

**Cálculo de distancia de visibilidad de adelantamiento requerida por conductores
colombianos en terreno montañoso**



Jose Eduardo Muñoz Cabrera
Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Mg. Carlos Eduardo Oñate Bastidas
Director

POPAYÁN, DICIEMBRE DE 2023

**Cálculo de distancia de visibilidad de adelantamiento requerida por conductores
colombianos en terreno montañoso**

Presentado por:

Jose Eduardo Muñoz Cabrera
Trabajo de grado para optar el título de Magister en
INGENIERÍA DE VIAS TERRESTRES
Modalidad Investigativa

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
CENTRO DE POSGRADOS
POPAYÁN 2023

Aprobado por:

Carlos Eduardo Oñate Bastidas, Mg
Director

Fecha

Alexandra Rosas Palomino, Mg
Jurado

Fecha

Alfonso Murgueitio Valencia, Mg
Jurado Externo

Fecha

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Problema.....	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Hipótesis.....	17
1.4 Objetivos.....	17
1.5 Alcance.....	18
1.6 Organización del documento.....	19
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	21
2.1 Descripción de la maniobra.....	21
2.2 Modelos de adelantamiento.....	24
2.3 Investigaciones realizadas.....	29
2.4 Modelos estadísticos.....	34
3 METODOLOGÍA.....	38
4 TOMA DE DATOS.....	41
4.1 Definición conceptual y operativa de variables.....	41
4.2 Descripción de la metodología empleada en la toma de datos.....	43
4.1 Trayectorias D2 medidas en campo.....	46
4.2 Localización geográfica de los tramos evaluados.....	51

5	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	55
5.1	Cálculo de distancia de visibilidad de adelantamiento para las observaciones registradas.....	56
5.2	Confiabilidad de datos	59
5.3	Análisis de varianza ANOVA	63
5.4	Comportamiento de la distancia de visibilidad de adelantamiento (ecuaciones de regresión).....	64
5.5	Niveles de confianza.....	68
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
7	CONCLUSIONES	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencia entre distancia de visibilidad de adelantamiento mínimas entre los manuales de señalización y diseño geométrico	15
Tabla 2. Valores de diseño de las distancias de visibilidad mínimas para el rebasamiento de un vehículo.....	27
Tabla 3. Distancias de visibilidad de adelantamiento mínima en diferentes países.....	28
Tabla 4. Clasificación del terreno según la geometría de la vía (Terreno montañoso).....	53
Tabla 5. Clasificación del tipo de terreno para los tramos evaluados	53
Tabla 6. Resumen toma de datos de campo	56
Tabla 7. Fórmula del valor p según AD	59
Tabla 8. Significancia estadística para cada variable	63
Tabla 9. Comparación DVA en función de Va	67
Tabla 10. Cálculo DVA NC = 95%.....	69
Tabla 11. Intervalo de confianza 95% para Delta V	71
Tabla 12. Distancia de adelantamiento en función de Le y Va.	73
Tabla 13. variables con significancia estadística	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Maniobra de adelantamiento.....	22
Figura 2. Distancia de visibilidad de adelantamiento.	24
Figura 3. Cuatro fases de la maniobra de adelantamiento, (Glennon, 1988).....	31
Figura 4. Concepto de posición crítica.....	32
Figura 5. Plan de investigación.....	38
Figura 6. Metodología toma de datos en campo	44
Figura 7. equipos utilizados en la toma de datos	44
Figura 8. registro fotográfico procedimiento de filmación	45
Figura 9. Maniobra digitalizada desde toma aérea ortogonal	46
Figura 10. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 50 y 60 km/h	47
Figura 11. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 60 y 70 km/h	48
Figura 12. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 70 y 85 km/h	49
Figura 13. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 90 y 100 km/h	50
Figura 14. Medición pendiente longitudinal tramo 2.....	51
Figura 15. Localización general corredor estudiado.....	52
Figura 16. localización específica tramos estudiados	54

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Muertes por eventos de transporte	12
Gráfica 2. Lesiones por eventos de transporte	12
Gráfica 3. Distancia de visibilidad de adelantamiento obtenidas según diferentes guías de diseño geométrico	14
Gráfica 4. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 50 y 60 km/h... 47	47
Gráfica 5. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 60 y 70 km/h... 48	48
Gráfica 6. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 70 y 85 km/h... 49	49
Gráfica 7. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 90 y 100 km/h. 50	50
Gráfica 4. Prueba Anderson-Darlyng (AD)	60
Gráfica 5. Frecuencia de datos distribución normal.....	61
Gráfica 10. Condición general de adelantamiento para Auto – Auto en función de V_a	64
Gráfica 11. Condición general de adelantamiento para Auto – Camión en función de V_a ...	65
Gráfica 12. Condición general de adelantamiento para Auto – Bus en función de V_a	65
Gráfica 13. Condición general de adelantamiento en función de DVA.....	66
Gráfica 14. Comparación de DVA en función de V_a	68
Gráfica 15. Comparativa de la variación de la DVA con $NC = 95\%$ y la normatividad colombiana vigente	70
Gráfica 16. Comparativa de la variación de la DVA según la velocidad entre las mediciones y la normatividad colombiana vigente	72

Gráfica 17. Comparativa de la DVA calculada mediante regresión línea vs DVA con NC = 95% 76

RESUMEN

En Colombia, gran parte de la Red Nacional de Carreteras está conformada por vías rurales de dos carriles, en donde debido al continuo crecimiento del volumen vehicular sin ampliación o rectificación de estas carreteras; ha hecho que la capacidad sea cada vez menor, aumentando los tiempos de recorrido e incitando al conductor, a la realización de maniobras de adelantamiento en muchos casos peligrosas que se han convertido en un problema de seguridad vial. La normativa colombiana no es clara para definir los tramos de adelantamiento, por lo que es necesaria una revisión científica de estas distancias, en relación con el comportamiento de los conductores y a las características topográficas existentes. Esta situación sugiere se analice si es conveniente elegir la distancia de visibilidad de adelantamiento (DVA) con los parámetros descritos en los manuales colombianos, por lo que es importante determinar esta distancia mediante el análisis de los conductores propios del País. Para el estudio; se tomó información en el suroccidente Colombia, en una vía rural primaria de dos carriles, recolectando datos entre puntos fijos de adelantamiento, mediante videos aéreos. Las variables dependientes se definieron como la distancia en la que un vehículo realiza el adelantamiento y las variables independientes como parámetros geométricos y operacionales. Se obtuvieron mediciones de DVA por debajo de las exigidas en los manuales; la velocidad de operación y longitud de entre tangencia se destacaron como los factores que más influyen en la decisión de realizar la maniobra.

ABSTRACT

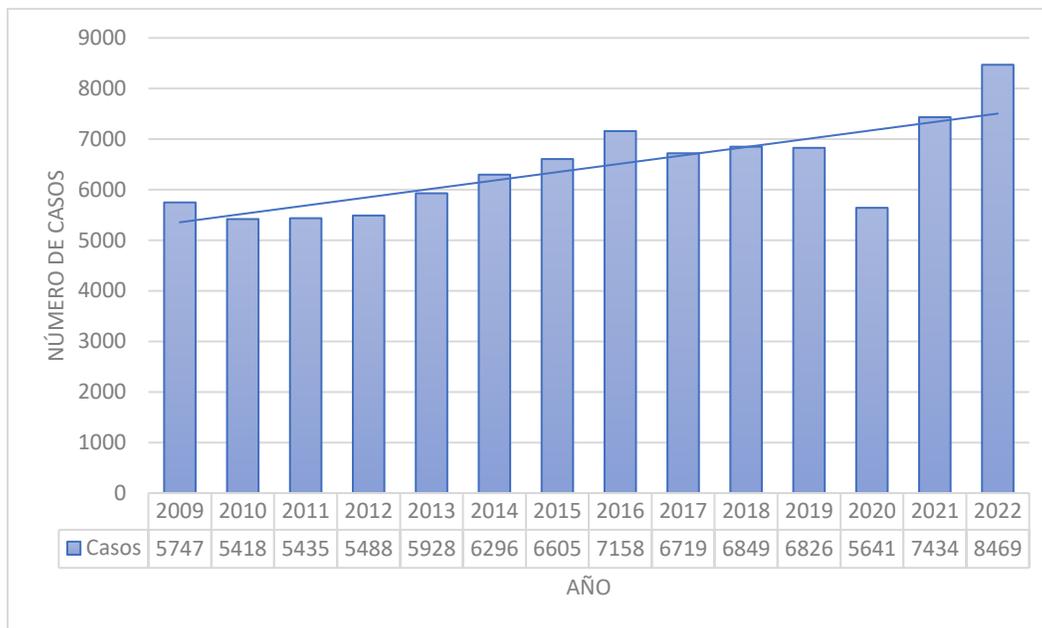
In Colombia, a large part of the National Road Network is made up of two-lane rural roads, where due to the continuous growth of vehicle volume without expansion or rectification of these roads; has made the capacity increasingly smaller, increasing travel times and encouraging the driver, to carry out overtaking maneuvers in many dangerous cases that have become a road safety problem. The Colombian regulations are not clear to define the overtaking sections, so a scientific review of these distances is necessary, in relation to the behavior of the drivers and the existing topographic characteristics. This situation suggests analyzing whether it is convenient to choose the overtaking visibility distance (OSD) with the parameters described in the Colombian manuals, so it is important to determine this distance through the analysis of the drivers themselves of the Country. For the study, information was taken in southwestern Colombia, on a primary two-lane rural road, collecting data between fixed overtaking points, through aerial videos. The dependent variables were defined as the distance at which a vehicle overtakes and the independent variables as geometric and operational parameters. OSD measurements were obtained below those required in the manuals; the operating speed and tangent length stood out as the factors that most influence the decision to perform the maneuver.

1 INTRODUCCIÓN

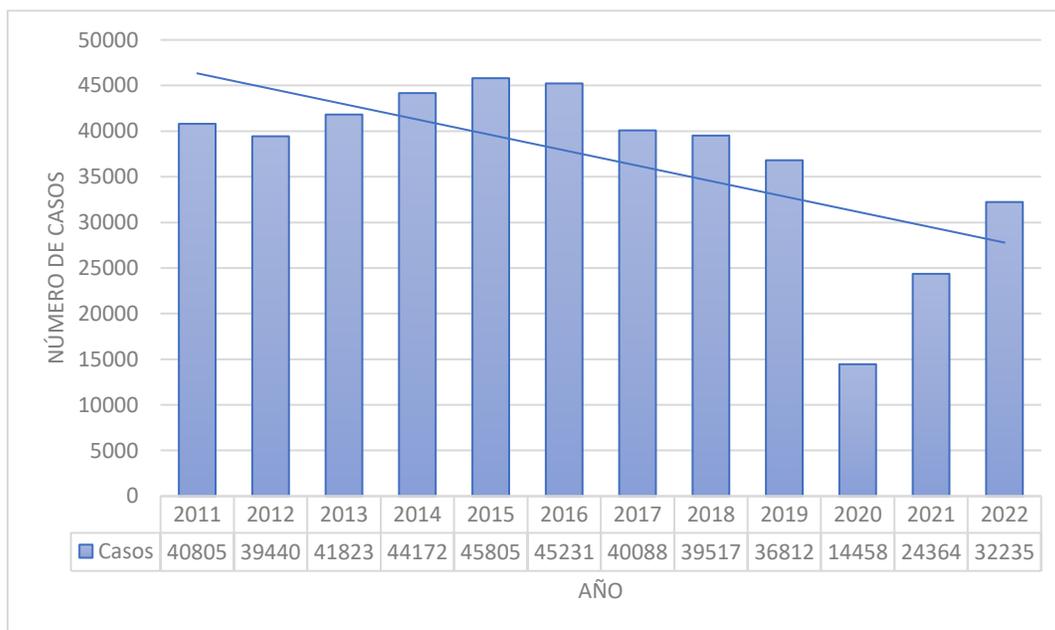
Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los accidentes de tránsito son una de las principales causas de mortalidad en todo el mundo. En 2020; se registraron 1.35 millones de personas que murieron en accidentes de tráfico en todo el mundo. Se estima que la mortalidad aumentaría hasta en un 80% en países en medianos y bajos ingresos (OMS, 2021); esto, si no hay un fortalecimiento de esfuerzos para controlar la siniestralidad vial por parte de las entidades gubernamentales. Entre 20 y 50 millones de personas sufren lesiones no mortales cada año debido a accidentes de tráfico.

