

**ESTUDIO DE VELOCIDADES ESPECÍFICAS DE CURVAS HORIZONTALES EN  
TERRENO PLANO**

Por

Jhon Alexander Tacué Chilito

Trabajo de grado en modalidad de investigación para optar por el título de

**MAGISTER**

**EN**

**INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES**

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

2020

Aprobado por:

---

Carlos Aníbal Calero Valenzuela  
Ph. D. Ingeniería civil

---

Fecha

## Abstract

Injuries caused by traffic crash are a global problem with a high social, economic and mainly public health impact. It is necessary to coordinate efforts for effective and sustainable prevention, integrating strategies that help mitigate the number of injuries and deaths. One of the possible ways is through geometric design, whose concept has been extended to considering: i) geometric design consistency, ii) road safety, iii) environmental impact, and iv) clear zone design.

A decrease in road safety is correlated with problems associated with the geometric design consistency, and is expressed by speed variations between successive road elements (tangent sections and horizontal curves), which can cause erratic maneuvers that trigger crashes. The Manual of Geometric Design of Roads from Colombia (MDGC), guide the geometric design consistency in a preliminary way by assigning speeds for homogeneous section ( $V_{TR}$ ) and the specific speeds for each geometric element in horizontal and vertical alignments. This methodology was developed from speed studies realized in countries with similar idiosyncrasy to Colombia people, and has not been adjusted to the driver behavior on Colombian roads.

The objective of the study is to verify the applicability of the design speed assignment to horizontal curves for rural two-lane roads on flat terrain. For this, a compendium of secondary information related to the topic, which was the basis for the collection of primary information, collecting geometry and speed data on Route 25 of the Panamericana Highway in the Patía - Galíndez sector of the Department del Cauca, satisfying with the selection criteria of the study. Data collection was performed during the day, in mild weather conditions, dry pavement and free flow speed. The speed was obtained by GPS with an accuracy of 0,1 m. The sample includes drivers between 20 and 60 years of age, regardless of gender and good health conditions. The speed of 50 horizontal curves grouped by case studies were analyzed according to the methodology for assigning speed described in the MDGC.

Initially, descriptive and correlation analyzes (correlation coefficient) between independent variables are included according to the grouping of the horizontal curves in the case studies raised in the MDGC, Subsequently, the analyzes are presented to establish the statistical significance between the study variables, and finally, statistical analysis of the specific speed assignment methodology MDGC (INVIAS, 2008), by comparing median for independent samples and Kruskal-Wallis test, in order to find significant differences between independent variables and response (operating speed gradient  $\Delta V_{85}$ ). This research confirms the hypothesis, given that when applying the methodology for assigning speeds (INVIAS, 2008) consistency problems can be generated, allowing the designer speed gradients in successive elements of up to 20 km/h, being classified as a “poor” design according to the literature (Jacob, R, & M.V.L.R., 2013; Lamm & Choueiri, 1987; Lamm, Choueiri, Hayward, & Paluri, 1988; Lamm, Hayward, & Cargin, 1986). This condition influences the generation of problems associated with road safety, given that, at high driving speeds, the probability of collision, severity and consequences of the crash increases (WHO, 2013).

## Resumen

Las lesiones causadas por accidentes de tránsito son un problema mundial con alto impacto social, económico, y principalmente en la salud pública. Es necesario concertar esfuerzos para una prevención eficaz y sostenible, integrando estrategias que ayuden a mitigar el número de traumatismos y muertes. Una de las posibles formas de llevarlo a cabo es a través del diseño geométrico, cuyo concepto se ha extendido al punto de considerar: i) la consistencia en el diseño, ii) elementos de seguridad vial, iii) impacto ambiental, y iv) diseño geométrico lateral con zonas libres.

Una disminución de la seguridad vial se correlaciona con problemas asociados a la consistencia en el trazado, y se expresa mediante variaciones de velocidad entre elementos sucesivos de una carretera (entretangencias y curvas horizontales), que pueden originar maniobras erráticas que desencadenan en choques. El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de Colombia '2008' (MDGC), encamina la consistencia de diseño de manera preliminar mediante la metodología de asignación de velocidades por tramo homogéneo ( $V_{TR}$ ) y las velocidades específicas para cada elemento geométrico en los alineamientos horizontal y vertical. Esta metodología fue desarrollada a partir de estudios de velocidad realizados en países con idiosincrasia similar a la colombiana, y no ha sido ajustada al comportamiento que desarrolla un conductor al transitar en las carreteras colombianas.

El objetivo del estudio es verificar la aplicabilidad de la asignación de la velocidad específica para carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano. Para esto se hizo un compendio de información secundaria relacionada con el tema, lo cual fue la base para la toma de información primaria, recolectando datos de geometría y de velocidad en la ruta 25 de la vía Panamericana en el sector de Patía – Galíndez del Departamento del Cauca, cumpliendo con los criterios de selección de los tramos de estudio. La toma de datos se llevó a cabo durante el día, en condiciones meteorológicas de clima templado, pavimento seco y de circulación a flujo libre. La velocidad fue obtenida mediante GPS con precisión de 0,1 m. La muestra incluye conductores entre 20 y 60 años de edad, sin distinción de género y con buenas condiciones de salud. Se analizaron velocidades de 50 curvas horizontales agrupadas por casos de estudio según la metodología para asignación de velocidades descrita en el MDGC.

Inicialmente, se realizaron análisis descriptivos y de correlaciones (coeficiente de correlación) entre variables independientes según la agrupación de las curvas horizontales en los casos de estudio planteados en el MDGC, posteriormente se presentan los análisis para establecer la significancia estadística entre las variables de estudio, y finalmente, realizando un análisis estadístico de la metodología de asignación de velocidad específicas MDGC (INVIAS, 2008), mediante la comparación de medianas para muestras independientes y pruebas Kruskal-Wallis, con el fin de encontrar diferencias significativas entre las variables independientes y la variable respuesta (gradiente de velocidad de operación  $\Delta V_{85}$ ). Con esta investigación se confirma la hipótesis planteada, dado que al aplicar la metodología de asignación de velocidades (INVIAS, 2008), se pueden generar problemas de consistencia, permitiendo al diseñador gradientes de velocidad en elementos sucesivos de hasta 20 km/h, clasificándose como un diseño “pobre” de acuerdo con la literatura (Jacob et al., 2013; Lamm & Choueiri, 1987; Lamm et al., 1988, 1986). Esta condición influye en la generación de problemas asociados con la seguridad vial, dado que, a velocidades altas de conducción se aumenta la probabilidad de que ocurra una colisión y la gravedad de las consecuencias del choque (WHO, 2013).

*Dedicado a:*

*Mi amada esposa Alejandra Paz Ante,*

*Mi mamá Leonor y mi papá Jesús Hernando,*

*Mis hermanos María Alejandra y Jesús Andrés.*

*y a quienes han contribuido a lo largo de mi vida a ser una persona de principios y valores.*

## **Agradecimientos**

*A mis padres, Jesús Hernando y Leonor, quienes en el transcurso de mi crianza me han hecho una persona de bien, de principios y valores. A mis hermanos Jesús Andrés y María Alejandra, que pusieron su grano de arena para que el presente estudio fuera realidad. A mi amada esposa, Alejandra Paz Ante, por contar con su apoyo incondicional, compañía, consejos, orientaciones y por enseñarme que siempre se puede dar más; gran parte de este logro es debido a ella.*

*Al Doctor Yilton Ovirne Riascos Forero, por guiarme y siempre estar dispuesto a instruirme y educarme en el manejo de la base de datos y el análisis estadístico, por ser un ejemplo como profesor, investigador y persona. Al Doctor Carlos Aníbal Calero por los aportes realizados en esta investigación, por su ejemplo como investigador; un profesional íntegro y competente.*

*Al Doctor Alberto M. Figueroa, por su disposición y compromiso, por ser un excelente y destacado, profesional, profesor e investigador. Al Ingeniero Efraín Solano, por colaborar y ayudarme a crecer como profesional, sus aportes a lo largo de los diferentes proyectos ingenieriles han sido de gran ayuda, un profesional digno de admirar.*

*A mi compañero Carlos Eduardo Oñate, por ayudarme en los inicios del proceso de toma y recolección de información primaria, por su amabilidad y disposición a lo largo de este proceso. A la Universidad del Cauca, por su soporte durante la investigación que hizo que el proceso de toma y análisis de datos fuera posible.*

## Tabla de contenido

---

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. Problema de investigación .....	14
1.2. Justificación .....	15
1.3. Hipótesis .....	16
1.4. Objetivos.....	16
1.5. Alcance del trabajo .....	16
1.6. Beneficios esperados .....	17
Capítulo 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
2.1. Seguridad vial .....	18
2.1.1. Seguridad vial y diseño geométrico de carreteras .....	19
2.1.2. Factor humano en la seguridad vial .....	20
2.2. Consistencia en el diseño geométrico.....	21
2.2.1. Modelos de consistencia .....	22
2.2.2. Medición de la consistencia.....	27
2.3. Conceptos de velocidad .....	29
2.3.1. Estimación de la velocidad de operación ( $V_{85}$ ).....	32
2.3.2. Estimación de velocidad en entretangencias horizontales .....	36
2.4. Influencia de la velocidad en la consistencia del diseño geométrico.....	37
2.5. Velocidades específicas en Colombia .....	38
2.6. Análisis no paramétricos y comparación entre medianas .....	41
2.6.1. Relación entre pruebas paramétricas y no paramétricas .....	42
2.6.2. Análisis de normalidad .....	42
2.6.3. Tipos de pruebas de normalidad .....	42
2.6.4. Prueba de Wilcoxon.....	43
2.6.5. Prueba U de Mann-Whitney .....	43
2.6.6. Prueba de Kruskal-Wallis .....	43
2.6.7. Pruebas de comparaciones múltiples .....	43
Capítulo 3. METODOLOGÍA .....	45
3.1. Selección de tramos de estudio.....	45
3.2. Recopilación de información primaria .....	46

3.3. Procesamiento y análisis de datos.....	47
Capítulo 4. RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE DATOS.....	49
4.1. Identificación y selección de tramos de estudio .....	49
4.1.1. Criterios de selección de los tramos .....	51
4.1.2. Selección preliminar de los tramos de estudio.....	51
4.1.3. Reconocimiento en campo.....	52
4.2. Recopilación de datos .....	53
4.2.1. Recopilación de datos geométricos .....	53
4.2.2. Recopilación de datos de velocidad.....	56
4.3. Procesamiento de datos.....	57
4.3.1. Tamaño de la muestra.....	57
4.3.2. Procesamiento de coordenadas GPS.....	58
4.3.3. Datos de velocidad de operación .....	59
4.3.4. Restitución geométrica .....	59
4.3.5. Asignación de velocidades específicas .....	59
4.3.6. Base de datos .....	60
Capítulo 5. DESARROLLO Y ANÁLISIS .....	62
5.1. Análisis descriptivo de los datos desagrupados .....	62
5.1.1. Variables independientes .....	62
5.1.2. Variable dependiente .....	63
5.2. Análisis descriptivo de los datos agrupados .....	64
5.2.1. Variables independientes .....	64
5.2.2. Variable dependiente .....	68
5.3. Análisis descriptivo de las variables que afectan el $\Delta V_{85}$ .....	72
5.4. Análisis de normalidad de la variable dependiente ( $V_{85}$ ) .....	74
5.5. Análisis no paramétrico de los datos agrupados .....	75
5.5.1. Kruskal-Wallis. Caso 1, sentido avance y contra .....	76
5.5.2. Kruskal-Wallis. Caso 2, sentido avance y contra .....	76
5.5.3. Kruskal-Wallis. Caso 4, sentido avance y contra .....	77
5.5.4. Kruskal-Wallis. Caso 5, sentido avance y contra .....	77
5.6. Análisis no paramétrico de los datos desagrupados.....	79
5.7. Análisis no paramétrico del $\Delta V_{85}$ desagrupado .....	80
5.7.1. Categorización de la variable dependiente $\Delta V_{85}$ .....	80

5.7.2. Categorización de las variables independientes.....	81
5.7.3. Prueba Kruskal-Wallis del $\Delta V_{85}$ .....	81
5.8. Análisis no paramétrico del $\Delta V_{85}$ por casos INVIAS 2008.....	85
5.8.1. Caso 1 y 1R.....	86
5.8.2. Caso 2 y 2R.....	88
5.8.3. Caso 4 y 4R.....	90
5.8.4. Caso 5 y 5R.....	91
Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
6.1. CONCLUSIONES.....	92
6.2. RECOMENDACIONES.....	94
6.3. INVESTIGACIÓN FUTURA.....	95
Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXO 1. Ejemplo de aplicación de asignación de velocidades en Colombia.....	101



## Lista de tablas

Tabla 1. Criterio de consistencia basado en diferencias de velocidades.....	23
Tabla 2. Medición de la consistencia basado en diferencia de velocidades .....	24
Tabla 3. Evaluación de consistencia. (Polus & Mattar-Habib, 2004).....	25
Tabla 4. Umbrales para la determinación de la calidad de la consistencia del diseño.....	25
Tabla 5. Nivel de consistencia del diseño.....	25
Tabla 6. Umbrales de consistencia para secciones en curvas horizontales.....	26
Tabla 7. Umbrales de consistencia, Camacho-Torregrosa (2015).....	26
Tabla 8. Umbrales de consistencia, Llopis (2017).....	27
Tabla 9. Parámetros para la estimación del percentil 85 de velocidad. ....	33
Tabla 10. Ecuaciones de regresión para estimar velocidades de operación .....	34
Tabla 11. Puntos de medición para estimación de la velocidad de operación .....	35
Tabla 12. Relación entre longitud de ETH y $V_{85}$ . Secuencia “ETH-curva” .....	36
Tabla 13. Modelos para estimación de velocidad en ETH .....	37
Tabla 14. Ecuaciones de regresión para estimar velocidades de operación.....	37
Tabla 15. Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos ( $V_{TR}$ ). ....	39
Tabla 16. Metodología de asignación de velocidades específicas (INVIAS, 2008).....	40
Tabla 17. Pruebas alternativas. ....	42
Tabla 18. Criterios de selección de los tramos .....	51
Tabla 19. Condiciones de geometría del perfil longitudinal.....	52
Tabla 20. Variabilidad geométrica de las curvas analizadas. ....	53
Tabla 21. Condiciones geométricas de las curvas analizadas.....	53
Tabla 22. Ficha de caracterización tipo. Curva horizontal sector El Estrecho .....	55
Tabla 23. Desviación estándar promedio para el tamaño de la muestra (S).....	57
Tabla 24. Constante correspondiente al nivel de confianza.....	58
Tabla 25. Agrupación de curvas horizontales según casos de estudio .....	60
Tabla 26. Estadísticos descriptivos de la variable independiente.....	62
Tabla 27. Correlación entre variables independientes. ....	63
Tabla 28. Estadísticos descriptivos de la variable dependiente ( $V_{85}$ ). ....	63
Tabla 29. Análisis descriptivo. Caso 1 y 1R.....	65
Tabla 30. Análisis de correlación. Caso 1 y 1R.....	65
Tabla 31. Análisis descriptivo. Caso 2 y 2R.....	65

Tabla 32. Análisis de correlación. Caso 2 y 2R.....	66
Tabla 33. Análisis descriptivo. Caso 4 y 4R.....	66
Tabla 34. Análisis de correlación. Caso 4 y 4R.....	67
Tabla 35. Análisis descriptivo. Caso 5 y 5R.....	67
Tabla 36. Análisis de correlación. Caso 5 y 5R.....	68
Tabla 37. Análisis descriptivo $V_{85}$ . Caso 1 y 1R. ....	68
Tabla 38. Análisis descriptivo $V_{85}$ . Caso 2 y 2R. ....	69
Tabla 39. Análisis descriptivo $V_{85}$ . Caso 4 y 4R. ....	70
Tabla 40. Análisis descriptivo $V_{85}$ . Caso 5 y 5R. ....	71
Tabla 41. Variables que afectan el $\Delta V_{85}$ . Caso 1 y 1R. ....	73
Tabla 42. Variables que afectan el $\Delta V_{85}$ . Caso 2 y 2R. ....	73
Tabla 43. Variables que afectan el $\Delta V_{85}$ . Caso 4 y 4R. ....	73
Tabla 44. Variables que afectan el $\Delta V_{85}$ . Caso 5 y 5R. ....	74
Tabla 45. Pruebas de normalidad.....	74
Tabla 46. Medidas de distribución de la $V_{85}$ .....	75
Tabla 47. Convenciones de análisis.....	76
Tabla 48. Parámetros de las pruebas no paramétricas. ....	76
Tabla 49. Prueba Kruskal-Wallis, caso 1 y 1R.....	76
Tabla 50. Prueba Kruskal-Wallis, caso 2 y 2R.....	77
Tabla 51. Prueba Kruskal-Wallis, caso 4 y 4R.....	77
Tabla 52. Prueba Kruskal-Wallis, caso 5 y 5R.....	78
Tabla 53. Prueba U de Mann-Whitney, caso 5R. Salida de curva.....	78
Tabla 54. Prueba U de Mann-Whitney, caso 5R. Entrada a curva. ....	79
Tabla 55. Prueba Kruskal-Wallis. Sentido de avance y contra.....	79
Tabla 56. Agrupación de la variable respuesta $\Delta V_{85}$ . ....	80
Tabla 57. Porcentaje según clasificación del gradiente de velocidad.....	80
Tabla 58. Estadísticos descriptivos del $\Delta V_{85}$ “nulo”. ....	80
Tabla 59. Pruebas de normalidad del $\Delta V_{85}$ “nulo”. ....	80
Tabla 60. Agrupación de las variables independientes.....	81
Tabla 61. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs $\Delta V_{85}$ . ....	82
Tabla 62. Comparaciones múltiples de la variable Radio. ....	83
Tabla 63. Comparaciones múltiples de la variable Externa.....	84

Tabla 64. Comparaciones múltiples de la variable Deflexión. ....	84
Tabla 65. Comparaciones múltiples de la variable ETH. ....	85
Tabla 66. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs $\Delta V_{85}$ . Caso 1 y 1R.....	86
Tabla 67. Comparaciones múltiples de la variable Radio. Caso 1.....	87
Tabla 68. Comparaciones múltiples de la variable Externa. Caso 1.....	88
Tabla 69. Comparaciones múltiples de la variable Deflexión. Caso 1. ....	88
Tabla 70. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs $\Delta V_{85}$ . Caso 2 y 2R.....	89
Tabla 71. Comparaciones múltiples de la variable Externa. Caso 2.....	90
Tabla 72. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs $\Delta V_{85}$ . Caso 4 y 4R.....	90
Tabla 73. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs $\Delta V_{85}$ . Caso 5 y 5R.....	91
Tabla 74. Variación de velocidad de curvas horizontales en terreno plano.....	94
Tabla 75. Comportamiento del gradiente de velocidad caso 1 y 2. ....	94
Tabla 76. Comportamiento del gradiente de velocidad para datos desagrupados. ....	94
Tabla 77. Ejemplo de aplicación. Elementos de curvas horizontales. ....	101
Tabla 78. Velocidad Específica de una curva horizontal. Caso 3.....	102
Tabla 79. Velocidad Específica de una curva horizontal. Caso 4.....	102
Tabla 80. Velocidad Específica de una curva horizontal. Caso 3 (b) .....	102

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Comparación entre seguridad nominal y sustantiva .....	20
Ilustración 2. Riesgo percibido vs. riesgo asumido .....	21
Ilustración 3. Distribución de puntos de observación.....	35
Ilustración 4. Metodología para el desarrollo de la investigación .....	45
Ilustración 5. Ruta nacional 25. ....	50
Ilustración 6. Sector 2503. Localización específica del estudio. ....	51
Ilustración 7. Selección preliminar de tramos de estudio. ....	52
Ilustración 8. Elementos de la sección transversal .....	54
Ilustración 9. Recopilación de datos. Coordenadas GPS.....	56
Ilustración 10. Geometría de curva horizontal.....	59
Ilustración 11. Perfil de velocidad de operación. Avance. ....	64
Ilustración 12. Perfil de velocidad de operación. Contra.....	64
Ilustración 13. Perfil de velocidad de operación. Caso 1.....	69
Ilustración 14. Perfil de velocidad de operación. Caso 1R.....	69
Ilustración 15. Perfil de velocidad de operación. Caso 2.....	70
Ilustración 16. Perfil de velocidad de operación. Caso 2R.....	70
Ilustración 17. Perfil de velocidad de operación. Caso 4.....	71
Ilustración 18 Perfil de velocidad de operación. Caso 4R.....	71
Ilustración 19. Perfil de velocidad de operación. Caso 5.....	72
Ilustración 20. Perfil de velocidad de operación. Caso 5R.....	72
Ilustración 21. Puntos geométricos de análisis no paramétrico. ....	75
Ilustración 22. Histograma del $\Delta V_{85}$ “nulo”. ....	81
Ilustración 23. Ejemplo de aplicación. Trazado en planta. ....	101
Ilustración 24. Ejemplo de asignación de velocidades en sentido de avance. ....	103
Ilustración 25. Ejemplo de asignación de velocidades en sentido de contra. ....	103
Ilustración 26. Ejemplo de aplicación. Velocidad de curva horizontal asignada. ....	104
Ilustración 27. Ejemplo de velocidad de entretangencia horizontal asignada. ....	104

---

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

---

Las lesiones causadas por accidentes de tránsito son un problema de alto impacto social, económico, laboral y principalmente en la salud pública mundial (WHO, 2015a). Es necesario concertar esfuerzos para una prevención eficaz y sostenible, integrando políticas nacionales y mundiales que ayuden a mitigar el número de traumatismos y muertes (WHO, 2015b). Diferentes países en el mundo han desarrollado políticas ligadas a la seguridad vial, con el fin de reducir las cifras de fatalidades por accidentes de tránsito; es importante mencionar que en Colombia, la reducción de muertes a causa de este hecho, entre otras cosas, se debe a la mejora en los mecanismos de control policial, así como en la socialización, a través de campañas, en relación al uso de elementos de seguridad pasiva en conductores y ocupantes (casco en motociclistas y cinturones de seguridad en vehículos privados), el fomento del compromiso personal de los ciudadanos, el reforzamiento colectivo y la formación de capital humano e institucional, y a la generación de programas sobre los riesgos de la conducción en estado de embriaguez (MINTRANSPORTE, 2015). En el país, se han implementado diferentes estrategias para reducir el número de muertes en las carreteras; tales como campañas de concienciación, prevención y educación a los usuarios, campañas policíacas para disminuir infracciones a las leyes de tránsito, la integración de dispositivos de seguridad en vehículos de motor, reducción en el tiempo de respuesta de servicios médicos ante incidentes en las vías y la consideración de mejoras geométricas y el uso de dispositivos de control y barreras de seguridad en las carreteras.

El concepto de diseño geométrico se ha desarrollado al punto de considerar: *i)* la consistencia en el diseño, *ii)* elementos de seguridad vial, *iii)* impacto ambiental, y *iv)* diseño geométrico lateral con zonas libres (Biehler et al., 2009). La integración de estas metodologías al diseño geométrico, han permitido que los diseñadores viales amplíen su visión en cuanto al trazado de una carretera disminuyendo los problemas de seguridad vial, a diferencia de los estudios de geometría desarrollados en años anteriores.

Un trazado consistente relaciona las características geométricas de una carretera con las expectativas del conductor (Polus & Dagan, 1987), es decir, cuando una vía con un buen nivel de coherencia coincide con las expectativas de un conductor, este usuario no se sorprende mientras conduce. Una mala consistencia puede llevar a generar eventos inesperados y variabilidad de la velocidad a lo largo de diferentes segmentos de carretera, lo que aumenta la probabilidad de choques (Camacho, Pérez, Campoy, & García, 2013).

La evaluación de la velocidad de operación es el criterio más usado para evaluar la consistencia del diseño de la carretera. Desde el punto de vista de diseño geométrico, las transiciones de entretangencia a curva son las zonas más críticas al considerar las medidas de seguridad, de hecho, se estima que más del 50% de todas las muertes en carreteras rurales se producen en tramos curvados (Lamm & Choueiri, 1992). La consistencia en el trazado, permite incluir el comportamiento de los conductores que circulan por una carretera mediante un análisis de velocidades de operación en los elementos sucesivos de la misma (entretangencias y curvas horizontales). Otras medidas de consistencia incluyen la comparación de las velocidades de operación con la velocidad de diseño inferida del elemento y la comparación con la fricción lateral.

Esta investigación verifica la aplicabilidad de la metodología de asignación de velocidades específicas descrita en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (MDGC) de Colombia (INVIAS, 2008), para carreteras rurales de dos carriles bidireccionales desarrolladas en terreno plano, analizando las variaciones de velocidad que puede experimentar un conductor cuando transita al interior de los elementos geométricos de una carretera con el fin de establecer los cambios característicos de velocidad entre curvas y entretangencias horizontales.

### 1.1. Problema de investigación

La seguridad vial es uno de los temas más importantes en el proceso de toma de decisiones, diseño geométrico, construcción y mantenimiento de carreteras a nivel mundial (Calero, 2015). Los accidentes de tránsito son una de las causas de más muertes en el mundo, y la principal entre personas de edades comprendidas entre los 15 y los 29 años (WHO, 2015b). Más de 1.25 millones de personas mueren en carreteras del mundo cada año y aproximadamente 50 millones sufren accidentes con lesiones graves (WHO, 2015b). Los traumatismos causados por el tránsito en la región de América cobran la vida de 154.089 personas al año y representan el 12% de las muertes ocasionadas a escala mundial (Organización Panamericana de la Salud, 2016). En el 2016, en Colombia, se reportaron 52.536 casos atendidos por accidentes de tránsito; las lesiones fatales corresponden a 7.280 personas (13,86 %) y las lesiones no fatales a 45.256 personas (84,14 %) (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, 2016).

El impacto de los accidentes de tránsito y sus consecuencias hacen necesario abordar esta problemática con políticas y acciones concretas, articuladas, integrales, medibles y controlables, dado que involucran la salud pública, la seguridad de los ciudadanos y la movilidad del país (MINTRANSPORTE, 2015). Es importante reducir el número de accidentes de tránsito ajustando e implementando metodologías que incidan directamente en la seguridad vial, siendo la consistencia del trazado una de las técnicas para lograrlo, dado que considera variables que incluyen el comportamiento del conductor a través de los cambios de velocidad a lo largo de una carretera, de igual manera, la seguridad subjetiva en una carretera, basada en el riesgo percibido, utiliza medidas de desempeño relacionadas a la conducta de los usuarios (género, edad, experiencia de conducción, agudeza visual, tiempo de reacción, entre otros); debido a lo anterior, la selección de velocidades es considerada entonces como una medida indirecta de seguridad. (Polus & Dagan, 1987; Anderson, Bauer, Harwood, & Fitzpatrick, 1999; Calero, 2015; Polus & Mattar-Habib, 2004; Wooldridge et al., 2003; Figueroa M, 2019). Si hay una correspondencia entre las características geométricas y operacionales de una carretera, la conducción puede hacerse de modo continuo, sin sobresaltos, lo que incide favorablemente sobre la seguridad en la circulación, evitando que se generen maniobras erráticas y choques entre vehículos (Sánchez, 2012; M.D. Wooldridge et al., 2003).

El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras MDGC (INVIAS, 2008), orienta de manera preliminar, la consistencia del trazado mediante la metodología de asignación de velocidades por tramo homogéneo ( $V_{TR}$ ) y por cada elemento geométrico horizontal y vertical (velocidades específicas). La *Tabla 2.2.* del MDGC (INVIAS, 2008) presenta los criterios para asignar la velocidad específica de los elementos en planta ( $V_{CH}$  y  $V_{ETH}$ ), y las relaciones de velocidad entre elementos geométricos

consecutivos. El inconveniente de los valores obtenidos mediante la metodología de asignación de velocidades específicas, es que no ha sido ajustada al comportamiento que desarrolla un conductor al transitar en las carreteras colombianas, pues, tiene como base, “estudios de velocidad de carreteras realizados en países con idiosincrasia similar a la colombiana” (INVIAS, 2008), estableciendo que “la gran mayoría de los conductores”, dependiendo de la percepción del trazado que tienen adelante, incrementan su velocidad respecto a la velocidad de diseño del tramo, hasta en veinte kilómetros por hora (20 km/h) (INVIAS, 2008). Por esta razón posiblemente se pueden presentar problemas en la consistencia del trazado asociados a maniobras erráticas y choques de vehículos. El estudio tiene como fin verificar las variaciones de velocidad que actualmente se presentan en carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano.

## 1.2. Justificación

Diferentes países del mundo han reflejado su preocupación por mitigar el número de traumatismos causados por accidentes de tránsito, estableciendo políticas que mejoran la seguridad vial como:

- El uso de cinturón de seguridad.
- Control de velocidad máxima.
- Cambios en el diseño geométrico.
- Planificación de la movilidad.
- Administración y gestión de infraestructura vial.
- Importación de vehículos más seguros.
- Implementación y uso de dispositivos de retención para niños.

Los traumatismos causados por accidentes de tránsito han sido abordados como una política de salud pública mundial, sin dejar a un lado los costos económicos que afectan considerablemente la economía nacional, en países de ingresos medios y bajos los siniestro viales pueden causar pérdidas económicas de hasta el 5% del PIB (WHO, 2015b).

La velocidad es un factor que generalmente se considera en la selección de ruta o la elección del modo de transporte (Gibreel, G.M., Easa, S.M., Hassan, Y., El-Dimeery, 1999). Factor que debe tenerse en cuenta al establecer las características del proyecto (Bravo, 1976). El exceso de velocidad es un problema de seguridad vial en todos los países, generado, en gran parte, por la falta de consistencia en el diseño, dado que, a velocidades altas de conducción se aumenta la probabilidad de que ocurra un colisión y la gravedad de las consecuencias del choque (WHO, 2013). Un conductor mantendrá una velocidad uniforme, sin sobresaltos, reflejado en una conducción controlada, si las características geométricas de la carretera por la que transita tienen un comportamiento homogéneo, permaneciendo dentro de un determinado rango de geometría a lo largo de un tramo (Sánchez, 2012). De igual manera, se debe considerar la percepción de riesgo de los usuarios en cuanto a las condiciones geométricas de la carretera (Tipo de topografía y geometría por la que transita) y sus expectativas en términos de la clasificación funcional de la carretera y la calidad del viaje anticipado por los usuarios (autopistas, carretera rural, vía urbana).

En Colombia, los accidentes de transporte dejan 6.754 personas sin vida al año, siendo la segunda causa de muerte violenta en el país (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, 2018). En 2017, en fueron reportados 46.869 casos atendidos por accidentes de transporte; las lesiones fatales corresponden a 14,41% personas fallecidas y las lesiones no fatales reportan 40.115 personas lesionadas (85,59%) (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, 2018).

La investigación fue encaminada al análisis de las variaciones de velocidad en elementos consecutivos de una carretera rural, análisis de las tendencias y patrones de la geometría horizontal, con el fin de establecer los indicadores de geometría que generan cambios de velocidad en elementos consecutivos. Un trazado consistente se ve reflejado en una conducción controlada y en una apreciable mejora a la seguridad vial, disminuyendo el número de choques y accidentes fatales en edades productivas.

### 1.3. Hipótesis

La metodología para la asignación de velocidades específicas de curvas horizontales que presenta la *Tabla 2.2.* del MDGC (INVIAS, 2008) podría llevar a problemas de consistencia en el trazado (diseño geométrico). Aplicar la metodología no garantiza diseños geométricos de carreteras exentos de problemas asociados con la geometría, debido a que en el país no se han realizado estudios de campo que verifiquen las variaciones de velocidad que experimentan los conductores en los elementos geométricos sucesivos de las carreteras (entretangencias y curvas horizontales).

### 1.4. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos a desarrollar en el estudio:

#### Objetivo de la Investigación

- Analizar la efectividad de la metodología de asignación de velocidades específicas del Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008, para carreteras rurales de dos carriles en terreno plano.

#### Objetivos Específicos

- Medir velocidades a flujo libre en entretangencias y curvas horizontales para establecer las variaciones en la velocidad de operación en una carretera rural de dos carriles en terreno plano.
- Identificar las variables que afectan el comportamiento de la velocidad específica en curvas horizontales.
- Analizar las variables que afectan el comportamiento de la velocidad específica al interior de los elementos geométricos en planta de una carretera.

### 1.5. Alcance del trabajo

En esta investigación se presenta el análisis de aplicabilidad de la metodología de asignación de velocidades descrita en el MDGC (INVIAS, 2008), análisis de datos de velocidad de operación, y de los indicadores de geometría horizontal que generan cambios de velocidad al interior de curvas



horizontales para carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano. La base de datos está compuesta de velocidades tomadas con GPS cartográfico con 0,1 m de precisión, que cuenta con una antena externa que incrementa la recepción satelital. Los datos de velocidad fueron tomados en tramos de carreteras ubicados en el suroccidente de Colombia, Departamento del Cauca. Los datos de geometría incluyen: dimensiones de los elementos de la sección transversal, el alineamiento horizontal, las condiciones superficiales del pavimento y las pendientes longitudinales del alineamiento vertical. La base de datos se compone de puntos sucesivos en el alineamiento horizontal, tomados con GPS de manera dinámica cada 1 s. El análisis comprende 3 puntos de velocidad sobre la curva horizontal (PC, MC y PT) y 2 puntos sobre los segmentos rectos (entretangencias horizontales) de entrada y salida a la curva horizontal (entretangencia media).

El estudio se basa en el análisis de cincuenta (50) curvas horizontales entre el sector del Bordo y Galíndez en el Municipio de Patía, al sur del Departamento del Cauca. La geometría recopilada, se clasifica de acuerdo a la metodología de asignación de velocidades específicas del MDGC (INVIAS, 2008), excluyendo aquellas curvas que se encuentren en centros poblados y sitios de cruce (Patía, El Estrecho y Galíndez). Las Curvas en estudio se encuentran distribuidas sobre una topografía en terreno plano y se desarrollan en una carretera intermunicipal con velocidad límite de 60 km/h. La selección de zonas de estudio se realiza con base en los siguientes factores:

- Sitios libres de la influencia de intersecciones (no se encontraron intersecciones en el tramo de estudio).
- Sitios sin cambios en las condiciones de pavimento, anchos de carril, anchos de bermas entre las secciones transversales de entretangencias y curvas horizontales.
- Se excluyen del estudio parámetros geométricos como pendiente longitudinal y condiciones de drenaje superficial y lateral.
- Los datos incluidos en el estudio corresponden a vehículos bajo velocidad a flujo libre (5 s) (Poe et al., 1996).
- Condiciones climáticas que garanticen el pavimento seco.
- Mediciones durante horas del día.

## 1.6. Beneficios esperados

Establecer la aplicabilidad de la metodología de asignación de velocidades específicas para curvas horizontales en terreno plano, implica una posible mejora en la evaluación de la consistencia de diseño descrita en el MDGC (INVIAS, 2008), que se puede ver reflejada en la disminución de maniobras erráticas, disminución en la frecuencia de choques y en los costos debido a mejoras posteriores en la vía asociadas a problemas de consistencia de diseño y seguridad vial.

---

## Capítulo 2. REVISIÓN DE LITERATURA

---

El presente capítulo muestra el estado del arte para la evaluación de consistencia de diseño geométrico. Inicialmente, se expone la seguridad vial tanto en el marco nacional como el internacional, seguido de una descripción de la consistencia en el diseño geométrico, sus mediciones y los modelos de consistencia. Finalmente se presentan las definiciones de velocidad, la influencia de la velocidad en la consistencia y la metodología de asignación de velocidades aplicada en Colombia.

### 2.1. Seguridad vial

En el marco internacional, el Plan Mundial de Seguridad Vial, orienta y facilita medidas coordinadas, destinadas al logro de las metas y objetivos del Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011–2020 (Sminkey, 2011). Entre las intervenciones eficaces figuran:

- La incorporación de las características de la seguridad vial en la utilización del suelo.
- La planificación urbana y la planificación del transporte.
- El diseño de carreteras más seguras y la exigencia de auditorías independientes en materia de seguridad vial para los nuevos proyectos de construcción.
- El mejoramiento de las características de seguridad de los vehículos.
- El fomento del transporte público.
- El control eficaz de la velocidad a cargo de la policía y mediante el uso de medidas de descongestión del tráfico.
- El establecimiento y observancia de leyes que exijan el uso del cinturón de seguridad, del casco y de los sistemas de retención para niños.
- La fijación e imposición de límites de alcoholemia a los conductores, y el mejoramiento de la atención que reciben las víctimas de los accidentes de tránsito.