La Agencia Nacional de Seguridad Vial de Colombia (ANSV) registró 8,469 muertes en accidentes de tráfico en todo el país durante el año 2022 (ver Gráfica 1). La mayor mortalidad fue en usuarios de motocicleta y peatón. Los siniestros fueron relacionados a la imprudencia de los conductores, falta de señalización adecuada y mantenimiento de las carreteras (ANSV, 2022); en estos accidentes de tránsito, la ANSV (2022) registró 32,235 lesionados (ver Gráfica 2).

La OMS en 2021 ha identificado varios factores de riesgo que contribuyen a estos accidentes; como la velocidad excesiva, la conducción bajo los efectos del alcohol o las drogas, la falta de uso del cinturón de seguridad y el uso de dispositivos móviles mientras se conduce. La OMS también ha desarrollado una serie de estrategias para reducir el número de accidentes; como la mejora de la seguridad de las carreteras, la promoción de la seguridad de los vehículos y la educación pública sobre la seguridad vial.



Gráfica 1. Muertes por eventos de transporte
Fuente: ANSV (2022)



Gráfica 2. Lesiones por eventos de transporte
Fuente: ANSV (2022)

Pineda (2011), planteó considerar varios factores como generadores de siniestros viales:

- La imprudencia de algunos conductores que adelantan en tramos donde la maniobra está prohibida: la presencia de vehículos pesados que circulan a velocidades bajas y las pocas oportunidades para adelantar, causan que los usuarios actúen desesperadamente.
- La falta de señalización en algunas vías, la señalización incorrecta o la poca coordinación entre las señales verticales y horizontales confunden al conductor: las carreteras de dos carriles que en toda su longitud restringen la posibilidad de adelantar con demarcación de doble línea amarilla continua, aun cuando haya tramos en los que es posible realizar la maniobra de forma segura; pero por falta de un correcto análisis del diseño geométrico de la vía se prefiere prohibirlo, y así desde lo legal tener resuelto lo que técnicamente tiene falencias. Lo anterior es causa de accidentes, los conductores perciben la incoherencia entre lo señalizado y lo que en realidad permiten las condiciones de la carretera, perdiendo el respeto a las indicaciones que se dan en la vía por medio de las señales de tránsito.

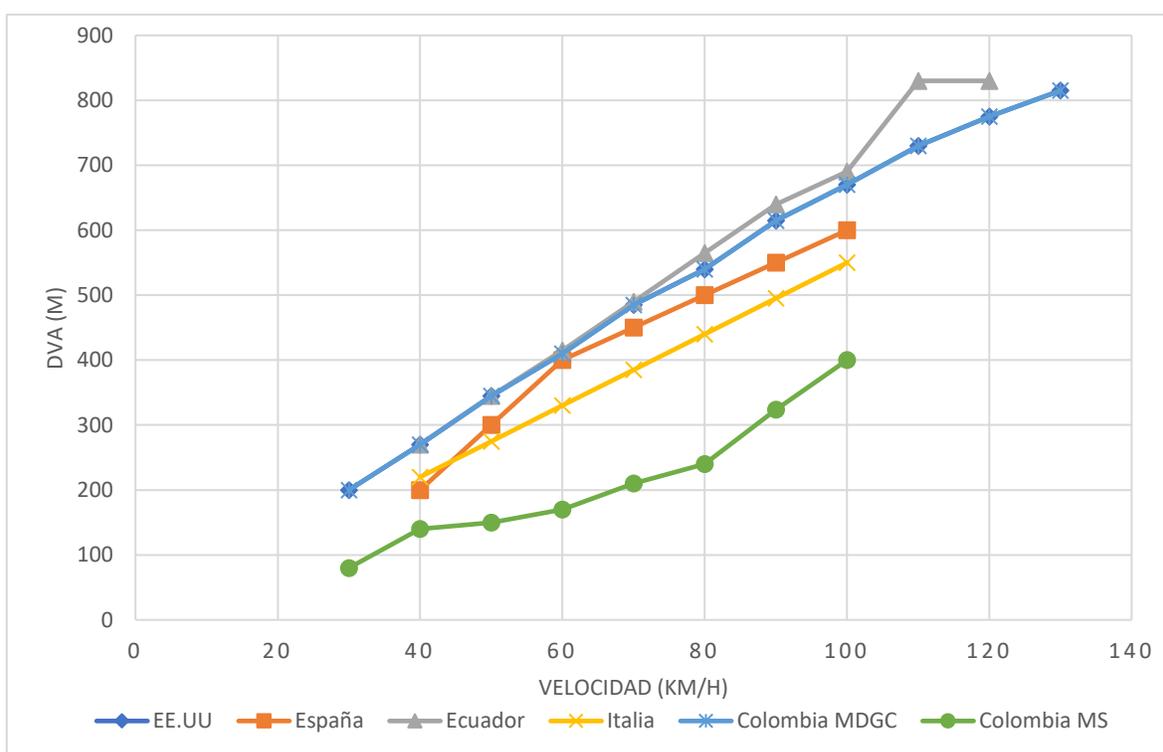
1.1 Problema

El adelantamiento es una de las maniobras más críticas que un conductor puede realizar en carreteras de dos carriles bidireccionales (Valencia, 2016); esto se debe al riesgo que asume el conductor al tomar el carril izquierdo (Pineda, 2011), viéndose afectada la visibilidad, la disponibilidad de espacio, la capacidad de operación de los vehículos y la experiencia del conductor (Valencia, 2016). Edades de conductores menores a 25 años, conducir a velocidades mayores a 90 km/h (Flórez et al, 2018) tienen como consecuencia alta probabilidad de ocasionar siniestros viales, accidentes fatales, salidas de la vía, entre otros (Llorca, Moreno y García, 2014). Flórez et al, 2018 analizaron causas testimoniales de un grupo considerable de accidentes,

la principal causa directa fue la denominada *Acción Temprana* referida a todos los casos en los que el conductor realiza una maniobra antes de que sea segura, como entrar a una intersección sin que este libre o adelantar a otro vehículo sin buenas condiciones de visibilidad.

Entre el Manual de Diseño Geométrico 2008 (MDGC 2008) y el Manual de Señalización Vial (2015) se evidencia una disparidad en los valores de la DVA; este último recomienda distancias menores sin una justificación técnica clara.

En la Gráfica 3, se puede observar la comparación de DVA calculadas con distintos manuales normativos en ciertos países. Estos coinciden en que la DVA es directamente proporcional a la velocidad de diseño, sin embargo, los valores calculados varían para una misma velocidad.



Gráfica 3. Distancia de visibilidad de adelantamiento obtenidas según diferentes guías de diseño geométrico

1.2 Justificación

El modelo más utilizado en Latinoamérica es el de la AASHTO, el cual no ha cambiado desde 2004 y está parametrizado bajo el comportamiento de conductores estadounidenses. Investigaciones previas muestran que los conductores de diferentes regiones se comportan de forma distinta (Rivas & Arboleda, 2005), por lo que es necesario analizar el caso particular de Colombia.

Además, entre el MDGC (2008) y el Manual de Señalización Vial (2015) existen discrepancias significativas en los valores recomendados de DVA (ver Tabla 2). Esta ambigüedad normativa puede generar confusiones en el diseño e interpretación por parte de autoridades y usuarios de las vías.

Tabla 1. Diferencia entre distancia de visibilidad de adelantamiento mínimas entre los manuales de señalización y diseño geométrico

Velocidad (Km/h)	Mínima Distancia de Visibilidad de Adelantamiento (MDG 2008) m	Mínima Distancia de Visibilidad de Adelantamiento (Manual de señalización vial 2015) m	Diferencia de Mínima Distancia de Visibilidad de Adelantamiento entre Normatividad Colombiana (m)
20	130	--	--
30	200	80	120
40	270	140	130
50	345	150	195
60	410	170	240
70	485	210	275
80	540	240	300
90	615	324	291
100	670	400	270

Velocidad (Km/h)	Mínima Distancia de Visibilidad de Adelantamiento (MDG 2008) m	Mínima Distancia de Visibilidad de Adelantamiento (Manual de señalización vial 2015) m	Diferencia de Mínima Distancia de Visibilidad de Adelantamiento entre Normatividad Colombiana (m)
110	730	--	--
120	775	--	--
130	815	--	--

Fuente: MDGC (2008), Manual de señalización vial (2015)

Según Pineda (2019), las distancias de visibilidad de adelantamientos obtenidas por el MDGC (INVIAS, 2008) son muy largas. Los parámetros usados por el manual colombiano se basaron en los modelos del manual americano, el cual fue medido para la condición en que un camión adelanta otro camión (AASHTO, 2004). Además, este modelo no tiene en cuenta si el vehículo que desea adelantar se encuentra en seguimiento o no, y se basa en variables (“ a ” y “ t_2 ”), que fueron parametrizadas teniendo como base al comportamiento de los conductores estadounidenses. Por otro lado, el MDGC (INVIAS, 2008) utiliza metodologías de países con comportamientos similares al de Colombia, por ejemplo, para la asignación de velocidades, resulta conveniente entonces, hacer lo propio para el cálculo de la DVA.

Implementar un modelo extranjero en la normativa colombiana sin considerar el comportamiento local y las inconsistencias entre manuales representa vacíos que esta investigación busca abordar. Los resultados pueden ser insumos en la actualización de la normatividad nacional sobre DVA.

1.3 Hipótesis

La Normativa Colombiana no especifica adecuadamente los valores de distancia de visibilidad de adelantamiento bajo las condiciones reales de operación de los conductores colombianos.

La adopción acrítica de modelos extranjeros sin considerar el comportamiento local ha llevado a inconsistencias y ambigüedades técnicas en los manuales de diseño geométrico y señalización vial.

Si la hipótesis es correcta, el estudio permitiría proponer una línea de investigación que llegue a ajustes normativos sobre los parámetros de diseño geométrico de carreteras asociados a la distancia de visibilidad de adelantamiento incitando estudios más profundos y detallados que lleven al cumplimiento de este objetivo.

Metodológicamente, se han elegido algunas de las variables que afectan a esta maniobra tan compleja y se busca determinar cuáles son las que más inciden en la maniobra de adelantamiento por parte de los conductores colombianos; además, se pretende proponer una metodología replicable en todo el territorio nacional.

1.4 Objetivos

A continuación, se listan los objetivos del presente estudio:

1.4.1 *Objetivo general*

Establecer la visibilidad de adelantamiento requerida por los conductores colombianos en terrenos montañosos.

1.4.2 *Objetivos específicos*

- Validar las variables consideradas por los modelos utilizados en los manuales de Colombia.
- Determinar las variables con mayor incidencia en la maniobra de adelantamiento de los usuarios colombianos.
- Establecer una metodología para la toma de datos que pueda ser replicada en el territorio colombiano.
- Encontrar el factor de significancia para los parámetros evaluados en la estimación de la DVA.

1.5 **Alcance**

Esta investigación tiene un alcance descriptivo de tipo aplicada y un enfoque cuantitativo. Presenta las características de las diferentes variables que inciden en la posibilidad de realizar la maniobra de adelantamiento de forma segura y determina los parámetros de mayor incidencia en el cálculo de la distancia mínima de visibilidad de adelantamiento.

El estudio se desarrolló en tramos de vías rurales primarias sobre terrenos montañosos de calzada única con doble sentido de circulación. Se controlaron variables como clima, flujo vehicular, proximidad a intersecciones, estado de la vía, etc.

La zona geográfica fue el Suroccidente Colombiano, específicamente los Departamentos del Cauca y Valle del Cauca. Se tomaron mediciones en 199 maniobras de adelantamiento para 9 tramos de carretera seleccionados en la ruta que comunica Popayán con Santander de Quilichao.

Las variables independientes correspondieron a parámetros geométricos (pendientes, radios de curvatura, longitudes) y operacionales (velocidades de circulación). La variable dependiente fue la distancia utilizada en la maniobra de sobrepaso vehicular.

El análisis estadístico permitió determinar las variables más influyentes y proponer un modelo ajustado para la realidad colombiana. Los resultados se compararon con los criterios contenidos en los manuales de diseño y señalización vial vigentes en Colombia.

De esta manera, la investigación permite sentar bases técnicas para mejorar la normatividad nacional sobre los parámetros geométricos asociados a las distancias de visibilidad de adelantamiento.

1.6 Organización del documento

Este escrito se ha desarrollado en siete capítulos donde el problema de investigación y la hipótesis fueron analizadas con el fin de llegar a los cumplimientos de los objetivos propuestos. En el primer capítulo se describe el problema y la importancia de realizar avances en temas de seguridad vial, por lo que se definen los objetivos a cumplir y el alcance.

El segundo capítulo hace referencia a la revisión de literatura, aquí se exaltan tres temas importantes para poder llevar a cabo la investigación. Inicialmente se destacan los controles para el diseño geométrico de carreteras concebidos en los manuales de diseño geométrico de carreteras (2008), señalización vial (2015) y manuales internacionales; con lo que se evidencia la inconsistencia en el parámetro de la DVA y por lo tanto la importancia de su investigación.

El tercer capítulo relata la metodología planteada para llevar a cabo la investigación. El procedimiento se divide en cuatro fases que contemplan el factor teórico, trabajo experimental en

campo, obtención de datos, análisis de resultados y conclusiones. El cuarto capítulo muestra el comportamiento descriptivo de los datos obtenidos, su clasificación y su categorización.

En el quinto capítulo se realiza el análisis estadístico, la categorización de las variables independientes necesarias para realizar los análisis de varianzas y encontrar significancias estadísticas respectivas entre la combinación de variables. En el sexto capítulo se resume el análisis de los resultados obtenidos y finalmente, en el séptimo capítulo se encuentran las conclusiones de la investigación y deja las recomendaciones para realizar trabajos a futuro.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

La distancia de visibilidad de adelantamiento es un concepto fundamental en el ámbito de la seguridad vial en carreteras. Varios autores han investigado y analizado este tema desde diferentes perspectivas, abordando aspectos relacionados con el diseño vial, la seguridad de los conductores y las prácticas para mejorarla.

2.1 Descripción de la maniobra

La maniobra de adelantamiento es descrita por Radelat (1995) como “(...) la maniobra mediante la cual un vehículo se sitúa por delante de otros que lo preceden en dicho carril”. Radelat dividió en dos las situaciones en las que se puede presentar un adelantamiento; con y sin seguimiento. En la primera, el vehículo que adelanta inicia la maniobra a la misma velocidad que el vehículo que desea adelantar, mientras que en la segunda, el vehículo que adelanta inicia la maniobra con una velocidad superior a la del vehículo a adelantar; en este caso el adelantamiento se estudia desde que el vehículo adelanta iguala la parte trasera del vehículo a adelantar en el carril izquierdo. Además, define 4 distancias durante la maniobra de adelantamiento. En la primera parte B (Fuente Cirianni, Leonardi, & Palamara (2016), el vehículo adelantante toma la decisión de realizar el adelantamiento y está definida por la distancia que le toma el conductor tomar esta decisión (Esta distancia no se considera en el estudio en caso de ser un adelantamiento sin seguimiento). Según Arboleda y Rivas (2005), esta primera distancia depende del tiempo de percepción – reacción de los conductores el cual es inherente al conductor.

La segunda parte C del adelantamiento está determinada por la distancia que recorre el vehículo que adelanta, desde el momento que invade el carril izquierdo hasta que vuelve a su carril. Es en esta parte en la que el conductor pasa por el punto de no retorno, y éste se logra cuando la parte delantera del vehículo que adelanta alcanza la parte delantera del vehículo adelantado (en este punto el conductor requiere el mismo tiempo para abortar el adelantamiento que para terminarlo).

La tercera parte D del adelantamiento, esta descrita por la distancia que existe entre el cruce del vehículo adelanta y el vehículo del que viaja en dirección opuesta. Finalmente, la cuarta (E-F-G) parte del adelantamiento hace referencia a la distancia que recorre el vehículo opuesto desde que inicia la maniobra hasta que se encuentra con el vehículo que realizó el adelantamiento. Cada una de las partes del adelantamiento son descritas por las distancias d_1 , d_2 , d_3 y d_4 con sus respectivos tiempos t_1 , t_2 , t_3 y t_4 (ver Figura 1).

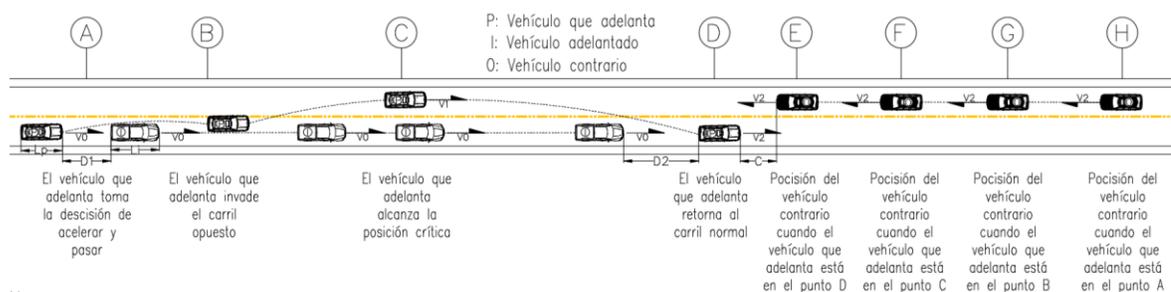


Figura 1. Maniobra de adelantamiento

Fuente Cirianni, Leonardi, & Palamara (2016)

El tiempo total (T) que requiere el adelantamiento esta descrito por la sumatoria de los primeros tres tiempos de la maniobra de adelantamiento, además en el momento en el cual se

cruza los vehículos adelanta y opuesto, sus tiempos de recorrido han sido los mismos como se muestra en la Ecuación 1.

$$T = t_1 + t_2 + t_3 = t_4$$

Ecuación 1. *Tiempo total del adelantamiento (s)*

2.1.1 Brecha de adelantamiento

La brecha de adelantamiento (B) está definida por el tiempo que existe entre el vehículo que desea adelantar y el vehículo que circula en dirección opuesta en el momento en el que el conductor decide adelantar (Radelat, 2003), como se describe en la ecuación 2.

$$B = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$$

Ecuación 2. *Brecha de adelantamiento (s)*

2.1.2 Distancia de adelantamiento

Definida por la distancia que debe de recorrer el conductor al momento de realizar el adelantamiento, es decir la distancia de adelantamiento total menos la distancia recorrida por el vehículo opuesto como muestra la ecuación 3.

$$d_a = V_o(B - T)$$

Ecuación 3. *Distancia de adelantamiento*

Donde:

- d_a : Distancia de adelantamiento (m)
- V_o : Velocidad vehículo opuesto (m/s)
- B : Brecha de adelantamiento (m/s)

2.2 Modelos de adelantamiento

2.2.1 Manuales de diseño geométrico y señalización vial

En Colombia, la normatividad sobre adelantamiento muestra un modelo igual al que indica la AASTHO (2004), como se puede ver en la Figura 2 las etapas en las que divide el adelantamiento obedeciendo a la siguiente ecuación:

$$DVA = D1 + D2 + D3 + D4 \quad \text{Ecuación 4. DVA según MDGC}$$

Donde:

- DVA: Distancia de visibilidad de adelantamiento, en metros.
- D1: Distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción, en metros.
- D2: Distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril, en metros.
- D3: Distancia de seguridad, una vez terminada la maniobra, entre el vehículo que adelanta y el vehículo que viene en la dirección opuesta, en metros.
- D4: Distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto (estimada en $2/3$ de D2), en metros.

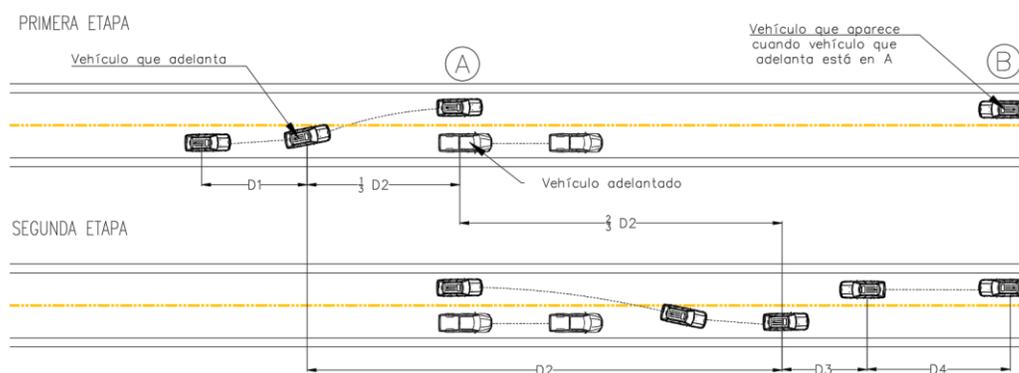


Figura 2. Distancia de visibilidad de adelantamiento.

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2008)

Alrededor del mundo, los países a través de sus manuales de diseño geométrico establecen el modelo que desean implementar para calcular la distancia de visibilidad de adelantamiento que requieren sus carreteras. A continuación, se realiza un resumen de los modelos que utilizan:

En Italia se considera un modelo de tres fases:

- Recorrido del vehículo adelanta desde el inicio de la maniobra hasta que su parte delantera coincide con la trasera del adelantado (Posición 1). Se emplean siempre 4s.
- Recorrido del vehículo adelanta desde la posición 1 hasta que la parte trasera coincide con la delantera del adelantado (Posición 2). Depende de las longitudes de los vehículos y de la diferencia de velocidades, si bien se asume que dura 2s
- Recorrido del adelanta desde la posición 2 hasta completar la maniobra. Se emplean para ello siempre 4s.

Finalmente, para el cálculo de las distancias de visibilidad de adelantamiento se obtiene la siguiente expresión:

$$D_a = 5.5 V_p$$

Ecuación 5. *DVA, Italia*

Donde:

- D_a : Distancia de adelantamiento (m)
- V_p : Velocidad de diseño (km/h)

En Francia y Suiza establecen modelos mucho más simplificados. Por ejemplo, Francia establece que la distancia de adelantamiento mínima debe de ser de 500 m independiente de la velocidad y Suiza asume que esta maniobra dura entre 8 y 10 segundos de la velocidad de diseño

En Nueva Zelanda Establece que la distancia de visibilidad necesaria para realizar un adelantamiento es la “Intermediate Sight Distance” (ISD), la cual es definida como el doble de la distancia de visibilidad de adelantamiento para un vehículo que circula a la velocidad de diseño (Llorca, Moreno and Garcia, 2014).