Los principios rectores en que se basa el Plan para el Decenio de Acción son los que se incluyen en el enfoque sobre un «sistema seguro», que pretende desarrollar un sistema de transporte vial mejor adaptado al error humano y que tome en consideración la vulnerabilidad del cuerpo humano. El enfoque considera que las limitaciones humanas, la energía cinética que el cuerpo humano puede resistir, constituyen una base importante para diseñar el sistema de transporte, y que los demás aspectos del sistema vial, tales como el desarrollo del entorno y del vehículo, deben armonizarse en función de tales limitaciones (Sminkey, 2011). Los usuarios de las vías de tránsito, los vehículos y el entorno se tienen en cuenta de manera integrada, mediante una amplia gama de intervenciones, prestando más atención al control de la velocidad, al diseño de los vehículos y las carreteras que a los enfoques tradicionales de la seguridad vial (Sminkey, 2011).

Para el caso del diseño y la construcción de una infraestructura segura, se propone la implementación de mecanismos como: las zonas 30 (área urbana en donde la velocidad máxima para la circulación de vehículos es de 30 km/h), barreras de contención seguras, bermas con anchos suficientes, pasos para peatones, semáforos en lugar de puentes peatonales, anchos de vía, infraestructuras de drenaje seguras para usuarios vulnerables, buen estado del pavimento, señalización

adecuada y en buen estado, infraestructura para peatones y ciclistas, y corredores peatonales exclusivos, que contribuyen significativamente a la preservación de la vida humana (Organización Panamericana de la Salud, 2016).

Conforme a lo expuesto, Colombia no es ajena a esta problemática, dadas sus cifras de accidentalidad y la tendencia presentada en los últimos años. Este panorama hace de los accidentes de tránsito en Colombia la segunda causa de muerte violenta en el país (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, 2018), y la primera causa de muerte de jóvenes menores de 30 años (MINTRANSPORTE, 2015). El Plan Nacional de Desarrollo 2010 - 2014 “Prosperidad para todos” adoptado mediante la Ley 1450 de 2012, el Gobierno Nacional, por primera vez en Colombia, “declara la seguridad vial como una política de Estado” que trasciende los planes y programas de un período de gobierno, el cual orienta y propicia medidas concertadas, indicativas e integrales en todo el territorio nacional, fomenta la formulación y aplicación de políticas y acciones a nivel regional, departamental y municipal, con el objetivo de reducir el número de víctimas fatales y no fatales a nivel nacional (MINTRANSPORTE, 2015).

Teniendo un acercamiento más regional, el País sigue diseñando sus vías bajo la premisa de velocidad y capacidad, lo que convierte toda infraestructura vial en una amenaza para los actores viales, en especial para los más vulnerables. La construcción de carreteras con bajos estándares en seguridad vial, la expedición de licencias de conducción por el ente que realiza el curso, la venta de vehículos sin seguridad activa y pasiva, la falta de infraestructura para ciclistas y peatones, la deficiencia en los sistemas de transporte público de pasajeros, la venta masiva de motocicletas a personas sin adiestramiento y control policial deficiente, son amenazas que el sistema de movilidad les está generando a sus usuarios (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, 2018).

### ***2.1.1. Seguridad vial y diseño geométrico de carreteras***

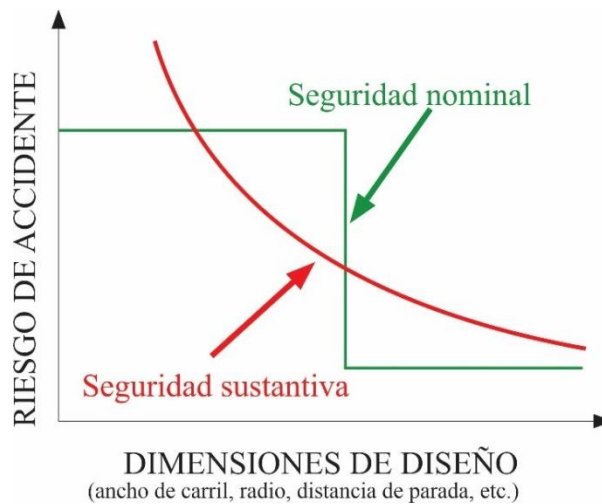
La mayoría de los conductores se comportan de acuerdo a las características geométricas de la carretera. Ellos seleccionan su velocidad atendiendo a las características particulares de cada elemento sin conocer cuál es la velocidad de diseño. En consecuencia, es posible que se produzcan disparidades entre ambas velocidades, o lo que es lo mismo, el comportamiento del conductor no se ajuste a la conducta para la cual se ha diseñado la carretera. Este hecho podría derivar en problemas de seguridad vial, aumentando la probabilidad de ocurrencia de accidentes (Llopis, 2017).

Uno de los principales problemas que existe en el proceso de diseño de carreteras es que el comportamiento final del conductor no es verificado al terminar el proceso. Las guías y manuales establecen valores mínimos y máximos para el diseño geométrico de acuerdo a una velocidad de diseño determinada, de esta forma, se asume que, si el trazado cumple estas restricciones, la carretera es segura. Sin embargo, existen diseños más seguros que otros. Esto responde a los conceptos de seguridad nominal y sustantiva (Llopis, 2017). La seguridad nominal, define un elemento geométrico o un tramo de carretera como seguro o no seguro. Por tanto, este concepto va ligado al cumplimiento de los estándares, políticas y manuales de diseño vigentes de un país. Por otra parte, la seguridad sustantiva (seguridad objetiva) está relacionada con los registros de la cantidad, frecuencia y la severidad de los accidentes de tránsito. De esta manera, no existe un elemento o tramo de carretera seguro, sino que

existen diseños más seguros que otros (ver Ilustración 1). Los accidentes de tránsito en carreteras son eventos raros, influenciados por factores determinísticos (pueden ser controlados) y factores estocásticos (aleatorios y con incertidumbre) (Figueroa M, 2019).

La seguridad vial integra la consistencia para que el tramo diseñado responda a las expectativas de los conductores y, por consiguiente, ocurra el mínimo número de accidentes (Llopis, 2017), considerando también que los mismos seleccionan su velocidad de operación en una carretera con base a ciertos factores: geometría, tipo de viaje, tipo de carretera, condición climática, potencial de peligro y potencial de multa (vigilancia policial).

Ilustración 1. Comparación entre seguridad nominal y sustantiva



Fuente: Tomado de tesis doctoral (Llopis, 2017).

La seguridad subjetiva basada en el riesgo percibido por los usuarios, utiliza medidas de desempeño relacionadas a la conducta de los usuarios: género, edad, experiencia de conducción, agudeza visual, tiempo de reacción, movilidad funcional, errores y distracciones de conducción, aceptación del riesgo y cultura de conducción (Figueroa M, 2019).

### 2.1.2. Factor humano en la seguridad vial.

#### 2.1.2.1. Teoría del riesgo percibido y riesgo asumido

Este modelo se fundamenta en que los conductores no intentan maximizar la seguridad, sino minimizar el riesgo (Summala, 1988). De este modo, esta teoría trata de comparar el riesgo percibido por el conductor por el realmente asumido durante la conducción. Para comprender dicha teoría es necesario, en primer lugar, definir los distintos conceptos de riesgo (Llopis, 2017):

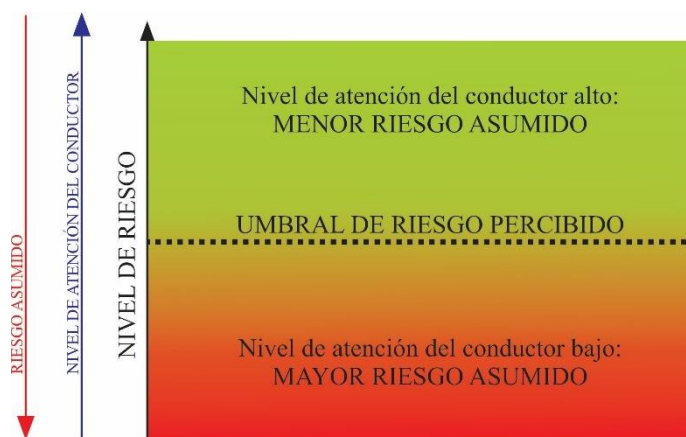
1. Riesgo objetivo: es el riesgo real de la carretera, que depende de las condiciones del pavimento, la geometría, el tráfico y el entorno de la misma.
2. Riesgo percibido: es el riesgo inferido a través de la información que los conductores perciben de la carretera. Es una medida sustitutoria del riesgo objetivo y depende principalmente de la personalidad, experiencia y condiciones del usuario.

3. Riesgo asumido: es el riesgo que cada conductor asume en función de sus condiciones y personalidad, motivo del viaje, restricciones de tiempo, etc.

La Ilustración 2, muestra las situaciones que se pueden llegar a dar bajo esta teoría. Para un determinado riesgo percibido, cuanto mayor sea el nivel de atención del conductor, menor será el riesgo asumido (Llopis, 2017). Normalmente, el usuario es consciente del nivel de riesgo que está asumiendo al recorrer una carretera y presta mayor o menor atención dependiendo de la zona de riesgo en la que se encuentre (Llopis, 2017). Si el riesgo percibido es mayor que el objetivo, el conductor tiende a prestar una mayor atención de la que realmente es requerida por la carretera y, en consecuencia, se encontrará en la zona segura del diagrama presentado en la Ilustración 2 (Llopis, 2017).

Sin embargo, si el riesgo percibido es menor que el objetivo, los conductores piensan que están en la zona segura del diagrama cuando realmente están en la zona de inseguridad. Esto podría producir maniobras erráticas en los usuarios o, un aumento de la probabilidad de ocurrencia de accidentes (Llopis, 2017). Para evitar esta situación se pueden tomar dos decisiones distintas: *i*) reducir el riesgo objetivo, *ii*) incrementar el umbral de riesgo percibido por los conductores con el fin de que sea lo más próximo al riesgo objetivo (Llopis, 2017). En cuanto a esta última posibilidad, se puede llevar a cabo el uso de señalización, programas de educación de la seguridad vial o incrementar las medidas de seguridad pasivas. No obstante, las medidas empleadas deberán ser entendidas por los conductores y representar adecuadamente el riesgo real (Llopis, 2017).

Ilustración 2. Riesgo percibido vs. riesgo asumido



Fuente: Tomado de tesis doctoral (Llopis, 2017).

## 2.2. Consistencia en el diseño geométrico

La consistencia del trazado puede entenderse como la relación entre las características geométricas y operacionales de una carretera y las que espera encontrar el conductor de un vehículo que circula por ella, si se cumple una expectativa, el rendimiento del conductor tiende a estar libre de errores; cuando se vulnera una expectativa, generalmente se produce un tiempo de respuesta más largo y un comportamiento incorrecto (Glennon & Harwood, 1978, Polus & Dagan, 1987; Anderson, Bauer, Harwood, & Fitzpatrick, 1999; Calero, 2015; Polus & Mattar-Habib, 2004; Wooldridge et al., 2003). Si hay una correspondencia entre estos dos aspectos, la conducción puede hacerse de modo continuo, sin sobresaltos, lo que incide favorablemente sobre la seguridad en la circulación, evitando que se generen maniobras erráticas y choques entre vehículos (Sánchez, 2012; Wooldridge et al., 2003).

La consistencia en el diseño va más allá de cambios de velocidad en curvas horizontales (sobresaltos), Chatfield (1987), identificó 15 características de diseño importantes al momento de realizar un análisis de consistencia en el trazado en carreteras rurales:

1. Alineamiento horizontal.
2. Distancia de visibilidad.
3. Ancho de berma.
4. Dimensión y localización de cunetas.
5. Taludes laterales.
6. Tipo y estado de la superficie de pavimento.
7. Pasos o cruces.
8. Alineamiento vertical.
9. Ancho de carril.
10. Ancho de separador.
11. Localización, altura y tipo de barreras.
12. Localización y dimensiones de zanjas para drenaje.
13. Señalización de demarcación.
14. Estructuras cercanas a la carretera.
15. Elementos presentes en las zonas laterales (árboles, postes de electricidad, rocas, alcantarillas, etc.).

### ***2.2.1. Modelos de consistencia***

La consistencia puede ser evaluada en un elemento particular del trazado (modelos locales) o en un tramo completo de carretera (modelos globales) (Llopis, 2017). En el primer caso, la consistencia es cuantificada, habitualmente, a través de la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño o la reducción de velocidad de operación entre elementos sucesivos. Sin embargo, cuando se trata de evaluar un tramo completo de carretera, la consistencia suele ser cuantificada a través del área comprendida entre el perfil de velocidad de operación ( $V_{85}$ ) y la velocidad promedio ponderada por longitud ( $V_{avg}$ ), a lo largo de todo el segmento (Polus & Mattar-Habib, 2004).

#### **2.2.1.1. Modelos locales de consistencia basados en la diferencia entre la $V_{85}$ y la $V_D$**

Leisch & Leisch (1977), propusieron el criterio de cambio de velocidad en 15 km/h para la velocidad de diseño entre elementos consecutivos. Los investigadores encontraron particularmente dos problemas para velocidades de diseño por debajo de 90 km/h; el primero de ellos, es la tendencia por parte del conductor de acelerar y desacelerar continuamente, y el segundo, es la variación de velocidad entre automóviles y camiones. El objetivo es cumplir con las expectativas del conductor y con sus características inherentes para lograr la consistencia operativa y mejorar la comodidad y seguridad en la conducción. El principio utilizado en el enfoque de velocidad de diseño es la regla de 15 km/h, durante los períodos a condiciones de flujo libre, y que implica tres consideraciones (Leisch & Leisch, 1977):

1. Se debe evitar una reducción en la velocidad de diseño, pero si se requiere, la reducción en velocidad no debe ser en más de 15 km/h.
2. Para una velocidad de diseño dada, las variaciones de velocidad del automóvil a lo largo de la carretera no deben variar en más de 15 km/h.

- Las variaciones de velocidad de los camiones no deben variar en más de 15 km/h con respecto a las velocidades del automóvil en carriles comunes.

Por otro lado, Fitzpatrick et al. (2003), estudiaron la relación entre la velocidad de diseño ( $V_D$ ), la de operación ( $V_{85}$ ) y los límites de velocidad en carreteras rurales de dos carriles. La velocidad de diseño tiene un impacto mínimo en las velocidades de operación a menos que se presente una curva horizontal cerrada o un valor  $K$  bajo. De esta forma, obtuvieron que los conductores transitan en carreteras rurales de dos carriles a velocidades superiores a la de diseño ( $V_D$ ) en curvas horizontales diseñadas para 90 km/h o menos. Cuando la velocidad señalizada excede la velocidad de diseño, surgen inquietudes de responsabilidad a pesar de que los conductores pueden superar con seguridad la velocidad de diseño (Fitzpatrick et al., 2003). Así, concluyeron que una curva era inconsistente cuando presentaba una velocidad de operación mayor a la de diseño, puesto que dicha curva se estaba diseñando con una velocidad menor a la que realmente los usuarios iban a circular. Además, identificaron que la velocidad de operación era un buen límite de velocidad, incluso para las secciones en las que la velocidad de diseño era inferior a la de operación (Llopis, 2017). Por otro lado, AASHTO (2004) e INVIAS (2008) recomiendan valores de fricción lateral menores a los que los conductores realmente utilizan en una carretera (limitación de la función de balance de fuerzas en una curva circular), por lo tanto, las velocidades de diseño son conservadoras (ver Ecuación 12); es decir, un conductor podría exceder la velocidad de diseño de una curva circular lo cual no implicaría necesariamente que se desencadenara un accidente de tránsito. Actualmente existe controversia en los Estados Unidos con el uso de la  $V_{85}$  como único criterio para establecer velocidades límites, especialmente en áreas urbanas. Federal Highway Administration promueve el uso de una herramienta llamada USLIMITS2 para que los departamentos de transporte la usen como guía para seleccionar velocidades límites "racionales" de acuerdo al contexto de la carretera (Figuroa M, 2019). Una crítica al uso único de la  $V_{85}$  consiste en que las velocidades de los usuarios podrían ir en aumento poniendo en desventaja a los otros (camiones, ciclistas, peatones, etc.).

Lamm et al. (1988, 1999), incluyeron un parámetro de diseño llamado tasa de cambio de curvatura de la curva simple con curvas de transición (CCRs), clasificando los aspectos de curvas horizontales en el diseño geométrico en "bueno", "favorable" y "pobre". Los investigadores encontraron que se debe disponer de curvas horizontales con radios mayores o iguales a 300 m. (para países como Australia, Canadá y Estados Unidos) para garantizar la consistencia en el diseño geométrico de curvas horizontales. Los criterios de clasificación se resumen de la siguiente manera (ver Tabla 1):

Tabla 1. Criterio de consistencia basado en diferencias de velocidades

Evaluación	Criterio 1 (elemento específico)	Criterio 2 (elementos sucesivos)	Criterio 3 (estabilidad del vehículo)
<b>Buena</b>	$V_{85} - V_d \leq 10$ km/h	$\Delta V_{85} \leq 10$ km/h	$\Delta f_R \geq 0,01$
<b>Aceptable</b>	$10 < V_{85} - V_d \leq 20$ km/h	$10 < \Delta V_{85} \leq 20$ km/h	$0,01 > \Delta f_R \geq -0,04$
<b>Pobre</b>	$V_{85} - V_d > 20$ km/h	$\Delta V_{85} > 20$ km/h	$\Delta f_R < -0,04$

$\Delta V_{85} = |V_{85i} - V_{85i+1}|$ , donde  $V_{85i}$  y  $V_{85i+1}$  son las velocidades de operación de los elementos  $i$  y  $i+1$  respectivamente.  
 $\Delta f_R = f_R - f_{RD}$ , donde  $f_R$  y  $f_{RD}$  son fricción asumida y demandada en el elemento  $i$ , respectivamente.

Fuente. Lamm et al. (1988, 1999)

Anderson et al. (1999), investigaron la relación entre la consistencia del diseño y la seguridad utilizando modelos de regresión log-lineales. Los investigadores encontraron que la consistencia del diseño está relacionada con la seguridad y desarrollaron dos modelos que relacionan la longitud de la curva y la reducción de velocidad  $\Delta V_{85}$ , la frecuencia de accidentes con el volumen de tráfico, y un modelo independiente que relaciona la frecuencia de accidentes con la longitud de la curva y el CCR

(tasa de cambio de curvatura). Los modelos se muestran a continuación (ver Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3):

$$Y = \exp(-7,1977) AADT^{0,9224} * L_c^{0,8419} \exp(0,0662\Delta V_{85}) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$R^2 = 0,195$$

$$Y = \exp(-0,8571) MVKT \exp(0,0780\Delta V_{85}) \quad R^2 = 0,156 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$Y = \exp(-5,932) AADT^{0,8265} * L_c^{0,7727} \exp(-0,3873CCR) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$R^2 = 0,196$$

Donde, Y es el número de accidentes que ocurrieron en la curva horizontal durante un período de 3 años, AADT es el tráfico diario promedio anual (vehículos/día),  $L_c$  la longitud de la curva horizontal, y MVKT es la exposición (millón de kilómetros/vehículo, de viaje para un período de 3 años).

Ng & Sayed (2004), calibraron diferentes Funciones de Estimación de la Siniestralidad (SPFs) con el fin de estimar el número de accidentes en carreteras rurales de dos carriles a partir de parámetros de consistencia. Desarrollaron la siguiente expresión que incluye como factor de consistencia la diferencia entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño  $\Delta V_{85}$  ( $V_{85} - V_d$ ), ver Ecuación 4:

$$Y_{i,5} = \exp(-3,380) * L^{0,8920} * V^{0,5913} \exp(0,009091(V_{85} - V_d)) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,  $Y_{i,5}$  es el número de accidentes en 5 años; L, longitud de sección (km); V, tráfico diario promedio anual (vehículos/día); ( $V_{85} - V_d$ ), diferencia entre la velocidad de operación y diseño (km/h) de un solo elemento.

Jacob et al. (2013), evaluaron los umbrales del criterio 1 y 2 de Lamm et al. (1999) en India (ver Tabla 1). Los investigadores concluyeron que los umbrales definidos por Lamm et al. (1999) eran adecuados para analizar la consistencia de un determinado elemento del trazado (Llopis, 2017). Los criterios de clasificación se resumen de la siguiente manera:

Tabla 2. Medición de la consistencia basado en diferencia de velocidades

Evaluación	Elemento específico
Buena	$ODD \leq 10$ km/h
Aceptable	$10 < ODD \leq 20$ km/h
Pobre	$ODD > 20$ km/h

ODD, diferencia de la velocidad de operación en la mitad de la curva y la velocidad de diseño;  $ODD = |V_{85MC} - V_D|$

Fuente: (Jacob et al., 2013)

Cafiso et al. (2005), investigaron los criterios propuesto por Lamm et al. (1999), (ver Tabla 1) encontrando que, los criterios que pudieron describir mejor la consistencia entre la expectativa del conductor y la alineación horizontal fueron el Criterio II y parcialmente el Criterio I. Debido a que el Criterio III también brinda información útil, especialmente si se combina con los otros dos criterios (Cafiso et al., 2005). La Ecuación 5, describe la relación entre la tasa de cambio de curvatura y los criterios de seguridad evaluados por los investigadores (Cafiso et al., 2005).

$$V = 107,8 - 0,053CCR_s, R^2 = 0,83 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde, CCRS: tasa de cambio de curvatura circular (gon/km).



### 2.2.1.2. Modelos globales de consistencia

El primer modelo de consistencia global fue el desarrollado por Polus & Mattar-Habib, (2004). Estos partieron de la hipótesis de que un tramo de carretera con numerosas variaciones de la velocidad produce en los conductores una mayor carga de trabajo. Por tanto, los tramos que presentan estas condiciones son menos consistentes, incluso aunque no se identifiquen inconsistencias locales en el mismo (Llopis, 2017). Los investigadores consideraron dos medidas de la consistencia de un segmento de carretera; *i*) la dispersión del perfil de velocidad de operación ( $\sigma$ ) y, *ii*) el área relativa ( $R_a$ ), definida como el área encerrada entre el perfil de velocidad de operación y la velocidad de operación media, dividida por la longitud del tramo de carretera (Llopis, 2017):

Tabla 3. Evaluación de consistencia. (Polus & Mattar-Habib, 2004).

Medición de consistencia	Buena	Aceptable	Pobre
Área relativa ( $R_a$ )	$R_a \leq 1$ (m/s)	$1 < R_a \leq 2$ (m/s)	$R_a > 2$ (m/s)
Desv. Estándar ( $\sigma$ )	$\sigma \leq 5$ (km/h)	$5 < \sigma \leq 10$ (km/h)	$\sigma > 10$ (km/h)

Fuente: (Polus & Mattar-Habib, 2004).

Como se observa en la Tabla 3, la consistencia del diseño disminuye cuando las dos medidas,  $R_a$  y  $\sigma$ , aumentan. Por lo tanto, la formulación del modelo de consistencia se asumió la siguiente manera (Polus & Mattar-Habib, 2004), ver y Ecuación 6:

$$C = 2,808 * e^{-0,278(R_a * (\frac{\sigma}{3,6}))} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde C: consistencia de diseño de un segmento de carretera de dos carriles;  $R_a$ : área relativa limitada entre el perfil de velocidad y la velocidad promedio ponderada;  $\sigma$ : desviación estándar de las velocidades de operación a lo largo del segmento de carretera (km/h); y A, B: parámetros. A partir del análisis de sensibilidad realizado por los investigadores, se establecieron umbrales para determinar la calidad de la consistencia de diseño de una carretera de dos carriles. Estos valores se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Umbrales para la determinación de la calidad de la consistencia del diseño

Buena	Aceptable	Pobre
$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$ (m/s)

Fuente: (Polus & Mattar-Habib, 2004)

Garach (2014), desarrolló un modelo de consistencia basado en la propuesta de Polus y Mattar-Habib (2004). Así pues, planteó el siguiente modelo de consistencia, ver Ecuación 7:

$$C = \frac{195,073}{\left(\frac{\sigma}{3,6} - 5,7933\right) * (4,1712 - R_a) - 26,6047} + 6,7823 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde, C: es el índice de consistencia global. A partir del análisis realizado, se establecieron umbrales para determinar la calidad de la consistencia de diseño, estos valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Nivel de consistencia del diseño

Buena	Aceptable	Pobre
$C > 2$ (m/s)	$1 < C \leq 2$ (m/s)	$C \leq 1$ (m/s)

Fuente: (Garach, 2014)

Garach (2014), concluyó que el modelo de consistencia presentado por Polus y Mattar-Habib (2004) es bastante conservador, y presenta algunas incongruencias, principalmente en que los tramos con valores aceptables de  $R_a$  y  $\sigma$  son clasificados como pobres según el modelo de global de los investigadores.

Calero (2015), en estudios realizados en Puerto Rico, desarrolló un modelo de consistencia en carreteras rurales de dos carriles, el cual implementa redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) para la estimación del percentil 85 de las diferencias de velocidad entre puntos de una curva horizontal ( $\Delta_{85}V_{BP}$ ). Calero (2015), estableció los siguientes umbrales para determinar la calidad de la consistencia de diseño (ver Tabla 6).

Tabla 6. Umbrales de consistencia para secciones en curvas horizontales

Umbral	Clasificación de consistencia de diseño
$\Delta_{85}V_{BP} < 3 \text{ MPH}$	Buena
$3 \text{ MPH} \leq \Delta_{85}V_{BP} < 4 \text{ MPH}$	Regular
$\Delta_{85}V_{BP} \geq 4 \text{ MPH}$	Pobre

Fuente: (Calero, 2015)

Camacho-Torregrosa (2015), desarrolló un modelo de consistencia tras el análisis de los accidentes ocurridos en 10 años en función del tráfico, el diseño geométrico y variables operacionales en segmentos de carretera ubicados en España. El modelo de consistencia propuesto estaba compuesto por dos variables: *i*) la velocidad de operación media ( $\bar{v}_{85}$ ) y, *ii*) la tasa de deceleración media ( $\bar{d}_{85}$ ). El modelo quedó definido a partir del siguiente parámetro de consistencia (Ecuación 8):

$$C = \sqrt[3]{\frac{\bar{v}_{85}}{\bar{d}_{85}}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde, C: índice de consistencia global. Camacho-Torregrosa (2015), estableció los siguientes umbrales para determinar la calidad de la consistencia, estos valores se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Umbrales de consistencia, Camacho-Torregrosa (2015)

Buena	Aceptable	Pobre
$C > 3,35 \sqrt[3]{s}$	$2,55 < C \leq 3,25 \sqrt[3]{s}$	$C \leq 2,55 \sqrt[3]{s}$

Fuente: (Camacho-Torregrosa, 2015)

Llopis (2017), desarrolló un modelo de consistencia global (parámetro C) estimado a partir del diagrama que presenta la diferencia entre el perfil de velocidad de operación inercial ( $V_i$ ), que representa las expectativas de los conductores y el perfil de velocidad de operación ( $V_{85}$ ). Este parámetro y sus variables principales son (Ecuación 9):

$$C = \sqrt{\frac{A(+)*\sigma(+)}{L(+)}} \left(\frac{km}{h}\right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde, A(+): área encerrada por el diagrama que muestra la diferencia entre  $V_i$  (velocidad de operación promedio del segmento de carretera anterior para cada punto de la carretera (Camacho et al., 2013)) y  $V_{85}$ , y el eje x considerando únicamente las diferencias positivas ( $m*km/h$ ); L(+): longitud de tramo de carretera donde se producen diferencias de velocidad positivas entre  $V_i$  y  $V_{85}$  (m);  $\sigma(+)$ : desviación estándar de la diferencia entre  $V_i$  y  $V_{85}$  considerando únicamente las diferencias de velocidad positivas ( $km/h$ ). Llopis (2017), estableció tres umbrales de consistencia para el modelo global: buena, aceptable y pobre, de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 8. Umbrales de consistencia, Llopis (2017)

Buena	Aceptable	Pobre
$C < 2,75$ km/h	$2,75 < C \leq 4,50$ km/h	$C > 4,50$ km/h

Fuente: (Llopis, 2017)

### 2.2.2. Medición de la consistencia

La mayoría de los modelos de evaluación de la consistencia obtienen un indicador de la vía o del tramo a estudiar y lo comparan con ciertos umbrales, obteniendo un resultado final cualitativo de la consistencia, que se suele clasificar como “buena”, “aceptable” o “pobre” (Llopis, 2017). Dichos umbrales son, normalmente, definidos tras analizar la relación entre consistencia y seguridad vial, medida esta última a partir de los accidentes ocurridos (Llopis, 2017).

Existen criterios que ayudan a evaluar la consistencia (Garach, 2014; Llopis, 2017; Ng & Sayed, 2004):

1. Estabilidad del vehículo.
2. Análisis de índices del trazado.
3. Evaluación de carga de trabajo del conductor.
4. Velocidad de operación y los elementos geométricos consecutivos.

#### Criterio 1. Estabilidad del vehículo

La estabilidad del vehículo es una medida del diseño de la carretera y está basada en el análisis del rozamiento transversal y el contacto entre pavimento-neumático. Cuando el rozamiento transversal que proporciona la curva es insuficiente, el vehículo puede salirse o volcar (Garach, 2014). Lamm et al. (1999), desarrollaron un modelo para la evaluación de la consistencia (Ecuación 10, Ecuación 11, Ecuación 12). En él,  $f_R$  (Rozamiento transversal movilizizado) se calcula en función de la velocidad de diseño, mientras que el  $f_{RD}$  (Rozamiento demandado por el vehículo) se calcula en función de la velocidad de operación, radio de curvatura y peralte (ver Tabla 1, criterio 3).

$$\Delta f_R = f_R - f_{RD} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$f_R = 0,22 - 1,79 \cdot 10^{-3} V_{TR} + 0,56 \cdot 10^{-5} V_{TR}^2 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$f_{RD} = \frac{V_{85}^2}{127R} - e \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde,  $\Delta f_R$ : Estabilidad del vehículo,  $V_{TR}$ : Velocidad de diseño (km/h);  $V_{85}$ : Velocidad que sólo es sobrepasada por el 15% de los vehículos;  $R$ : Radio de la curva en metros;  $e$ : Peralte de la curva.

Este modelo, evalúa los niveles de consistencia en función del  $\Delta f_R$  (Estabilidad del vehículo), presentados en la Tabla 1, criterio 3.

#### Criterio 2. Análisis de índices del trazado

Los índices de trazado están basados en las características geométricas de la carretera y revelan inconsistencias cuando éstas cambian significativamente. Algunos de los índices más usados para evaluar la consistencia son (Pérez-Zuriaga, Camacho Torregrosa, & García, 2011, Castro et al., 2005):

Índices de trazado horizontales:

- Tasa de cambio de curvatura (CCR), se define como la suma de los ángulos de deflexión entre la longitud total del tramo.

- Grado de curvatura (DC), es la relación entre la longitud de la curva y su radio.
- Relación entre la longitud de curvas en el tramo y la longitud del tramo (CL).
- Radio medio (AvgR), es el radio de curvatura medio del segmento.
- Recta media (AvgT), se mide como la longitud de las rectas entre el número de rectas.
- Radio máximo (MaxR) entre radio mínimo (MinR), es la relación entre el máximo y el mínimo radio dentro de un segmento; es decir (MaxR/MinR).

Índices de trazado verticales:

- Tasa de cambio de curvatura vertical (VCCR), refleja el cambio de pendiente por km de carretera, y es el equivalente a la tasa de cambio de curvatura horizontal.
- Curvatura vertical media (VavgK), representa la relación entre la longitud de la curva vertical y la pendiente de cambio. Muestra la longitud de curva vertical necesaria para alcanzar un cambio de un 1% en la pendiente.
- Pendiente media (VavgG), refleja el cambio de elevación entre puntos de cambio de inclinación consecutivos por kilómetro de carretera.

### **Criterio 3. Evaluación de carga de trabajo del conductor**

La carga de trabajo puede definirse como una medida del esfuerzo que debe realizar una persona mientras desarrolla cierta tarea, independientemente de la naturaleza de la misma (Pérez-Zuriaga et al., 2011). Los métodos que evalúan el criterio se basan en la medición de variables psicofísicas, en la distancia de visibilidad o en la demanda visual (Pérez-Zuriaga et al., 2011). La medición de variables psicofísicas consiste en evaluar las respuestas físicas que la carga de trabajo produce en el conductor (Heger et al., 1998). En cuanto a la distancia de visibilidad, si esta es limitada, la carga de trabajo aumenta porque el conductor necesita actualizar la información relativa a la carretera con mayor frecuencia y procesarla en menor tiempo (Ng & Sayed, 2004). La demanda visual es la cantidad de información visual que un conductor necesita para mantener una adecuada trayectoria en la carretera (Mark D. Wooldridge, Fitzpatrick, Koppa, & Bauer, 2007).

Messer (1980), relaciona el concepto de consistencia en el diseño geométrico con la tarea de conducción (carga de trabajo del conductor). El modelo conceptual establece que se deben realizar tareas de conducción para seguir una ruta de forma segura y cómoda. El conductor continuamente actualiza las acciones de control del vehículo a medida que se genera nueva información obtenida del entorno. Esta información se maneja en un proceso de toma de decisiones que se traducen en la conducción del vehículo. La carretera sirve como principal fuente de información y, por consiguiente, impone requisitos de carga de trabajo en el conductor. Ésta puede aumentar drásticamente para aquellos conductores que se sorprenden por la ocurrencia inesperada o la complejidad de un conjunto de características geométricas. Estos conductores requerirán más tiempo y esfuerzo mental para decidir la velocidad y ruta apropiadas. Messer (1980), propone separar las características (inconsistencias geométricas consecutivas) asignando una distancia de proximidad para proporcionar al conductor recuperación, percepción y reacción frente a la siguiente característica inesperada (inconsistencia geométrica), esta distancia de proximidad se estima que va de 10 a 20 s (Messer, 1980).

Conceptualmente, la carga de trabajo podría identificar mejor las inconsistencias que la velocidad de operación, dado que ésta se mide directamente sobre el conductor mientras que la velocidad de operación es sólo una variable derivada de la manera de conducir. Sin embargo, se utiliza mucho menos que la velocidad de operación por la dificultad de ser medida debido a su naturaleza subjetiva (Krammes A & Glascock, 1992)

Krammes et al. (1995), realizaron un análisis, para la evaluación de la carga de trabajo la cual consistente en que los conductores cierran los ojos y los vuelven a abrir sólo cuando piensan que es necesario extraer información de la carretera para direccionar adecuadamente el vehículo. La cantidad de tiempo que los conductores tienen los ojos abiertos representó la carga de trabajo necesaria en el proceso de conducción.

Durante la conducción, el usuario debe procesar información relativa a la geometría de la carretera, condiciones de tráfico y el entorno de la misma. Así, Alexander & Lunenfeld (1986), definieron dos tipos de expectativas:

1. Expectativas a priori: son aquellas adquiridas por el conductor gracias a todas las experiencias de conducción pasadas, en cualquier carretera.
2. Expectativas “ad hoc”: son aquellas que desarrolla el conductor en una determinada carretera al mismo tiempo que la recorre.

Las inconsistencias presentes en el diseño pueden infringir tanto las expectativas a priori como las “ad hoc”, haciendo que los conductores se vean sorprendidos por lo que se encuentran, e incrementando la probabilidad de que los conductores realicen algún error y se produzca un choque (Llopis, 2017).

#### **Criterio 4. Velocidad de operación y los elementos geométricos consecutivos**

Si la carretera presenta una inconsistencia en el trazado, o un cambio brusco en las características geométricas de sus elementos, provocará un cambio notorio de velocidad (Garach, 2014). La velocidad de operación es el criterio más utilizado para evaluar la consistencia, debido a la facilidad de la toma de información y a la inclusión del comportamiento del conductor (Anderson et al., 1999; Gibreel, G.M., Easa, S.M., Hassan, Y., El-Dimeery, 1999; Ng & Sayed, 2004; Pérez-Zuriaga et al., 2011).

La comparación de las velocidades de operación entre elementos geométricos consecutivos (entretangencias y curvas horizontales) es una medida adecuada de consistencia debido a que un cambio inesperado en la geometría de la carretera genera un cambio notorio en la velocidad de operación (Garach, 2014). Por ejemplo, si seguido de una entretangencia de gran longitud se tiene una curva horizontal cerrada, el conductor deberá reducir la velocidad, que posiblemente resulte peligroso y desencadene en un accidente (Garach, 2014).

Un caso común en un trazado inconsistente, es la presencia de curvatura cerrada después de entretangencias con longitudes grandes (mayores a 400 m), en donde se supone que los conductores pueden desarrollar velocidades deseables que se reducirán a lo largo de la curva horizontal (Abdelwahab, Aboul-Ela, & Morrall, 1998).

### **2.3. Conceptos de velocidad**

La velocidad de un conductor en una carretera varía debido a factores como: las condiciones y características de la carretera, volumen de tráfico, situaciones ambientales y experiencia del conductor (Singh, Zaman M, & White, 2011). La estimación de velocidad en carreteras de dos carriles se ha investigado extensamente para curvas horizontales en terrenos relativamente planos. Investigaciones indican que el radio de la curva es el elemento más importante para estimar velocidades en curvas horizontales (Fitzpatrick et al., 2000). La distancia de visibilidad, el ancho de los elementos de la sección transversal, la pendiente longitudinal entre otros parámetros, han sido analizados para estimar velocidades de operación. El peralte y el ángulo de deflexión son otras variables que se han utilizado en ecuaciones de regresión para estimar velocidades de operación en curvas horizontales (Fitzpatrick

et al., 2000). Para las entretangencias, su longitud es el parámetro principal que determina la velocidad; la geometría de la sección transversal afecta la velocidad en las entretangencias en terreno plano (Fitzpatrick et al., 2000). Para entretangencias cortas (longitud  $\leq 200$  m), la velocidad generalmente depende de su longitud y del radio de la curva anterior, aunque otras variables, como el radio de la siguiente curva, el ángulo de deflexión y la velocidad en la curva anterior, también se han utilizado para estimar la velocidad (Andueza, 2000; Bella, 2005; Cardoso, 1997; Fambro, Fitzpatrick, & Koppa, 1997; Polus & Dagan, 1987; Polus, Fitzpatrick, & Fambro, 2000).

Existen distintos conceptos de velocidad a lo largo de una carretera: Velocidad de Diseño del Tramo Homogéneo ( $V_{TR}$ ), Velocidad de Operación ( $V_{OP}$ ), Velocidad Especifica de los elementos que integran el trazado en planta y perfil ( $V_{CH}$ ,  $V_{ETH}$ ,  $V_{CV}$ ,  $V_{TV}$ ) y Velocidad a Flujo Libre ( $V_{FF}$ ). En el MDGC (INVIAS, 2008), la Velocidad de Diseño del Tramo Homogéneo ( $V_{TR}$ ) es la característica inicial más importante para la asignación de parámetros técnicos de diseño geométrico en una carretera (INVIAS, 2008), la cual se define como la máxima velocidad segura y cómoda que puede ser mantenida en un tramo determinado de una vía (Cárdenas, 2013; INVIAS, 2008); AASTHO (2018), define la velocidad de diseño como una velocidad seleccionada que se utiliza para establecer las diversas características de diseño geométrico de la carretera. La Velocidad de Operación ( $V_{OP}$ ) es la velocidad en la cual los conductores son observados operando sus vehículos bajo condiciones a flujo libre y generalmente definida como el percentil 85 de una muestra representativa en una carretera (AASHTO, 2011). Velocidad Especifica de los elementos que integran el trazado en planta y perfil, se define como la máxima velocidad más probable con la que se puede abordar cada elemento que compone el trazado geométrico de una carretera (curvas horizontales  $V_{CH}$ , entretangencias horizontales  $V_{ETH}$ , curvas verticales  $V_{CV}$  y tangentes verticales  $V_{TV}$ ) (INVIAS, 2008). La Velocidad a Flujo Libre se define como la velocidad en la cual los vehículos circulan sin restricciones generadas por el tráfico, dispositivos de control (semáforos, señalización, dispositivos de control) y condiciones de clima en la vía, manteniendo un espaciamiento (brecha) entre vehículos de mínimo 5 segundos (Poe et al., 1996).

La mayoría de los conductores eligen una velocidad para llegar a sus destinos en el menor tiempo posible sin ponerse en peligro, ni mucho menos a los acompañantes. Singh et al. (2011), establecen los siguientes cuatro grupos de factores que afectan la velocidad de operación:

1. Características geométricas.
2. Características y control del tráfico.
3. Características ambientales y condiciones climáticas.
4. Experiencia del conductor, conocimiento de la carretera a transitar y las características del entorno (rural, urbano).

Adicional a lo anterior, se debe considerar el potencial de ser amonestado en el caso de infracciones (riesgo económico) y el factor de aceptación de riesgo en la carretera.

### **Factor 1: Características geométricas**

Las características geométricas de una carretera influyen en el flujo del tráfico, a continuación, se presentan las que afectan la velocidad de operación en carreteras de dos carriles (Fitzpatrick et al., 2003; Najjar et al., 2000; Gattis et al., 1999; Polus et al., 1991):

1. Ancho de carril y condiciones del pavimento.
2. Ancho de talud utilizable.
3. Ancho de zona.
4. Ancho del separador.
5. Grado de curvatura horizontal, longitud de curva, radio y peralte.

6. Distancia de parada.
7. Geometría de la berma.
8. Tipo de terreno: terreno plano, terreno ondulado o terreno montañoso.
9. Longitud de zonas de no adelantamiento.

Najjar et al. (2000), investigaron el efecto de la velocidad en las bermas de la calzada con diferente tipo de material: pavimento (P/C) y césped/grava (T/G). los investigadores establecieron que la velocidad de operación ( $V_{85}$ ) aumenta para el caso T/G donde el ancho de berma es aproximadamente 0,9 m, y disminuye ligeramente con un aumento en el ancho de berma a 1,8 m; más allá de este ancho, se mantiene casi constante la  $V_{85}$ .

### **Factor 2: Características y control del tráfico**

La velocidad de un vehículo está influenciada por las características del tráfico. La velocidad promedio disminuye, casi linealmente, con un aumento en el volumen de tráfico en las carreteras de dos carriles (HCM, 2010). Para diseñar límites razonables de velocidad en una sección específica de una carretera, se deben considerar las siguientes condiciones del tránsito:

1. Volumen.
2. Composiciones (% camiones, % autos, % buses).
3. Señalización vertical.
4. Distribución direccional (50/50, 40/60, 30/70, 20/80).

### **Factor 3: Características ambientales y condiciones climáticas**

El entorno físico y climático que rodea un vehículo también puede ser un factor en la ocurrencia de un choque (Singh et al., 2011). Las condiciones climáticas desfavorables tienden a aumentar el potencial de accidente; en donde la velocidad de operación disminuye debido a la visibilidad de la carretera. Las características que influyen en la variación de la velocidad de operación, incluyen (Singh et al., 2011):

1. Número de construcciones o propiedades alrededor de la carretera.
2. Uso del suelo alrededor de la carretera.
3. Número de intersecciones.
4. Hora de conducción (día, noche), conducción en hora pico.
5. Condición climática (soleado, nublado, lluvioso).

La condición húmeda y seca de la superficie de pavimento también afecta la velocidad de operación. Ibrahim et al. (1994), encontraron una variación de velocidad de operación en alrededor de 1,6 km/h para superficies de pavimento en condiciones de lluvias ligeras, y en condiciones de lluvias fuertes se evidencia una reducción de velocidad entre 4,8 a 9,7 km/h.

### **Factor 4: Experiencia del conductor y conocimiento de la carretera a transitar**

El comportamiento del viaje en vehículo varía con la aptitud y experiencia del conductor (Singh et al., 2011). El género y la edad de los conductores también tienen un efecto considerable en la velocidad de conducción (McKelvey, Maleck, Stamatiadis, & Hardy, 1998; Polus, Craus, & Livneh, 1991). Los conductores masculinos y jóvenes, tienden a conducir más rápido que los conductores femeninos y mayores bajo las mismas condiciones de la carretera (Singh et al., 2011). El conocimiento previo de los conductores sobre la carretera puede alentarlos a conducir más rápido que los límites de velocidad establecidos (Donald, Ockwell, & Board, 1994). Una causa importante de muchas situaciones de choque es el desempeño del conductor de uno o ambos vehículos involucrados (Singh et al., 2011).

La comodidad y economía que ofrece una carretera están relacionadas con la velocidad y la seguridad de operación al transitar (Leisch & Leisch, 1977). El uso de la velocidad con la que se diseña una carretera, presenta inconvenientes en cuanto a curvas horizontales que tienen control sobre esta, pues hacen que el conductor aumente la velocidad en las partes más planas de la alineación (entretangencias) y luego disminuya en las curvas más agudas (deflexiones grandes). Otro inconveniente es que la velocidad de diseño a veces es menor que la expectativa del conductor (Leisch & Leisch, 1977). Por lo tanto, para compensar los estados físicos y emocionales del conductor, cumplir con sus expectativas y con sus características inherentes, es necesario lograr consistencia operativa y mejorar la comodidad y la seguridad de conducción mediante la aplicación de una velocidad de diseño adecuada (Leisch & Leisch, 1977).

### 2.3.1. Estimación de la velocidad de operación ( $V_{85}$ )

#### 2.3.1.1. Estimación de velocidad en curvas horizontales

Existen diversos modelos de velocidad de operación para curvas y entretangencias horizontales, la mayoría de ellos solo usan uno o dos parámetros geométricos, dado que imponen un control de velocidad para los conductores. El parámetro más utilizado es el radio; normalmente, los modelos de estimación de velocidad de operación para curvas horizontales no consideran la alineación vertical (Camacho-Torregrosa, 2015).

Lamm & Choueiri (1987), en investigaciones realizadas en New York (Estados Unidos), determinaron la relación entre parámetros de diseño y el percentil 85 de velocidad. Los primeros, incluían el grado de curvatura, longitud de la curva, peralte, bombeo, distancia de visibilidad, ancho de carril, ancho de berma y volumen del tránsito. La relación obtenida en la investigación fue lineal y se expresa de la siguiente manera (Ecuación 13):

$$V_{85} = 34,7 - DC + 2,081 * LW + 0,174 * SHW + 0,0004 * AADT$$

$$R^2 = 0,842 \text{ (error estándar estimado: } 2,184 \frac{mi}{h} \text{)}$$

*Ecuación 13*

Donde,  $V_{85}$ : estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 (mi/h); DC: grado de curvatura (en grados por 100 ft); LW: ancho de carril (ft); SHW: ancho de berma (ft); AADT: tránsito promedio diario anual (vehículos/día).

En Grecia, el comportamiento de los conductores en el trazado horizontal ha sido estudiado por Kanellaidis et al. (1990). El concepto de velocidad de operación se consideró como una herramienta básica para diseñar elementos de carretera individuales y lograr consistencia en las alineaciones horizontales. Kanellaidis et al. (1990) investigaron los parámetros de la curva que resultaron en el siguiente modelo:

$$V_{85} = 129,88 - \frac{623,1}{\sqrt{r}}, R^2 = 0,78$$

*Ecuación 14*

Donde, r: radio de la curva horizontal.

Los cambios en la velocidad de operación en curvas horizontales de carreteras rurales fueron estudiados por Islam y Seneviratne (1994). Los investigadores encontraron que el grado de curvatura es el parámetro más significativo en la estimación de la velocidad de operación en curvas horizontales.



Las relaciones entre las velocidades de operación en PC, MC y PT y el grado de curvatura fueron las siguientes:

$$V_{85}(PC) = 95,41 - 1,48D - 0,012D^2, R^2 = 0,99 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$V_{85}(MC) = 103,03 - 2,41D - 0,029D^2, R^2 = 0,98 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$V_{85}(PT) = 96,11 - 1,07D, R^2 = 0,98 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde,  $V_{85}$ : Estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad (km/h);  
D: Grado de curvatura ( $^{\circ}$ )

Morrall & Talarico (1994), utilizaron análisis de regresión para obtener estimaciones del efecto sobre la velocidad de operación producido por el grado de curvatura. Se desarrollaron modelos de regresión lineal, multiplicativa, exponencial y recíproca. Se encontró el siguiente modelo (Ecuación 18):

$$V_{85} = e^{(4,561 - 0,00586DC)}, R^2 = 0,631 \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde,  $V_{85}$ : Estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad (km/h);  
DC: Grado de curvatura (grados/100 m).

Krammes et al. (1995) recolectaron datos en 138 curvas horizontales y 78 entretangencias horizontales, con el objeto de calibrar las siguientes ecuaciones del percentil 85 de velocidad (ver Ecuación 19, Ecuación 20 y Ecuación 21). La Tabla 9, presenta los parámetros para la estimación de la velocidad de operación.

Tabla 9. Parámetros para la estimación del percentil 85 de velocidad.

Regresión estimada	Forma de la ecuación		
	Lineal	Exponencial	Inversa
$\beta_0$ (km/h)	103,66	4,66	0,0092
$\beta_1$ (km/h)	-1,95	-0,02	0,0003
Estadístico F	556,89	585,07	540,97
Valor P	0,0001	0,0001	0,0001
Valor $R^2$	0,80	0,81	0,80

Unidad de conversión: 1 km/h = 0,621 mi/h

*Fuente: (Krammes et al., 1995).*

$$V_{85} = 103,66 - 1,95D, R^2 = 0,80 \quad \text{Ecuación 19}$$

$$V_{85} = 102,45 - 1,57D + 0,0037L - 0,1I, R^2 = 0,82 \quad \text{Ecuación 20}$$

$$V_{85} = 41,62 - 1,29D + 0,0049L - 0,12I + 0,95 V_t, R^2 = 0,98 \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde,  $V_{85}$ : estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad (km/h);  
D: grado de curvatura (en grados); L: longitud de la curva (m); I: ángulo de deflexión ( $^{\circ}$ );  $V_t$ : estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad en aproximación a la tangente (km/h). Los resultados estadísticos sugieren que conocer la velocidad de aproximación de la tangente, mejora la estimación de las velocidades del percentil 85 en la curva horizontal (Krammes et al., 1995). La Ecuación 19, considera el efecto del grado de curvatura. La Ecuación 20, también incorpora la longitud de la curva y el ángulo de deflexión. La Ecuación 21 considera la velocidad tangente como una variable independiente (Krammes et al., 1995).

McFadden & Elefteriadou (2000, 2007), analizaron las velocidades del percentil 85 en curvas horizontales en tres pasos. Primero, un modelo utilizando el grado de curvatura como una variable independiente (Ecuación 22); segundo, un modelo que incluía otras características de la curva que podrían mejorar el poder explicativo de las relaciones (Ecuación 23); y finalmente, la velocidad del percentil 85 observada en la tangente de aproximación (Ecuación 24). Los modelos que se formularon y que pronosticaron la velocidad del percentil 85 en curvas horizontales se dan a continuación:

$$V_{85} = 104,61 - 1,90D, R^2 = 0,74 \quad \text{Ecuación 22}$$

$$V_{85} = 103,13 - 1,58D + 0,0037L - 0,09I, R^2 = 0,76 \quad \text{Ecuación 23}$$

$$V_{85} = 54,59 - 1,50D + 0,0006L - 0,12I + 0,81 V_t, R^2 = 0,86 \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde,  $V_{85}$ : estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad (km/h); D: grado de curvatura (en grados); L: longitud de la curva (m); I: ángulo de deflexión (°);  $V_t$ : estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad en aproximación a la tangente (km/h).

Fitzpatrick et al. (2000), desarrollaron modelos que incluyen condiciones del alineamiento vertical para la estimación de la velocidad de operación en curvas horizontales. Los investigadores, definieron el radio de curvatura como el parámetro más importante en la estimación de la velocidad, y desarrollaron ecuaciones a base de la combinación del trazado planta-perfil. Como resultado, Fitzpatrick et al. (2000) desarrollaron seis modelos de velocidad de operación para automóviles de pasajeros. La Tabla 10 describe las ecuaciones de regresión de los modelos estudiados por los investigadores.

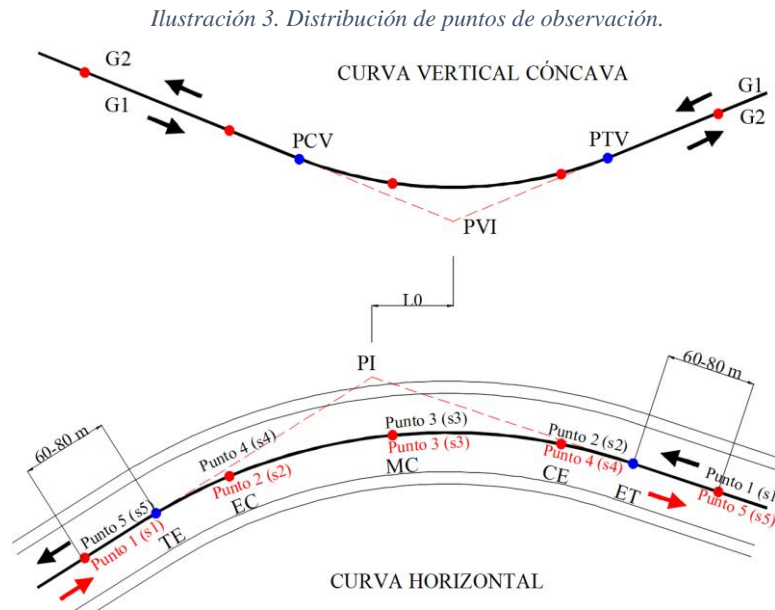
Tabla 10. Ecuaciones de regresión para estimar velocidades de operación

Condición del trazado	Velocidad (automóviles)	N	R <sup>2</sup>	Ecuación No.
Curva horizontal con pendiente longitudinal entre 0% y 4%	$V_{85} = 106,30 - \frac{3595,29}{R}$	28	0,92	Ecuación 25
Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava		28	0,93	
Curva horizontal con pendiente longitudinal entre 4% y 9%	$V_{85} = 96,46 - \frac{2744,49}{R}$	14	0,56	Ecuación 26
Curva horizontal con pendiente longitudinal entre -9% y 0%	$V_{85} = 100,87 - \frac{2720,78}{R}$	22	0,59	Ecuación 27
Curva horizontal combinada con curva vertical convexa y con distancia de visibilidad limitada ( $K < 43$ )	$V_{85} = 101,90 - \frac{3283,01}{R}$	16	0,78	Ecuación 28
Entretangencia horizontal combinada con curva vertical convexa y con distancia de visibilidad limitada ( $K < 43$ )	$V_{85} = 111,07 - \frac{175,98}{K}$	6	0,54	Ecuación 29
Entretangencia horizontal combinada con curva vertical convexa	$V_{85} = 100,19 - \frac{126,07}{K}$	5	0,68	Ecuación 30

Donde,  $V_{85}$ : percentil 85 de velocidad para automóviles; R: radio de curvatura horizontal; K: tasa de curvatura vertical; N: número de observaciones.

Fuente: (Fitzpatrick et al., 2000).

Gibreel et al. (2001), realizaron modelos para estimar velocidades de operación en sitios específicos del trazado Planta-Perfil. Los investigadores, consideraron cinco puntos (3 puntos al interior de la curva horizontal y 2 puntos sobre la tangente de entrada y salida) de análisis, donde midieron la velocidad de operación. Los resultados se presentan a continuación (Tabla 11):



Fuente:(Gibreel et al., 2001).

Tabla 11. Puntos de medición para estimación de la velocidad de operación

Modelo	R <sup>2</sup>	Ecuación No.
$V_{s1} = 91,81 + 0,010r + 0,468\sqrt{L_v} - 0,006G_1^3 - 0,878 \ln A - 0,826 \ln L_0$	0,98	Ecuación 31
$V_{s2} = 47,96 + 7,217 \ln r + 1,534 \ln L_v - 0,2586G_1 - 0,653A - 0,008L_0 + 0,020e^E$	0,98	Ecuación 32
$V_{s3} = 76,42 + 0,023r + 2,30 * 10^{-4} * K^2 - 0,008e^A - 1,23 * 10^{-4} * L_0^2 + 0,062e^E$	0,94	Ecuación 33
$V_{s4} = 82,78 + 0,011r + 2,067 \ln K - 0,361G_2 - 0,036e^E - 1,091 * 10^{-4} * L_0^2$	0,95	Ecuación 34
$V_{s5} = 109,45 - 1,257G_2 - 1,586 \ln L_0$	0,79	Ecuación 35

Donde, r: radio curvatura horizontal (m); L<sub>v</sub>: long. de la curva vertical (m); E: peralte (%); A: diferencia algebraica de pendientes longitudinales (%); K: tasa de curvatura vertical; G<sub>1</sub> y G<sub>2</sub>: pendiente longitudinal de entrada y salida (%); L<sub>0</sub>: distancia horizontal entre PVI y PI (m).

Fuente:(Gibreel et al., 2001)

Castro et al. (2008), desarrollaron un modelo para estimar velocidades de operación en curvas horizontales para España, la Ecuación 36 describe el modelo propuesto, que depende del radio de curvatura horizontal.

$$V_{85} = 120,16 - \frac{5596,72}{R}, R^2 = 0,74 \tag{Ecuación 36}$$

Donde, V<sub>85</sub>: estimación de la velocidad de operación expresada por el percentil 85 de velocidad (km/h); R: radio de curvatura horizontal (m).

Castro et al. (2011), desarrollaron un modelo para estimar velocidades de operación en curvas horizontales para Colombia, la Ecuación 37 describe el modelo propuesto, el cual depende de la longitud de curva horizontal y el ángulo de deflexión, como se presenta a continuación:

$$V_{85} = 91,1323 + 0,0328341L_c - 0,481729\Omega \tag{Ecuación 37}$$

$$R^2 = 0,76$$

### 2.3.2. Estimación de velocidad en entretangencias horizontales

Las entretangencias horizontales (ETH) no imponen un control de velocidad a los conductores, por lo tanto, las velocidades de operación son más altas que en las curvas horizontales. En lugar del radio (parámetro que no tiene influencia en las variaciones de velocidad en la ETH), normalmente se consideran otros parámetros para la estimación de la velocidad de operación, como: *i*) la longitud de la ETH, *ii*) el radio de la curva anterior y/o siguiente, *iii*) el ancho del carril y de bermas (Camacho-Torregrosa, 2015).

Lamm, et al. (1988), establecieron límites para longitudes de ETH que deben considerarse como elementos de diseño “independientes” o “no independientes”. Las ETH independientes son tangentes largas; en estas, los conductores pueden desarrollar completamente la velocidad deseada, por lo tanto, la velocidad máxima alcanzada (y mantenida) no se ve afectada por ningún control geométrico, como la curva anterior o siguiente. Las ETH no independientes, son más cortas, por lo que los conductores no pueden alcanzar la velocidad deseada, y seleccionan una velocidad de operación diferente y más baja, según su percepción de las restricciones del alineamiento. Para las ETH “independientes”, la secuencia “ETH a curva” controla el proceso de diseño, mientras que para las ETH “no independientes”, la secuencia “curva a curva” es la que controla el proceso de diseño. La Tabla 12 presenta longitudes máximas (en metros) permitidas para la ETH, consideradas como elementos de diseño “no independientes”.

Tabla 12. Relación entre longitud de ETH y  $V_{85}$ . Secuencia “ETH-curva”

$V_{85}$ en curva (km/h)	$V_{85}$ en Entretangencias (km/h)				
	54,7	64,4	74,0	83,7	93,3
35,4	76,2	129,5	190,5	259,1	335,3
45,1		99,0	152,4	221,0	304,8
54,7			114,3	183,0	259,1
64,4				129,5	205,7
>74,0					144,8

Fuente: (Lamm et al., 1988).

Polus et al. (2000), realizaron estudios para estimar velocidades de operación en ETH, y encontraron que la velocidad depende de características de la carretera, como la longitud de la ETH, el radio de la curva anterior y posterior, elementos de sección transversal, alineamiento vertical, tipo de terreno, las características de aceleración y desaceleración del vehículo, la pendiente y distancia de visibilidad. Polus et al. (2000), también introdujeron la media geométrica (GM). La Ecuación 38 y Ecuación 39, muestran cómo se calcula este parámetro.

$$GM_L = \frac{\left[ TL * (R_1 * R_2)^{\frac{1}{2}} \right]}{100}, TL \geq t \quad \text{Ecuación 38}$$

$$GM_S = \frac{R_1 + R_2}{2}, TL < t \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde,  $GM_L$ : media geométrica para ETH larga ( $m^2$ );  $GM_S$ : media geométrica para ETH corta ( $m^2$ );  $R_1$  y  $R_2$ : radio de curvatura anterior y posterior (m);  $TL$ : longitud de ETH (m);  $t$ : umbral seleccionado de longitud de ETH (m).

Polus et al. (2000), agruparon los datos considerando características comunes, y sugirieron los siguientes cuatro grupos:

- i. Grupo 1: Las curvas horizontales anteriores y posteriores tienen un radio de 250 m o menos, y la ETH es menor que 150 m.
- ii. Grupo 2: El radio para cada curva horizontal es menor o igual a 250 m con una longitud de ETH entre 150 m y 1000 m.
- iii. Grupo 3: El radio para cada curva horizontal es mayor de 250 m con una longitud de ETH entre 150 m y 1000 m.
- iv. Grupo 4: Longitud de ETH mayor a 1000 m (1 km).

La Tabla 13, describe los modelos propuestos para estimar la velocidad de operación en ETH con base a la clasificación anterior (Polus et al., 2000).

Tabla 13. Modelos para estimación de velocidad en ETH

Modelo	R <sup>2</sup>	Ecuación No.
$V_{85} = 101,11 - \frac{3420}{GM_S}$	0,553	Ecuación 40
$V_{85} = 105 - \frac{28,107}{e^{0,00108+GM_L}}$	0,742	Ecuación 41
$V_{85} = 97,73 - 0,00067 * GM$	0,2	Ecuación 42
$V_{85} = 105 - \frac{22,953}{e^{0,00012+GM_L}}$	0,838	Ecuación 43

Fuente: (Polus et al., 2000).

La Tabla 14, presenta las ecuaciones desarrolladas por autores para estimar velocidades de operación en curvas horizontales en función de variables geométricas.

Tabla 14. Ecuaciones de regresión para estimar velocidades de operación.

Autor (es)	Modelo	R <sup>2</sup>	Tamaño muestra	País
Lamm & Choveiri (1987)	$V_{85} = 94,397 - 3189,24/r$	0,79	261	Estados Unidos
Krammes et al. (1995)	$V_{85} = 102,44 - 2471,81/r + 0,012*Lc - 0,1\Omega$	0,82	138	Estados Unidos
McFadden & Elefteriadou (1997)	$V_{85} = 103,66 - 1,95*DC$	0,80	78	Estados Unidos
Ottesen & Krammes (2000)	$V_{85} = 102,44 - 1,57*DC + 0,012*Lc - 0,01*DC*Lc$	0,81	138	Estados Unidos
Nie & Hassan (2007)	$V_{85} = 108,357 - 0,097*CCR$	0,86	10	Canadá

Fuente: (Castro et al., 2011).

Donde, r: Radio de la curva; DC: Grado de curvatura; Lc: Longitud de la curva;  $\Omega$ : ángulo de deflexión; CCR: Tasa de cambio de curvatura.

Esta cantidad de modelos de estimación de velocidad, y variables independientes y coeficientes de regresión, podrían ser el resultado de las diferencias en el comportamiento del conductor de un lugar a otro. Además, la mayoría de los modelos de velocidad descritos no se desarrollaron en países con economías crecientes (Castro et al., 2011).

## 2.4. Influencia de la velocidad en la consistencia del diseño geométrico

La velocidad es un factor importante en la seguridad vial que afecta tanto a la ocurrencia de accidentes como a la gravedad de los mismos (Elvik, Christensen, & Amundsen, 2004).

En el país, la velocidad de diseño es seleccionada de acuerdo a la funcionalidad y tipo de terreno de la carretera a diseñar (INVIAS, 2008) y, a partir de la misma, quedan definidos los principales parámetros del diseño geométrico: radio mínimo, peraltes máximos, pendientes máximas del trazado vertical, distancia de visibilidad, geometría de la sección transversal, etc. Por tanto, debería responder a la operación de los conductores, la topografía, los usos del suelo y la clasificación funcional de la propia carretera (AASHTO, 2011). La seguridad, movilidad y eficiencia son resultados directos del

diseño seleccionado, sin embargo, existen factores, tales como la calidad medioambiental, el factor económico, la estética y el impacto social y político que pueden desviar la selección de esta velocidad (Llopis, 2017). Esta velocidad no coincide habitualmente con la velocidad de operación, que es la velocidad que realmente los conductores desarrollan, éstos no ajustan su velocidad de acuerdo a la importancia de la carretera, sino que lo hacen de acuerdo a las limitaciones físicas que ofrece el trazado y el volumen de tránsito existente, por tanto, una gran diferencia entre estas dos lleva consigo problemas de seguridad vial, lo que se traduce en un aumento de la probabilidad de ocurrencia de accidentes (Llopis, 2017).

En el medio colombiano la velocidad “tope” a la que viajan los conductores en un momento dado es función, de las restricciones u oportunidades que ofrezca el trazado de la carretera, el estado de la superficie de la calzada, las condiciones climáticas, la intensidad del tráfico y las características del vehículo y en menor medida por las señales de límite de velocidad colocadas en la vía o por una eventual intervención de los agentes de tránsito (INVIAS, 2008). Para tener en cuenta en el diseño esta actitud de relativa indisciplina de los conductores es necesario dimensionar los elementos geométricos, curvas y entretangencias en planta y perfil, en forma tal que puedan ser recorridos con plena seguridad a la velocidad máxima más probable con que sería abordado cada uno de dichos elementos geométricos (INVIAS, 2008). La velocidad máxima más probable con que sería abordado cada elemento geométrico es justamente su Velocidad Específica y es con la que se debe diseñar ese elemento (INVIAS, 2008).

Las relaciones velocidad-accidente fueron examinadas en distintos estudios en todo el mundo (Shinar, 1998; Lynam and Hummel, 2002; OECD, 2006; Aarts and Van Schagen, 2006; GRSP, 2008), donde la comprensión básica sobre el tema se puede resumir en las siguientes afirmaciones: las velocidades altas se asocian con una mayor probabilidad de estar involucrado en un accidente y están directamente relacionadas con una mayor gravedad del accidente; mayor variación de velocidad aumenta el riesgo de accidentes (Gitelman, Doveh, & Bekhor, 2017).

## 2.5. Velocidades específicas en Colombia

En Colombia, el MDGC (INVIAS, 2008), permite variaciones máximas de velocidad con respecto a la velocidad de diseño ( $V_{TR}$ ) en 20 km/h (velocidades específicas de los elementos geométricos consecutivos).

El MDGC (INVIAS, 2008), orienta el proceso de diseño geométrico mediante la asignación de parámetros generales de diseño como son:

- Clasificación de la carretera según su funcionalidad
- Clasificación de la carretera según el tipo de terreno

Estos parámetros permiten asignar la velocidad de diseño ( $V_{TR}$ ) del proyecto, “Tabla 2.1 Valores de la Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos ( $V_{TR}$ ) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno”, presentada en la Tabla 15 (INVIAS, 2008). El criterio de selección de la  $V_{TR}$ , consiste en establecer la viabilidad del proyecto en la etapa de construcción y mantenimiento. Vías con altas velocidades de diseño definen carreteras amplias, con radios de curvatura extensos, menores ángulos de deflexión, y pendientes longitudinales suaves, que, durante la etapa de construcción representa grandes movimientos de tierras (corte y terraplén). Por el contrario, bajas velocidades de diseño, definen carreteras de calzadas reducidas, con menores radios de curvatura, grandes ángulos de deflexión, y pendientes longitudinales fuertes, que, durante la etapa de construcción, reduce considerablemente el movimiento de tierras. La Tabla 15, define la velocidad de diseño en función de

la categoría de la carretera y el tipo de terreno, e indica mediante un rango de velocidades, el equilibrio entre el mejor nivel de servicio que se puede ofrecer y las posibilidades económicas del país.

Tabla 15. Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos ( $V_{TR}$ ).

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO $V_{TR}$ (km/h)										
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	
Primaria de dos calzadas	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											
Primaria de una calzada	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											
Secundaria	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											
Terciaria	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras, Tabla 2.1. (INVIAS, 2008).

La velocidad específica, es la velocidad máxima más probable con que sería abordado cada elemento geométrico en planta y perfil y es con la que se debe diseñar cada elemento (entretangencia horizontal, curva horizontal, tangente y curva vertical) (INVIAS, 2008).

El MDGC (INVIAS, 2008) define la velocidad específica del elemento inmediatamente continuo, mediante la metodología de asignación de velocidades específicas (Tabla 2.2 “Velocidad Específica de una curva horizontal ( $V_{CH}$ ) incluida en un tramo homogéneo con Velocidad de Diseño  $V_{TR}$ ), que tiene como base, cinco (5) casos de estudio que dependen de:

- El sentido en el cual el vehículo realiza el recorrido (avance o contra).
- La velocidad específica del elemento inmediatamente anterior.
- La longitud del segmento recto anterior (entretangencia).
- El ángulo de deflexión de la curva en estudio.

La secuencia general para la asignación de la velocidad específica de los elementos geométricos en planta y perfil se describe a continuación (INVIAS, 2008):

### 1. En el proceso de diseño del eje en planta:

- Partiendo de la velocidad de diseño del tramo homogéneo adoptada ( $V_{TR}$ ), se asigna la velocidad específica a cada una de las curvas horizontales ( $V_{CH}$ ).
- Partiendo de la velocidad específica asignada a las curvas horizontales ( $V_{CH}$ ), se define la velocidad específica a las entretangencias horizontales ( $V_{ETH}$ ).

### 2. En el proceso de diseño del eje en perfil:

- Partiendo de la velocidad específica asignada a las curvas horizontales ( $V_{CH}$ ) y a las entretangencias horizontales ( $V_{ETH}$ ), se define la velocidad específica a las curvas verticales ( $V_{CV}$ ).
- Partiendo de la velocidad específica asignada a las entretangencias horizontales ( $V_{ETH}$ ), se define la Velocidad Específica a las tangentes verticales ( $V_{TV}$ ).

La Tabla 16, resume la metodología descrita en el MDGC (INVIAS, 2008), en función de la velocidad específica del elemento anterior y la velocidad de diseño del tramo, teniendo en cuenta el patrón de comportamiento que adoptan los conductores según la geometría en cinco casos de estudio (ver Tabla 16). Según el alcance de la investigación, se analizaron los casos de estudio correspondientes a una velocidad de diseño ( $V_{TR}$ ) mayor a 50 km/h (carreteras rurales de 2 carriles en terreno plano, categoría primaria de una calzada).

Tabla 16. Metodología de asignación de velocidades específicas (INVIAS, 2008).

Velocidad específica de la curva horizontal anterior VCH (Km/h)	Velocidad de diseño del tramo ( $V_{TR}$ ) $\leq$ 50 Km/h					Velocidad de diseño del tramo ( $V_{TR}$ ) $>$ 50 Km/h				
	Longitud del segmento recto anterior (m)					Longitud del segmento recto anterior (m)				
	$L \leq 70$	$70 < L \leq 250$		$250 < L \leq 400$	$L > 400$	$L \leq 150$	$150 < L \leq 400$		$400 < L \leq 600$	$L > 600$
	$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$				$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$			
<b>VTR</b>	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 20
<b>VTR + 10</b>	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 20
<b>VTR + 20</b>	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20
<b>CASO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras, Tabla 2.2. (INVIAS, 2008)

CASO 1. Los conductores, al salir de la curva anterior, juzgan que la longitud del segmento recto es inferior a la distancia recorrida en aproximadamente cinco segundos (5 s) a la Velocidad de Diseño del Tramo (150 metros en promedio). En este caso no disponen del tiempo suficiente para obtener plena claridad sobre la situación y en consecuencia no alcanzan a realizar ajustes a su velocidad. La condición de seguridad indica que a la curva horizontal siguiente se le debe asignar la misma Velocidad Específica que la asignada a la curva que se acaba de recorrer (INVIAS, 2008).

CASO 2. Los conductores, al salir de la curva anterior, juzgan que la longitud del segmento recto se encuentra entre ciento cincuenta y cuatrocientos metros (150 y 400 m). En este caso ajustan o no su velocidad en función de la percepción que obtienen del trazado más allá de la curva que encuentran ya muy cercana. Si la deflexión de la curva siguiente es menor de cuarenta y cinco grados ( $\Delta < 45^\circ$ ), los conductores alcanzan a tener una noción razonablemente clara del trazado que sigue y no disminuyen la velocidad a la que ya se desplazan por el segmento recto, que es la velocidad a la que salieron de la curva anterior. En consecuencia, se le debe asignar a la curva horizontal una Velocidad Específica igual a la de la curva anterior (INVIAS, 2008).

CASO 3. Los conductores, al salir de la curva anterior, juzgan que la longitud del segmento recto se encuentra entre ciento cincuenta y cuatrocientos metros (150 y 400 m). En este caso ajustan o no su velocidad en función de la noción que obtienen del trazado más allá de la curva que encuentran ya muy cercana. Si la deflexión de la curva siguiente es mayor o igual a cuarenta y cinco grados ( $\Delta \geq 45^\circ$ ), los conductores tienen una percepción incierta del trazado y cautelosamente disminuyen su velocidad por lo que a la curva horizontal se le debe asignar una Velocidad Específica diez kilómetros por hora (10 km/h) menor que la Velocidad Específica de la curva anterior (INVIAS, 2008).

CASO 4. Los conductores, al salir de la curva anterior, juzgan que la longitud del segmento recto se encuentra entre cuatrocientos y seiscientos metros (400 y 600 m). En este caso, el segmento recto es suficientemente extenso para que la velocidad de entrada a la curva siguiente sea independiente de la que se salió de la curva anterior, pero no demasiado, por lo que los conductores ajustan su velocidad a una superior en diez (10) kilómetros por hora respecto a la Velocidad de Diseño del Tramo ( $V_{TR}$ ) (INVIAS, 2008).