La normatividad británica nombra la distancia de visibilidad de adelantamiento como la “Full Overtaking Sight Distance” (FOSD), esta distancia es medida a partir del momento en el cual el vehículo que adelanta invade el carril contrario, y tiene una visual total de los vehículos que se dirigen en dirección contraria y que pueden impedir la maniobra (Harwood *et al.*, 2008). En Australia se adopta una distancia de visibilidad muy similar a la británica, con la diferencia que esta tiene en cuenta la distancia que recorre el vehículo antes de invadir el carril opuesto.

En Canadá se adoptó un modelo prácticamente idéntico al que se utiliza en Estados Unidos, la diferencia en algunas de las distancias se debe a diferencias mínimas en las conversiones de unidades métricas (Harwood *et al.*, 2008).

En países latinoamericanos como Paraguay (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2011), Bolivia (Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), 2007) y Chile (Ministerio de Obras Públicas, 2017) la distancia de visibilidad de adelantamiento mínima es establecida a partir de los valores medios de este parámetro que se emplean en Alemania, España y Gran Bretaña, los cuales resultan en distancias entre el 5% y el 10% menores a las presentadas en el modelo propuesto por la AASHTO el cual califican como “conservador y alejado de la cotidianidad. Los manuales de estos países también presentan una recomendación con respecto a

la pendiente en la cual, si la carretera presenta una pendiente positiva de más del 6% de debe de utilizar la distancia visibilidad de adelantamiento de la velocidad de diseño (D_p según el manual) + 10Km/h.

En Perú, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018) presentó un modelo similar al que se presenta en el manual de diseño geométrico colombiano es decir un modelo basado en los parámetros del manual americano (AASHTO, 2004)

La normatividad ecuatoriana implementa el modelo que utiliza la AASHTO (2004), pero varía su interpretación numérica, pues las ecuaciones que utiliza para calcular cada uno de las distancias del modelo son diferentes. Además, este manual hace anotaciones para el cálculo de la DVA según el tipo de terreno y el tránsito promedio diario (TPD) como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. *Valores de diseño de las distancias de visibilidad mínimas para el rebasamiento de un vehículo*

Clase de Carretera	Valor Recomendable			Valor Absoluto		
	L	O	M	L	O	M
R-I o R-II > 8000 TPDA	830	830	640	830	640	565
I 3000 a 8000 TPDA	830	690	565	690	565	415
II 1000 a 3000 TPDA	690	640	490	640	565	345
III 300 a 1000 TPDA	640	565	415	565	415	270
IV 100 a 300 TPDA	480	290	210	290	150	110
V Menos de 100 TPDA	290	210	150	210	150	110

L - Terreno Llano
O - Terreno Ondulado
M - Terreno Montañoso

Fuente: *R. del E. Ministerio de Obras Públicas (2003)*

En México, no se ha implementado un modelo propiamente dicho, sino que basados en investigaciones realizadas llegan a la siguiente conclusión: “(...) es razonable establecer distancia de visibilidad de rebase equivalente a la recorrida en 18 segundos a la velocidad de proyecto”

(Dirección General de Servicios Técnicos, 2018) con lo cual calculan este parámetro utilizando la siguiente ecuación 5:

$$DR=7.5 VP$$

Ecuación 6. Distancia de adelantamiento, México

Donde:

- DR: Distancia de rebase o de adelantamiento (m)
- VP: Velocidad de proyecto o de diseño (km/h)

Los resultados de los modelos previamente presentados se muestran en la **Tabla 3**:

Tabla 3. Distancias de visibilidad de adelantamiento mínima en diferentes países

País	Velocidad de referencia	Velocidad (km/h)										
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
EE. UU.	V _D	200	270	345	410	485	540	615	670	730	775	815
Canadá	V ₈₅	-	290	350	410	490	550	610	680	730	800	-
Reino Unido	V ₈₆	-	-	290	345	410	-	-	580	-	-	-
Australia	V _D	-	-	330	420	520	640	770	920	1100	1300	-
N. Zelanda	V ₈₅	-	60	80	110	150	190	280	340	420	500	-
Alemania	V ₈₆	-	-	-	475	500	525	575	625	-	-	-
Grecia	V ₈₇	-	-	-	475	500	525	575	625	-	-	-
Austria	V _D	-	-	-	400	-	525	-	650	-	-	-
Italia	V _D	-	220	275	330	385	440	495	550	-	-	-
Suiza	V _D	-	-	-	450	500	550	575	625	-	-	-
Francia	V _D	-	-	-	500	500	500	500	500	-	-	-
España	V _D	-	200	300	400	450	500	550	600	-	-	-
Paraguay	V _D	180	240	300	370	440	500	550	600	-	-	-
Bolivia	V _D	180	240	300	370	440	500	550	600	-	-	-
Chile	V _D	180	240	300	370	440	500	550	600	-	-	-
Perú	V _{TH}	200	270	345	410	485	540	615	670	730	775	815
México	V _D	225	300	375	450	525	600	675	750	825	900	975
Ecuador	V _D	-	270	345	415	490	565	640	690	830	830	-
MDGC Colombia	V _D	200	270	345	410	485	540	615	670	730	775	815
MS Colombia	V _D	80	140	150	170	210	240	324	400	-	-	-

Fuente: Recopilación de autores citados.

Cada país de la tabla anterior cuenta con un modelo para el cálculo de la DVA, el cual está estipulado en sus respectivas guías o manuales de diseño geométrico. En casos específicos como Estados y Reino unido, estos modelos son el resultado de investigaciones rigurosas realizadas en el ámbito local y que debido a sus buenos resultados son adoptados por la normativa de su país; pero en otros casos como en el contexto latinoamericano, los modelos utilizados son una adaptación de modelos extranjeros o, en algunos casos, adoptan el mismo modelo sin realizar ningún tipo de modificación.

A razón de esto, que el siguiente estudio busca ser un punto de partida para otras investigaciones que tengan como base estimar y determinar un modelo para el cálculo de la DVA en el ámbito local, el cual, describa de una manera adecuada el comportamiento de los conductores colombianos y sea una herramienta practica y a aplicable en el diseño geométrico de carreteras.

2.3 Investigaciones realizadas

En el estudio de la distancia de visibilidad de adelantamiento se han propuesto diferentes investigaciones en pro de mejorar las dificultades que en ella existan, como lo es, la definición de variables que inciden en el desarrollo de esta maniobra. Se interpreta diversos enfoques o planteamientos para mejorar la calibración en la creación de modelos que pueden tomar valores distintos, o también encontrar coincidencias en éstos (Llorca, Moreno & Garcia, 2014).

El primer modelo que se analiza es el Van Valkenburg (1971), destacó por ser el primer modelo que implementa el concepto de posición crítica o punto de retorno, el cual sugiere dos enfoques diferentes para el análisis la distancia de visibilidad siendo la utilización o no de este

concepto, y a su vez afectar en la elección si se desarrolla la maniobra de adelantamiento, ya que, el conductor puede desistir de ésta (Llorca, Moreno and Garcia, 2014).

Weaver y Glennon (1972), definieron a esta posición como el tiempo necesario para completar y para desistir la maniobra son iguales, y por otro lado Harwood y Glennon (1989) la definieron como la igualdad entre las distancias de visibilidad necesarias para realizar o no la maniobra, en lugar de los tiempos (Llorca, Moreno & Garcia, 2014).

Estos autores no calcularon directamente donde se encuentra la posición crítica, sólo asumieron que se encuentra en una determinada posición. El primero en introducir la forma de calcular ésta es Lieberman (1981) de forma analítica, de manera que se igualen las distancias de visibilidad para completar y desistir la maniobra. Él empleó un parámetro Δc como la distancia entre partes delanteras del vehículo adelanta y adelantado, en el momento que se encuentran en la posición crítica (Llorca, Moreno & Garcia, 2014).

La Figura 3 ilustra las fases de la maniobra de adelantamiento definidas por Glennon (1988) y la Figura 4 muestra el concepto de posición crítica, que Glennon (1988) asume como correcta y posteriormente revisada por Hassan (1996), y que actualmente la normativa de diseño americana la acepta en su manual (AASTHO, 2018). Hassan afirmó que la posición crítica es cuando la distancia de visibilidad necesaria para completar la maniobra de adelantamiento es igual a la necesaria para abortarla, o cuando los vehículos se encuentran en paralelo. Una vez el vehículo supera esta posición ya es improbable que se desista la maniobra.

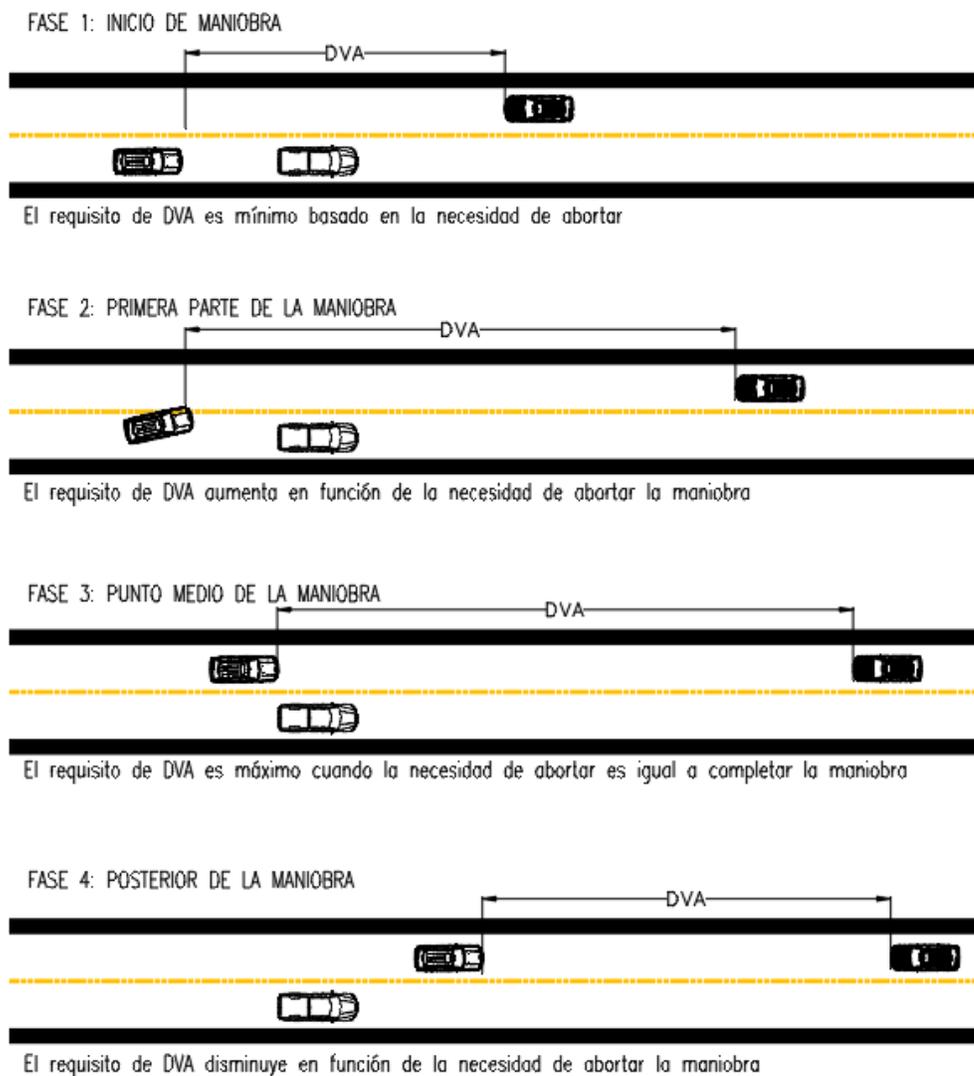


Figura 3. Cuatro fases de la maniobra de adelantamiento, (Glennon, 1988)

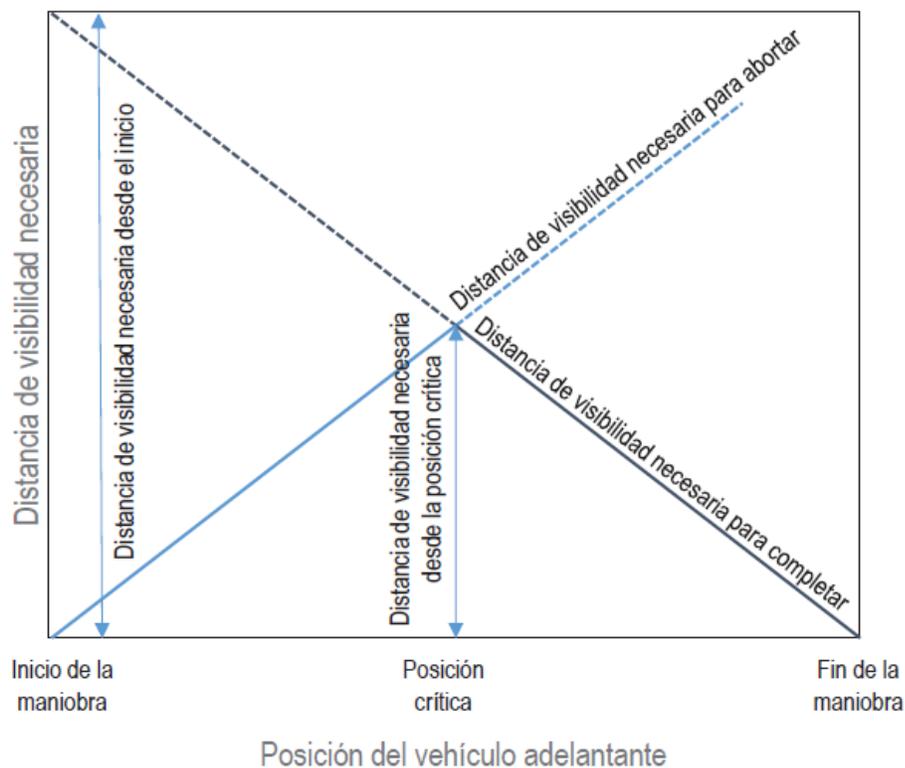


Figura 4. Concepto de posición crítica.

Fuente: Llorca et al., (2014)

Otros modelos que no consideran el concepto de posición crítica, Wang y Cartmell (1998) describen la maniobra de adelantamiento completa, desde el momento que se empieza con el vehículo que adelanta se encuentra en su propio carril y está detrás del adelantado. Este modelo necesita distancias de visibilidad más elevadas, ya que la opción de desistir del adelantamiento no está contemplada o solo está en fases muy tempranas de maniobra. Otro aspecto en el que los modelos difieren, son las velocidades de los tres vehículos implicados en la maniobra: el adelantado (V_i), el que adelanta (V_p) y el opuesto (V_o). Estas velocidades guardan relación entre sí destacadas por las velocidades de diseño (V_D) y de operación de la carretera (V_{85}) (Llorca et al, 2014).

Allen J. Doelp (1990) ha contribuido al campo de la ingeniería vial al explorar el cálculo y la importancia de la distancia de visibilidad de adelantamiento. Sus investigaciones se enfocan en comprender cómo diseñar y configurar los circuitos de manera que se garantice una distancia de visibilidad adecuada. Esto implica considerar la velocidad del vehículo, el diseño de carretera y las condiciones ambientales para lograr un entorno seguro para los conductores durante los adelantamientos.

J. Dixon Smith (1998) ha investigado específicamente sobre las carreras de automóviles y la distancia de visibilidad de adelantamiento. Su enfoque se centra en analizar cómo esta distancia afecta la seguridad de los conductores durante los adelantamientos y cómo se pueden implementar medidas para mejorarla y reducir los riesgos asociados. Smith buscó identificar estrategias y prácticas que contribuyan a una distancia de visibilidad óptima y, por lo tanto, a un entorno más seguro para los competidores.

David C. Viano (1999), reconocido investigador en seguridad vial ha realizado estudios sobre diversos aspectos de las carreras de automóviles, incluida la distancia de visibilidad de adelantamiento. Su investigación se ha centrado en analizar los factores que influyen en esta distancia, considerando elementos como la velocidad del vehículo, el diseño vial y las condiciones ambientales.

En conjunto, estos autores y sus investigaciones nos brindan una comprensión más profunda de la distancia de visibilidad de adelantamiento en carreras de automóviles. Sus trabajos proporcionan perspectivas valiosas sobre cómo mejorar la seguridad de los conductores, considerando aspectos de diseño de circuitos, factores ambientales y prácticas óptimas. La implementación de sus hallazgos y recomendaciones puede contribuir a entornos de carreteras más seguras y reducir los riesgos asociados.

2.4 Modelos estadísticos

2.4.1 Prueba Anderson – Darling (AD)

Se usó la prueba Anderson-Darling para evaluar la confiabilidad de los datos en comparación con la distribución teórica asumida en este caso como distribución normal. Esta prueba se basa en la función de distribución acumulativa (CDF) de la distribución teórica y compara la CDF observada de los datos con la CDF teórica esperada. Cuanto mayor sea el valor estadístico de Anderson-Darling, mayor será la evidencia en contra de la hipótesis nula de que los datos siguen la distribución teórica.

En el contexto de la confiabilidad de datos, la prueba de Anderson-Darling puede utilizarse para verificar si un conjunto de datos de interés sigue una distribución de probabilidad específica, como la distribución de Weibull, que se utiliza comúnmente en el análisis de confiabilidad. Si los datos se desvían significativamente de la distribución teórica esperada, esto podría indicar que la confiabilidad de los datos no es consistente con el modelo asumido.

2.4.2 Análisis de varianza ANNOVA

Por otro lado, los efectos de las variables independientes en la velocidad de operación fueron analizados bajo el análisis de sus varianzas y su comportamiento de manera descriptiva.

Análisis descriptivo: Se extrajo información a partir de la exploración de los datos comparando los efectos en combinaciones entre variables independientes con variables dependiente de manera conjunta o individual. Bajo esta concepción, la muestra es analizada de manera individual para cada variable y posteriormente se estudiaron las relaciones entre variables. Las representaciones gráficas fueron de gran ayuda para definir el punto de cambio donde cada parámetro geométrico tiene influencia en la variable dependiente.

ANOVA multifactorial: El análisis de varianza trata de analizar la variación de una respuesta y de asignar proporciones de esta variación a cada una de las variables de un conjunto de variables independientes, su objetivo es identificar la variable independiente más importante en el estudio y determinar cómo interactúan y afectan a la respuesta. La variabilidad de un conjunto de n mediciones es proporcional a la suma de los cuadrados de las desviaciones, y que esta cantidad se utiliza para calcular la varianza de la muestra. El análisis de varianza divide la suma de los cuadrados de las desviaciones llamada *suma total de los cuadrados de las desviaciones*, en partes, cada una de las cuales se atribuye a una de las variables independientes en el experimento, más un residuo que se asocia con el error aleatorio. Cuando una variable está muy relacionada la respuesta, su porción de suma de cuadrados para esta variable estará exagerada. Se puede detectar esta condición comparando la estimación de la varianza de una variable independiente particular, con la estimación obtenida en la suma total de los cuadrados de las desviaciones asignadas al error (SC) aplicando una prueba F . Si la estimación para la variable independiente es significativamente mayor, la prueba F rechazará la hipótesis de que la variable independiente no tiene efecto (Mendenhall et al, 2001).

En un ANOVA, el grado de libertad está dado por el número de valores que pueden ser asignados de forma arbitraria, antes de que el resto de las variables tomen un valor de manera automática, con el fin de compensar e igualar un resultado. La variable independiente con significancia estadística será cuando su valor P sea menor a 0.05; de igual manera se revisó el coeficiente de determinación R^2 y se comparó con el coeficiente R^2 ajustado, este coeficiente indica la cantidad de variabilidad explicada por el modelo, cuanto mayor sea este coeficiente más predecible es la variable respuesta en función de las variables independientes. El R^2 ajustado

corrige el R2 que ha sido incrementado por la adición de variables independientes dentro del modelo, aunque estas variables sean o no relevantes en él (Cayuela, 2014).

2.4.3 Nivel de confianza

El nivel de confianza es una medida estadística que proporciona un rango de valores dentro del cual es probable que se encuentre el parámetro de interés de una población. Se expresa como un porcentaje y se utiliza para cuantificar la incertidumbre asociada con una estimación.

La manera común de expresar el nivel de confianza (NC), es a través de un intervalo de confianza (IC). Un intervalo de confianza típicamente se construye alrededor de un estimador, como la media o la proporción de una población. El nivel de confianza indica la probabilidad de que el intervalo contenga el verdadero valor del parámetro.

El cálculo del intervalo de confianza depende del tipo de distribución de la población y del estimador específico que estás utilizando. Para una media poblacional con una muestra grande, por ejemplo, se puede usar la distribución normal y aplicar la fórmula:

$$\mu \pm Z \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde,

- μ es la media muestral
- Z es el valor crítico de la distribución normal estándar, relacionado con el nivel de confianza (por ejemplo, 1.96 para un nivel de confianza del 95%)
- s es la desviación estándar muestral
- n es el tamaño de la muestra

Para proporciones o en casos de muestras pequeñas (n menor a 30), se utilizan otras distribuciones como la t de Student cuya ecuación se presenta a continuación.

$$\mu \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde,

- μ es la media muestral
- t es el valor crítico de la distribución t de Student asociado con el nivel de confianza deseado y los grados de libertad.
- s es la desviación estándar muestral
- n es el tamaño de la muestra

En términos generales, el cálculo del nivel de confianza implica determinar los valores críticos asociados con la distribución de probabilidad específica y aplicarlos a la fórmula del estimador.

3 METODOLOGÍA

En cumplimiento de los objetivos propuestos, la metodología se desarrolló en cuatro pasos generales representadas en la Figura 5.