CASO 5. Los conductores, al salir de la curva anterior, juzgan que la longitud del segmento recto es mayor de seiscientos metros (600 m). En este caso, en el que el segmento recto por su longitud



relativamente grande estimula a los conductores a incrementar la velocidad, éstos la ajustan a una superior en veinte (20) kilómetros por hora respecto a la Velocidad de Diseño del Tramo ( $V_{TR}$ ) (INVIAS, 2008).

Para asegurar la mayor homogeneidad posible en la velocidad específica de curvas y entretangencias, se obliga a que las velocidades de los elementos que integran un tramo homogéneo sean como mínimo iguales a la velocidad de diseño del tramo ( $V_{TR}$ ) y no superen esta velocidad en más de veinte kilómetros por hora ( $V_{TR} + 20$  km/h) (INVIAS, 2008).

La asignación de la velocidad específica de las curvas horizontales ( $V_{CH}$ ) se debe realizar simulando inicialmente el desplazamiento de un vehículo en un sentido de avance al abscisado y posteriormente en sentido contrario. La velocidad específica que se le asigne como definitiva a una curva horizontal debe ser la mayor que resulte de la simulación en ambos sentidos (aunque exista diferencia de 20 km/h entre direcciones) (INVIAS, 2008).

La velocidad específica de la entretangencia horizontal ( $V_{ETH}$ ) debe ser igual a la mayor de las dos velocidades específicas de las curvas horizontales extremas (INVIAS, 2008). La velocidad específica de la curva vertical ( $V_{CV}$ ), cóncava o convexa, considera la coincidencia con el trazado en planta, si la curva vertical coincide con una curva horizontal que tiene una velocidad específica dada ( $V_{CH}$ ), la velocidad de la curva vertical ( $V_{CV}$ ) debe ser igual a la velocidad específica de la curva horizontal ( $V_{CH}$ ). Si la curva vertical está localizada dentro de una entretangencia horizontal con una velocidad específica dada ( $V_{ETH}$ ), la velocidad de la curva vertical ( $V_{CV}$ ) debe ser igual a la velocidad específica de la entretangencia horizontal ( $V_{ETH}$ ) (INVIAS, 2008). Si la curva vertical está ubicada entre la ETH y una curva horizontal, se le asignará el valor más crítico de velocidad de los elementos en planta (el mayor valor de velocidad).

Finalmente, la velocidad específica de la tangente vertical ( $V_{TV}$ ) es igual a la velocidad específica de la entretangencia horizontal ( $V_{ETH}$ ) (INVIAS, 2008). Si la tangente vertical está ubicada entre la ETH y una curva horizontal, se le asignará el valor más crítico de velocidad de los elementos en planta (el mayor valor de velocidad).

## 2.6. Análisis no paramétricos y comparación entre medianas.

Un análisis no paramétrico es una prueba de hipótesis que no requiere que la distribución de la población se caracterice por ciertos parámetros (distribución normal), de modo que es útil cuando los datos son considerablemente no normales y resistentes a transformaciones (datos de velocidad de operación del presente estudio). En un método no paramétrico, se presupone que la distribución de la que proviene la muestra no está especificada y, con frecuencia, se desea hacer inferencias sobre el centro de la distribución (Minitab, 2019).

Los procedimientos estadísticos no paramétricos se aplican no sólo a observaciones que son difíciles de cuantificar, sino que también son particularmente útiles para hacer inferencias en situaciones en las que existe una seria duda acerca de las suposiciones que son la base de la metodología estándar (Wackerly, Mendenhall, & Scheaffer, 2008).

Los métodos no paramétricos son útiles cuando no se cumple el supuesto de normalidad y el tamaño de la muestra es pequeño ( $n < 30$ ), sin embargo, las pruebas no paramétricas no están completamente libres de supuestos acerca de los datos. Por ejemplo, es fundamental presuponer que las observaciones de las muestras son independientes y provienen de la misma distribución (Minitab, 2019).

### 2.6.1. Relación entre pruebas paramétricas y no paramétricas

La Tabla 17 relaciona las pruebas no paramétricas y sus alternativas paramétricas (siguen una distribución normal):

Tabla 17. Pruebas alternativas.

Prueba no paramétrica	Prueba paramétrica alternativa
Prueba de signos de 1 muestra	Prueba Z de 1 muestra, prueba t de 1 muestra
Prueba de Wilcoxon de 1 muestra	Prueba Z de 1 muestra, prueba t de 1 muestra
Prueba de Mann-Whitney	Prueba t de 2 muestras
Prueba de Kruskal-Wallis	ANOVA de un solo factor
Prueba de la mediana de Mood	ANOVA de un solo factor
Prueba de Friedman	ANOVA de dos factores

### 2.6.2. Análisis de normalidad

Para definir si los datos no siguen una distribución normal, es necesario realizar pruebas de normalidad. Estas consisten en comparar el valor p con el nivel de significancia. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) de 0,05. En una prueba de normalidad, se plantean las siguientes hipótesis (Minitab, 2019):

- $H_0$ : Los datos siguen una distribución normal.
- $H_1$ : Los datos no siguen una distribución normal.

Si el valor  $p \leq \alpha$ : los datos no siguen una distribución normal (se rechaza  $H_0$ ). Si el valor  $p > \alpha$ : la decisión es que no se puede rechazar la hipótesis nula, no existe suficiente evidencia para concluir que los datos no siguen una distribución normal.

### 2.6.3. Tipos de pruebas de normalidad

Las pruebas de Anderson-Darling y Kolmogórov-Smirnov se basan en la función de distribución empírica. La prueba de Ryan-Joiner (similar a la prueba de Shapiro-Wilk) se basa en regresión y correlación. Las tres pruebas tienden a ser adecuadas para identificar una distribución no normal cuando la distribución es asimétrica.

**Prueba de Anderson-Darling:** esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si la diferencia observada es adecuadamente grande, se rechaza la hipótesis nula de normalidad de la población (Minitab, 2019).

**Prueba de normalidad de Ryan-Joiner:** esta prueba evalúa la normalidad calculando la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Si el coeficiente de correlación se encuentra cerca de 1, es probable que la población sea normal. El estadístico de Ryan-Joiner evalúa la fuerza de esta correlación; si se encuentra por debajo del valor crítico apropiado, se rechaza la hipótesis nula de normalidad de la población. Esta prueba es similar a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Minitab, 2019).

**Prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov:** esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si esta diferencia observada es adecuadamente grande, la prueba rechaza la hipótesis nula de normalidad de la población. Si el valor p de esta prueba es menor que el nivel de significancia ( $\alpha$ ), se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que se trata de una población no normal (Minitab, 2019).

### 2.6.4. Prueba de Wilcoxon

Es una prueba usada para hacer pruebas de hipótesis acerca de la mediana. La prueba estadística se basa en el estadístico de Wilcoxon (1945), el cual se calcula de la siguiente manera (Acuña, Edgar):

- Se resta de cada dato el valor de la mediana que se considera en la hipótesis nula.
- Se calcula los rangos de las diferencias sin tomar en cuenta el signo de las mismas (en valor absoluto). En el caso de que exista empate, se asigna un rango promedio a todas las diferencias empatadas.

Finalmente, el estadístico W de Wilcoxon será la suma de los rangos correspondientes a las diferencias positivas.

### 2.6.5. Prueba U de Mann-Whitney

Esta prueba se usa cuando se quiere comparar dos poblaciones usando muestras independientes, es decir, es una prueba alterna a la prueba de t de Student para comparar dos medias usando muestras independientes. También es conocida como la prueba de suma de rangos de Wilcoxon (Acuña, Edgar).

La hipótesis nula es que la mediana de las dos poblaciones es igual; y la hipótesis alterna puede ser que la mediana de la población 1 sea mayor (menor o distinta) de la mediana de la población 2. La Ecuación 44 describe la fórmula para el estadístico U de Mann-Whitney.

$$U = n_1 * n_2 + \frac{n_1 * (n_1 + 1)}{2} - W \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde,  $n_1$ : número de observaciones en la muestra 1;  $n_2$ : número de observaciones en la muestra 2; W: suma de rango para la muestra 1.

### 2.6.6. Prueba de Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis, es una alternativa a la prueba F del análisis de varianza para diseños de clasificación simple. En este caso se comparan varios grupos, pero usando la mediana de cada uno de ellos, en lugar de las medias (Acuña, Edgar).

$H_0$ : La mediana de las k poblaciones consideradas son iguales y  $H_1$ : al menos una de las poblaciones tiene mediana distinta a las otras. La Ecuación 45 describe el estadístico H de Kruskal-Wallis.

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1) \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde, n: número de observaciones;  $n_i$ : número de mediciones en la muestra de la población i;  $R_i$  = suma de rangos para la muestra i, donde el rango de cada medida se calcula de acuerdo con su tamaño relativo en el conjunto general de n.

### 2.6.7. Pruebas de comparaciones múltiples

Una vez realizado el análisis no paramétrico, se debe tener en cuenta que la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), no especifica cuales medianas analizadas son distintas, solo establece que al menos una media es diferente a las otras, por lo tanto el rechazo a la hipótesis nula ( $H_0$ ) no puede usarse como fundamento para aceptar una alternativa en particular (Canavos, 1988). Con el propósito de establecer

las diferencias significativas entre cierto número de medianas, se han estudiado métodos como las pruebas de rango y las comparaciones múltiples por parejas. Estas permiten definir las medianas que difieren y se realizan sobre valores sin corregir (Canavos, 1988).

De acuerdo a la revisión de la literatura realizada en este capítulo, puede concluirse lo siguiente:

- El proceso de simulación de la velocidad específica propuesta en el MDGC (INVIAS, 2008), permite incrementar la velocidad de un elemento geométrico del trazado en planta hasta en 20 km/h, clasificándose como un trazado “pobre” según los umbrales de consistencias de distintos investigadores (Jacob et al., 2013; Lamm & Choueiri, 1987; Lamm et al., 1988, 1986).
- En relación a los resultados de diferentes investigadores (Castro et al., 2011; Garach, 2014; Lamm et al., 1988; Pérez-Zuriaga et al., 2011), se puede establecer que las variables con mayor incidencia en la estimación de la velocidad de operación son:
  - Radio de curvatura.
  - Ángulo de deflexión.
  - Grado de curvatura.
  - Longitud de la curva horizontal.

## Capítulo 3. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe la metodología del proyecto investigativo, la cual se desarrolla en cinco etapas, de la siguiente manera: En la primera etapa se realiza una revisión literaria detallada de estudios de velocidades, buscando, factores que intervienen en cambios de velocidades, metodologías que analizan la consistencia y seguridad vial, teoría de diseño de experimentos y variables estadísticas, entre otros temas (color cian). En la segunda etapa se identifican, bajo criterios técnicos, los tramos de estudio para toma de información de velocidades (color amarillo). En la tercera etapa se realiza la toma de velocidades en campo a condiciones de flujo libre, mediante el uso de GPS cartográfico (color verde). En la cuarta etapa se realiza el procesamiento y análisis de datos (color magenta), y en la etapa final, se describen conclusiones, futuras líneas de investigación y la elaboración del documento final (color azul), ver Ilustración 4.

Ilustración 4. Metodología para el desarrollo de la investigación



La primera etapa contenida en el Capítulo 2 permitió ampliar la comprensión temática relacionada con el objeto de estudio de la investigación, preparando el desarrollo de las actividades posteriores y generando criterios de evaluación más concretos que se verán reflejados en los próximos capítulos.

### 3.1. Selección de tramos de estudio

Esta sección corresponde a la segunda etapa de la investigación, la cual se apoya tanto en la primera etapa de revisión literaria como en el conocimiento previo del investigador, en donde la selección de los tramos de estudio se basó en los siguientes aspectos:

- Carretera rural de dos carriles bidireccional (primaria).
- La vía debe desarrollarse sobre un terreno plano ( $\leq 3\%$ ).
- El tramo debe estar libre de la influencia de intersecciones (500 m antes y después).
- El estado superficial del pavimento no debe presentar cambios (visual).
- La sección transversal del corredor debe ser continua, es decir, los anchos que componen cada elemento de la corona de la vía son fijos (condición encontrada en el estudio).

- Los vehículos que circulan por el tramo deben transitar bajo velocidades a flujo libre.

El proceso de selección de los tramos de estudio se basó en información cartográfica digital libre del sur occidente colombiano, evaluados en los aspectos anteriormente mencionados, recolectando un total de 50 curvas horizontales correspondiente a la vía Panamericana ruta 25 en el sur del Departamento del Cauca (sector Patía – Galíndez, municipio del Patía).

### 3.2. Recopilación de información primaria

La recolección de información primaria hace referencia a la toma de velocidades y la geometría de los tramos viales seleccionados. Ambas actividades de campo se desarrollaron en el marco de la tercera etapa de la investigación, las cuales se realizaron en dos fases. La primera de ellas está orientada a la calibración y ajuste de la metodología, en donde se toman velocidades con tres diferentes equipos: radar, aeronave no tripulada (Drone) y GPS, siendo este último, el que garantizó la eficiencia en las mediciones. Esta fase permitió la calibración de los equipos y del personal de medición, determinando así el rendimiento de la actividad y la confiabilidad de los datos recolectados. Las velocidades de operación se obtuvieron mediante la instrumentación de un vehículo de gama media conducido por 31 personas (conductores voluntarios) con edades entre 20 y 60 años (grupo heterogéneo). Para obtener las velocidades de operación, cada conductor realizó un único recorrido en sentido de avance (Patía – Galíndez) y sentido en contra (Galíndez – Patía), desconociendo el segmento de medición real, pues los conductores no pertenecían a la zona de estudio; el investigador estuvo presente (copiloto) en cada uno de los recorridos, configurando el equipo (GPS) y estableciendo la veracidad de las velocidades (mediciones aceptadas o rechazadas). Adicionalmente, se utilizaron herramientas digitales (software) para el procesamiento de los datos recolectados en campo, llevando a determinar la confiabilidad de los datos.

La segunda fase (color amarillo en la Ilustración 4), se basa en la recopilación de datos destinados a la elaboración de análisis estadísticos, optando por el GPS cartográfico de 0.1 m de precisión como dispositivo de medición de la velocidad, el cual cuenta con una antena externa que incrementa la recepción satelital. Este equipo permite la toma de datos sucesivos registrados para cada elemento geométrico de la carretera en un alineamiento horizontal, de manera dinámica cada un segundo, obteniendo mayor eficiencia y menores costos (viáticos del personal adicional) con resultados similares (comparado con drone y radar). De igual forma, se realizó la recolección de información geométrica, que permite asociar las características del alineamiento horizontal con las velocidades registradas por GPS a lo largo del recorrido del vehículo por el tramo en estudio. Los elementos viales medidos en campo se agrupan en sección transversal, alineamiento horizontal y alineamiento vertical.

Los puntos de interés para análisis estadístico relacionados con la geometría de la vía de acuerdo al estado del arte, son los siguientes: el punto medio de la entretangencia de entrada, el punto de inicio de la curva horizontal (PC), el punto medio de la curva horizontal (MC), el punto final de la curva horizontal (PT) y el punto medio de la entretangencia de salida. La ubicación de estos puntos, fue obtenida a partir de la restitución geométrica del alineamiento horizontal, con la ayuda de imágenes satelitales de libre acceso y el registro del recorrido del GPS en coordenadas geográficas registradas cada segundo.

### 3.3. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y el análisis de los datos recolectados en la etapa previa, inició con la organización de los recorridos registrados con el GPS, de tal forma que las coordenadas geográficas cada segundo del recorrido son transformadas a coordenadas planas Gauss Krueger, referenciadas al origen Oeste del sistema MAGNA-SIRGAS (Colombia). Todos los puntos fueron posicionados en el plano de restitución geométrica elaborada a partir de mapas satelitales libres. Esta actividad permitió asignar las velocidades específicas en el sentido de avance y de contra de acuerdo a los criterios establecidas en el MDGC (INVIAS, 2008), para así clasificar las curvas del alineamiento horizontal.

Conociendo la ubicación de los puntos de interés en la restitución geométrica, se estimó la velocidad de operación (a flujo libre), calculándolos a partir de la razón entre la distancia entre coordenadas sucesivas registradas con GPS en metros y el tiempo de registro del mismo (1 s). La información obtenida fue organizada en una hoja de Excel para realizar el análisis de los datos, partiendo del análisis descriptivo de las variables independientes (geometría horizontal) y de la variable dependiente (velocidad de operación), y terminando con un análisis de varianza.

El análisis descriptivo de los datos geométricos obtenidos a partir de la restitución geométrica fue aplicado en el sentido de avance y contra del abscisado, considerando el promedio, la desviación estándar, la varianza, el mínimo y el máximo, para las variables de la geometría horizontal: radio de curvatura, longitud de la curva, externa, deflexión y ETH. De igual forma, se determinó el coeficiente de correlación entre las características geométricas mencionadas.

Posteriormente, se analizaron los datos de velocidad organizados de acuerdo al caso que representan según la metodología de asignación de velocidades específicas del MDGC (INVIAS, 2008), en donde se calculó el promedio, la desviación estándar, la varianza, el mínimo y el máximo para el percentil 85 ( $V_{85}$ ) de las observaciones tomadas en los puntos de interés en sentido de avance y sentido en contra del abscisado.

En complemento, se realizaron análisis del comportamiento del gradiente de velocidad de operación cuando se condicionan los parámetros geométricos (Longitud de curva, Radio, Entretangencia, Externa, deflexión), considerando el sentido de circulación de los vehículos (avance y contra). Estos son denominados como Variables que afectan el  $\Delta V_{85}$ , estudiados por cada caso aplicable al terreno plano del MDGC (INVIAS, 2008).

Esta etapa de la investigación contempló el estudio del análisis de Kruskal-Wallis para los casos de estudio, con el fin de determinar si las condiciones de velocidad varían según la geometría de la vía en los puntos de interés. Para esta labor se nombraron los casos para cada sentido de circulación del uno (1) al ocho (8) y los puntos de estudio del uno (1) al siete (7) y se desarrolló el análisis considerando, la hipótesis nula, hipótesis alterna y el nivel de significancia (5%).

Posteriormente se realizó un análisis estadístico general, considerando todas las variables independientes (Lc, R, ETH, E y  $\Delta$ ) y la combinación de las mismas, con respecto a la variable dependiente (gradiente de velocidad de operación sucesivo  $\Delta V_{85}$ ). Se efectuó una comparación de medianas (pruebas equivalentes a las Post Hoc), y un análisis Kruskal-Wallis.

Como etapa final se realizaron las conclusiones y recomendaciones de la investigación, cumpliendo así con los objetivos planteados en el presente proyecto.

Cabe mencionar que esta metodología permitió analizar las características geométricas que generan variaciones de velocidad en elementos geométricos consecutivos (Entretangencias y curvas

horizontales), por medio del perfil de velocidad de operación, de acuerdo con los criterios establecidos, de un tramo de carretera, a partir de la restitución geométrica, el tipo de terreno y la velocidad de operación, de los datos recolectados en campo. Un perfil de velocidad es esencialmente un gráfico de velocidades de operación en el eje vertical versus la distancia a lo largo de la carretera en el eje horizontal y en el sentido de avance; las inconsistencias de diseño se identifican en el perfil de velocidad cuando hay diferencias en las velocidades de operación entre las características sucesivas de la carretera (Fitzpatrick et al., 2000).



## Capítulo 4. RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE DATOS

---

El presente capítulo contiene el proceso de recopilación y descripción de los datos, iniciando con el proceso para la identificación y selección de los tramos de estudio, para luego detallar la recopilación de datos geométricos y de velocidad, y finalizando con el procesamiento de los datos de velocidad de operación.

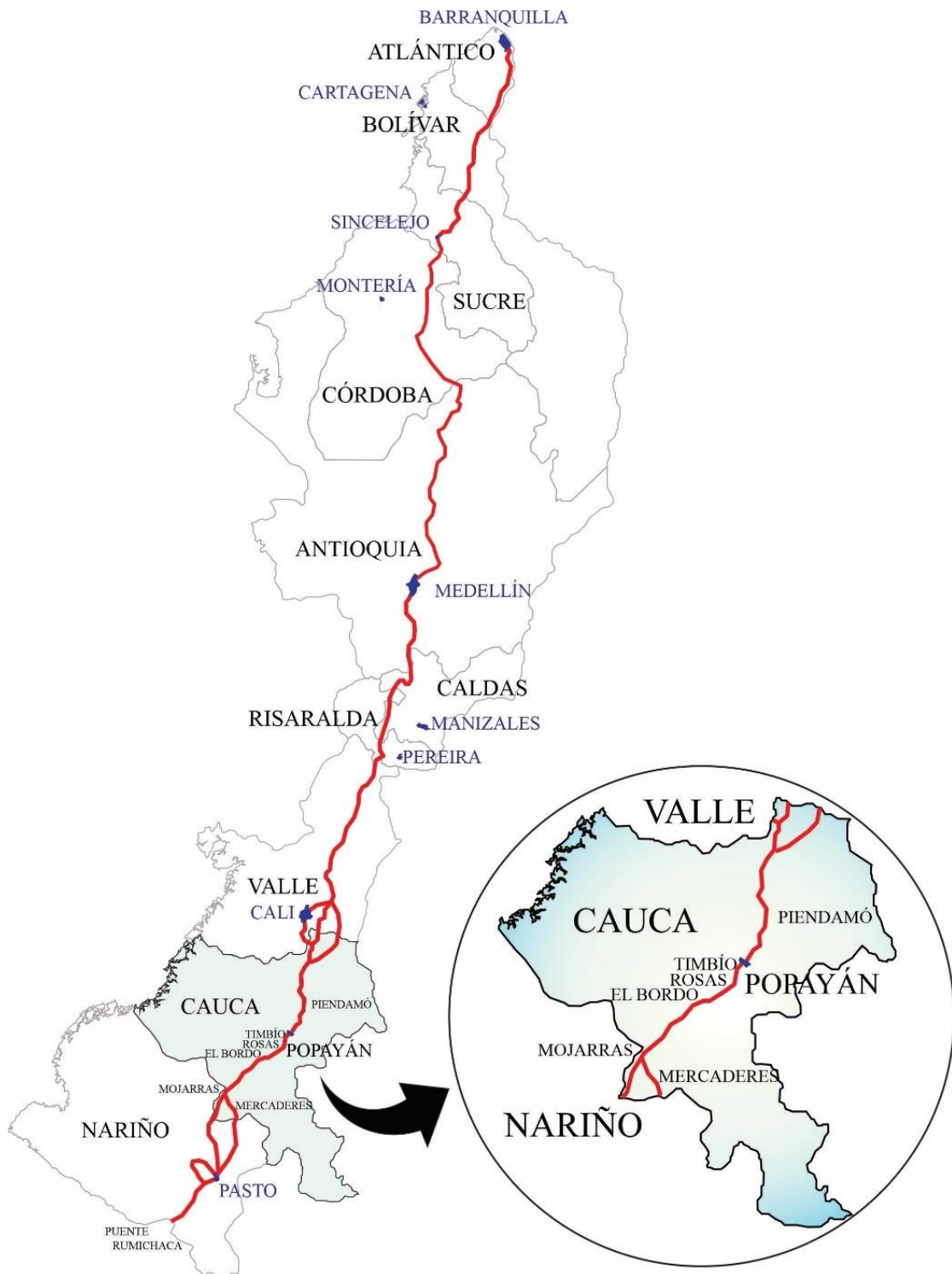
### 4.1. Identificación y selección de tramos de estudio

En Colombia los servicios de transporte se realizan de modo: terrestre, ferroviario, fluvial, marítimo y aéreo. El transporte terrestre, atraviesa la geografía nacional de Sur a Norte y viceversa a través de corredores troncales y de Oriente a Occidente y viceversa a través de corredores transversales. En este orden de ideas, la troncal Occidente, la troncal del Magdalena y la troncal del Caribe conforman la columna vertebral en términos de movilidad de pasajeros y de carga del país. La troncal Occidental o ruta nacional 25 (carretera Panamericana), atraviesa de Sur a Norte el País, desde el puente internacional de Rumichaca (en el Departamento de Nariño, que marca el límite entre Colombia y Ecuador), y desde allí y hacia el norte, este corredor vial comunica ciudades como San Juan Pasto, Popayán, Santiago de Cali, la región del Eje Cafetero, Medellín, Sincelejo y finalmente Barranquilla, en donde se conecta con la troncal del Caribe (ver Ilustración 5).

El estudio se realizó en la carretera Panamericana (Colombia) en el Sur del Departamento del Cauca, entre Popayán y San Juan de Pasto, también denominada como ruta nacional 25 (ver Ilustración 5), sector 2503, comprendida en el tramo Mojarras – Popayán (Troncal de occidente), que atraviesa Mojarras (Mercaderes), Galíndez (Patía), El Estrecho (El Bordo), Patía (El Bordo), La Florida (El Bordo), El Bordo, Piedrasentada (El Bordo), Párraga (Rosas), Rosas, Lomagrande (Rosas), Timbío y Popayán, administrada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), con una longitud aproximada de 120 km (ver Ilustración 6). El tramo de estudio se localiza entre el sector del Patía y Galíndez, municipio del Patía con una longitud aproximada de 21 km.

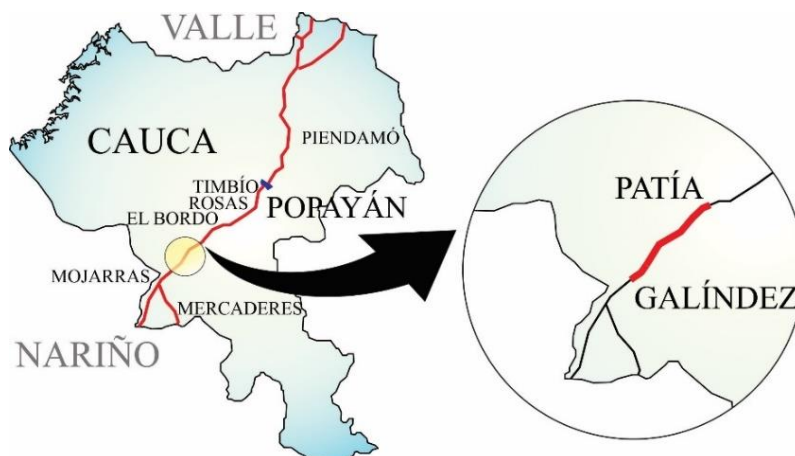
De esta forma, la ruta nacional 25, objeto de este estudio se analiza desde el contexto regional, nacional e internacional dada la relevancia en el transporte de carga y de pasajeros desde y hacia el centro del país; sin embargo, este corredor no cuenta con las características geométricas, de seguridad vial, capacidad y nivel de servicio de un corredor de primer orden.

Ilustración 5. Ruta nacional 25.



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de Google Chrome.

Ilustración 6. Sector 2503. Localización específica del estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de Google Chrome.

La infraestructura vial de la ruta 2503 es anterior a la normatividad vigente (Manual de Diseño Geométrico de Carreteras INVIAS 2008) y, como tal, se compone de una sucesión de tramos rectos y curvas, sin la presencia de elementos de transición. El alineamiento horizontal es sinuoso, con entretangencias cortas, especialmente en su paso por terrenos montañosos. La variabilidad de los radios de las curvas horizontales es notoria, pues el trazado trata de ajustarse a las condiciones geográficas de la zona.

#### 4.1.1. Criterios de selección de los tramos

La selección del sector a estudiar se basó en los criterios establecidos en la Tabla 18.

Tabla 18. Criterios de selección de los tramos

No.	Característica	Criterio	No.	Característica	Criterio
1	Tipo vía	Carretera primaria	7	Presencia de controles de velocidad	SR-30 (60 km/h)
2	Ubicación	Rural	8	Influencia de intersecciones	Ninguna
3	Calzada	Una	9	Tipo de terreno	Plano.
4	Carriles	Dos	10	Sección transversal	Continua
5	Sentido	Bidireccional.	11	Condición de circulación vehicular	A flujo libre.
6	Estado del pavimento	En buenas condiciones			

#### 4.1.2. Selección preliminar de los tramos de estudio

En oficina se realizó un estudio preliminar mediante el uso de herramientas digitales y programas computacionales como: Google Earth, Google Maps, AutoCAD y Excel. Esta actividad consistió en rastrear la carretera Panamericana hacia el Norte (Popayán – Santiago de Cali) y al Sur (Popayán – San Juan de Pasto) con zonas de terreno plano ( $0\% \leq \text{pendiente} \leq \pm 3\%$ ), en el Departamento del Cauca. Mediante la información satelital proporcionada por el programa Google Earth, se definieron los tramos que corresponden a carretera en terreno plano, realizando el análisis del perfil longitudinal. Esta herramienta también permitió verificar las siguientes características iniciales: (1) que corresponda a una carretera, (2) ubicada en la zona rural del Cauca, (3) de una sola calzada, (4) con dos carriles de circulación (5) bidireccionales.

Ilustración 7. Selección preliminar de tramos de estudio.



Fuente: Google Earth

De esta etapa se identificaron los tramos viales dentro del Departamento del Cauca que cumplen con los criterios mencionados, encontrando tan solo dos secciones a lo largo de la vía Panamericana, uno ubicado en el norte del departamento y otro en el sur; sin embargo, por condiciones de seguridad fue necesario continuar con el tramo al sur del departamento, correspondiente al sector de Patía-Galíndez. La Ilustración 7 muestra la localización específica de las mediciones de velocidad en planta, y el perfil longitudinal de terreno con base al modelo digital de elevaciones (MDE) de la vía en mención.

La pendiente longitudinal en el sector Patía-Galíndez es suave que clasifica la zona como terreno plano – ondulado según los criterios del MDGC (INVIAS, 2008). Se caracteriza por tener volúmenes de tráfico medio, una homogeneidad geométrica suficiente para no inducir maniobras abruptas por parte de los usuarios y la ausencia de intersecciones y de accesos privados en las áreas cercanas.

La Tabla 19 describe valores de inclinación, longitud y cotas del perfil longitudinal de terreno en la zona de estudio (Patía – Galíndez, Municipio del Patía).

Tabla 19. Condiciones de geometría del perfil longitudinal

Ítem	Valor
Cota mínima	596 msnm
Cota promedio	612 msnm
Cota máxima	635 msnm
Longitud	19 km
Ganancia/pérdida de elevación	176 m /-209 m
Inclinación máxima	±3,0 %
Inclinación promedio	±1,5 %

### 4.1.3. Reconocimiento en campo

Una vez seleccionado el tramo de carretera, se realizó una visita de campo con la ayuda de un GPS que rastreó el corredor (toma de coordenadas) permitiendo la visualización de todo el tramo con el fin de establecer las curvas horizontales adecuadas para el estudio. Durante el recorrido se tomaron datos de coordenadas geográficas de las curvas horizontales potencialmente adecuadas. De igual forma, se analizaron los elementos geométricos consecutivos y la visibilidad al interior de la curva horizontal.

Adicionalmente, se verificó el cumplimiento de los siguientes criterios:

- Una superficie de pavimento en buenas condiciones
- La circulación vehicular sea a flujo libre.
- La sección de carretera, debe estar fuera de la influencia de intersecciones o cualquier característica física que pueda originar riesgos, como puentes estrechos, población civil y comercio en general. Por tal motivo se excluyen del estudio la geometría 500 m antes y después del paso por poblaciones de (Calero, 2015): Patía, El Estrecho y Galíndez (Municipio del Patía). En los tramos restantes no se presentan accesos a la vía principal.
- El ancho de carril, calzada y berma debe ser constante a lo largo del corredor de estudio. Si se presenta ausencia de bermas o cunetas, se debe garantizar la continuidad de la sección antes y después del sector en estudio.
- La entretangencia y las curvas horizontales posteriores deben tener las mismas condiciones de pavimento, geometría, drenaje y topografía.

## 4.2. Recopilación de datos

Definido el tramo de estudio en el sector de Patía – Galíndez, se procedió a recolectar la información necesaria para esta etapa de la investigación. A continuación, se describen las actividades realizadas para la recopilación de datos geométricos y de velocidad, que llevaron a la conformación de la base de datos.

### 4.2.1. Recopilación de datos geométricos

La recopilación de datos geométricos se obtuvo en campo y en oficina, consignándola en una hoja de Excel organizada de acuerdo a los elementos que componen la sección transversal, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical. Para cada medición se registró la fecha, hora y clima.

Se recolectó la información de 50 curvas horizontales. La Tabla 20, describe los valores extremos para las curvas horizontales incluidas en el estudio. La Tabla 21, muestra los valores promedio de curvatura horizontal y geometría de la sección transversal.

Tabla 20. Variabilidad geométrica de las curvas analizadas.

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo
Radio (m)	382,90	308,10	94922,40	57,80	272,10	1678,10
ETH (m)	208,50	241,80	58451,10	13,10	119,00	1310,30
Lc (m)	111,41	38,14	1454,65	40,53	109,24	191,48
E (m)	6,62	4,86	23,66	0,26	5,10	23,88
D (°)	25,58	16,44	270,42	2,00	20,00	66,00

Tabla 21. Condiciones geométricas de las curvas analizadas.

VARIABLE EVALUADA	VALOR PROMEDIO
Longitud Patía – Galíndez (m) :	21761,9
Ancho Carril Derecho (m) :	3,65
Ancho Carril Izquierdo (m) :	3,65
Ancho Calzada (m) :	7,3
Ancho Berma Derecha (m) :	0,8
Ancho Berma Izquierda (m) :	0,8
Ancho Berma (m) :	0,8
Radio (m) :	371,7
Número de Curvas Horizontales :	50
Número de Curvas Horizontales por Km :	2,9
Curvatura Horizontal (°/km) :	77,6

A continuación, se presentan los elementos que se recopilieron durante esta etapa.

#### 4.2.1.1. Sección transversal

Los elementos que componen la sección transversal (ver Ilustración 8), registrados durante la toma de información geométrica en campo son:

- Ancho del carril derecho
- Ancho del carril izquierdo
- Ancho de la calzada
- Ancho de la berma derecha
- Ancho de la berma izquierda
- Bombeo
- Condición de señalización vertical (velocidad señalizada límite).

Ilustración 8. Elementos de la sección transversal



Fuente: Elaboración propia a partir de fotografía en la zona de estudio.

La medición de la sección transversal se realizó mediante el uso de implementos topográficos como jalones, cinta métrica y piquetes.

#### 4.2.1.2. Alineamiento horizontal

Los elementos geométricos asociados al alineamiento horizontal fueron recolectados a partir de restitución geométrica de las poligonales generadas al registrar el recorrido del vehículo con el GPS y en complemento de imágenes satelitales libres para verificar el trazado horizontal. Estos elementos son:

- Radio
- Ángulo de deflexión
- Entretangencia
- Longitud de curva
- Externa
- Velocidad señalizada (SR-30: 60 km/h)


### 4.2.1.3. Alineamiento vertical

Para obtener los elementos necesarios relacionados con el alineamiento vertical se generó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), a partir de mapas satelitales libres y el recorrido vehicular registrado con el GPS. Utilizando el MDE se determinó la pendiente longitudinal a fin de corroborar la clasificación del terreno de acuerdo al MDGC (INVIAS, 2008)

Cabe mencionar que los elementos de la geometría de la vía fueron corroborados mediante la medición en campo con el uso de implementos topográficos (jalones, cinta métrica, piquetes, nivel Abney, nivel de precisión y mira) para puntos aleatorios del tramo vial seleccionado, teniendo un resultado afirmativo en la validación de la geometría. Por ejemplo, se realizó la nivelación simple con el nivel Abney para determinar las pendientes de las tangentes de entrada y salida de la curva en análisis. Lo anterior con el fin de confirmar la condición inicial para la selección del tramo de análisis correspondiente a terreno plano. En la Tabla 22, se describe la información primaria recolectada para una curva horizontal validada.

Tabla 22. Ficha de caracterización tipo. Curva horizontal sector El Estrecho

CURVA HORIZONTAL SECTOR EL ESTRECHO (PATÍA)	
Lugar	PR 27
Departamento	Cauca
Municipio	Patía
Tramo	2503
Fecha	1 de junio de 2018
Hora	11:00 a. m.
Sentido	El Bordo - El Estrecho
Receptor GPS	Mobile Mapper Magellan 6
Coordenadas planas N	718903 m
Coordenadas planas E	1001611 m
Clima	Despejado
Tipo terreno	Plano
Pendiente	3,70%
Zona de sobrepaso	NO
Ancho carril	3,65 m
Ancho berma	0,8 m
Longitud de la curva	72,3 m
Peralte	7 % (Abney)
Observación	Cerco a 2 m lado Izquierdo



### 4.2.2. Recopilación de datos de velocidad

La recolección de datos de velocidad se realizó en dos etapas. Inicialmente, esta información fue destinada a calibración de equipos, calibración de personal, manejo de herramientas digitales (software) y verificación en campo de las características geométricas establecidas para el desarrollo del estudio. Esta etapa se realizó entre los meses de agosto y octubre del año 2018. Posteriormente, en los meses de noviembre del año 2018 y febrero del año 2019, se recolectó datos de velocidad destinados a los modelos estadísticos, obtención de perfiles de velocidad y validación de estudios internacionales similares.

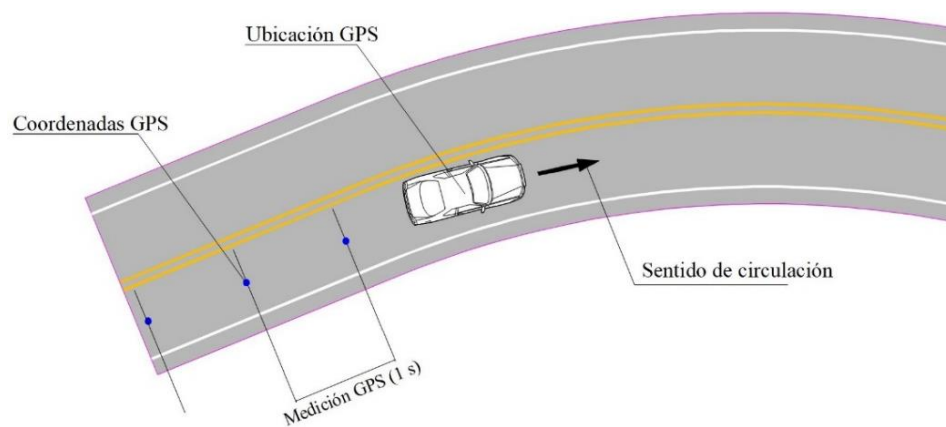
Para la toma de velocidades se optó por el uso de dispositivos GPS, debido a la facilidad con que registra datos sucesivos (coordenadas geográficas) para cada elemento geométrico de la carretera. Los datos de velocidad (variación de la distancia por unidad de tiempo) se obtienen mediante mediciones continuas de coordenadas geográficas (cada 1 s) con GPS equipado con antena externa que es transportado en un automóvil estándar de clase media y a velocidad de flujo libre. Se decidió definir la población de conductores con edades comprendidas entre 20 y 60 años.

La toma de datos se llevó a cabo durante el día, en condiciones meteorológicas de clima templado y de pavimento seco. No se tuvieron en cuenta los factores condicionantes debidos al tráfico, motociclistas, vehículos comerciales o pesados, ni los automóviles con espaciamiento de menos de 5 segundos (condiciones de flujo libre) (Glennon & Harwood, 1978). El parámetro de consistencia de diseño se basa en mediciones de velocidad de operación continua, a través de la utilización de un dispositivo GPS ubicado al interior del vehículo de gama media. La relación entre velocidad medida y velocidad real fue constatada mediante el uso de radares de mano (aproximación a 1 km/h) y mediante un análisis “prueba T de dos muestras” se definió la similitud de las desviaciones de las muestras.

En los segmentos seleccionados para el estudio se realizó la toma de datos usando mediciones continuas de velocidad de operación obtenidas con GPS. Para la toma de datos se precisó de un rastreador GPS, alimentado eléctricamente mediante pilas triple A (AAA) recargables. El dispositivo rastreador utilizado se basó en la señal de mínimo 12 satélites, con una PDOP entre 2 y 5, registrando cada segundo (1 s) los datos de latitud, longitud, altitud, en ambos sentidos de circulación de la carretera, como se muestra en la Ilustración 9.

Considerando las condiciones a flujo libre que presenta el tramo seleccionado, la variación de la velocidad medida está influenciada por las condiciones geométricas de la vía en planta.

Ilustración 9. Recopilación de datos. Coordenadas GPS.





Una vez realizadas las mediciones, mediante una salida USB, conectada directamente desde el equipo a un ordenador, fue posible realizar la descarga de los datos registrados (archivos tipo \*.Shp).

Los datos totales recopilados se procesaron para obtener el percentil 85 de los valores de las velocidades ( $V_{85}$ ) en los puntos de geometría de interés: PC (punto de inicio de la curva), MC (punto medio de la curva), PT (punto final de la curva) y ETH/2 (punto medio de la entretangencia de entrada).

### 4.3. Procesamiento de datos

A partir de la recolección de información primaria se realizó el procesamiento de datos, contemplando el tamaño de la muestra, el procesamiento de coordenadas del GPS, datos de velocidad y la conformación de una base de datos.

#### 4.3.1. Tamaño de la muestra

Oppenlander et al. (1961), determinaron el número mínimo de observaciones requeridas para la estimación de varios percentiles de velocidad del vehículo, basado en el supuesto de que los datos de velocidad puntual tienen una distribución aproximadamente normal. Los investigadores definieron una ecuación para estimar el tamaño de muestra requerido en términos de percentil, límite de tolerancia, nivel de confianza deseado y desviación estándar (ver Ecuación 46). La desviación estándar de las velocidades es la única variable en la determinación del tamaño de la muestra que está directamente influenciada por las velocidades vehiculares.

$$n = \frac{v^2 * S^2 * (2 + u^2)}{2 * d^2} \quad \text{Ecuación 46}$$

Dónde,  $n$  = tamaño mínimo de la muestra;  $v$  = desviación normal correspondiente al nivel de confianza deseado (constante  $K$ );  $S$  = desviación estándar de la muestra de velocidades (km/h);  $u$  = desviación normal correspondiente al percentil a estimar ( $V_{85} = 1,44$  km/h);  $d$  = error normal permitido en la estimación de la velocidad media (km/h).

El Manual de Diseño Geométrico para Carreteras de Colombia (INVIAS, 1998) recomienda que: si se ha efectuado un análisis previo de velocidades en el lugar del estudio (muestra piloto), la desviación normal ( $S$ ) de las velocidades y el error normal ( $d$ ) de la media pueden ser de utilidad para determinar el tamaño mínimo ( $n$ ) que conviene adoptar de una muestra, bajo un nivel de confianza dado a través de la constante  $K$  ( $v$ ). En casos en los cuales no se hayan efectuado estudios anteriores y debido a que la variabilidad en las medidas de dispersión de velocidades es limitada, se sugiere una desviación normal promedio de 8,0 km/h, como valor empírico para velocidades de punto en cualquier tipo de vía y tránsito; sin embargo, el manual de estudios de tráfico uniforme (FDOT, 2016) recomienda valores de desviación estándar de acuerdo al tipo de carretera y el número de carriles de acuerdo a la Tabla 23.

Tabla 23. Desviación estándar promedio para el tamaño de la muestra ( $S$ )

Áreas de tráfico	Tipo de carretera	mph	km/h
Rural	dos carriles	5,3	8,5
	cuatro carriles	4,2	6,8
Semi-Urbano	dos carriles	5,3	8,5
	cuatro carriles	5,3	8,5
Urbano	dos carriles	4,8	7,7
	cuatro carriles	4,9	7,9

Fuente: Manual on Uniform Traffic Studies (FDOT, 2016).

El nivel de confianza (K) representa la probabilidad de que la diferencia entre la velocidad media calculada de la muestra y la velocidad de operación ( $V_{85}$ ) en la ubicación del estudio sea menor que el error permitido. La Tabla 24 proporciona los valores de K correspondientes para los niveles de confianza seleccionados (FDOT, 2016).

Tabla 24. Constante correspondiente al nivel de confianza

Contante k	Nivel de confianza (%)
1,50	86,6
1,64	90,0
1,96	95,0
2,00	95,5
2,50	98,8
2,58	99,0

Fuente: *Manual on Uniform Traffic Studies* (FDOT, 2016)

Finalmente, el error permitido puede variar de  $\pm 1,6$  km/h a  $\pm 8,0$  km/h (FDOT, 2016).

Como en los sitios seleccionados, no se logró obtener información de estudios previos, se siguió la recomendación del Manual de Estudios de Tráfico (*Manual on Uniform Traffic Studies*) (FDOT, 2016) de tomar 8,5 km/h como desviación estándar (S) y como error normal permitido (d) 3,583 km/h, con un nivel de confianza del 90% (ver Tabla 24) obtenemos que el tamaño de la muestra es (Ecuación 47):

$$n = \frac{1,64^2 * 8,5^2 * (2 + 1,44^2)}{2 * 3,583^2} \approx 31 \quad \text{Ecuación 47}$$

En cumplimiento con el tamaño de la muestra del percentil 85, se tienen 31 observaciones de velocidad medidas en campo para el estudio.

### 4.3.2. Procesamiento de coordenadas GPS

Inicialmente se realizó la generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), mediante el uso de software especializado. Para ello, fue necesario importar el archivo generado por el GPS (archivo Shape file), y realizar una conexión con los mapas satelitales libres a fin de generar el MDE. El mapa fue configurado de acuerdo a las condiciones de país: Datum WGS84, Huso MAGNA SIRGAS Oeste.

Posteriormente, se exportaron las coordenadas en archivos de texto (\*.txt), para realizar la conversión a coordenadas Cartesianas Gauss Krueger referenciadas al origen Oeste del sistema MAGNA-SIRGAS (Colombia).

Para estimar la velocidad de operación (velocidad en la cual los conductores son observados operando sus vehículos bajo condiciones a flujo libre), se debe obtener el percentil 85 de los datos analizados que cumplen con las condiciones iniciales propuestas para el estudio. Esta velocidad se determina con la siguiente expresión (ver Ecuación 48):

$$V = 3,6 * \left[ \frac{\text{Distancia entre coordenadas}}{\text{Tiempo de registro}} \right] \quad \text{Ecuación 48}$$

Dónde, V: Velocidad de operación en el punto de análisis (km/h); d: Distancia entre coordenadas sucesivas registradas con GPS (m); t: Tiempo de registro del GPS (1 s).

### 4.3.3. Datos de velocidad de operación

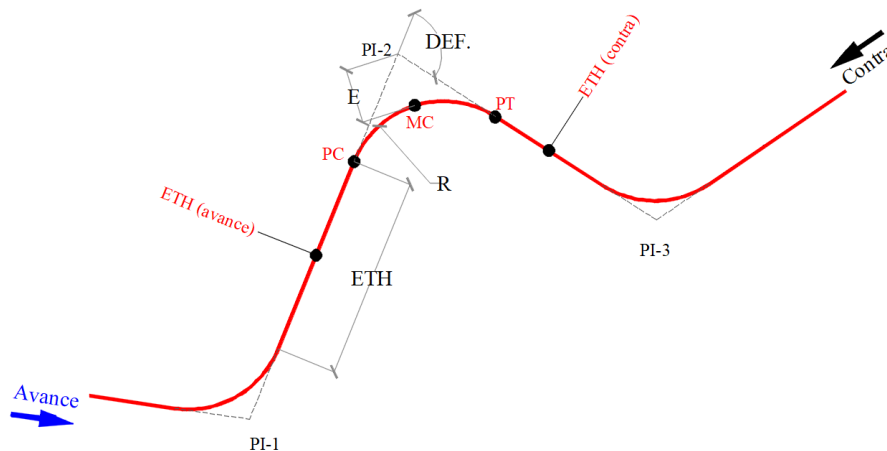
Los datos de velocidad de operación fueron obtenidos a partir de la distancia entre coordenadas registradas por el GPS para cada lectura de 1 s, los cuales fueron digitalizados en un archivo tipo - Excel, y se compilaron en una base de datos que registró todas las mediciones realizadas para el desarrollo de la investigación.

El procesamiento de los datos de velocidades de operación en cada punto de interés de la geometría se realizó mediante la interpolación cada 0,5 m de las coordenadas tomadas con GPS. Este cálculo se realizó mediante el software AutoCAD Civil 3D con la herramienta “Feature Line” que permite dibujar una polilínea en tres dimensiones (3D POLY), correspondiente a las de coordenadas Norte, Este y Velocidad e interpolar la velocidad cada 50 cm, mostrando una etiqueta a lo largo de la restitución geométrica.

### 4.3.4. Restitución geométrica

Con los datos de coordenadas procesados, se realizó un trazado del eje en planta, bajo la condición de que la poligonal proyectada se ajuste a los puntos GPS medidos en campo (criterio de diseño vial en vías existentes, ajuste con respecto al eje). Los puntos que se tomaron como base del alineamiento proyectado, fueron medidos a una velocidad constante, menor a 30 km/h, con el fin de densificar la toma de datos, y mediante el uso de software especializado, se obtiene la geometría en planta del alineamiento (PC, PT, MC, Lc, deflexión, radio, ETH, externa, etc.) ver Ilustración 10

Ilustración 10. Geometría de curva horizontal



### 4.3.5. Asignación de velocidades específicas

Una vez definido el alineamiento de la zona en estudio, se realizó el proceso de asignación de velocidades específicas en sentido de avance y de contra, con el objeto de clasificar las curvas horizontales del alineamiento. Ver numeral 2.5 Velocidades específicas en Colombia, resumidos en la Tabla 16.

Para esta actividad se tiene una  $V_{\text{Límite}}$  de 60 km/h, obtenida de la señalización reglamentaria de velocidad SR-30 a lo largo del corredor. Es de mencionar que, en Colombia la velocidad señalizada corresponde a la velocidad de diseño del tramo homogéneo, exceptuando zonas por pasos por puentes, zonas escolares o recreativas y túneles. Para la simulación en sentido de avance se toma como valor

inicial ( $V_{CH-1}$ ) la velocidad medida en campo con GPS, 200 m antes de la zona de estudio. De igual manera, se asignó esta variable para el sentido contrario.

La Tabla 25, muestra la clasificación de la curvatura horizontal estudiada (Sector Patía-Galíndez, Municipio del Patía) de acuerdo a los criterios de la metodología colombiana.

Tabla 25. Agrupación de curvas horizontales según casos de estudio

CASO	No. Curva horizontal (PI) – Sentido de avance
1	1-14, 20, 22-24, 26, 27, 31, 33, 37, 38, 40, 42, 51, 52, 55-63
2	19, 25, 28, 30, 36, 45, 46, 49, 50, 53, 54
4	21, 34, 39, 41, 43
5	29, 32, 35, 44, 47, 48
CASO	No. Curva horizontal (PI) – Sentido en contra
1 R	63-54, 51, 50, 41, 39, 37, 36, 32, 30, 26, 25, 23, 22, 21, 19, 14-1
2 R	53, 52, 49, 48, 45, 44, 35, 29, 27, 24
4 R	42, 40, 38, 33, 20
5 R	47, 46, 43, 34, 31, 28
R: sentido contrario al abscisado	

Para carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano, no es común encontrar la combinación de un segmento recto con longitud entre 150 y 400 m seguido de una curva horizontal con una deflexión mayor a  $45^\circ$  (Caso 3,  $V_{TR} > 50$  km/h); por tal motivo, no se presentó esta condición en el análisis.

#### 4.3.6. Base de datos

La base de datos se estableció a partir de los datos de geometría y los de velocidad, la cual se originó en cuatro fases descritas a continuación:

Fase 1: De la recopilación de datos de GPS se obtuvieron las coordenadas geográficas: Latitud y Longitud, las cuales fueron organizadas de acuerdo con su fecha de toma en una hoja de Excel.

Fase 2: Las coordenadas geográficas son transformadas a coordenadas planas Gauss Krueger, Huso MAGNA SIRGAS Oeste con la ayuda del software TOPO3 (SOLANO EFRAÍN, 2019). El listado de coordenadas Norte y Este es organizado en columnas en Excel para proceder con el cálculo de la distancia entre puntos sucesivos tomados cada segundo (distancia entre coordenadas). Posteriormente se determinó la velocidad tal como se presentó en la sección 4.3.2, para después concatenar la coordenada: Norte, Este y Velocidad de cada registro, conformando una cartera de puntos sucesivos con 1879 registros para cada sentido de circulación.

Fase 3: A partir de la restitución geométrica del tramo vial en AutoCAD Civil 3D, se utilizó la herramienta “Feature Line” que permite dibujar una polilínea en tres dimensiones (3D POLY), que corresponde a la cartera de coordenadas Norte, Este y Velocidad, creada en la fase previa. Este comando de AutoCAD Civil 3D permitió interpolar la velocidad cada 50 cm, mostrando una etiqueta a lo largo de la restitución, de tal forma que se pudo visualizar la coincidencia entre el punto de interés de la geometría de la vía y la velocidad interpolada. Esta información se consignó en una hoja de Excel en donde se organizaron los datos de la siguiente manera:

- **GEOMETRÍA TRAMO PARADOR PATÍA- PUENTE GALÍNDEZ**
  - PI – Número de curva o punto de intersección de la curva circular.
  - PC (Absc) – Abscisa del punto de comienzo de la curva circular.
  - PT (Absc) – Abscisa del punto final de la curva circular.
  - NORTE – Coordenada norte del PI.

- ESTE – Coordenada este del PI.
- RADIO – Radio de la curva circular.
- ETH – Longitud de la entretangencia horizontal anterior a la curva (sentido de circulación).
- DELTA – Delta de la curva circular.
- Lc – Longitud de la curva circular.
- EXTERNA – Externa de la curva circular.
- **DATOS**
  - No. – Número de la medición con GPS.
- **SENTIDO AVANCE**
  - FECHA – Fecha de medición con GPS.
  - CÓDIGO – Concatenación entre la fecha, número de PI y el caso al que pertenece la curva circular.
  - CASO – Caso al que pertenece la curva circular.
  - V(ETH/2) – Velocidad de operación en el punto medio de la entretangencia horizontal anterior a la curva.
  - VPC – Velocidad de operación en el punto de comienzo de la curva circular.
  - VMC – Velocidad de operación en el punto medio de la curva horizontal.
  - VPT - Velocidad de operación en el punto final de la curva horizontal.
- **SENTIDO CONTRA**
  - FECHA – Fecha de medición con GPS.
  - CÓDIGO – Concatenación entre la fecha, número de PI y el caso al que pertenece la curva circular.
  - CASO – Caso al que pertenece la curva circular.
  - V(ETH/2)-R – Velocidad de operación en el punto medio de la entretangencia horizontal anterior a la curva.
  - VPC-R – Velocidad de operación en el punto de comienzo de la curva circular.
  - VMC-R – Velocidad de operación en el punto medio de la curva horizontal.
  - VPT-R - Velocidad de operación en el punto final de la curva horizontal.

Fase 4: Para cada curva se calculó el percentil 85 de la velocidad ( $V_{85}$ ) según el sentido de circulación. Posteriormente, se generó una tabla que contiene dicha variable en los puntos de interés del alineamiento horizontal.

## Capítulo 5. DESARROLLO Y ANÁLISIS

El presente capítulo aborda los análisis de las variables independientes ‘geometría horizontal’ (se excluye el alineamiento vertical) y de la variable dependiente (velocidad de operación  $V_{85}$ ) organizado de la siguiente manera: inicialmente, se realizaron análisis descriptivos y de correlaciones (coeficiente de correlación) entre variables independientes según la agrupación de las curvas horizontales en los casos de estudio planteados en el MDGC, posteriormente se presenta el análisis descriptivo de las variables que afectan el  $\Delta V_{85}$ , continuando con el análisis de normalidad de la variable dependiente, y finalmente, realizando un análisis estadístico de la metodología de asignación de velocidad específicas del MDGC (INVIAS, 2008), mediante la comparación de medianas para muestras independientes, el test de la suma de rangos de Wilcoxon (test de la U de Mann-Whitney) y el análisis de comparaciones de múltiples medianas: test de Kruskal-Wallis, con el fin de encontrar diferencias significativas de los datos combinados (variables independientes) con respecto a la variable respuesta (gradiente de velocidad de operación  $\Delta V_{85}$ ).

### 5.1. Análisis descriptivo de los datos desagrupados

El análisis de las variables parte de la base de datos organizada desde la etapa de recopilación de información primaria hasta el procesamiento de los datos geométricos y de velocidad.

#### 5.1.1. Variables independientes

Al analizar las características geométricas del alineamiento horizontal se observó que las dimensiones de los elementos en la sección transversal presentan variabilidad. El mayor valor promedio se presenta en el radio de curvatura horizontal, y el menor valor en la externa. Los valores calculados de desviación estándar, muestran un mayor resultado en el radio de curvatura (sentido de avance) y ETH (sentido en contra), mientras que los valores menores fueron observados en la externa (ver Tabla 26).

Tabla 26. Estadísticos descriptivos de la variable independiente.

Avance	Unidad	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	382,9	308,1	94922,4	57,8	1678,1
ETH	m	208,5	241,8	58451,1	13,1	1310,3
Lc	m	111,41	38,1	1454,7	40,5	191,5
Externa	m	6,62	4,8	23,7	0,26	23,9
Deflexión	°	25,58	16,4	270,4	2,00	66,0
Contra (R)	Unidad	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
R_(R)	m	382,9	308,1	94922,4	57,8	1678,1
ETH_(R)	m	235,3	337,1	113657,0	13,1	1975,1
Lc_(R)	m	111,41	38,14	1454,6	40,5	191,5
Externa_(R)	m	6,62	4,8	23,6	0,3	23,9
Deflexión_(R)	°	25,58	16,4	270,4	2,0	66,0

Mediante un análisis de correlación bivariado se encontraron relaciones directas entre: i) Radio-ETH, ii) Radio-Lc, iii) ETH-Lc, iv) Lc-Externa, y v) Externa-Deflexión; relaciones inversas entre: vi) Radio-Externa, vii) Radio-Deflexión, y viii) ETH-Deflexión. En el sentido contrario al abscisado, existen relaciones directas entre: i) Radio-ETH, ii) Radio-Lc, iii) Lc-Externa, y iv) Externa-Deflexión; y relaciones inversas entre: v) Radio-Externa, vi) Radio-Deflexión, y vii) ETH-Deflexión (ver Tabla 27).

Tabla 27. Correlación entre variables independientes.

Correlaciones sentido de avance						
variable	Análisis	R	ETH	Lc	E	D
R	Correlación de Pearson	1	0,657**	0,393**	-0,510**	-0,721**
	Sig. (bilateral)		0,000	0,002	0,000	0,000
ETH	Correlación de Pearson	0,657**	1	0,421**	-0,245205774	-,384**
	Sig. (bilateral)	1,60329E-08		0,001	0,061	0,003
Lc	Correlación de Pearson	0,393**	0,421**	1	0,367**	-0,040200785
	Sig. (bilateral)	0,002069024	0,001		0,004	0,762
E	Correlación de Pearson	-0,510**	-0,245205774	0,367**	1	0,861**
	Sig. (bilateral)	3,70187E-05	0,061	0,004		0,000
D	Correlación de Pearson	-0,721**	-0,384**	-0,040200785	0,861**	1
	Sig. (bilateral)	1,16179E-10	0,003	0,762	0,000	
Correlaciones sentido en contra						
variable	Análisis	R	ETH	Lc	E	D
R1	Correlación de Pearson	1	0,282*	0,393**	-0,510**	-0,721**
	Sig. (bilateral)		0,031	0,002	0,000	0,000
ETH1	Correlación de Pearson	0,282*	1	0,189798628	-0,186910321	-0,281*
	Sig. (bilateral)	0,03060393		0,150	0,156	0,031
Lc1	Correlación de Pearson	0,393**	0,189798628	1	0,367**	-0,040200785
	Sig. (bilateral)	0,002069024	0,150		0,004	0,762
E1	Correlación de Pearson	-0,510**	-0,186910321	0,367**	1	0,861**
	Sig. (bilateral)	3,70187E-05	0,156	0,004		0,000
D1	Correlación de Pearson	-0,721**	-0,281*	-0,040200785	0,861**	1
	Sig. (bilateral)	1,16179E-10	0,031	0,762	0,000	
*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).						
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).						

### 5.1.2. Variable dependiente

Al analizar la variable en cada uno de los puntos considerados en el estudio (ver Ilustración 10), se observó que el promedio presenta su mayor valor en la ETH/2, y su menor valor en el MC. La desviación estándar muestra mayor valor en el PT (sentido de avance) y en el ETH/2 (sentido en contra), mientras que los valores mínimos fueron observados en el PC (avance) y PT (contra) (ver Tabla 28).

Tabla 28. Estadísticos descriptivos de la variable dependiente ( $V_{85}$ ).

Avance	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	74,6	8,3	69,0	53,8	87,3
PC	72,7	7,3	53,0	55,0	82,6
MC	71,6	7,7	59,0	55,4	83,0
PT	72,8	8,3	69,6	52,2	84,9
Contra	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2_(R)	77,0	8,0	64,5	57,4	91,8
PT_(R)	75,0	7,1	51,0	58,6	86,3
MC_(R)	73,3	7,9	63,0	53,9	88,0
PC_(R)	74,9	7,7	58,9	57,7	90,1
* $V_{85}$ en km/h					

La Ilustración 11 describe el comportamiento de la velocidad de operación para el sentido de avance en cada punto de interés, mostrando una variación de velocidad entre 55 y 85 km/h (avance). La Ilustración 12 indica la variación de velocidad de operación (entre 55 y 85 km/h) para el sentido contrario al abscisado del alineamiento (contra).

Ilustración 11. Perfil de velocidad de operación. Avance.

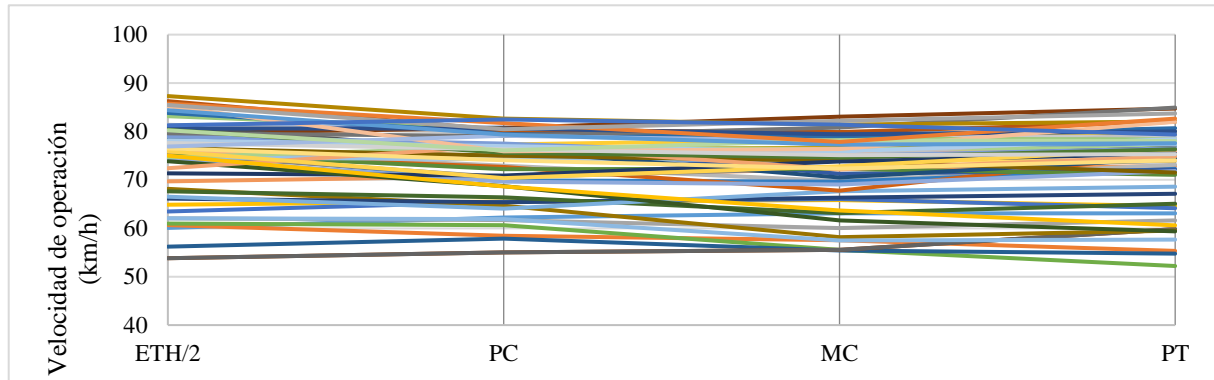
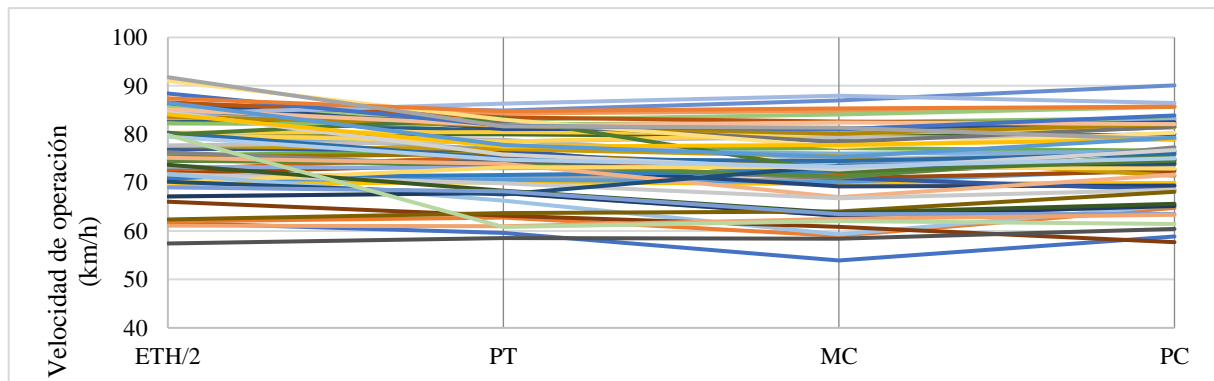


Ilustración 12. Perfil de velocidad de operación. Contra.



## 5.2. Análisis descriptivo de los datos agrupados

La agrupación de los datos, tiene como base los casos expuestos en la metodología de asignación de velocidades específicas del MDGC (INVIAS, 2008). Se realizaron análisis de correlación, promedio, desviación estándar, varianza, mínimos y máximos.

### 5.2.1. Variables independientes

CASO 1: se observó que las dimensiones de los elementos en la sección transversal presentan una amplia variabilidad. El radio de curvatura (227,1 m) muestra un mayor valor de desviación estándar, mientras que los valores menores fueron obtenidos en la externa (5,4 m) (ver Tabla 29). En el caso 1, se encontraron relaciones directas entre: i) Lc-Externa, y ii) Externa-Deflexión; relaciones inversas entre: iii) Radio-Externa, y iv) Radio-Deflexión.

En el caso 1R, existen relaciones directas entre: i) Radio-Lc, ii) ETH-Lc, iii) Lc-Externa, y iv) Externa-Deflexión; relaciones inversas entre: v) Radio-Externa, y vi) Radio-Deflexión (ver Tabla 30).



Tabla 29. Análisis descriptivo. Caso 1 y 1R.

Caso 1	Unidad	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	265,7	209,4	43865,3	57,8	881,6
ETH	m	75,75	39,73	1578,2	13,15	149,95
Lc	m	99,7	36,34	1320,34	40,53	180,42
Externa	m	7,602	5,463	29,843	0,26	23,881
Deflexión	°	31,08	17,38	302,08	2	66
Caso 1R	Unidad	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	276,8	227,1	51557,2	57,8	1085,5
ETH	m	74,93	39,55	1564,1	13,15	149,95
Lc	m	102,61	34,51	1190,96	43,11	171,73
Externa	m	7,53	5,43	29,50	0,634	23,88
Deflexión	°	30,58	17,27	298,25	5,0	66,0

Tabla 30. Análisis de correlación. Caso 1 y 1R.

Correlaciones Caso 1						
variable	Análisis	R(C1)	ETH(C1)	Lc(C1)	E(C1)	D(C1)
R(C1)	Correlación de Pearson	1	0,26569092	0,105658081	-0,494**	-0,756**
	Sig. (bilateral)		0,112	0,534	0,002	0,000
ETH(C1)	Correlación de Pearson	0	1	0,272101375	-0,047165663	-0,251636009
	Sig. (bilateral)	0,111974324		0,103	0,782	0,133
Lc(C1)	Correlación de Pearson	0	0,272101375	1	0,600**	0,18522871
	Sig. (bilateral)	0,53369191	0,103		0,000	0,272
E(C1)	Correlación de Pearson	-0,494**	-0,047165663	0,600**	1	0,844**
	Sig. (bilateral)	0,001885387	0,782	0,000		0,000
D(C1)	Correlación de Pearson	-0,756**	-0,251636009	0,18522871	0,844**	1
	Sig. (bilateral)	6,11643E-08	0,133	0,272	0,000	
Correlaciones Caso 1R						
variable	Análisis	R(C1R)	ETH(C1R)	Lc(C1R)	E(C1R)	D(C1R)
R(C1R)	Correlación de Pearson	1	0,223574815	0,336*	-0,463**	-0,709**
	Sig. (bilateral)		0,177	0,039	0,003	0,000
ETH(C1R)	Correlación de Pearson	0	1	0,544**	0,219956806	-0,002011255
	Sig. (bilateral)	0,177233843		0,000	0,185	0,990
Lc(C1R)	Correlación de Pearson	0,336*	0,544**	1	0,520**	0,084545846
	Sig. (bilateral)	0,039405495	0,000		0,001	0,614
E(C1R)	Correlación de Pearson	-0,463**	0,219956806	0,520**	1	0,849**
	Sig. (bilateral)	0,003391644	0,185	0,001		0,000
D(C1R)	Correlación de Pearson	-0,709**	-0,002011255	0,084545846	0,849**	1
	Sig. (bilateral)	6,32574E-07	0,990	0,614	0,000	

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

CASO 2: de acuerdo a la clasificación de la metodología de asignación de velocidades descrita en el numeral 2.5. El radio de curvatura tiene un mayor valor promedio, mientras que la externa tiene el menor valor (ver Tabla 31). Se encontraron relaciones directas entre: i) Externa-Deflexión; relaciones inversas: ii) Radio-Externa, y iii) Radio-Deflexión (ver Tabla 32).

Tabla 31. Análisis descriptivo. Caso 2 y 2R.

Caso 2	Unidad	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	476,6	281,9	79480,5	209,4	1085,5
ETH	m	250,2	72,9	5321,3	164,4	372,7
Lc	m	130,07	28,15	792,59	75,43	171,73
Externa	m	5,95	3,44	11,84	0,78	13,51
Deflexión	°	19,55	9,96	99,27	4	40
Caso 2R	Unidad	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	693	401	160822	302	1678
ETH	m	241	69,9	4880	164,4	372,7
Lc	m	145,4	41,5	1723,2	75,4	191,5
Externa	m	5,024	3,075	9,453	0,78	11
Deflexión	°	14,4	7,5	56,27	4	28

Tabla 32. Análisis de correlación. Caso 2 y 2R.

Correlaciones Caso 2						
variable	Análisis	R(C2)	ETH(C2)	Lc(C2)	E(C2)	D(C2)
R(C2)	Correlación de Pearson	1	0,423418353	0,075862423	-0,671*	-0,800**
	Sig. (bilateral)		0,194	0,825	0,024	0,003
ETH(C2)	Correlación de Pearson	0	1	0,415166477	-0,26260512	-0,336906442
	Sig. (bilateral)	0,194406659		0,204	0,435	0,311
Lc(C2)	Correlación de Pearson	0	0,415166477	1	0,462615764	0,301249987
	Sig. (bilateral)	0,824557183	0,204		0,152	0,368
E(C2)	Correlación de Pearson	-0,671*	-0,26260512	0,462615764	1	,972**
	Sig. (bilateral)	0,023681075	0,435	0,152		0,000
D(C2)	Correlación de Pearson	-0,800**	-0,336906442	0,301249987	0,972**	1
	Sig. (bilateral)	0,003098362	0,311	0,368	0,000	
Correlaciones Caso 2R						
variable	Análisis	R(C2R)	ETH(C2R)	Lc(C2R)	E(C2R)	D(C2R)
R(C2R)	Correlación de Pearson	1	-0,157950122	0,206318131	-0,559565778	-0,753*
	Sig. (bilateral)		0,663	0,567	0,093	0,012
ETH(C2R)	Correlación de Pearson	0	1	0,412079932	0,437864463	0,402647756
	Sig. (bilateral)	0,662975856		0,237	0,206	0,249
Lc(C2R)	Correlación de Pearson	0	0,412079932	1	0,610271701	0,348730291
	Sig. (bilateral)	0,567404849	0,237		0,061	0,323
E(C2R)	Correlación de Pearson	-1	0,437864463	0,610271701	1	0,930**
	Sig. (bilateral)	0,092581132	0,206	0,061		0,000
D(C2R)	Correlación de Pearson	-0,753*	0,402647756	0,348730291	0,930**	1
	Sig. (bilateral)	0,011853528	0,249	0,323	0,000	

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

CASO 4: de acuerdo a la clasificación de la metodología de asignación de velocidades descrita en el numeral 2.5. El radio de curvatura (caso 4) y la ETH (caso 4R) tiene un mayor valor promedio, mientras la externa tiene el menor valor promedio (ver Tabla 33).

En el caso 4R, existen relaciones directas entre: i) Lc-Externa, ii) Lc-Deflexión, y iii) Externa-Deflexión; relaciones inversas: iv) Radio-Lc, v) Radio-Externa, y vi) Radio-Deflexión (ver Tabla 34).

Tabla 33. Análisis descriptivo. Caso 4 y 4R.

Caso 4	Unidad	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	640	212,5	45156,8	359,5	809,5
ETH	m	422	91	8276,4	275,1	506,2
Lc	m	110,8	34,8	1209,6	64,9	157,3
Externa	m	2,54	1,12	1,26	1,14	4,06
Deflexión	°	9,8	2,77	7,7	7	14
Caso 4R	Unidad	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	368	263	69259	161	789
ETH	m	477,4	57,2	3269,5	413,6	552
Lc	m	93,6	37,1	1376,6	40,5	136,2
Externa	m	5,91	4,66	21,67	0,26	9,74
Deflexión	°	22,6	16,01	256,3	2	38

Tabla 34. Análisis de correlación. Caso 4 y 4R.