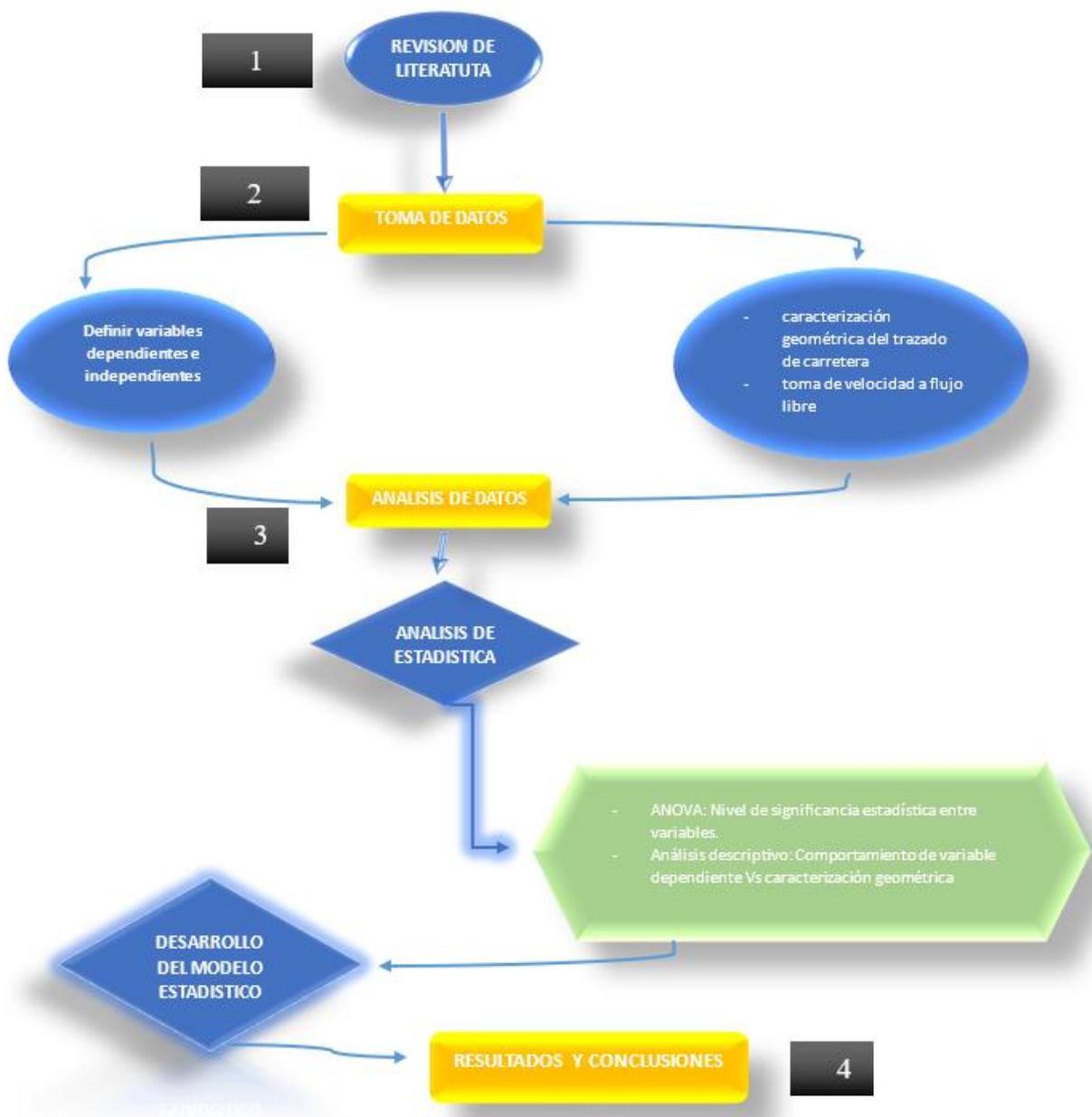


Figura 5. Plan de investigación
Fuente: propia

➤ Fase 1 – Recopilación de información: se realizó revisión de literatura sobre investigaciones, manuales y guías anteriores en cuanto a consistencia de diseño geométrico de carreteras, seguridad vial, modelos de velocidad y distancia de visibilidad de adelantamiento.

Con esta revisión, se identificaron las variables que relacionan la maniobra de adelantamiento con los parámetros de diseño geométrico de carreteras; con lo cual, se definen cuáles de estas variables son dependientes y cuales son independientes.

➤ Fase 2 – Toma de datos: se efectuó un reconocimiento del tramo a evaluar, en este caso el tramo de la ruta 25 entre Popayán y Santander de Quilichao; en donde se seleccionaron los tramos homogéneos que cumplieron con las siguientes características: carreteras de calzada única de dos carriles bidireccionales, no estar en zonas de intersecciones, puentes ni túneles y sin dispositivos reductores de velocidad (Sánchez, 2012); adicionalmente se seleccionaron los tramos que actualmente están demarcados con línea punteada permitiendo el adelantamiento.

- Se tomó la información geométrica de la carretera, pendientes, radios de curva y longitud de tangente. Para cada maniobra se midió, la velocidad del vehículo que adelanta, la velocidad del vehículo que es adelantado, la distancia total utilizada para completar la maniobra y la clasificación de los vehículos que intervienen. La toma de datos se realizó mediante capturas de video por cámaras estáticas. (Llorca, Moreno & García, 2014)
- Una vez seleccionados los tramos representativos se procedió con las campañas de campo que consisten en sobrevuelos con un vehículo aéreo

no tripulado (dron). El dron grabó mediante video las maniobras de adelantamiento que realizaron los conductores en condiciones normales. Este equipo tiene la ventaja de ser imperceptible para los conductores, de modo que, estos no cambiaron su comportamiento habitual.

➤ Fase 3 – Análisis de datos: se caracterizaron los elementos geométricos para cada tramo recto (L_e) como se habían establecido las variables independientes (Radio de curva antes y después de L_e , ancho de carril, ancho de berma, velocidad de los vehículos implicados en la maniobra, pendientes longitudinal y tipo de vehículos comprometidos en la maniobra)

○ Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se realizaron los análisis estadísticos planteados determinando la influencia de cada parámetro geométrico en la distancia de visibilidad de adelantamiento.

○ Se utilizó ANOVA multifactorial no balanceado para identificar la significancia estadística de cada parámetro dentro de la variable dependiente. En función de estos resultados se analizó de manera descriptiva la maniobra de adelantamiento.

➤ Fase 4 – Resultados y conclusiones: es importante verificar el comportamiento de los datos obtenidos, la significancia estadística entre variables de manera grupal e independiente, y realizar un análisis descriptivo que refleje el comportamiento de los conductores en la maniobra de adelantamiento en función de las características geométricas de la carretera.

4 TOMA DE DATOS

En este capítulo se describe la metodología y procedimientos llevados a cabo para la recolección de datos en campo con el fin de alimentar el posterior análisis estadístico.

Se detalla el proceso de selección de los tramos de carretera evaluados, los equipos utilizados para la filmación de maniobras de adelantamiento, el procedimiento para la captura de información relevante y la localización geográfica de los puntos estudiados.

Asimismo, se definen conceptual y operacionalmente las variables independientes (factores geométricos y de operación) y la variable dependiente (distancia de adelantamiento).

De esta manera se explicita el diseño metodológico implementado en la fase de trabajo de campo del estudio para recabar los datos necesarios que serán analizados en el siguiente capítulo.

4.1 Definición conceptual y operativa de variables

4.1.1 Variables independientes – geométricas y de operación

Los modelos matemáticos utilizados para estimar la trayectoria vehicular en cualquier maniobra se basan en los elementos geométricos de la carretera y condiciones de operación para encontrar el valor de la variable respuesta. A partir de esto, se tomó como variables independientes los parámetros geométricos en común entre los modelos predictores y los factores disponibles dentro del tramo de carretera, en estos se destacan:

- V_a : Velocidad de vehículo que realiza el adelantamiento (Km/h)
- V_o : Velocidad de vehículo que es adelantado (Km/h)
- Δv : Diferencia de velocidades $V_a - V_o$ (Km/h)

- Le: Longitud de tramo de entre tangencia donde es realizado la maniobra de adelantamiento (m)
- Sw: Ancho de berma (m)
- Sc: Ancho de Carril (m)
- Rc: Radio de curvatura (m)
- Se: Pendiente longitudinal en el sentido de avance del adelantamiento (%)

4.1.2 Variable dependiente - DVA

Para el cálculo de la DVA se tomaron videos de adelantamientos en condiciones normales para los nueve tramos seleccionados, se toma la información geométrica de campo (ancho de carril, ancho de bermas, etc.); posteriormente en oficina se procesan los videos para determinar las variables independientes a considerar y con esto el cálculo de la variable dependiente de interés. Para lo cual se usaron las siguientes ecuaciones:

- Ecuaciones vehículo que adelanta

$$D2 = B * dB \qquad Va = \frac{D2}{tf-ti}$$

Ecuación 8. *DVA vehículo que adelanta*

Ecuación 7. *Velocidad vehículo que adelanta*

- Ecuaciones vehículo que es adelantado

$$Dm = B * dB \qquad Vo = \frac{Dm}{tf^o-ti^o}$$

Ecuación 9. *Distancia vehículo adelantado*

Ecuación 10. *Velocidad vehículo adelantado*

Donde, D2: Distancia medida del adelantamiento (m)

#B: Banderas cruzadas durante la maniobra (unidad)

dB: Distancia entre cada bandera (m)

Va: Velocidad vehículo que adelanta (m/s)

ti y tf: Tiempo de inicio y final de la maniobra respectivamente (s)

Dm: Distancia recorrida por el vehículo adelantado durante la maniobra (m)

Vo: Velocidad vehículo que es adelantado (m/s)

ti° y tf°: Tiempo de inicio y final entre Dm (s)

Finalmente, para el cálculo de la DVA se tomó la $DVA = D1 + D2 + D3 + D4$

Ecuación 4 del MDGC, conservando las medidas D1 y D3 del manual y reemplazando en la ecuación la distancia D2 medida en campo y D4 que es igual a 2/3 de D2.

4.2 Descripción de la metodología empleada en la toma de datos

La información de campo se recopiló mediante filmaciones de la ruta 25 perteneciente a la red de arterias primarias del suroccidente de Colombia, eligiendo el tramo 04 por desarrollarse en un terreno montañoso.

4.2.1 Selección de tramos de carretera

Los tramos evaluados se están señalizados con línea discontinua permitiendo la maniobra de adelantamiento en uno o ambos sentidos; además se garantizaron condiciones óptimas de circulación: Estructura del pavimento, drenaje, tráfico, clima, y aspectos que afectaran la circulación como intersecciones o pasos elevados (Sánchez, 2012).

4.2.2 Equipos de medición

Se utilizaron aeronaves no tripuladas (DRON) para filmar la maniobra de adelantamiento de los usuarios en condiciones normales. La altura de vuelo del dron aseguró que el comportamiento de los conductores no fuera alterado por la medición. En terreno, se instalaron segmentos de tela a una distancia fija (10 m) para poder medir distancias y calcular velocidades durante la maniobra estudiada. En la Figura 6 se observa el modelo experimental definido para esta investigación y en la Figura 7 los equipos principales utilizados en la toma de información en campo.

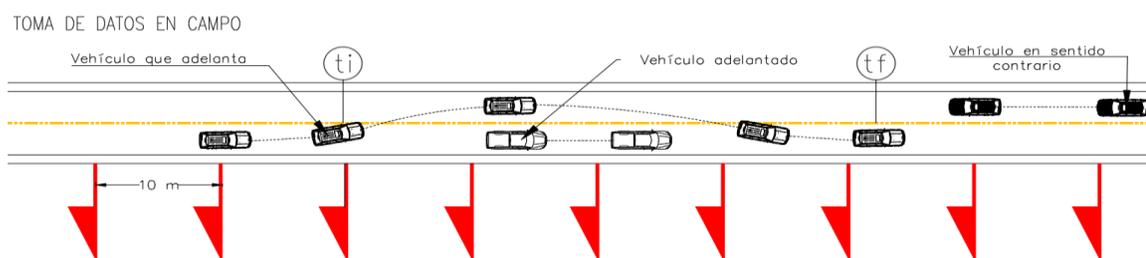


Figura 6. Metodología toma de datos en campo

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. equipos utilizados en la toma de datos

Fuente: propia (imágenes sin escala)

4.2.3 Procedimiento de filmación

La aeronave no tripulada tuvo altura de vuelo entre 150 y 300 metros, en una posición donde se logró visualizar el tramo que desea evaluar (ver Figura 8); se filma cada maniobra de adelantamiento para ser procesada en oficina.