Correlaciones Caso 4						
variable	Análisis	R(C4)	ETH(C4)	Lc(C4)	E(C4)	D(C4)
R(C4)	Correlación de Pearson	1	-0,724404061	0,71859248	0,178233972	-0,557132087
	Sig. (bilateral)		0,166	0,171	0,774	0,329
ETH(C4)	Correlación de Pearson	-1	1	-0,440751924	-0,022329346	0,614508084
	Sig. (bilateral)	0,16631073		0,458	0,972	0,270
Lc(C4)	Correlación de Pearson	1	-0,440751924	1	0,810043485	0,147609441
	Sig. (bilateral)	0,171434257	0,458		0,097	0,813
E(C4)	Correlación de Pearson	0	-0,022329346	0,810043485	1	0,687478924
	Sig. (bilateral)	0,774272768	0,972	0,097		0,200
D(C4)	Correlación de Pearson	-1	0,614508084	0,147609441	0,687478924	1
	Sig. (bilateral)	0,329267578	0,270	0,813	0,200	
Correlaciones Caso 4R						
variable	Análisis	R(C4R)	ETH(C4R)	Lc(C4R)	E(C4R)	D(C4R)
R(C4R)	Correlación de Pearson	1	-0,056356677	-0,906*	-0,915*	-0,951*
	Sig. (bilateral)		0,928	0,034	0,029	0,013
ETH(C4R)	Correlación de Pearson	0	1	-0,127417623	0,139190883	0,216166642
	Sig. (bilateral)	0,928282451		0,838	0,823	0,727
Lc(C4R)	Correlación de Pearson	-0,906*	-0,127417623	1	0,938*	0,893*
	Sig. (bilateral)	0,03413516	0,838		0,018	0,041
E(C4R)	Correlación de Pearson	-0,915*	0,139190883	0,938*	1	0,982**
	Sig. (bilateral)	0,029492431	0,823	0,018		0,003
D(C4R)	Correlación de Pearson	-0,951*	0,216166642	0,893*	0,982**	1
	Sig. (bilateral)	0,012854245	0,727	0,041	0,003	

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

CASO 5: de acuerdo a la clasificación de la metodología de asignación de velocidades descrita en el numeral 2.5. La ETH tiene el mayor valor promedio, mientras que la externa tiene el menor valor; con respecto a la desviación estándar se tienen valores máximos en radio (caso 5) y ETH (caso 5R) (ver Tabla 35). En el caso 5, se encontraron relaciones directas entre: i) Radio- ETH, y ii) Externa-Deflexión.

En el caso 5R, existen relaciones directas entre: i) Externa-Deflexión; relaciones inversas: ii) Radio-Deflexión (ver Tabla 36).

Tabla 35. Análisis descriptivo. Caso 5 y 5R.

Caso 5	Unidad	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	720,00	517,00	267045,00	208,00	1678,00
ETH	m	773,00	296,00	87579,00	405,00	1310,00
Lc	m	150,00	35,3	1246,3	102,8	191,5
Externa	m	5,17	2,76	7,61	2,73	9,34
Deflexión	°	15,83	9,5	90,17	6,00	33,00
Caso 5R	Unidad	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
R	m	550,00	250,00	62516,00	272,00	802,00
ETH	m	1040,00	514,00	264427,00	667,00	1975,00
Lc	m	125,41	20,27	411,01	96,93	157,26
Externa	m	4,11	1,56	2,43	2,55	6,98
Deflexión	°	15,00	6,36	40,4	9,00	25,00

Tabla 36. Análisis de correlación. Caso 5 y 5R.

Correlaciones Caso 5						
variable	Análisis	R(C5)	ETH(C5)	Lc(C5)	E(C5)	D(C5)
R(C5)	Correlación de Pearson	1	0,884*	0,707750993	-0,632205751	-0,773880708
	Sig. (bilateral)		0,020	0,116	0,178	0,071
ETH(C5)	Correlación de Pearson	0,884*	1	0,400760639	-0,620641449	-0,628676065
	Sig. (bilateral)	0,019539843		0,431	0,189	0,181
Lc(C5)	Correlación de Pearson	1	0,400760639	1	-0,069641671	-0,445570903
	Sig. (bilateral)	0,115633805	0,431		0,896	0,376
E(C5)	Correlación de Pearson	-1	-0,620641449	-0,069641671	1	0,911*
	Sig. (bilateral)	0,178032671	0,189	0,896		0,012
D(C5)	Correlación de Pearson	-1	-0,628676065	-0,445570903	0,911*	1
	Sig. (bilateral)	0,070914169	0,181	0,376	0,012	
Correlaciones Caso 5R						
variable	Análisis	R(C5R)	ETH(C5R)	Lc(C5R)	E(C5R)	D(C5R)
R(C5R)	Correlación de Pearson	1	0,3333579	0,740422656	-0,730020144	-0,934**
	Sig. (bilateral)		0,518	0,092	0,099	0,006
ETH(C5R)	Correlación de Pearson	0	1	0,05257088	-0,485129558	-0,450474158
	Sig. (bilateral)	0,518485764		0,921	0,329	0,370
Lc(C5R)	Correlación de Pearson	1	0,05257088	1	-0,127514487	-0,518312163
	Sig. (bilateral)	0,092325384	0,921		0,810	0,292
E(C5R)	Correlación de Pearson	-1	-0,485129558	-0,127514487	1	0,913*
	Sig. (bilateral)	0,099494387	0,329	0,810		0,011
D(C5R)	Correlación de Pearson	-0,934**	-0,450474158	-0,518312163	0,913*	1
	Sig. (bilateral)	0,006310075	0,370	0,292	0,011	

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

El análisis descriptivo de las variables independientes permitió inferir la variabilidad de los datos, garantizando la inclusión de los casos de estudio propuestos en la metodología colombiana en carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano. El análisis de correlación bivariado permitió inferir las relaciones directas e inversas que existen entre las variables independientes (geometría horizontal) incluidas en el estudio, corroborando lo que se encuentra establecido en la literatura de tal forma que se verifica la confiabilidad de la información recopilada.

### 5.2.2. Variable dependiente

CASO 1: al analizar la velocidad de operación en cada uno de los puntos de interés, se evidenció que el promedio presenta su menor valor en el MC. La  $V_{85}$  en el PT para el caso 1 (8,33 km/h) y en el PC para el caso 1R (7,4 km/h) muestran un mayor valor de desviación estándar, mientras que los valores menores fueron obtenidos en el PC (Caso 1) y PT (Caso 1R) (ver Tabla 37).

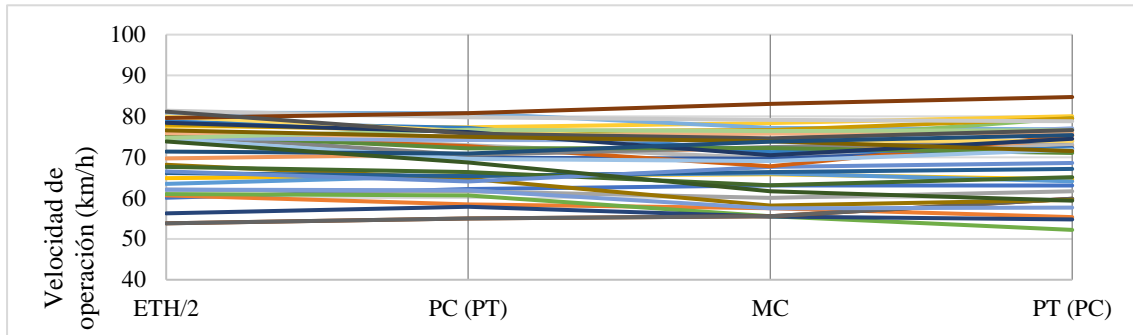
Tabla 37. Análisis descriptivo  $V_{85}$ . Caso 1 y 1R.

Caso 1	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	71,1	8,2	66,4	53,8	81,4
PC	69,8	7,3	53,3	55,0	80,8
MC	68,5	7,7	59,4	55,4	83,0
PT	69,6	8,3	69,3	52,2	84,7
Caso 1R	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	72,9	6,7	45,0	57,4	86,3
PT	72,3	6,6	43,9	58,6	84,9
MC	70,4	7,6	57,8	53,9	87,0
PC	72,1	7,4	54,6	57,7	90,1

\* $V_{85}$  en km/h

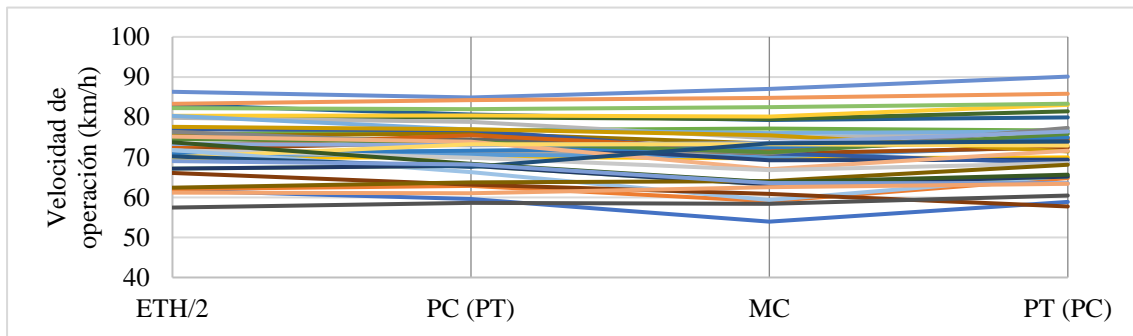
La Ilustración 13 describe el comportamiento de la velocidad de operación para el sentido de avance en cada punto de interés, mostrando una variación de velocidad entre 55 y 80 km/h.

Ilustración 13. Perfil de velocidad de operación. Caso 1.



La Ilustración 14 indica la variación de velocidad de operación (entre 60 y 85 km/h) para el sentido contrario al abscisado del alineamiento.

Ilustración 14. Perfil de velocidad de operación. Caso 1R.



CASO 2: al analizar la velocidad de operación en cada uno de puntos de interés, se evidenció que el promedio presenta su menor valor en el MC. La  $V_{85}$  en la ETH/2 para el caso 2 (4,34 km/h) y en el MC para el caso 2R (3,55 km/h) muestran un mayor valor de desviación estándar, mientras que los valores menores fueron observados en el PT (ver Tabla 38).

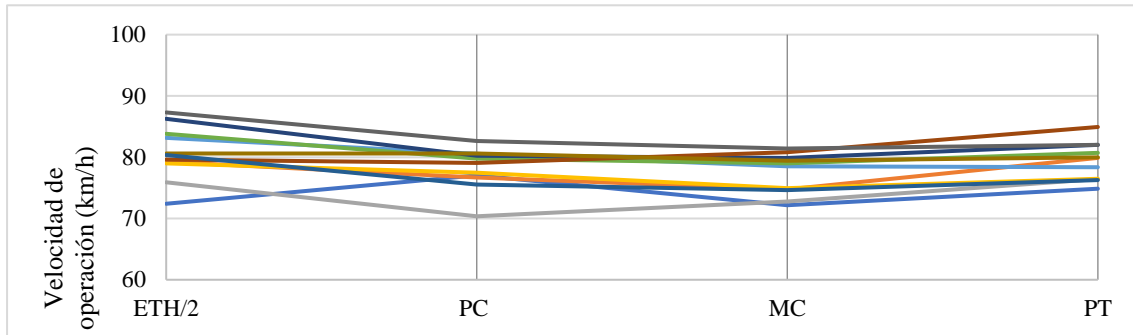
Tabla 38. Análisis descriptivo  $V_{85}$ . Caso 2 y 2R.

Caso 2	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	80,7	4,3	18,8	72,4	87,3
PC	78,2	3,3	11,1	70,4	82,6
MC	77,1	3,3	11,0	72,2	81,4
PT	79,3	3,1	9,5	74,9	84,9
Caso 2R	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	82,9	3,2	10,2	77,7	86,6
PT	80,9	2,8	7,6	74,9	83,5
MC	79,3	3,6	12,6	72,2	84,1
PC	80,8	3,3	11,2	74,5	85,6

\* $V_{85}$  en km/h

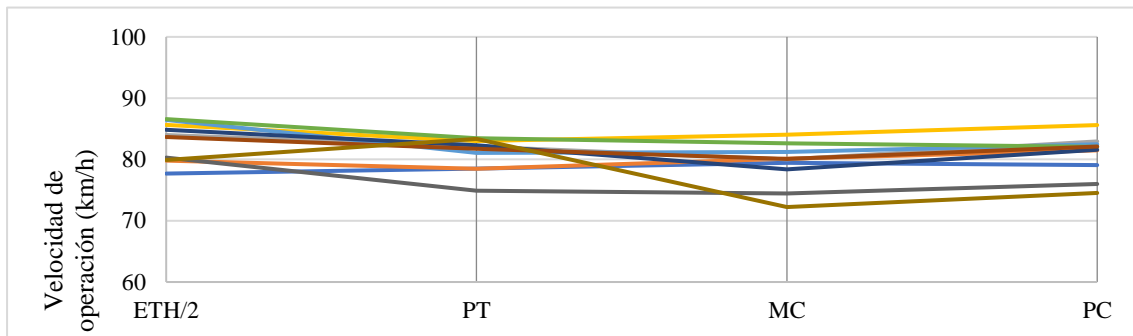
La Ilustración 15 describe el comportamiento de la velocidad de operación para el sentido de avance en cada punto de interés, mostrando una variación de velocidad entre 70 y 85 km/h.

Ilustración 15. Perfil de velocidad de operación. Caso 2.



La Ilustración 16 indica la variación de velocidad de operación (entre 75 y 85 km/h) para el sentido contrario al abscisado del alineamiento.

Ilustración 16. Perfil de velocidad de operación. Caso 2R.



CASO 4: al analizar la velocidad de operación en cada uno de puntos de interés, se observó que el promedio presenta su menor valor en el MC y mayor valor en la ETH/2. La  $V_{85}$  en la ETH/2 para el caso 4 (3,6 km/h) y en el MC para el caso 4R (6,45 km/h) muestran un mayor valor de desviación estándar, mientras que los valores menores fueron observados en el PC con 1,82 km/h (caso 4) y ETH/2 con 4,1 km/h (caso 4R) (ver Tabla 39).

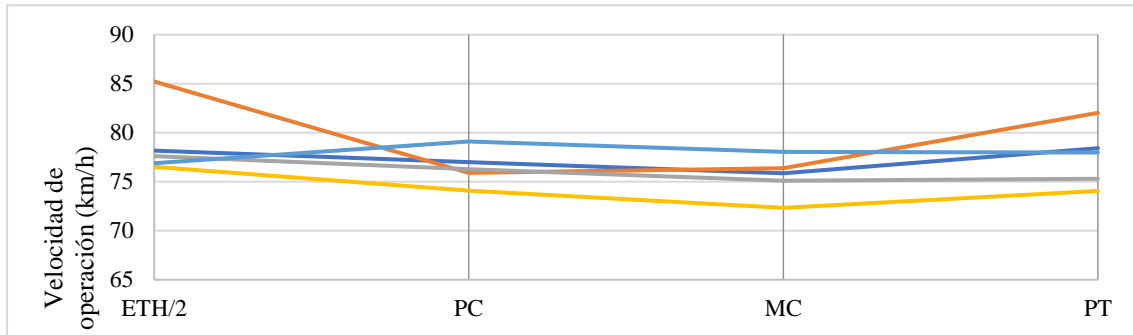
Tabla 39. Análisis descriptivo  $V_{85}$ . Caso 4 y 4R.

Caso 4	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	78,9	3,6	13,0	76,5	85,2
PC	76,5	1,8	3,3	74,1	79,1
MC	75,5	2,1	4,4	72,3	78,1
PT	77,6	3,1	9,6	74,1	82,0
Caso 4R	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	84,9	4,1	16,8	79,5	91,0
PT	80,3	4,9	24,3	74,7	86,3
MC	78,7	6,5	41,6	72,7	88,0
PC	80,1	4,5	20,4	75,0	86,5

\* $V_{85}$  en km/h

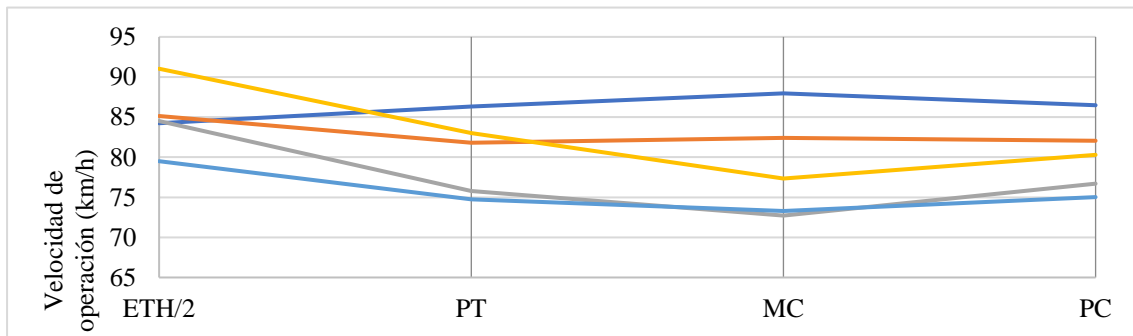
La Ilustración 17 describe el comportamiento de la velocidad de operación para el sentido de avance en cada punto de interés, mostrando una variación de velocidad entre 75 y 80 km/h.

Ilustración 17. Perfil de velocidad de operación. Caso 4.



La Ilustración 18 indica la variación de velocidad de operación (entre 75 y 90 km/h) para el sentido contrario al abscisado del alineamiento.

Ilustración 18 Perfil de velocidad de operación. Caso 4R.



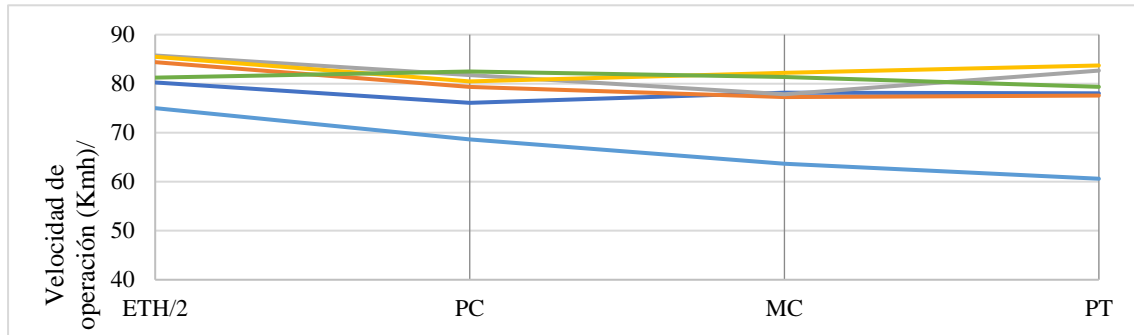
CASO 5: al analizar la velocidad de operación en cada uno de puntos de interés, se observó que el promedio presenta su menor valor en el MC y mayor valor en la ETH/2. La  $V_{85}$  en el PT muestra un mayor valor de desviación estándar (8,6 km/h), mientras que los valores menores fueron observados en la ETH/2 (ver Tabla 40).

Tabla 40. Análisis descriptivo  $V_{85}$ . Caso 5 y 5R.

Caso 5	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	82,0	4,1	16,9	75	85,8
PC	78,1	5,2	26,7	68,6	82,5
MC	76,8	6,7	45,2	63,7	82,2
PT	77,0	8,4	70,6	60,6	83,7
Caso 5R	Media	Desv,Est,	Varianza	Mínimo	Máximo
ETH/2	86,4	4,1	16,5	79,8	91,8
PT	77,4	8,6	73,1	60,8	84,8
MC	77,1	8,1	66,2	62,1	85,4
PC	78,0	8,6	74,0	61,5	85,7
* $V_{85}$ en km/h					

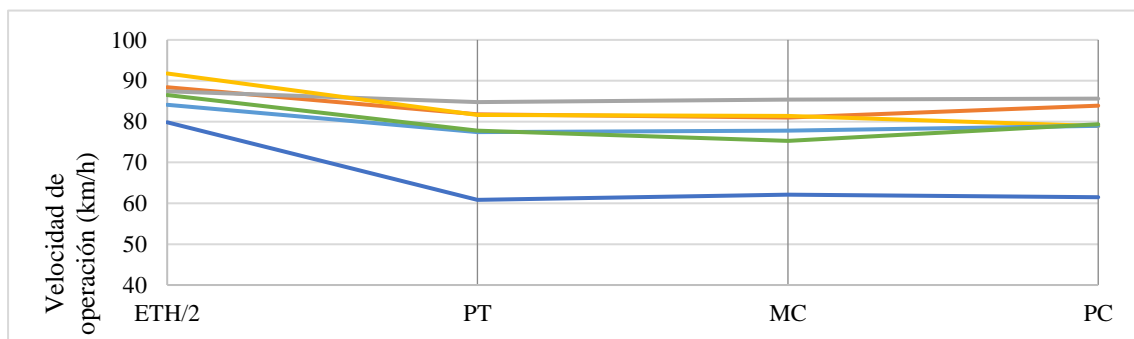
La Ilustración 19 describe el comportamiento de la velocidad de operación para el sentido de avance en cada punto de interés, mostrando una variación de velocidad entre 80 y 85 km/h.

Ilustración 19. Perfil de velocidad de operación. Caso 5.



La Ilustración 20 indica la variación de velocidad de operación (entre 75 y 85 km/h) para el sentido contrario al abscisado del alineamiento.

Ilustración 20. Perfil de velocidad de operación. Caso 5R.



En relación a la variable dependiente, se logró concluir que los datos agrupados según el caso de estudio no presentan variaciones de velocidad superiores a 20 km/h, lo que indica que, un conductor al transitar por una curva horizontal trata de conservar la velocidad de operación en los puntos de interés.

### 5.3. Análisis descriptivo de las variables que afectan el $\Delta V_{85}$

Se realizaron diferentes análisis del comportamiento del gradiente de velocidad de operación ( $\Delta V_{85}$ ) cuando se condiciona la variable independiente ( $L_c$ ,  $R$ ,  $ETH$ ,  $E$ ,  $\Delta$ ), según el sentido de circulación de los vehículos (avance y contra). Los valores tomados como referentes para los condicionantes en el análisis estadístico corresponden a la mediana. El  $\Delta V_{85}$  corresponde a la diferencia entre la  $V_{85}$  de las curvas horizontales sucesivas ( $curva_{n-1}$ ,  $curva_n$ ).

CASO 1 (avance y contra): para esta condición, se encontraron variaciones máximas en el  $\Delta V_{85}$  cuando: i) el radio de curvatura es menor a 210 m, ii) la ETH es mayor a 65 m, iii) la longitud de curva es menor a 95 m, iv) la externa es mayor a 5 m, y v) el ángulo de deflexión es mayor a 30° (ver Tabla 41).



Tabla 41. Variables que afectan el  $\Delta V_{85}$ . Caso 1 y 1R.

Variable (Mediana)	CASO 1 (km/h)			CASO 1R (km/h)		
	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (1)	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (1R)
R $\leq$ 210 m	-2,1	16,0	18,1	-0,7	13,6	14,3
R > 210 m	-1,2	10,1	11,3	-3,0	6,1	9,1
ETH $\leq$ 65 m	-2,1	11,9	14,0	-3,0	9,4	12,4
ETH > 65 m	-1,7	16,0	17,7	-1,0	13,6	14,6
Lc $\leq$ 95 m	-2,1	11,9	14,0	-3,0	13,6	16,6
Lc > 95 m	-1,7	16,0	17,7	0,2	9,4	9,2
Externa $\leq$ 5 m	-2,1	11,9	14,0	-3,0	8,4	11,4
Externa > 5 m	-1,7	16,0	17,7	0,3	13,6	13,3
Deflexión $\leq$ 30°	-2,1	10,1	12,2	-3,0	6,1	9,1
Deflexión > 30°	-1,7	16,0	17,7	-0,7	13,6	14,3

CASO 2 (avance y contra): para esta condición, se encontraron variaciones máximas en el  $\Delta V_{85}$  cuando: i) la longitud de curva es menor a 150 m, y ii) el ángulo de deflexión es menor a 15° (ver Tabla 42).

Tabla 42. Variables que afectan el  $\Delta V_{85}$ . Caso 2 y 2R.

Variable (Mediana)	CASO 2 (km/h)			CASO 2R (km/h)		
	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (2)	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (2R)
R $\leq$ 500 m	0,2	6,4	6,2	4,5	7,7	3,2
R > 500 m	0,5	4,8	4,3	-0,8	6,5	7,3
ETH $\leq$ 215 m	1,2	5,9	4,7	-0,8	7,7	8,5
ETH > 215 m	0,2	6,4	6,2	2,6	6,5	3,9
Lc $\leq$ 150 m	0,2	6,4	6,2	-0,8	5,4	6,2
Lc > 150 m	0,5	4,8	4,3	2,6	7,7	5,1
Externa $\leq$ 5 m	1,2	6,4	5,2	-0,8	4,5	5,3
Externa > 5 m	0,2	5,7	5,5	4,0	7,7	3,7
Deflexión $\leq$ 15°	0,5	6,4	5,9	-0,8	4,5	5,3
Deflexión > 15°	0,2	5,9	5,7	5,4	7,7	2,3

CASO 4 (avance y contra): para esta condición, se encontraron variaciones máximas en el  $\Delta V_{85}$  cuando: i) la externa de la curva es menor a 5 m, y ii) el ángulo de deflexión es menor a 20° (ver Tabla 43).

Tabla 43. Variables que afectan el  $\Delta V_{85}$ . Caso 4 y 4R.

Variable (Mediana)	CASO 4 (km/h)			CASO 4R (km/h)		
	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (4)	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (4R)
R $\leq$ 500 m	2,3	2,5	0,2	6,2	13,7	7,5
R > 500 m	-1,1	9,3	10,4	-0,7	-0,7	0,0
ETH $\leq$ 450 m	4,7	9,3	4,6	8,3	13,7	5,4
ETH > 450 m	-1,1	2,5	3,6	-0,7	13,1	13,8
Lc $\leq$ 110 m	2,3	4,7	2,4	-0,7	13,1	13,8
Lc > 110 m	-1,1	9,3	10,4	13,7	13,7	0,0
Externa $\leq$ 5 m	-1,1	9,3	10,4	-0,7	8,3	9,0
Externa > 5 m	0,0	0,0	0,0	6,2	13,7	7,5
Deflexión $\leq$ 20°	-1,1	9,3	10,4	-0,7	8,3	9,0
Deflexión > 20°	0,0	0,0	0,0	6,2	13,7	7,5

CASO 5 (avance y contra): para esta condición, se encontraron variaciones máximas en el  $\Delta V_{85}$  cuando: i) el radio de curvatura es mayor a 600 m, ii) la ETH es mayor a 750 m, iii) la longitud de la curva es menor a 140 m, iv) la externa de la curva es menor a 5 m, y v) el ángulo de deflexión es menor a 15° (ver Tabla 44).

Tabla 44. Variables que afectan el  $\Delta V_{85}$ . Caso 5 y 5R.

Variable (Mediana)	CASO 5 (km/h)			CASO 5R (km/h)		
	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (5)	$\Delta$ Mínimo	$\Delta$ Máximo	$\Delta V_{85}$ (5R)
R $\leq$ 600 m	5,0	7,9	2,9	6,7	11,2	4,5
R > 600 m	1,9	21,4	19,5	2,6	24,8	22,2
ETH $\leq$ 750 m	4,2	7,9	3,7	6,7	12,9	6,2
ETH > 750 m	1,9	21,4	19,5	2,6	24,8	22,2
Lc $\leq$ 140 m	5,0	21,4	16,4	2,6	24,8	22,2
Lc > 140 m	1,9	7,9	6,0	12,9	12,9	0,0
Externa $\leq$ 5 m	1,9	21,4	19,5	2,6	24,8	22,2
Externa > 5 m	7,1	7,9	0,8	11,2	11,2	0,0
Deflexión $\leq$ 15°	1,9	21,4	19,5	2,6	24,8	22,2
Deflexión > 15°	7,1	7,9	0,8	6,7	11,2	4,5

Del análisis anterior se puede concluir que, la metodología de asignación de velocidades específicas de curvas horizontales del MDGC (INVIAS, 2008), excluye variables independientes que generan cambios en la velocidad de operación al interior de una curva horizontal de acuerdo al caso de estudio.

#### 5.4. Análisis de normalidad de la variable dependiente ( $V_{85}$ )

Se realizaron pruebas de normalidad de la variable dependiente ( $V_{85}$ ) en sentido de avance y contra, a fin de verificar si estos siguen o no una distribución normal. El análisis consistió en determinar la significancia estadística mediante pruebas Kolmogórov-Smirnov y Shapiro-Wilk. La Tabla 45 describe el análisis realizado, estableciendo la no normalidad de la variable dependiente ( $V_{85}$ ) en los puntos de interés.

Tabla 45. Pruebas de normalidad.

Pruebas de normalidad - Avance				
$V_{85}$ avance	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>		Shapiro-Wilk	
	Estadístico	Sig.	Estadístico	Sig.
ETH/2 (E)	0,188	0,000	0,917	0,001
PC	0,163	0,000	0,916	0,001
MC	0,159	0,001	0,917	0,001
PT	0,163	0,001	0,911	0,000
ETH/2 (S)	0,189	0,000	0,914	0,000
Pruebas de normalidad - Contra				
$V_{85}$ contra	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>		Shapiro-Wilk	
	Estadístico	Sig.	Estadístico	Sig.
ETH/2 (S)1	0,099	0,200*	0,974	0,247
PT1	0,086	0,200*	0,952	0,021
MC1	0,082	0,200*	0,974	0,249
PC1	0,076	0,200*	0,974	0,246
ETH/2 (E)1	0,096	0,200*	0,976	0,302
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.				
a. Corrección de significación de Lilliefors				

El análisis de distribución (asimetría y la curtosis) permitió identificar la forma en que se separan o aglomeran los valores de  $V_{85}$  de acuerdo a su representación gráfica. El resultado negativo de asimetría se da cuando la mayor cantidad de datos se aglomeran en los valores menores que la media generando un “sesgo” del lado izquierdo. Con respecto a la curtosis, ésta determina el grado de concentración que presentan los valores de  $V_{85}$  en la región central de la distribución. Un coeficiente de curtosis negativo (baja concentración de valores de  $V_{85}$ ) representan una distribución Platicúrtica (“achatada”), ver Tabla 46.

Tabla 46. Medidas de distribución de la  $V_{85}$ .

Medidas de distribución - Avance			
$V_{85}$ avance	Medida	Estadístico	Desv. Error
ETH/2 (E)	Asimetría	-0,892	0,311
	Curtosis	0,132	0,613
PC	Asimetría	-0,822	0,311
	Curtosis	-0,220	0,613
MC	Asimetría	-0,759	0,311
	Curtosis	-0,390	0,613
PT	Asimetría	-0,834	0,311
	Curtosis	-0,273	0,613
ETH/2 (S)	Asimetría	-0,910	0,311
	Curtosis	0,145	0,613
Medidas de distribución - Contra			
$V_{85}$ contra	Medida	Estadístico	Desv. Error
ETH/2 (S)1	Asimetría	-0,368	0,311
	Curtosis	-0,458	0,613
PT1	Asimetría	-0,560	0,311
	Curtosis	-0,478	0,613
MC1	Asimetría	-0,355	0,311
	Curtosis	-0,493	0,613
PC1	Asimetría	-0,349	0,311
	Curtosis	-0,587	0,613
ETH/2 (E)1	Asimetría	-0,371	0,311
	Curtosis	-0,448	0,613

Las pruebas de normalidad permitieron definir el tipo de análisis no paramétrico a realizar a fin de establecer la significancia estadística de las variables en estudio. El test de la suma de rangos de Wilcoxon (test de la U de Mann-Whitney) y el análisis de comparaciones de múltiples medianas: test de Kruskal-Wallis son el equivalente no paramétrico del análisis de varianza (ANOVA).

### 5.5. Análisis no paramétrico de los datos agrupados

Con el fin de verificar si las condiciones de velocidad varían de acuerdo a la geometría de la carretera, se realizó una prueba Kruskal-Wallis para establecer si la variable dependiente ( $V_{85}$ ) permanece estadísticamente constante, o si existe diferencia significativa entre los puntos de interés (puntos de interés vs  $V_{85}$ ). La Ilustración 21, describe la ubicación de los puntos para el análisis, de acuerdo al sentido de avance y contra del alineamiento horizontal. La Tabla 47 define las convenciones utilizadas en el análisis.

Ilustración 21. Puntos geométricos de análisis no paramétrico.

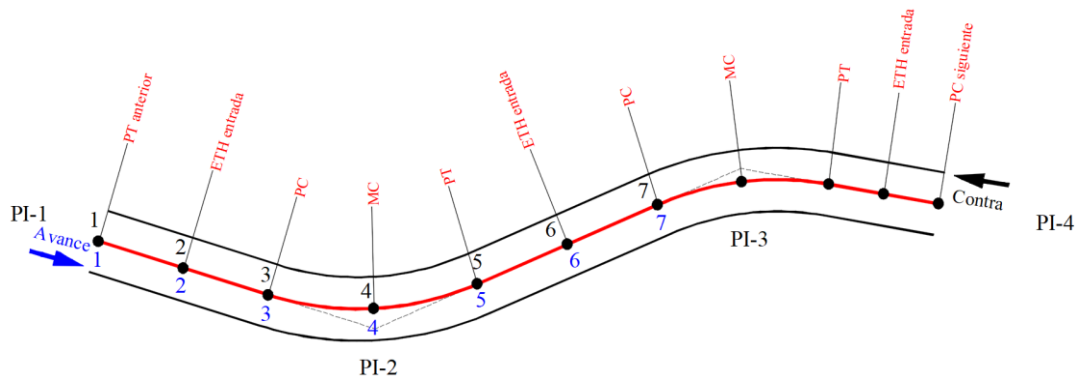


Tabla 47. Convenciones de análisis.

Caso 1=	Caso 1	Punto 1=	PT anterior
Caso 2=	Caso 1R	Punto 2=	ETH entrada
Caso 3=	Caso 2	Punto 3=	PC
Caso 4=	Caso 2R	Punto 4=	MC
Caso 5=	Caso 4	Punto 5=	PT
Caso 6=	Caso 4R	Punto 6=	ETH salida
Caso 7=	Caso 5	Punto 7=	PC siguiente
Caso 8=	Caso 5R		

La Tabla 48 contiene los parámetros asignados en la prueba Kruskal-Wallis, considerando, la hipótesis nula, hipótesis alterna y el nivel de significancia (5%).

Tabla 48. Parámetros de las pruebas no paramétricas.

Método	
Hipótesis nula	Todas las medianas son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medianas son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

### 5.5.1. Kruskal-Wallis. Caso 1, sentido avance y contra

CASO 1: de acuerdo al análisis realizado en sentido de avance, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p = 0,397$ ) entre la variable respuesta ( $V_{85}$ ) y los puntos de interés (ver Ilustración 21). De igual manera, en el sentido contrario (caso 1R), se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p = 0,517$ ) entre las variables analizadas (ver Tabla 49).

Tabla 49. Prueba Kruskal-Wallis, caso 1 y 1R.

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 1	
Prueba	$V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	5,159
gl	5
Sig. asintótica	0,397
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 1R	
Prueba	$V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	4,228
gl	5
Sig. asintótica	0,517
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	

Lo anterior indica que no se presentan variaciones importantes en el cambio de velocidad a la entrada y salida de una curva horizontal.

### 5.5.2. Kruskal-Wallis. Caso 2, sentido avance y contra

CASO 2: de acuerdo al análisis realizado en sentido de avance, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p = 0,461$ ) entre la variable respuesta ( $V_{85}$ ) y los puntos de interés (ver Ilustración 21). De igual manera, en el sentido contrario (caso 2R), se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p = 0,190$ ) entre las variables analizadas (ver Tabla 50).

Tabla 50. Prueba Kruskal-Wallis, caso 2 y 2R.

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 2	
Prueba	V <sub>85</sub>
H de Kruskal-Wallis	4,646
gl	5
Sig. asintótica	0,461
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 2R	
Prueba	V <sub>85</sub>
H de Kruskal-Wallis	7,442
gl	5
Sig. asintótica	0,190
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	

Lo anterior indica que no se presentan variaciones importantes en el cambio de velocidad a la entrada y salida de una curva horizontal.

### 5.5.3. Kruskal-Wallis. Caso 4, sentido avance y contra

CASO 4: de acuerdo al análisis realizado en sentido de avance, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p=0,455$ ) entre la variable respuesta ( $V_{85}$ ) y los puntos de interés (ver Ilustración 21). De igual manera, en el sentido contrario (caso 4R), se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p=0,592$ ) entre las variables analizadas (ver Tabla 51).

Tabla 51. Prueba Kruskal-Wallis, caso 4 y 4R.

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 4	
Prueba	V <sub>85</sub>
H de Kruskal-Wallis	4,685
gl	5
Sig. asintótica	0,455
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 4R	
Prueba	V <sub>85</sub>
H de Kruskal-Wallis	3,710
gl	5
Sig. asintótica	0,592
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	

Lo anterior indica que no se presentan variaciones importantes en el cambio de velocidad a la entrada y salida de una curva horizontal.

### 5.5.4. Kruskal-Wallis. Caso 5, sentido avance y contra

CASO 5: de acuerdo al análisis realizado en sentido de avance, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p=0,339$ ) entre la variable respuesta ( $V_{85}$ ) y los puntos de interés (ver Ilustración 21). En el sentido contrario (caso 5R), se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas ( $p=0,021$ ) entre las variables analizadas (ver Tabla 52).

Tabla 52. Prueba Kruskal-Wallis, caso 5 y 5R.

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 5	
Prueba	V85
H de Kruskal-Wallis	5,674
gl	5
Sig. asintótica	0,339
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Caso 5R	
Prueba	V85
H de Kruskal-Wallis	13,301
gl	5
Sig. asintótica	0,021
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés	

Lo anterior indica que se presentan variaciones importantes (significativas) en el cambio de velocidad a la entrada y salida de una curva horizontal agrupada en el caso 5 de la metodología colombiana (INVIAS, 2008).

#### 5.5.4.1. Comparaciones múltiples, caso 5

La Tabla 53 y Tabla 54 describen el análisis de comparación de dos medianas usando el test de la suma de rangos de Wilcoxon y U de Mann-Whitney (pruebas equivalentes a las Post-hoc). El análisis estadístico no paramétrico permitió inferir que se presentan cambios significativos en la  $V_{85}$  en los puntos de interés: i) entretangencia horizontal de entrada (ETHe), y ii) entretangencia horizontal de salida (ETHs).

Tabla 53. Prueba U de Mann-Whitney, caso 5R. Salida de curva.

Estadísticos de prueba <sup>a</sup> - ETHs vs PC	
Prueba	$V_{85}$
U de Mann-Whitney	5,000
W de Wilcoxon	26,000
Z	-2,082
Sig. asintótica(bilateral)	0,037
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,041 <sup>b</sup>
Estadísticos de prueba <sup>a</sup> - ETHs vs MC	
Prueba	$V_{85}$
U de Mann-Whitney	5,000
W de Wilcoxon	26,000
Z	-2,082
Sig. asintótica(bilateral)	0,037
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,041 <sup>b</sup>
Estadísticos de prueba <sup>a</sup> - ETHs vs PT	
Prueba	$V_{85}$
U de Mann-Whitney	5,000
W de Wilcoxon	26,000
Z	-2,082
Sig. asintótica(bilateral)	0,037
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,041 <sup>b</sup>
a. Variable de agrupación: punto de interés, b. No corregido para empates.	

Tabla 54. Prueba U de Mann-Whitney, caso 5R. Entrada a curva.

Estadísticos de prueba <sup>a</sup> - PC vs ETHE	
Prueba	V <sub>85</sub>
U de Mann-Whitney	3,000
W de Wilcoxon	24,000
Z	-2,402
Sig. asintótica(bilateral)	0,016
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,015 <sup>b</sup>
Estadísticos de prueba <sup>a</sup> - MC vs ETHE	
Prueba	V <sub>85</sub>
U de Mann-Whitney	4,000
W de Wilcoxon	25,000
Z	-2,242
Sig. asintótica(bilateral)	0,025
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,026 <sup>b</sup>
Estadísticos de prueba <sup>a</sup> - PT vs ETHE	
Prueba	V <sub>85</sub>
U de Mann-Whitney	4,000
W de Wilcoxon	25,000
Z	-2,242
Sig. asintótica(bilateral)	0,025
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,026 <sup>b</sup>

a. Variable de agrupación: punto de interés, b. No corregido para empates.

Lo anterior indica que la velocidad de operación (V<sub>85</sub>) en la ETH del caso 5 (INVIAS, 2008) tiende a aumentar cuando la longitud del segmento recto es mayor a 600 m.

## 5.6. Análisis no paramétrico de los datos desagrupados

Con el fin de verificar si las condiciones de velocidad de todas las curvas horizontales incluidas en el estudio varían de acuerdo a la geometría horizontal de la carretera, se realizó una prueba Kruskal-Wallis a fin de establecer si la variable dependiente (V<sub>85</sub>) permanece estadísticamente constante, o si existe diferencia significativa entre los puntos de interés (puntos de interés vs V<sub>85</sub>). La Ilustración 21, describe la ubicación de los puntos para el análisis, de acuerdo al sentido de avance y contra del alineamiento horizontal. La Tabla 47 define las convenciones utilizadas en el análisis.

De acuerdo al análisis, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas (p= 0,119) entre la variable respuesta (V<sub>85</sub>) y los puntos de interés en el sentido de avance de la carretera (ver Ilustración 21). De igual manera, en el sentido contrario del tramo en estudio, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas (p= 0,174) entre las variables analizadas (ver Tabla 55).

Tabla 55. Prueba Kruskal-Wallis. Sentido de avance y contra.

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Avance	
Prueba	V <sub>85</sub>
H de Kruskal-Wallis	8,760
gl	5
Sig. asintótica	0,119
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Contra	
Prueba	V <sub>85</sub>
H de Kruskal-Wallis	7,692
gl	5
Sig. asintótica	0,174

a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: punto de interés

Lo anterior indica que no se presentan variaciones importantes en el cambio de velocidad a la entrada y salida de una curva horizontal, en el análisis de los datos totales (desagrupados) para el sentido de avance y sentido en contra del tramo en estudio.

## 5.7. Análisis no paramétrico del $\Delta V_{85}$ desagrupado

Con el objeto de encontrar diferencias significativas de los datos combinados (variables independientes) con respecto a la variable respuesta (gradiente de velocidad de operación:  $\Delta V_{85}$ ), se normalizan los datos de geometría, agrupando las variables de acuerdo a intervalos, para así, realizar análisis estadísticos como: comparación de medianas “prueba de dos muestras independientes”, prueba Kruskal-Wallis. El  $\Delta V_{85}$  corresponde a la diferencia entre la  $V_{85}$  de las curvas horizontales sucesivas ( $curva_{n-1}$ ,  $curva_n$ ).

### 5.7.1. Categorización de la variable dependiente $\Delta V_{85}$

A fin de realizar comparaciones, se agrupó el  $\Delta V_{85}$  con base a las siguiente condiciones: i) entre -5 km/h y 5 km/h se consideró “nulo” y se asignó un valor de cero (0); ii) entre 5 km/h y 10 km/h, se valoró como “+10” (aumento en 10 km/h entre elementos sucesivos), y iii) para gradientes de velocidad mayores a 10 km/h, se contempló como un aumento entre elementos sucesivos en 20 km/h (ver Tabla 56). Cabe mencionar que no se presentaron variaciones de velocidad menores a -5 km/h entre elementos geométricos sucesivos.

Tabla 56. Agrupación de la variable respuesta  $\Delta V_{85}$ .

Gradiente	Intervalo $\Delta V_{85}$ (km/h)		Valor $\Delta V_{85}$	Observación
	Mínimo	máximo		
$\Delta V_{85}$	-5	5	0	Nulo
$\Delta V_{85}$	5	10	10	+10
$\Delta V_{85}$	> 10		20	+20

De acuerdo con los porcentajes de representatividad estadística de las curvas analizadas del  $\Delta V_{85}$  agrupado, la clasificación definida como “+20” no se considera en los análisis, dado que, representa el 4%, siendo poco representativo para en el análisis estadístico(ver Tabla 57).

Tabla 57. Porcentaje según clasificación del gradiente de velocidad.

Gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ )	Porcentaje (%)
Nulo	61,2
+10	34,5
+20	4,3
<b>Total</b>	<b>100</b>

Se obtuvieron los estadísticos descriptivos de los datos agrupados en el  $\Delta V_{85}$  definido como “nulo” debido a la incidencia (61,2%), para soportar dicha condición (Tabla 58). El histograma del  $\Delta V_{85}$  presentado en la Ilustración 22 muestra que el 52 % de los datos se agruparon entre -2 km/h y 2 km/h, ratificando que el gradiente de velocidad presenta un cambio “nulo” entre elementos horizontales sucesivos.

Tabla 58. Estadísticos descriptivos del  $\Delta V_{85}$  “nulo”.

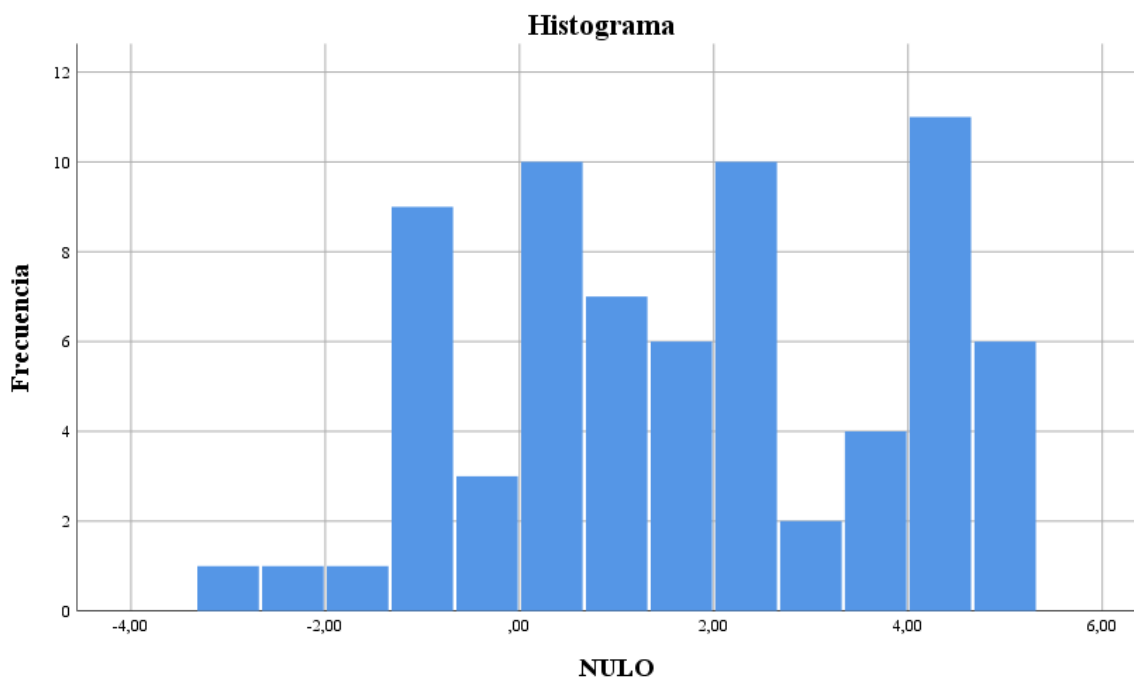
Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo
$\Delta V_{85}$ “nulo”	1,775	2,082	4,334	-2,961	1,588	4,983

Tabla 59. Pruebas de normalidad del  $\Delta V_{85}$  “nulo”.

Pruebas de normalidad - Gradiente "nulo"						
Variable	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
NULO	0,113	71	0,026	0,955	71	0,012

a. Corrección de significación de Lilliefors



Ilustración 22. Histograma del  $\Delta V_{85}$  "nulo".

### 5.7.2. Categorización de las variables independientes

De acuerdo con los valores mínimos y máximos obtenidos de los análisis descriptivos, se agrupó la geometría horizontal en intervalos (categorización de la variable independiente), considerando la coincidencia de rangos entre variables independientes, con el fin de realizar el análisis correspondiente. Por ejemplo, para el caso del radio de curvatura (R), los datos del intervalo entre 0 m y 200 m, se les asignó un valor de 200; entre 200 m y 400 m, un valor de 400; entre 400 m y 600 m, un valor de 600; y finalmente, para datos mayores a 600 m, se asignó un valor de 800. De igual forma, se realizó el procedimiento de categorización de las variables independientes incluidas en el estudio: i) ETH, ii) longitud. de curva, iii) externa (E) y iv) ángulo de deflexión (D) (ver Tabla 60).

Tabla 60. Agrupación de las variables independientes.

Variable	Valor agrupado			
<b>R (valor)</b>	200	400	600	800
R (intervalo)	0-200	200-400	400-600	>600
<b>ETH (valor)</b>	200	400	600	800
ETH (intervalo)	0-200	200-400	400-600	>600
<b>LC (valor)</b>	50	100	150	200
LC (intervalo)	0-50	50-100	100-150	>150
<b>E (valor)</b>	5	10	15	
E (intervalo)	0-5	5-10	>10	
<b>D (valor)</b>	20°	40°	60°	
D (intervalo)	0-20	20-40	>40	

### 5.7.3. Prueba Kruskal-Wallis del $\Delta V_{85}$

Con el fin de verificar la significancia estadística de las características geométricas (radio, ETH, longitud. de curva, externa y ángulo de deflexión), en el  $\Delta V_{85}$  de las curvas incluidas en el estudio, se realizó una prueba Kruskal-Wallis, obteniendo como resultado, que las variables: i) Radio ( $p= 0,048$ ), ii) Externa ( $p= 0,002$ ), y iii) Deflexión ( $P= 0,004$ ) presentan un valor p menor al nivel de significancia

(5%) en el gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no todas las medianas de población son iguales (ver Tabla 61). De esta manera, se logró identificar las variables geométricas que intervienen en los cambios de velocidad en una carretera rural de dos carriles sobre terreno plano.

Por otro lado, la variable ETH a pesar de no generar significancia estadística (valor  $p=0,075$ ), se hizo necesario establecer comparaciones múltiples de rango (pruebas Post-hoc) a fin de verificar su comportamiento de acuerdo a lo presentado en los cinco (5) casos de asignación de velocidades del MDGC (INVIAS, 2008).

Tabla 61. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs  $\Delta V_{85}$ .

Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Radio	
Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	7,919
gl	3
Sig. asintótica	0,048
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: radio	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - ETH	
Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	6,890
gl	3
Sig. asintótica	0,075
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: ETH	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Lc	
Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	3,749
gl	3
Sig. asintótica	0,290
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: Lc	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Externa	
Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	12,913
gl	2
Sig. asintótica	0,002
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: externa	
Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup> - Deflexión	
Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	10,830
gl	2
Sig. asintótica	0,004
a. Prueba de Kruskal Wallis, b. Variable de agrupación: deflexión	

### 5.7.3.1. Comparaciones múltiples para Radio, Externa y Deflexión

Una vez se identificaron las variables independientes con diferencias significativas, se realizaron análisis de pruebas de rango y comparaciones múltiples por parejas, que permitieron determinar cuáles medianas presentaban diferencias. Las comparaciones corresponden a los valores categorizados según la Tabla 60.

El análisis de la variable Radio de curvatura (R) permitió inferir, que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $R < 200$  m, ii)  $200 \text{ m} < R < 600$  m, y iii)  $R > 600$  m (ver Tabla 62).

Tabla 62. Comparaciones múltiples de la variable Radio.

Variable de agrupación: Radio [m] (200-400)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	92,500
W de Wilcoxon	345,500
Z	-1,996
Sig. asintótica(bilateral)	0,046
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,045 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Radio [m] (200-600)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	37,000
W de Wilcoxon	73,000
Z	-1,297
Sig. asintótica(bilateral)	0,195
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,212 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Radio [m] (200-800)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	26,000
W de Wilcoxon	81,000
Z	-2,576
Sig. asintótica(bilateral)	0,010
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,009 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Radio [m] (400-600)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	85,000
W de Wilcoxon	338,000
Z	-0,141
Sig. asintótica(bilateral)	0,888
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,909 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Radio [m] (400-800)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	75,000
W de Wilcoxon	130,000
Z	-1,423
Sig. asintótica(bilateral)	0,155
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,163 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Radio [m] (600-800)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	29,000
W de Wilcoxon	84,000
Z	-0,977
Sig. asintótica(bilateral)	0,328
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,360 <sup>b</sup>

b. No corregido para empates.

El análisis de la variable Externa (E) permitió inferir, que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $E < 5$  m, y ii)  $5 \text{ m} < E < 10$  m, y iii)  $E > 10$  m (ver Tabla 63).

El análisis de la variable ángulo de deflexión (D) permitió inferir, que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $D < 20^\circ$ , y ii)  $20^\circ < D < 40^\circ$ , y iii)  $D > 40^\circ$  (ver Tabla 64).

Tabla 63. Comparaciones múltiples de la variable Externa.

Variable de agrupación: Externa [m] (5-10)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	122,000
W de Wilcoxon	500,000
Z	-2,803
Sig. asintótica(bilateral)	<b>0,005</b>
Variable de agrupación: Externa [m] (5-15)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	42,000
W de Wilcoxon	420,000
Z	-2,904
Sig. asintótica(bilateral)	0,004
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	<b>0,003<sup>b</sup></b>
Variable de agrupación: Externa [m] (10-15)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	57,500
W de Wilcoxon	228,500
Z	-1,209
Sig. asintótica(bilateral)	0,227
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,232 <sup>b</sup>
b. No corregido para empates.	

Tabla 64. Comparaciones múltiples de la variable Deflexión.

Variable de agrupación: Deflexión [°] (20-40)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	120,000
W de Wilcoxon	396,000
Z	-2,489
Sig. asintótica(bilateral)	<b>0,013</b>
Variable de agrupación: Deflexión [°] (20-60)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	57,000
W de Wilcoxon	333,000
Z	-2,815
Sig. asintótica(bilateral)	0,005
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	<b>0,004<sup>b</sup></b>
Variable de agrupación: Deflexión [°] (40-60)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	83,500
W de Wilcoxon	273,500
Z	-1,237
Sig. asintótica(bilateral)	0,216
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,220 <sup>b</sup>
b. No corregido para empates.	

La variable entretangencia horizontal (ETH) a pesar de tener un valor p mayor que el nivel de significancia ( $p=0,075$  no existe una asociación estadísticamente significativa), se logró inferir que genera variación en el gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ) de manera estadísticamente no significativa cuando (ver Tabla 65): i)  $ETH < 200$  m, ii)  $200 \text{ m} < ETH < 600$  m y iii)  $ETH > 600$  m. Lo anterior permite establecer una asociación con los valores asignados en los casos de estudio de la metodología de asignación de velocidades específicas de Colombia (INVIAS, 2008).

Tabla 65. Comparaciones múltiples de la variable ETH.

Variable de agrupación: ETH [m] (200-400)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	81,000
W de Wilcoxon	901,000
Z	-1,763
Sig. asintótica(bilateral)	0,078
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,080 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: ETH [m] (200-600)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	44,000
W de Wilcoxon	864,000
Z	-0,763
Sig. asintótica(bilateral)	0,446
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,480 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: ETH [m] (200-800)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	30,000
W de Wilcoxon	850,000
Z	-2,041
Sig. asintótica(bilateral)	0,041
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,040 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: ETH [m] (400-600)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	9,000
W de Wilcoxon	37,000
Z	-0,342
Sig. asintótica(bilateral)	0,732
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,833 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: ETH [m] (400-800)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	7,000
W de Wilcoxon	35,000
Z	-1,323
Sig. asintótica(bilateral)	0,186
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,230 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: ETH [m] (600-800)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	4,000
W de Wilcoxon	10,000
Z	-0,707
Sig. asintótica(bilateral)	0,480
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,629 <sup>b</sup>

b. No corregido para empates.

### 5.8. Análisis no paramétrico del $\Delta V_{85}$ por casos INVIAS 2008

Con el objeto de encontrar diferencias significativas entre las variables independientes con respecto a la variable respuesta (gradiente de velocidad de operación:  $\Delta V_{85}$ ), y de acuerdo a los datos categorizados en el numeral anterior (numeral 5.7), se realizó un análisis de los datos agrupados de acuerdo a los casos descritos en la metodología de asignación de velocidades de Colombia (INVIAS, 2008). Se realizaron análisis estadísticos como: prueba Kruskal-Wallis y pruebas Post-hoc, con el fin de encontrar significancias entre las variables estudiadas.

### 5.8.1. Caso 1 y 1R

Con el fin de verificar la significancia estadística que generan las características geométricas agrupadas en el caso 1 de estudio (avance y contra), se realizó una prueba Kruskal-Wallis, obteniendo como resultado, que las variables: i) Radio ( $p= 0,013$ ), ii) Externa ( $p= 0,002$ ), y iii) Deflexión ( $P= 0,000$ ) presentan un valor  $p$  menor al nivel de significancia (5%) en el gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no todas las medianas de población son iguales (ver Tabla 66). De esta manera, se lograron identificar las variables geométricas que intervienen en los cambios de velocidad en el caso 1, en una carretera rural de dos carriles sobre terreno plano.

Tabla 66. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs  $\Delta V_{85}$ . Caso 1 y 1R.

AVANCE C1		CONTRA C1R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	4,389	H de Kruskal-Wallis	10,831
gl	3	gl	3
Sig. asintótica	<b>0,222</b>	Sig. asintótica	<b>0,013</b>
b. Variable de agrupación: R-C1		b. Variable de agrupación: R-C1R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	1,268	H de Kruskal-Wallis	0,969
gl	3	gl	3
Sig. asintótica	<b>0,737</b>	Sig. asintótica	<b>0,809</b>
b. Variable de agrupación: Lc-C1		b. Variable de agrupación: Lc-C1R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	3,484	H de Kruskal-Wallis	12,999
gl	2	gl	2
Sig. asintótica	<b>0,175</b>	Sig. asintótica	<b>0,002</b>
b. Variable de agrupación: E-C1		b. Variable de agrupación: E-C1R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	5,186	H de Kruskal-Wallis	17,604
gl	2	gl	2
Sig. asintótica	<b>0,075</b>	Sig. asintótica	<b>0,000</b>
b. Variable de agrupación: D-C1		b. Variable de agrupación: D-C1R	

#### 5.8.1.1. Comparaciones múltiples Caso 1 y 1R

Una vez se identificaron las variables independientes con diferencias significativas, se realizaron análisis de pruebas de rango y comparaciones múltiples por parejas, que permitieron determinar cuáles medianas presentaban diferencias. Las comparaciones corresponden a los valores categorizados según la Tabla 60.

El análisis de la variable Radio de curvatura (R) permitió inferir, que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $R < 200$  m, ii)  $200 \text{ m} < R < 600$  m, y iii)  $R > 600$  m (ver Tabla 67).

Tabla 67. Comparaciones múltiples de la variable Radio. Caso 1.

<b>Variable de agrupación: Radio [m] (200-400)</b>	
<b>Prueba</b>	<b><math>\Delta V_{85}</math></b>
U de Mann-Whitney	50,500
W de Wilcoxon	203,500
Z	-2,511
Sig. asintótica(bilateral)	0,012
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,010 <sup>b</sup>
<b>Variable de agrupación: Radio [m] (200-600)</b>	
<b>Prueba</b>	<b><math>\Delta V_{85}</math></b>
U de Mann-Whitney	6,000
W de Wilcoxon	16,000
Z	-2,265
Sig. asintótica(bilateral)	0,024
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,023 <sup>b</sup>
<b>Variable de agrupación: Radio [m] (200-800)</b>	
<b>Prueba</b>	<b><math>\Delta V_{85}</math></b>
U de Mann-Whitney	6,000
W de Wilcoxon	12,000
Z	-1,816
Sig. asintótica(bilateral)	0,069
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,082 <sup>b</sup>
<b>Variable de agrupación: Radio [m] (400-600)</b>	
<b>Prueba</b>	<b><math>\Delta V_{85}</math></b>
U de Mann-Whitney	19,000
W de Wilcoxon	29,000
Z	-1,343
Sig. asintótica(bilateral)	0,179
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,203 <sup>b</sup>
<b>Variable de agrupación: Radio [m] (400-800)</b>	
<b>Prueba</b>	<b><math>\Delta V_{85}</math></b>
U de Mann-Whitney	13,000
W de Wilcoxon	19,000
Z	-1,323
Sig. asintótica(bilateral)	0,186
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,216 <sup>b</sup>
<b>Variable de agrupación: Radio [m] (600-800)</b>	
<b>Prueba</b>	<b><math>\Delta V_{85}</math></b>
U de Mann-Whitney	4,000
W de Wilcoxon	14,000
Z	-0,707
Sig. asintótica(bilateral)	0,480
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,629 <sup>b</sup>

b. No corregido para empates.

El análisis de la variable Externa (E) permitió inferir que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $E < 5$  m, y ii)  $5 \text{ m} < E < 10$  m, y iii)  $E > 10$  m (ver Tabla 68).

El análisis de la variable ángulo de deflexión (D) permitió inferir, que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $D < 20^\circ$ , y ii)  $20^\circ < D < 40^\circ$ , y iii)  $D > 40^\circ$  (ver Tabla 69).

Tabla 68. Comparaciones múltiples de la variable Externa. Caso 1.

Variable de agrupación: Externa [m] (5-10)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	41,000
W de Wilcoxon	194,000
Z	-2,701
Sig. asintótica(bilateral)	0,007
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,006 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Externa [m] (5-15)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	16,000
W de Wilcoxon	169,000
Z	-3,029
Sig. asintótica(bilateral)	0,002
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,001 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Externa [m] (10-15)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	29,500
W de Wilcoxon	107,500
Z	-1,428
Sig. asintótica(bilateral)	0,153
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,157 <sup>b</sup>

b. No corregido para empates.

Tabla 69. Comparaciones múltiples de la variable Deflexión. Caso 1.

Variable de agrupación: Deflexión [°] (20-40)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	15,000
W de Wilcoxon	81,000
Z	-3,394
Sig. asintótica(bilateral)	0,001
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,000 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Deflexión [°] (20-60)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	9,000
W de Wilcoxon	75,000
Z	-3,508
Sig. asintótica(bilateral)	0,000
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,000 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Deflexión [°] (40-60)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	47,500
W de Wilcoxon	152,500
Z	-1,878
Sig. asintótica(bilateral)	0,060
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,060 <sup>b</sup>

b. No corregido para empates.

### 5.8.2. Caso 2 y 2R

Con el fin de verificar la significancia estadística que generan las características geométricas agrupadas en el caso 2 de estudio (avance y contra), se realizó una prueba Kruskal-Wallis, obteniendo como resultado, que la variable: i) Externa ( $p=0,040$ ) presenta un valor p menor al nivel de significancia (5%) en el gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ), se concluye que no todas las medianas de población son iguales (ver Tabla 70). De esta manera, se logró identificar la variable geométrica que interviene en los cambios de velocidad en el caso 2, en una carretera rural de dos carriles sobre terreno plano.



Tabla 70. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs  $\Delta V_{85}$ . Caso 2 y 2R.

AVANCE C2		CONTRA C2R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	3,364	H de Kruskal-Wallis	3,996
gl	2	gl	2
Sig. asintótica	<b>0,186</b>	Sig. asintótica	<b>0,136</b>
b. Variable de agrupación: R-C2		b. Variable de agrupación: R-C2R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	1,042	H de Kruskal-Wallis	2,195
gl	1	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,307</b>	Sig. asintótica	<b>0,138</b>
b. Variable de agrupación: ETH-C2		b. Variable de agrupación: ETH-C2R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	1,390	H de Kruskal-Wallis	4,364
gl	2	gl	2
Sig. asintótica	<b>0,499</b>	Sig. asintótica	<b>0,113</b>
b. Variable de agrupación: Lc-C2		b. Variable de agrupación: Lc-C2R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	2,356	H de Kruskal-Wallis	6,431
gl	2	gl	2
Sig. asintótica	<b>0,308</b>	Sig. asintótica	<b>0,040</b>
b. Variable de agrupación: E-C2		b. Variable de agrupación: E-C2R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	0,924	H de Kruskal-Wallis	2,455
gl	2	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,630</b>	Sig. asintótica	<b>0,117</b>
b. Variable de agrupación: D-C2		b. Variable de agrupación: D-C2R	

### 5.8.2.1. Comparaciones múltiples Caso 2 y 2R

Una vez se identificaron las variables independientes con diferencias significativas, se realizaron análisis de pruebas de rango y comparaciones múltiples por parejas, que permitieron determinar cuáles medianas presentaban diferencias. Las comparaciones corresponden a los valores categorizados según la Tabla 60.

El análisis de la variable Externa (E) permitió inferir que el  $\Delta V_{85}$ , cambia de comportamiento cuando se presentan los siguientes intervalos: i)  $E < 5$  m, y ii)  $5 \text{ m} < E < 10$  m, y iii)  $E > 10$  m (ver Tabla 71).

Tabla 71. Comparaciones múltiples de la variable Externa. Caso 2.

Variable de agrupación: Externa [m] (5-10)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	1,000
W de Wilcoxon	16,000
Z	-2,205
Sig. asintótica(bilateral)	0,027
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	<b>0,032<sup>b</sup></b>
Variable de agrupación: Externa [m] (5-15)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	0,000
W de Wilcoxon	15,000
Z	-1,464
Sig. asintótica(bilateral)	0,143
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,333 <sup>b</sup>
Variable de agrupación: Externa [m] (10-15)	
Prueba	$\Delta V_{85}$
U de Mann-Whitney	0,000
W de Wilcoxon	10,000
Z	-1,414
Sig. asintótica(bilateral)	0,157
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	0,400 <sup>b</sup>

b. No corregido para empates.

### 5.8.3. Caso 4 y 4R

Con el fin de verificar la significancia estadística que generan las características geométricas agrupadas en el caso 4 de estudio (avance y contra), se realizó una prueba Kruskal-Wallis, obteniendo como resultado, que ninguna variable genera cambios significativos en el gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ), y se concluye que todas las medianas de población son iguales (ver Tabla 72).

Tabla 72. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs  $\Delta V_{85}$ . Caso 4 y 4R.

AVANCE C4		CONTRA C4R			
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	0,533	H de Kruskal-Wallis	2,000	H de Kruskal-Wallis	0,000
gl	2	gl	2	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,766</b>	Sig. asintótica	<b>0,368</b>	Sig. asintótica	<b>1,000</b>
b. Variable de agrupación: R-C4		b. Variable de agrupación: R-C4R		b. Variable de agrupación: E-C4R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	2,000	H de Kruskal-Wallis	2,000	H de Kruskal-Wallis	0,000
gl	2	gl	2	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,368</b>	Sig. asintótica	<b>0,368</b>	Sig. asintótica	<b>1,000</b>
b. Variable de agrupación: Lc-C4		b. Variable de agrupación: Lc-C4R		b. Variable de agrupación: D-C4R	

### 5.8.4. Caso 5 y 5R

Con el fin de verificar la significancia estadística que generan las características geométricas agrupadas en el caso 5 de estudio (avance y contra), se realizó una prueba Kruskal-Wallis, obteniendo como resultado, que ninguna variable genera cambios significativos en el gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ), y se concluye que todas las medianas de población son iguales (ver Tabla 73).

Tabla 73. Prueba Kruskal-Wallis. Geometría vs  $\Delta V_{85}$ . Caso 5 y 5R.

AVANCE C5		CONTRA C5R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	3,600	H de Kruskal-Wallis	1,800
gl	2	gl	2
Sig. asintótica	<b>0,165</b>	Sig. asintótica	<b>0,407</b>
b. Variable de agrupación: R-C5		b. Variable de agrupación: R-C5R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	0,333	H de Kruskal-Wallis	0,200
gl	1	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,564</b>	Sig. asintótica	<b>0,655</b>
b. Variable de agrupación: Lc-C5		b. Variable de agrupación: Lc-C5R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	3,000	H de Kruskal-Wallis	1,800
gl	1	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,083</b>	Sig. asintótica	<b>0,180</b>
b. Variable de agrupación: E-C5		b. Variable de agrupación: E-C5R	
Estadísticos de prueba <sup>b</sup>		Estadísticos de prueba <sup>b</sup>	
Prueba	$\Delta V_{85}$	Prueba	$\Delta V_{85}$
H de Kruskal-Wallis	0,500	H de Kruskal-Wallis	0,600
gl	1	gl	1
Sig. asintótica	<b>0,480</b>	Sig. asintótica	<b>0,439</b>
b. Variable de agrupación: D-C5		b. Variable de agrupación: D-C5R	

El análisis del gradiente de velocidad sucesivo ( $\Delta V_{85}$ ), permitió identificar variables independientes, que generan variaciones de velocidad al interior de una curva horizontal. Es importante mencionar que el radio de curvatura (R) y la externa (E) son variables sin consideración en la metodología de asignación de velocidades específicas objeto del presente estudio.

## Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

A partir de la metodología desarrollada para este trabajo de investigación se identificaron las siguientes conclusiones y recomendaciones.

### 6.1. CONCLUSIONES

Se analizó la aplicabilidad de la metodología de asignación de velocidades específicas del MDGC (INVIAS, 2008), para carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano, por medio de la aplicación de estadística descriptiva, análisis no paramétricos, comparación de medianas para muestras independientes y comparaciones múltiples, tanto para datos agrupados de acuerdo a la metodología, como para los datos totales incluidos en el estudio.

Se analizaron las variaciones de velocidad en los puntos de interés de la geometría de la carretera: el punto medio de la entretangencia de entrada, el punto de inicio de la curva horizontal (PC), el punto medio de la curva horizontal (MC), el punto final de la curva horizontal (PT) y el punto medio de la entretangencia de salida, por medio de estadística descriptiva y pruebas Kruskal-Wallis, para los datos agrupados de acuerdo a la metodología de asignación de velocidades del MDGC (INVIAS, 2008) como en los datos totales. Los análisis permitieron inferir que las variables influyentes son el radio, la externa de la curva y el ángulo de deflexión, siendo estadísticamente significativas.

Con esta investigación se confirma la hipótesis planteada al inicio del estudio, dado que al aplicar la metodología de asignación de velocidades específicas de curvas horizontales del MDGC (INVIAS, 2008), se generan problemas de consistencia en el trazado, permitiendo al diseñador establecer gradientes de velocidad en elementos sucesivos de hasta 20 km/h, clasificándose como un diseño “pobre” de acuerdo con la literatura (Jacob et al., 2013; Lamm & Choueiri, 1987; Lamm et al., 1988, 1986). Esta condición puede influir en los problemas asociados con la seguridad vial, dado que, a velocidades altas de conducción se aumenta la probabilidad de que ocurra una colisión y la gravedad de las consecuencias del choque (WHO, 2013). Por otro lado, los análisis estadísticos permitieron inferir que no se presentan variaciones importantes en la velocidad de operación a la entrada y salida de una curva horizontal en una carretera rural de dos carriles en terreno plano; los datos agrupados según el caso de estudio del MDGC (INVIAS, 2008) no presentan variaciones de velocidad superiores a 20 km/h, indicando que un conductor al transitar por una curva horizontal trata de conservar la velocidad de operación en los puntos de interés. Estos resultados permiten inferir que, aunque el diseño geométrico podría ser considerado "pobre" según los criterios de consistencia de diseño geométrico desarrollados por distintos investigadores, las velocidades de operación seleccionadas por los conductores en terreno plano no son afectadas por la geometría de las curvas horizontales.

Los principales datos registrados de la geometría de la vía son: R, ETH, Lc, E y  $\Delta$ , denominadas como variables independientes en el análisis de la información recolectada. La velocidad de operación, obtenida bajo condiciones de flujo libre medida en campo durante el día, en condiciones meteorológicas de clima templado y de pavimento seco, es llamada la variable dependiente. Ambas variables fueron consignadas y organizadas en una base de datos, a partir de la cual se determinó la velocidad ( $V_{85}$ ) según el sentido de circulación asociada a cada punto de interés de la geometría del tramo.

El análisis de la información primaria inició con estadísticos descriptivos de los datos, por medio del cálculo del promedio, la desviación estándar, la varianza, los valores mínimos y máximos, permitiendo definir la variabilidad de los datos, garantizando la inclusión de los casos de estudio propuestos en la metodología colombiana. Los análisis de coeficiente de correlación entre las variables independientes, permitieron inferir las relaciones directas e inversas que existen entre las mismas

(geometría horizontal), corroborando lo establecido en la literatura (Castro et al., 2011; Garach, 2014; Lamm et al., 1988; Pérez-Zuriaga et al., 2011) y verificando la confiabilidad de la información recopilada. El análisis de correlación entre variables "independientes" permitió definir el tipo de pruebas a realizar con el objeto de remover síntomas de multi-colinearidad entre parámetros de diseño de carreteras; dos variables "independientes" que tienen alta correlación no deben incluirse en un análisis paramétrico o no paramétrico pues generan problemas de calibración.

De las características geométricas analizadas, se infiere que el mayor valor promedio se presenta en el radio de curvatura horizontal y el menor valor en la externa; la mayor desviación estándar se presenta en el radio de curvatura (sentido de avance) y en la ETH (sentido en contra), mientras que la menor desviación se encuentra en la externa. Por otra parte, la  $V_{85}$  presenta un mayor valor promedio en la ETH/2, y un menor valor en el MC; la desviación estándar de esta variable evidencia un mayor valor en la ETH/2, mientras que el menor valor se encuentra en el PC.

Al estudiar los datos agrupados de acuerdo a la metodología de asignación de velocidades de Colombia, se logró establecer que el 63% de los datos corresponden al Caso 1, el 19 % al Caso 2, el 8% al Caso 4 y el 10% al Caso 5, siendo los más comunes los casos 1 y 2. Por otro lado, en carreteras rurales de dos carriles bidireccionales en terreno plano, no es común encontrar la combinación de un segmento recto con longitud entre 150 y 400 m seguido de una curva horizontal con una deflexión mayor a  $45^\circ$  (Caso 3,  $V_{TR} > 50$  km/h); por tal motivo, no se presentó esta condición en los análisis.

Los análisis estadísticos (pruebas no paramétricas) realizados en los casos de estudio, permitieron establecer si las condiciones de velocidad varían según la geometría de la vía en los puntos de interés, encontrando que, para longitudes de entretangencia mayores a 600 m (caso 5), se presenta un aumento significativo en la velocidad de operación.