Figura 8. registro fotográfico procedimiento de filmación

Fuente: propia

Los tramos con longitud de entretangencia menores a 200m se realizaron vuelos con una vista ortogonal a la carretera, esta información fue particularmente útil porque permitió la digitalización de la maniobra en trayectorias gráficas como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Maniobra digitalizada desde toma aérea ortogonal

Fuente: propia

4.1 Trayectorias D2 medidas en campo

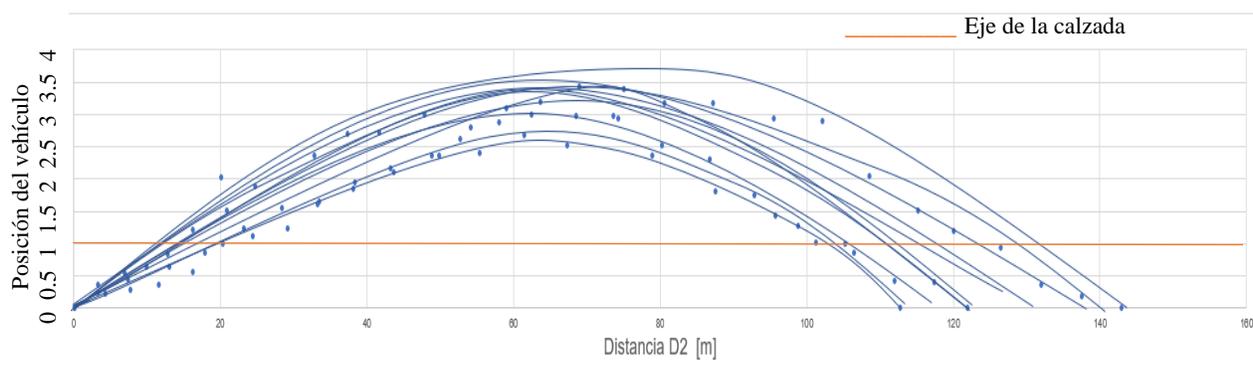
Con las tomas aéreas ortogonales se digitalizaron los puntos en cada fotograma del video durante la maniobra de adelantamiento. Las gráficas 4 a la 7 ilustran la trayectoria de vehículos al momento de realizar la maniobra de adelantamiento D2 agrupados en intervalos de velocidad del vehículo que adelanta (V_a); las gráficas muestran la trayectoria de los vehículos al momento de invadir el carril izquierdo durante la maniobra de adelantamiento como se observa en las figuras 10 a la 13.

De la gráfica 4 se puede observar que la distancia D2 oscila entre 110 y 140 metros para velocidades entre 50 y 60 km/h.



Figura 10. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 50 y 60 km/h

Fuente: Propia



Gráfica 4. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 50 y 60 km/h.

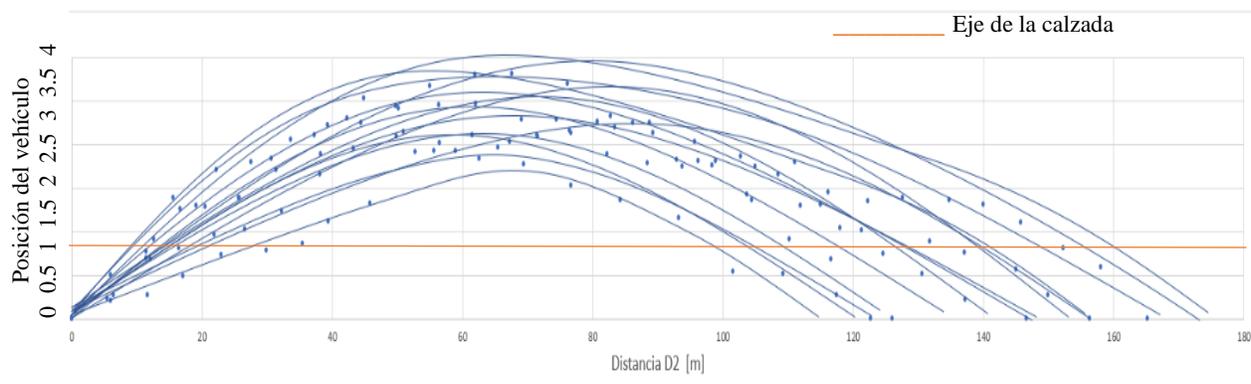
Fuente: Propia

De la gráfica 5 se puede observar que la distancia D2 oscila entre 120 y 170 metros para velocidades entre 60 y 70 km/h.



Figura 11. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 60 y 70 km/h

Fuente: Propia



Gráfica 5. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 60 y 70 km/h.

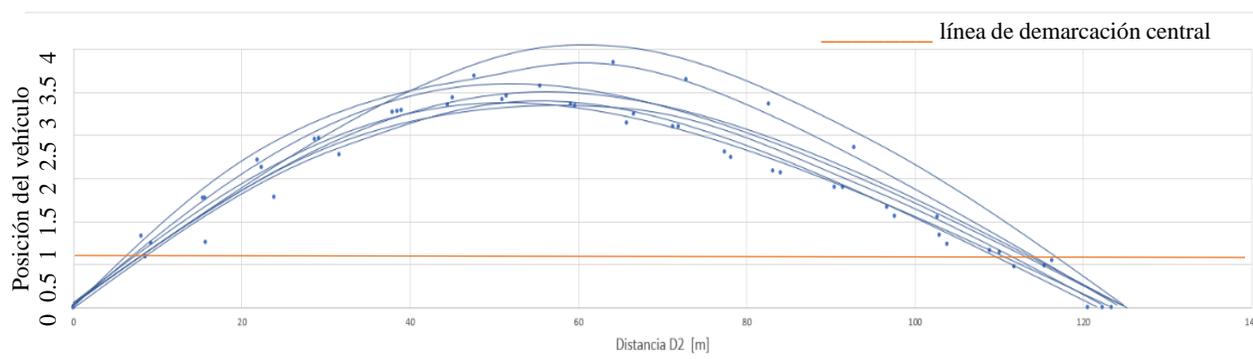
Fuente: Propia

De la gráfica 6 se puede observar que la distancia D2 oscila entre 120 y 125 metros para velocidades entre 70 y 85 km/h.



Figura 12. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 70 y 85 km/h

Fuente: Propia



Gráfica 6. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 70 y 85 km/h.

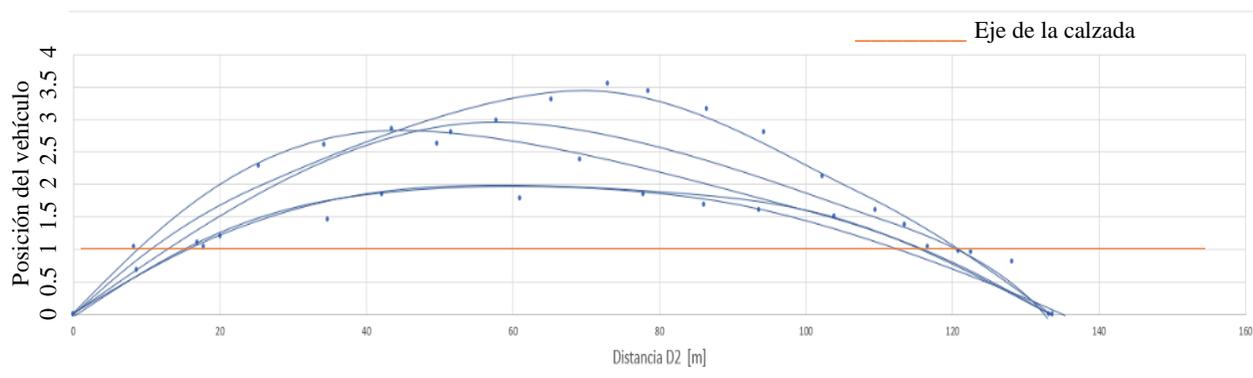
Fuente: Propia

De la gráfica 7 se puede observar que la distancia D2 corresponde a 135 metros para velocidades entre 90 y 100 km/h.



Figura 13. Trayectoria de adelantamiento para una velocidad entre 90 y 100 km/h

Fuente: Propia



Gráfica 7. Trayectoria de adelantamiento para velocidad de vehículo entre 90 y 100

km/h.

Fuente: Propia

4.1.1 Captura de información geométrica

Con ayuda del odómetro y cinta métrica se midieron los anchos de: calzada, berma, longitud de entre tangencia y longitud del patrón de discontinuidad de la demarcación central. Y con las

herramientas de Google Earth Pro se midieron los radios de las curvas y la pendiente longitudinal y transversal de la carretera (ver Figura 14).



Figura 14. Medición pendiente longitudinal tramo 2

Fuente: propia a partir Google Earth Pro

4.2 Localización geográfica de los tramos evaluados

Se estudiaron nueve (9) tramos localizados en la ruta 25 entre Popayán y Santander de Quilichao en el Cauca (tramo 2504). Este corredor tiene una longitud de 71 km y pertenece a la red de arterias primarias de Colombia y es conocida como Carretera Panamericana; esta vía se desarrolla en terreno montañoso con una sola calzada bidireccional. En la **Figura 15** se muestra la localización del corredor estudiado.

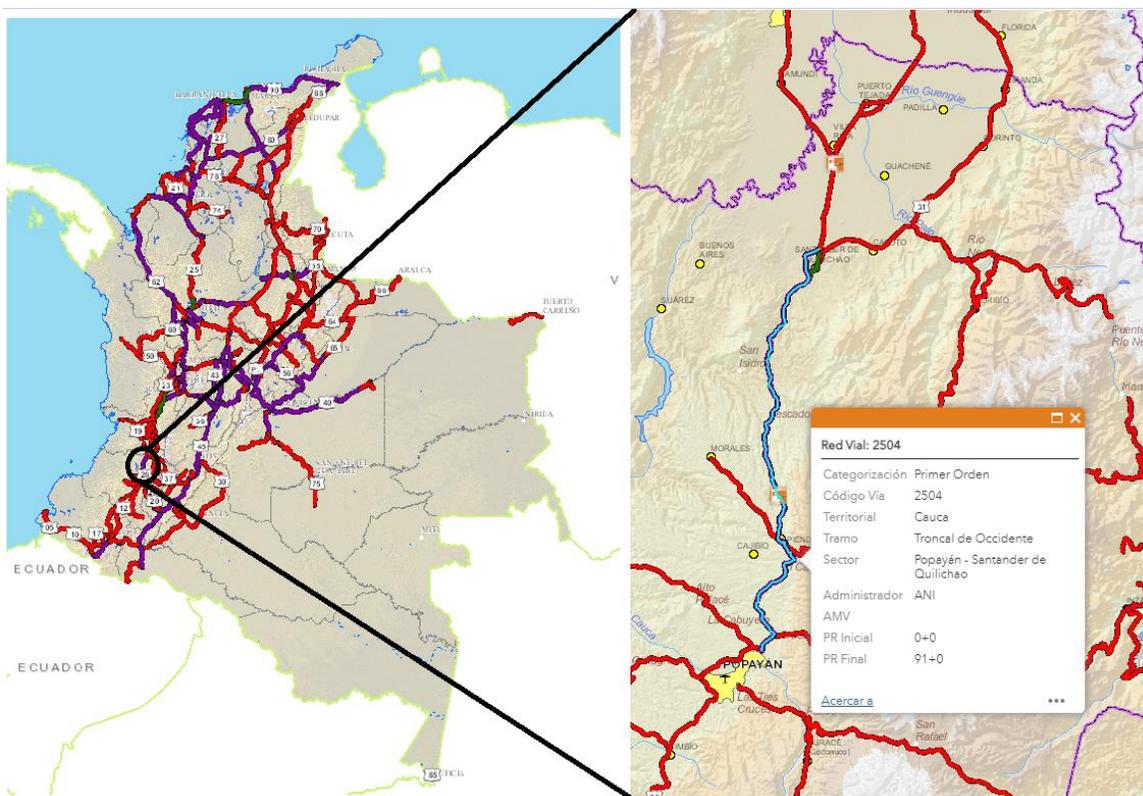


Figura 15. Localización general corredor estudiado

Fuente: *geo-visor hermes.invias.gov.co*

Esa clasificación se resumió en una tabla resultado del procesamiento de información de datos de varias carreteras del país del proyecto iRAP propuesto por la ANSV y realizado en el 2015 por la Universidad del Cauca. La Tabla 4, presenta la clasificación del terreno según las características geométricas encontradas en el trazado delineado de TOPO3, resaltando con el recuadro rojo, las correspondientes a terreno montañoso.