El análisis estadístico de la metodología de asignación de velocidades específicas en el MDGC (INVIAS, 2008) se realizó a partir de pruebas no paramétricas como: prueba Kruskal-Wallis y comparación de medianas para muestras independientes, obteniendo que la variable dependiente ( $\Delta V_{85}$ ), cambia de comportamiento cuando: a)  $R < 200$  m,  $200 \text{ m} < R < 600$  m,  $R > 600$  m; b)  $E < 5$  m,  $5 \text{ m} < E < 10$  m,  $E > 10$  m; y c)  $D < 20^\circ$ ,  $20^\circ < D < 40^\circ$ ,  $D > 40^\circ$ , sin sobrepasar un gradiente de velocidad mayor a 10 km/h.

Al realizar el análisis de la variable ETH, se logró identificar que la misma no genera variaciones significativas en el gradiente de velocidad de las curvas sin agrupar, sin embargo, se encontraron intervalos que pueden generar variaciones:  $ETH < 200$  m,  $200 \text{ m} < ETH < 600$  m,  $ETH > 600$  m.

El análisis estadístico del  $\Delta V_{85}$  agrupado de acuerdo a la metodología de asignación de velocidades específicas del MDGC (INVIAS, 2008) permitió definir que en el caso 1 y caso 2 se presentan variaciones con significancia estadística. En el caso 1, las variables independientes: radio, externa y deflexión, generan significancia estadística en el  $\Delta V_{85}$ . Para el caso 2, la variable externa ocasiona cambios significativos cuando:  $E < 5$  m,  $5 \text{ m} < E < 10$  m,  $E > 10$  m.

Se evidenció que no es necesario clasificar la variable dependiente (“nulo”, “+10” y “+20”) para los análisis estadísticos mencionados, más su importancia se evidencia en la comparación con la metodología colombiana, debido a que ésta se basa en gradientes de velocidad.

El estudio realizado permitió inferir que el gradiente de velocidad en terreno plano, con un valor mayor a 20 km/h no es representativo, dado que el conductor tiende a mantener su velocidad a lo largo del recorrido (elementos sucesivos).

De acuerdo a los resultados obtenidos de los análisis estadísticos, se puede inferir que los datos agrupados de acuerdo a la metodología de asignación de velocidades del MDGC (INVIAS, 2008), no presentan variaciones significativas en la velocidad de operación, sin embargo se lograron identificar, para cada caso de estudio, las variables que influyen en el gradiente de velocidad como se presenta en la Tabla 74:

Tabla 74. Variación de velocidad de curvas horizontales en terreno plano.

Caso	Variable Incidente	$\Delta V_{85}$	Observación
1	radio, ETH, long. curva, externa y deflexión	Nulo	Gradiente de velocidad agrupado. Caso 5 con porcentaje de representatividad estadística bajo.
2	Long. curva y deflexión	Nulo	
4	Externa y deflexión	Nulo	
5	radio, ETH, long. curva, externa, deflexión	+10	

El análisis del  $\Delta V_{85}$  de los datos agrupados (INVIAS, 2008) permitió inferir su comportamiento de acuerdo al valor que toma la variable independiente: caso 1 (radio, externa y ángulo de deflexión) y caso 2 (externa). La Tabla 75 presenta el comportamiento del  $\Delta V_{85}$  categorizado como “nulo” y “+10” para las variables independientes significativas.

Tabla 75. Comportamiento del gradiente de velocidad caso 1 y 2.

Variable	Caso 1						Caso 2					
	Radio (m)		Externa (m)		Deflexión (°)		Externa (m)					
Intervalo	< 200	200 < R < 600	> 600	< 5	5 < E < 10	> 10	< 20	20 < D < 40	> 40	< 5	5 < E < 10	> 10
$\Delta V_{85}$	" +10 "	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	" +10 "	Nulo	Nulo	" +10 "	Nulo	" +10 "	" +10 "

El análisis comparación de medianas para muestras independientes de los datos desagrupados (datos totales) permitió inferir el comportamiento del gradiente de velocidad ( $\Delta V_{85}$ ) de acuerdo al valor que toma la variable independiente (radio, externa y ángulo de deflexión). La Tabla 76 presenta el comportamiento del  $\Delta V_{85}$  categorizado como “nulo” y “+10” para las variables independientes analizadas.

Tabla 76. Comportamiento del gradiente de velocidad para datos desagrupados.

Variable	Datos totales								
	Radio (m)			Externa (m)			Deflexión (°)		
Intervalo	< 200	200 < R < 600	> 600	< 5	5 < E < 10	> 10	< 20	20 < D < 40	> 40
$\Delta V_{85}$	" +10 "	Nulo	Nulo	Nulo	" +10 "	" +10 "	Nulo	" +10 "	" +10 "

## 6.2. RECOMENDACIONES

Con el fin de estudiar las variables que afectan la consistencia del diseño utilizando modelos de regresión lineal, se pueden relacionar las variables independientes significativas con la  $V_{85}$ . Por lo tanto, es recomendado realizar una toma de datos en diferentes tramos viales que cumplan con los criterios de selección en todo el país, permitiendo la aplicación de modelos estadísticos de regresión lineal para la estimación de velocidades de operación en carreteras rurales de dos carriles en terreno plano, partiendo de la conformación de un equipo de profesionales con dispositivos de última generación que permitan la obtención de información primaria en todo el país.

Se recomienda conformar una base de datos en donde se contemplen las condiciones físicas y mentales del conductor, así como las condiciones del vehículo, y datos de accidentalidad debidos a la geometría de la carretera, permitiendo ampliar el estudio de las variables que afectan la velocidad de operación en las carreteras colombianas.

### 6.3. INVESTIGACIÓN FUTURA

Una de las variables que no se incorporó en el presente estudio fue la zona lateral y el alineamiento vertical. Éstas pueden ser utilizadas en el análisis de la variación de velocidad en los elementos de la curva horizontal en terreno plano. El análisis puede complementarse con análisis de varianza, pruebas no paramétricas, comparaciones múltiples y pruebas Post-hoc. A partir de los casos descritos en el apéndice D “Descripciones de la categoría de clasificación de riesgos en carretera” del NCHRP Report 641: Guidance for the Design and Application of Shoulder and Centerline Rumble Strips (Biehler et al., 2009).

Es importante realizar un análisis de las variaciones de velocidad de curvas horizontales en terreno plano, para tramos con velocidad de diseño ( $V_{TR}$ ) menor a 50 km/h, considerando de igual forma la metodología de asignación de velocidades específicas presentada en el manual colombiano (INVIAS, 2008).

Este trabajo de grado es la base para futuras investigaciones, partiendo de la conformación de un equipo de profesionales con dispositivos de última generación para la toma de datos, y recursos financieros que permitan la obtención de información primaria en todo el país, permitiendo un análisis profundo entre la variable dependiente y las independientes con significancia estadística.

## Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- Aarts, L., van Schagen, I.N.L.G., 2006. Driving speed and the risk of road crashes: a review. *Accident Analysis and Prevention* 38(2), 215-224.
- AASHTO. (2004). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (5th ed.).
- AASHTO. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets* (6th ed.).
- Abdelwahab, W. M., Aboul-Ela, M. T., & Morrall, J. F. (1998). Geometric design consistency based on speed change on horizontal curves. *Road and Transport Research*, 7(1), 13–23.
- Acuña, E. (n.d.). 11. pruebas no paramétricas. In UPRM (Ed.), *Pruebas no paramétricas* (p. 23). Puerto Rico: UPRM. Retrieved from <http://academic.uprm.edu/eacuna/miniman11sl.pdf>
- Alexander, G. J., & Lunenfeld, H. (1986). *Driver expectancy in highway design and traffic operations*. [Washington, D.C.]: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Traffic Operations.
- American Association of State Highway and Transportation Officials - AASTHO. (2018). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 7th Edition.
- Anderson, I. B., Bauer, K. M., Harwood, D. W., & Fitzpatrick, K. (1999). Relationship to Safety of Geometric Design Consistency Measures for Rural Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, (1658), 43–51.
- Andueza, P. (2000). Mathematical Models of Vehicular Speed on Mountain Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1701(00), 104–110.
- Bella, F. (2005). The evaluation of design consistency: predicting models of operating speed on three-dimensional alignment from tests on driving simulator.
- Biehler, A. D., Dot, P., Brown, L. L., Dot, M., Clark, W. A. V, Angeles, L., ... Dot, V. (2009). NCHRP Report 641: Guidance for the Design and Application of Shoulder and Centerline Rumble Strips. <https://doi.org/10.17226/14323>
- Bravo, P. E. (1976). *Diseño de carreteras técnica y análisis del proyecto* (6th ed.).
- Cafiso, S., Di Graziano, A., & La Cava, G. (2005). Actual driving data analysis for design consistency evaluation. *Transportation Research Record*, (1912), 19–30. <https://doi.org/10.3141/1912-03>
- Calero, C. A. (2015). Metodología para la evaluación de la consistencia de diseño de carreteras rurales de dos carriles. Universidad de Puerto Rico recinto Universitario de Mayagüez.
- Camacho, F. J., Pérez, A. M., Campoy, J. M., & García, A. (2013). New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. *Accident Analysis & Prevention*, 61, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.001>
- Camacho-Torregrosa, F. J. (2015). Desarrollo y calibración de un modelo global de consistencia del diseño geométrico de carreteras convencionales basado en el empleo de perfiles continuos de velocidad de operación. *Carreteras*. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/48543>
- Canavos, G. C. (1988). *Probabilidad y estadística aplicaciones y métodos* (1st ed.).
- Cárdenas, J. (2013). *Diseño geométrico de carreteras* (2th ed.).
- Cardoso, J. L. (1997). Relationships between Accident Frequency and Speed Consistency in Portuguese Two-Lane / Two-Way Highways Links.
- Castro, M., Pardillo-Mayora, J.M., & Sánchez, J.F. (2005). Alignment Indices as a Tool to Evaluate Safety and Design Consistency in Two Lane Rural Roads.



- Castro, M., Sánchez, J. A., Vaquero, C. M., Iglesias, L., & Rodríguez-Solano, R. (2008). Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(5), 325–331. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2008\)22:5\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2008)22:5(325))
- Castro, M., Sánchez, J. F., Sánchez, J. A., & Iglesias, L. (2011). Operating Speed and Speed Differential for Highway Design Consistency, 837–840. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000309).
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (7th ed.).
- Donald, D., Ockwell, A., & Board, A. R. R. (1994). Reducing Speed: The Relative Effectiveness of a Variety of Sign Types. Australian Road Research Board. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=ZpATRI5BsVQC>
- Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. (2004). Speed and road accidents: An evaluation of the Power Model. *TOI Report*, 740(December), 134.
- Fambro, D. B., Fitzpatrick, K., & Koppa, R. J. (1997). Determination of stopping sight distances. Transportation Research Board.
- FDOT. (2016). *Manual on Uniform Traffic Studies*.
- Figueroa M, A. M., & Tarko, A. P. (2007). Speed Changes in the Vicinity of Horizontal Curves on Two-Lane Rural Roads. *Journal of Transportation Engineering*, 133(4), 215–222. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2007\)133:4\(215\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2007)133:4(215))
- Figueroa M, A. M. (2019). Diseño Geométrico. In Universidad del Cauca (Ed.). Popayán: Congreso internacional de ingeniería vial.
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M.A., Wooldridge, M.D., and Miaou, S.P. (2003). “Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices.” NCHRP Report No. 504.
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., ... Passetti, K. (2000). Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways, (99), 217. <https://doi.org/FHWA-RD-99-171>
- Garach Morcillo, L. (2014). Consistency measure in two-lane rural highways and its relation to road safety: application to the province of Granada.
- García Leal, J. & Lara Porras, A.M. (1998). “Diseño Estadístico de Experimentos. Análisis de la Varianza.” Grupo Editorial Universitario.
- Gattis, J.L., and Watts, A. (1999). “Urban Street Speed Related to Width and Functional Class.” *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 193-200.
- Gibreel, G. M., Easa, S. M., ASCE, & El-Dimeery, I. A. (2001). Prediction of operating speed on three -dimensional highway alignments, 3(February), 21–30.
- Gibreel, G.M., Easa, S.M., Hassan, Y., El-Dimeery, I. A. (1999). State of the art of highway geometric design consistency. *Journal of Transportation Engineering*, (August), 305–313.
- Gitelman, V., Doveh, E., & Bekhor, S. (2017). The Relationship between Free-Flow Travel Speeds, Infrastructure Characteristics and Accidents, on Single-Carriageway Roads. *Transportation Research Procedia*, 25, 2026–2043. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.398>
- Glennon, J., & Harwood, D. (1978). Highway design consistency and systematic design related to highway safety. *Transportation Research Record*, (c). Retrieved from [https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds\[\]=cjournalarticle\\_483646\\_38](https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds[]=cjournalarticle_483646_38)
- GRSP, 2008. Speed management. A road safety manual for decision-makers and practitioners. Global Road Safety Partnership, Geneva. Guidelines,

- Heger, R., Watters, P., O Mahony, M., Wong, J. T., Huang, S. H., Green, P., & Hagendoorn, R. G. C. (1998). Driving Behavior and Driver Mental Workload As Criteria of Highway Geometric Design Quality. International Symposium on Highway Geometric Design Practices, 1995, Boston, Massachusetts, USA. Retrieved from [http://www.easts.info/publications/journal\\_proceedings/journal2010/100196.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0](http://www.easts.info/publications/journal_proceedings/journal2010/100196.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0)
- Highway Capacity Manual (HCM) (2000). Transportation Research Board, Washington, D.C.
- IBM SPSS STATISTICS. Software estadístico.
- Ibrahim, A.T., and Hall, F.L. (1994). “Effect of Adverse Weather Conditions on Speed=Flow-Occupancy Relationships. Journal of Transportation Research Records, No. 1457, pp. 184-191.
- Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. (2016). Forensis datos para la vida.
- Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. (2018). Forensis datos para la vida, 19(1), 563.
- INVIAS. (1998). Manual de Diseño Geométrico para Carreteras, 162.
- INVIAS. (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras.
- Jacob, A., R, D., & M.V.L.R., A. (2013). Geometric design consistency of multiple horizontal curves on two-lane rural highways. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 104, 1068–1077. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.202>
- Kanellaidis, G., Golias, J., and Efstathiadis, S. (1990). “Driver’s speed behaviour on rural road curves.” Traffic Engrg. and Control, London, 31(7/8), 414–415.
- Krammes A, R., & Glascock, S. W. (1992). Geometric inconsistencies and accident experience on two-lane rural highways. Paper Presented at the 71st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, August 1991 ., (1356).
- Krammes, R. A., Brackett, R. Q., Shafer, M. A., Ottesen, J. L., Anderson, I. B., Fink, K. L., ... Messer, C. J. (1995). Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways. Federal Highway Administration.
- Lamm, R., & Choueiri, E. M. (1987). Recommendations for Evaluating Horizontal Design Consistency Based on Investigations in the State of New York.
- Lamm, R., & Choueiri, E. M. (1992). Traffic safety on two continents - A ten year analysis of human and vehicular involvements.
- Lamm, R., Choueiri, E. M., Hayward, J. C., & Paluri, A. (1988). Possible Design Procedure To Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads, 1195, 111–122.
- Lamm, R., Choueriri, E. M., & Mailaender, T. (1999). Validation of the 10 MPH rule in highway design consistency procedure. Traffic Safety on Two Contments - A Ten-Year Analysis of Human and Vehicular Involments, Proceedings 5HRP, 18–20.
- Lamm, R., Hayward, J. C., & Cargin, J. G. (1986). Comparison of different procedures for evaluating speed consistency, 10–20.
- Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). Highway design and traffic safety engineering handbook. New York: McGraw-Hill.(Lamm, Choueriri, & Mailaender, 1999)
- Lara Porras, A.M. (2000). “Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS” Proyecto Sur de Ediciones.
- Leisch, J. E., & Leisch, J. P. (1977). New Concepts in Design-Speed Application, 6–14.
- LEISCH, J. E., and LEISCH, J. P. (1976). New concepts in design speed application, Transportation Research Record, 631, National Research Council, Washington, D.C., pp. 4-15.

- Llopis, D. (2017). Desarrollo de una metodología para el diseño y mejora de carreteras convencionales a partir del análisis de la seguridad vial mediante modelos de consistencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/100271>
- Lynam, D., Hummel, T., 2002. The effect of speed on road deaths and injuries: literature review. TRL Limited Unpublished Project Report PR SE/627/02, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- McFadden, J., & Elefteriadou, L. (2000). Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-Lane Rural Highways, 1737(00), 9–17.
- McFadden, J., & Elefteriadou, L. (2007). Formulation and Validation of Operating Speed-Based Design Consistency Models by Bootstrapping. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1579(1), 97–103. <https://doi.org/10.3141/1579-12>
- McKelvey, F. X., Maleck, T. L., Stamatiadis, N., & Hardy, D. K. (1998). Highway accidents and the older driver. Journal of Safety Research, 20(3), 139–140. [https://doi.org/10.1016/0022-4375\(89\)90061-3](https://doi.org/10.1016/0022-4375(89)90061-3)
- McKelvey, P.X., Maleck, T.L., Stamatiadis, N., and Hardy, D.K. (1998). “Highway Accidents and the Older Driver.” Journal of Transportation Research Record, No. 1172, pp. 47-57.
- Messer, C. J. (1980). Methodology for Evaluating Geometric Design Consistency. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 757(1), 7–14.
- Minitab 2017, Inc. Software estadístico.
- MINTRANSPORTE. (2015). Plan Nacional de Seguridad Vial Colombia 2011-2021.
- Morrall, J. F., & Talarico, R. J. (1994). Side Friction Demanded and Margins of Safety on Horizontal Curves. Transportation Research Record, (1435), 145–152. Retrieved from [http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1435/1435-019.pdf%5Cnhttps://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=SIDE+FRICION+DEMANDE+AND+MARGINS+OF+SAFETY+ON+HORIZONTAL+CURVES&author=J.+Morrall&author=R.+Talarico&publication\\_year=1994%5Cnhttps://trid](http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1435/1435-019.pdf%5Cnhttps://scholar.google.com/scholar_lookup?title=SIDE+FRICION+DEMANDE+AND+MARGINS+OF+SAFETY+ON+HORIZONTAL+CURVES&author=J.+Morrall&author=R.+Talarico&publication_year=1994%5Cnhttps://trid)
- Najjar, Y., Russell, E., Stokes, R., and Ghassan, A. L. (2002), “New Speed Limits on Kansas Highways: Impact on Crashes and Fatalities.” Journal of the Transportation Research Forum, Vol. 56, No.4, pp.119-147.
- Ng, J. C. W., & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety, 227, 218–227. <https://doi.org/10.1139/L03-090>
- OECD, 2006. Speed management. Organization for Economic Co-operation and Development, European Conference of Ministers of Transport. Pei, X., Wong, S.C., Sze, N. N., 2012. The roles of exposure and speed in road safety analysis. Accident Analysis and Prevention 48 (2012), 464-471.
- Oppenlander, J. C., Bunte, W. F., & Kadakia, P. L. (1961). Sample Size Requirements for Vehicular Speed Studies. Highway Research Board, (39th Annual Meeting of the Highway Research Board), 68–86. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/281/281-004.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud. (2016). La Seguridad Vial en la Región de las Américas. Retrieved from [http://www2.paho.org/hq/index.php?option=com\\_topics&view=article&id=351&Itemid=40939&lang=es](http://www2.paho.org/hq/index.php?option=com_topics&view=article&id=351&Itemid=40939&lang=es)
- Pérez-Zuriaga, A., Camacho Torregrosa, F. J., & García, A. (2011). La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial.

- Polus, A., & Dagan, D. (1987). Models for Evaluating the Consistency of Highway Alignment. *Transportation Research Record*, (6), 47–56. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2975899>
- Polus, A., & Mattar-Habib, C. (2004). New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety. *Journal of Transportation Engineering*, 130(3), 286–293. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(286))
- Polus, A., Craus, J., & Livneh, M. (1991). Flow and Capacity Characteristics on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, (1320), 128–134. Retrieved from [http://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=FLOW+AND+CAPACITY+CHARACTERISTICS+ON+TWO-LANE+RURAL+HIGHWAYS&author=A.+Polus&author=J.+Craus&author=M.+Livneh&publication\\_year=1991%5Cnhttps://trid.trb.org/view/365595](http://scholar.google.com/scholar_lookup?title=FLOW+AND+CAPACITY+CHARACTERISTICS+ON+TWO-LANE+RURAL+HIGHWAYS&author=A.+Polus&author=J.+Craus&author=M.+Livneh&publication_year=1991%5Cnhttps://trid.trb.org/view/365595)
- Polus, A., Craus, J., and Livneh, M. (1991). “Flow and Capacity Characteristics on Two-Lane Rural Highways.” *Journal of Transportation Research Record*, No. 1372, pp. 128-134.
- Polus, A., Fitzpatrick, K., & Fambro, D. B. (2000). Predicting Operating Speeds on Tangent Sections of Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1737(1), 50–57. <https://doi.org/10.3141/1737-07>
- Sánchez, J. F. (2012). Metodología para la evaluación de la consistencia del trazado de carreteras interurbanas de dos carriles. Universidad Politécnica de Madrid.
- Shinar, D., 1998. Speed and Crashes: a controversial topic and an elusive relationship. In: *Special Report 254: Managing Speed*, Transportation Research Board, Washington DC.
- Singh, D., Zaman M, M., & White, L. (2011). Modeling of 85th Percentile Speed for Rural Highways for Enhanced Traffic Safety, (2211), 109p. Retrieved from [http://ntl.bts.gov/lib/42000/42400/42427/FY10\\_2211\\_Zaman\\_FinalReport.pdf%5Cnhttps://trid.trb.org/view/1117036](http://ntl.bts.gov/lib/42000/42400/42427/FY10_2211_Zaman_FinalReport.pdf%5Cnhttps://trid.trb.org/view/1117036)
- Sminkey, L. (2011). Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011–2020.
- Solano, Efraín, (2019). Software TOPO3. Universidad del Cauca, Colombia.
- Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: the zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, 31(4), 491–506. <https://doi.org/10.1080/00140138808966694>
- Wackerly, D. D., Mendenhall, W., & Scheaffer, R. L. (2008). *Estadística matemática con aplicaciones.pdf* (7 th). <https://doi.org/10.1002/ptr.3245>
- WHO, W. H. O. (2013). *Global status report on road safety*, 1, 318. <https://doi.org/10.1258/jrsm.2010.090426>
- WHO, W. H. O. (2015a). *Global status report on road safety*.
- WHO, W. H. O. (2015b). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial*.
- Wooldridge, M.D., Fitzpatrick, K., Harwood, D. W., Potts, I. B., Elefteriadou, L., & Torbic, J. D. (2003). Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways. *Transportation Research Board*.
- Wooldridge, Mark D., Fitzpatrick, K., Koppa, R., & Bauer, K. (2007). Effects of Horizontal Curvature on Driver Visual Demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1737(1), 71–77. <https://doi.org/10.3141/1737-09>

## ANEXO 1. Ejemplo de aplicación de asignación de velocidades en Colombia.

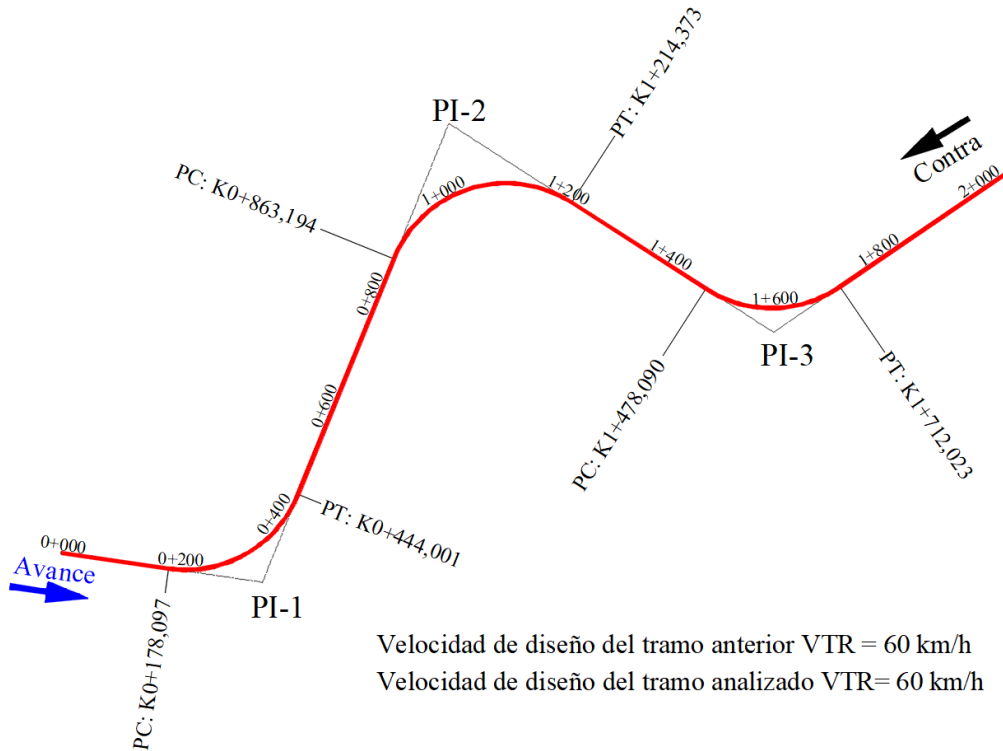
A continuación, se realiza un ejemplo de aplicación que incluye el trazado y la geometría de los elementos en planta (trazado propuesto en esta investigación), siguiendo la metodología de asignación de velocidades específicas para el trazado en planta, descrita en el MDGC (INVIAS, 2008), ver Tabla 77. La Ilustración 23 muestra la configuración del alineamiento en planta, el abscisado y numeración de las curvas.

Categoría: secundaria, tipo de terreno: plano,  $V_{TR} = 60$  km/h (ver Tabla 15).

Tabla 77. Ejemplo de aplicación. Elementos de curvas horizontales.

PI	AZ (entrada)	Deflexión	Lc	PI (N - E)	R	Abscisa (PC - PT)	ETH	CL	E	T
ETH1	98°17'42"						178,10			
PI-1		76°10'33" D	265,904	1702,931 - 1638,461	200	K0+178,10 - K0+444,00		246,748	54,109	156,752
ETH2	22°7'8"						419,19			
PI-2		100°36'19" I	351,179	2459,682 - 1330,884	200	K0+863,19 - K1+214,37		307,772	113,121	240,924
ETH3	122°43'28"						263,72			
PI-3		67°1'0" D	233,933	2115,288 - 794,938	200	K1+478,09 - K1+712,02		220,824	39,864	132,419
ETH4	55°42'27"						342,29			

Ilustración 23. Ejemplo de aplicación. Trazado en planta.



De acuerdo con la metodología de asignación de velocidades del MDGC (INVIAS, 2008), inicialmente, se debe realizar la asignación en sentido de avance de la carretera (ver Ilustración 24). Para realizar este procedimiento, se consideran los casos de estudio expuestos en la Tabla 16. En la curva 1 (PI-1), se asume una velocidad de curva anterior de 60 km/h (equivalente a la velocidad del

ANEXOS

tramo  $V_{TR}$ , un ángulo de deflexión de  $76^\circ$  (Tabla 77) y una longitud de entretangencia de 178,1 m. según la Tabla 16, se puede establecer que el conductor tiene una percepción incierta del trazado y mantiene su velocidad por lo que a la curva horizontal 1 (PI-1) se le debe asignar una velocidad específica igual a la velocidad de la curva anterior. Caso 3 (ver Tabla 78).

Tabla 78. Velocidad Específica de una curva horizontal. Caso 3

Velocidad específica de la curva horizontal anterior VCH (Km/h)	Velocidad de diseño del tramo (VTR) $\leq 50$ Km/h					Velocidad de diseño del tramo (VTR) $> 50$ Km/h				
	Longitud del segmento recto anterior (m)					Longitud del segmento recto anterior (m)				
	L $\leq 70$	70 $< L \leq 250$		250 $< L \leq 400$	L $> 400$	L $\leq 150$	150 $< L \leq 400$		400 $< L \leq 600$	L $> 600$
	$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$				$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$			
VTR	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 20
VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 20
VTR + 20	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20
CASO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras, Tabla 2.2. (INVIAS, 2008)

En la curva 2 (PI-2), se tiene una velocidad de curva anterior de 60 km/h ( $V_{CH}=V_{TR}$ ), un ángulo de deflexión de  $100^\circ$  y una longitud de entretangencia de 419,19 m. según la Tabla 16, se puede establecer que el segmento recto es suficientemente extenso para que la velocidad de entrada a la curva siguiente sea independiente de la velocidad a la que se salió de la curva anterior, por lo que el conductor ajusta su velocidad a una superior en diez (10) kilómetros por hora respecto a la velocidad de diseño del tramo. Caso 4 (ver Tabla 79).

Tabla 79. Velocidad Específica de una curva horizontal. Caso 4

Velocidad específica de la curva horizontal anterior VCH (Km/h)	Velocidad de diseño del tramo (VTR) $\leq 50$ Km/h					Velocidad de diseño del tramo (VTR) $> 50$ Km/h				
	Longitud del segmento recto anterior (m)					Longitud del segmento recto anterior (m)				
	L $\leq 70$	70 $< L \leq 250$		250 $< L \leq 400$	L $> 400$	L $\leq 150$	150 $< L \leq 400$		400 $< L \leq 600$	L $> 600$
	$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$				$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$			
VTR	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 20
VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 20
VTR + 20	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20
CASO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras, Tabla 2.2. (INVIAS, 2008)

Finalmente, en la curva 3 (PI-3), se tiene una velocidad de curva anterior de 70 km/h ( $V_{CH}=V_{TR+10}$ ), un ángulo de deflexión de  $67^\circ$  y una longitud de entretangencia de 263,72 m. según la Tabla 16, se puede establecer que el conductor tiene una percepción incierta del trazado y reduce su velocidad por lo que a la curva horizontal 3 (PI-3) se le debe asignar una velocidad específica menor en diez kilómetros por hora a la velocidad de la curva anterior. Caso 3. (ver Tabla 80).

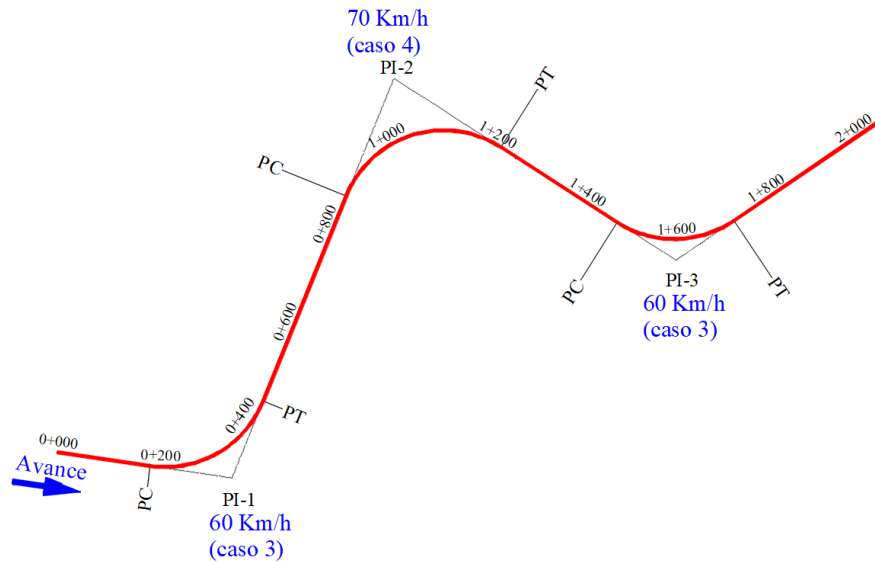
Tabla 80. Velocidad Específica de una curva horizontal. Caso 3 (b)

Velocidad específica de la curva horizontal anterior VCH (Km/h)	Velocidad de diseño del tramo (VTR) $\leq 50$ Km/h					Velocidad de diseño del tramo (VTR) $> 50$ Km/h				
	Longitud del segmento recto anterior (m)					Longitud del segmento recto anterior (m)				
	L $\leq 70$	70 $< L \leq 250$		250 $< L \leq 400$	L $> 400$	L $\leq 150$	150 $< L \leq 400$		400 $< L \leq 600$	L $> 600$
	$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$				$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$			
VTR	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR	VTR	VTR + 10	VTR + 20
VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR	VTR + 10	VTR + 20
VTR + 20	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20	VTR + 20	VTR + 10	VTR + 10	VTR + 20
CASO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras, Tabla 2.2. (INVIAS, 2008)

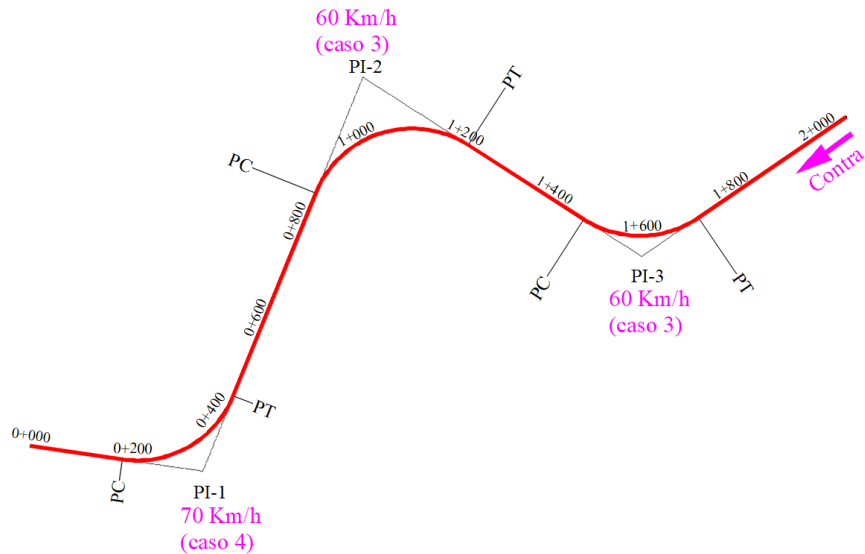
La Ilustración 24, resume la metodología de asignación de velocidades en Colombia de acuerdo al ejemplo de aplicación en sentido de avance.

Ilustración 24. Ejemplo de asignación de velocidades en sentido de avance.



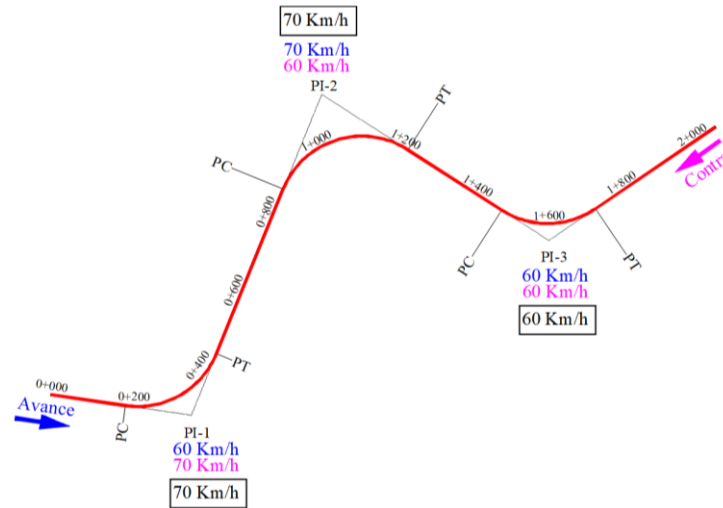
Ahora, es necesario repetir el procedimiento de asignación de velocidades en sentido contrario al abscisado del trazado en planta, ver Ilustración 25.

Ilustración 25. Ejemplo de asignación de velocidades en sentido de contra.



Una vez definida la velocidad en ambos sentidos, la velocidad específica de la curva horizontal analizada  $V_{CH}$ , debe ser la mayor velocidad simulada en ambos sentidos (ver Ilustración 26). En el caso de la curva 1 (PI-1) se tiene que la velocidad en sentido de avance es 60 km/h y en sentido contrario es 70 km/h, por lo tanto, la velocidad específica asignada es igual a 70 km/h.

Ilustración 26. Ejemplo de aplicación. Velocidad de curva horizontal asignada.



Finalmente, es necesario definir la velocidad específica de los segmentos rectos de la carretera (entretangencias horizontales <ETH>). La velocidad específica de la entretangencia horizontal ( $V_{ETH}$ ) debe ser igual a la mayor de las dos velocidades específicas de las curvas horizontales extremas (INVIAS, 2008), ver Ilustración 27. Continuando con el ejemplo, la primera entretangencia se desarrolla entre inicio y curva 1 (PI-1), y se conoce que la velocidad en inicio es igual a 60 km/h y la velocidad específica asignada de la curva 1 es 70 km/h, por lo tanto, la velocidad del segmento recto es 70 km/h.

Ilustración 27. Ejemplo de velocidad de entretangencia horizontal asignada.