Tabla 4. Clasificación del terreno según la geometría de la vía (Terreno montañoso)

Grado de curvatura	Radio	Deflexión	Pendiente	Sub+baj	Tipo de terreno
$\Sigma\Delta^\circ/\text{Km}$	(m)	(grados)	%	(m/Km)	
0 - 30	> 500	< 30	< 4%	< 30	Plano
30 - 200	100 - 500	30 - 80	4 % - 7%	35 - 60	Ondulado
200 - 400	40 - 100	80 - 120	7% - 9%	60 - 70	Montañoso
400 - 800	< 40	> 120	> 9%	> 70	Escarpado

Fuente: Rosas A, (2015)

De esta manera, la clasificación del tipo de terreno para los tramos evaluados se muestra en la Tabla 5 y la localización de estos en la Figura 16.

Tabla 5. Clasificación del tipo de terreno para los tramos evaluados

Tra mo	Grado de curvatura ($\Sigma\Delta^\circ/\text{Km}$)	Radio (m)	deflexión (grados)	Pendiente (%)	Sub+Baj (m/Km)	Tipo de te- rreno
Ruta 2504	287	76	86	7	66	Montañoso

Fuente: elaboración propia

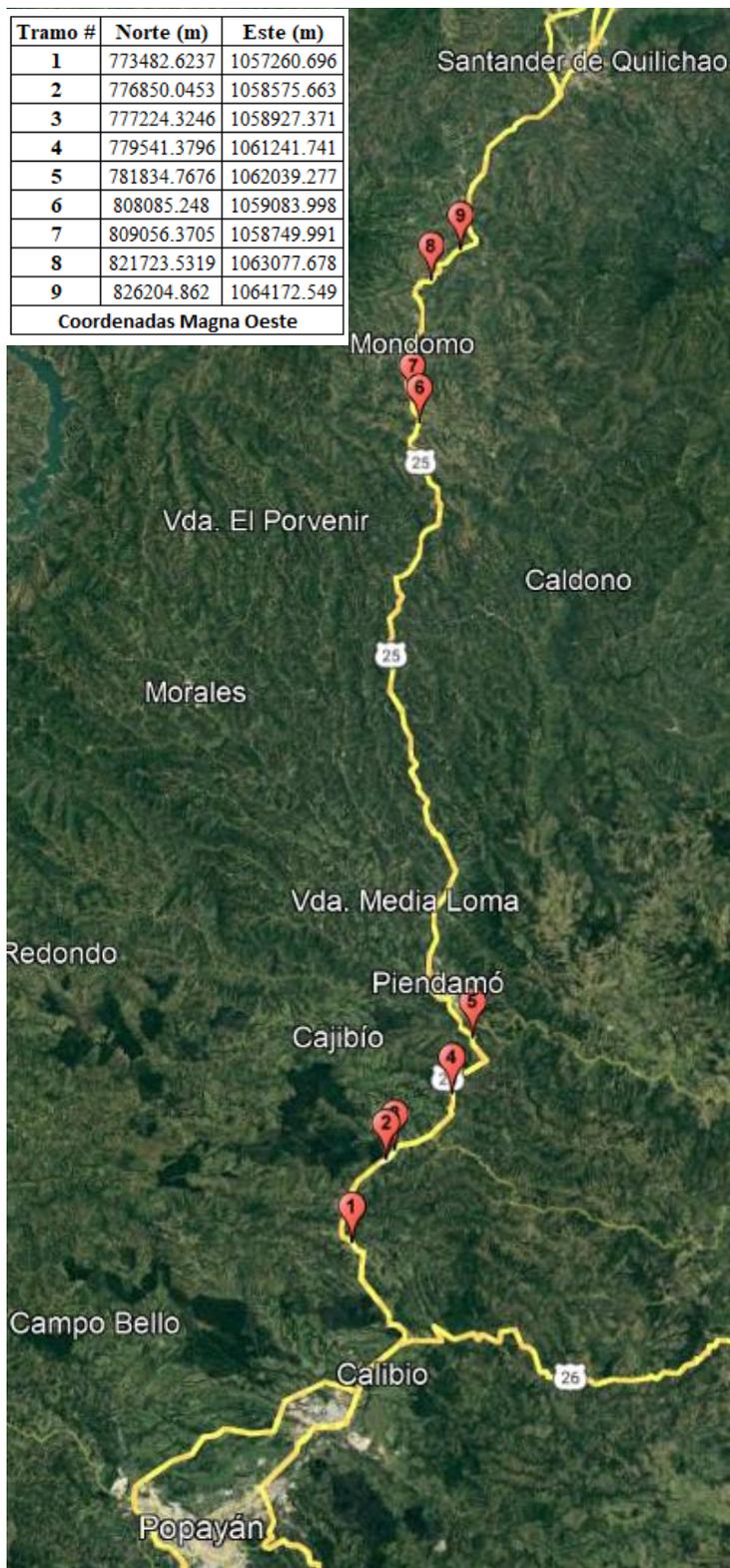


Figura 16. localización específica tramos estudiados

Fuente: propia adaptado de Google Earth

5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo se presenta el análisis estadístico de los datos recolectados durante el trabajo de campo con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados.

Inicialmente, se realizó el cálculo de la distancia de adelantamiento para cada uno de los 199 casos registrados a partir de la información sobre variables independientes obtenida en la filmación. A estos datos se aplican modelos de confiabilidad como la prueba Anderson-Darlyn y verificación de tamaño de muestras necesaria para asegurar confiabilidad y precisión en la estimación de parámetros poblacionales.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis descriptivo para explorar el comportamiento de la variable dependiente (distancia de adelantamiento) en función de las variables independientes tanto geométricas (radio de curvatura, longitud de tangente, etc.) como operacionales (velocidades).

Luego, con el fin de identificar las variables que tienen un efecto estadísticamente significativo en la distancia de adelantamiento, se realizan pruebas de hipótesis a través de un ANOVA multifactorial.

Finalmente, con base en los factores más influyentes, se plantearon modelos de regresión para estimar la distancia de adelantamiento a partir de las características geométricas y de operación de los tramos evaluados. Los resultados se compararon con los criterios normativos vigentes en Colombia.

De esta manera se presenta el análisis cuantitativo necesario para cumplir con los objetivos propuestos y confirmar o rechazar la hipótesis de investigación planteada inicialmente. Los resultados permitirán establecer recomendaciones para la normatividad y futuras investigaciones.

5.1 Cálculo de distancia de visibilidad de adelantamiento para las observaciones registradas

En la **Tabla 6** se presenta un resumen del cálculo de la DVA de acuerdo con la información de campo. En la primera columna se muestra la numeración de cada una de las 199 observaciones, en la segunda columna la velocidad en km/h del vehículo que realiza el adelantamiento, en la tercera columna el cálculo de la DVA con la D2 medida en campo, es decir los valores D1, D3, D4 se mantienen igual a como lo recomienda el MDGC 2008.

Tabla 6. Resumen toma de datos de campo

OBS	Va Km/h	DVA medida	Condición
1	51	238	Auto adelanta auto
2	83	508	Auto adelanta camión
3	96	543	Auto adelanta auto
4	67	463	Bus adelanta camión
5	30	243	Auto adelanta auto
6	83	547	Auto adelanta auto
7	68	355	Auto adelanta camión
8	75	397	Auto adelanta camión
9	96	741	Auto adelanta camión
10	47	281	Auto adelanta auto
11	88	507	Auto adelanta auto
12	45	298	Auto adelanta auto
13	58	320	Camión adelanta camión
14	67	377	Auto adelanta camión
15	79	414	Auto adelanta camión
16	58	330	Auto adelanta camión
17	51	269	Auto adelanta auto
18	79	541	Auto adelanta camión
19	67	417	Auto adelanta auto
20	64	259	Auto adelanta camión
21	61	352	Auto adelanta auto
22	82	520	Auto adelanta auto
23	65	406	Bus adelanta auto
24	74	401	Auto adelanta auto
25	57	287	Camión adelanta auto
26	63	323	Auto adelanta camión
27	36	237	Auto adelanta camión
28	100	630	Auto adelanta camión
29	96	542	Auto adelanta camión
30	76	369	Auto adelanta bus
31	80	353	Auto adelanta auto
32	80	454	Auto adelanta auto
33	62	289	Auto adelanta auto
34	74	390	Auto adelanta auto
35	54	279	Auto adelanta auto
36	67	376	Auto adelanta auto
37	70	382	Auto adelanta auto
38	47	276	Auto adelanta camión
39	86	494	Auto adelanta camión
40	69	362	Auto adelanta auto
41	66	338	Auto adelanta camión
42	69	314	Auto adelanta auto
43	75	339	Auto adelanta auto
44	87	461	Auto adelanta auto
45	54	291	Auto adelanta camión
46	82	448	Auto adelanta auto
47	52	233	Auto adelanta bus
48	63	314	Auto adelanta camión
49	83	480	Auto adelanta camión

OBS	Va Km/h	DVA medida	Condición
50	63	298	Auto adelanta bus
51	80	513	Auto adelanta auto
52	38	225	Auto adelanta camión
53	68	432	Auto adelanta camión
54	38	419	Camión adelanta camión
55	53	355	Auto adelanta camión
56	63	318	Camión adelanta camión
57	25	224	Auto adelanta camión
58	79	445	Auto adelanta auto
59	76	464	Auto adelanta camión
60	78	571	Auto adelanta camión
61	76	461	Camión adelanta camión
62	35	258	Auto adelanta bus
63	50	378	Auto adelanta auto
64	66	370	Auto adelanta camión
65	78	422	Auto adelanta auto
66	29	223	Auto adelanta camión
67	47	270	Auto adelanta camión
68	79	403	Auto adelanta auto
69	50	277	Auto adelanta camión
70	73	353	Auto adelanta auto
71	53	246	Auto adelanta auto
72	53	283	Auto adelanta camión
73	56	289	Auto adelanta auto
74	72	335	Auto adelanta auto
75	45	240	Auto adelanta auto
76	59	304	Auto adelanta camión
77	53	291	Auto adelanta camión
78	58	286	Auto adelanta auto
79	23	298	Camión adelanta camión
80	32	224	Auto adelanta camión
81	33	225	Auto adelanta auto
82	35	256	Auto adelanta auto
83	65	288	Auto adelanta auto
84	84	432	Auto adelanta auto
85	57	303	Auto adelanta auto
86	50	227	Auto adelanta auto
87	37	258	Auto adelanta auto
88	44	320	Auto adelanta auto

OBS	Va Km/h	DVA medida	Condición
89	52	227	Auto adelanta auto
90	56	250	Auto adelanta bus
91	50	248	Auto adelanta auto
92	63	260	Auto adelanta camión
93	77	389	Auto adelanta camión
94	88	472	Auto adelanta auto
95	65	256	Auto adelanta auto
96	81	458	Auto adelanta auto
97	92	474	Auto adelanta bus
98	74	382	Auto adelanta auto
99	87	479	Auto adelanta auto
100	60	295	Auto adelanta camión
101	29	229	Auto adelanta auto
102	72	408	Auto adelanta bus
103	74	405	Auto adelanta auto
104	58	296	Auto adelanta auto
105	70	381	Auto adelanta bus
106	100	481	Auto adelanta bus
107	70	396	Auto adelanta auto
108	66	313	Auto adelanta auto
109	52	270	Auto adelanta camión
110	98	534	Auto adelanta auto
111	50	269	Auto adelanta bus
112	60	309	Auto adelanta auto
113	66	333	Auto adelanta auto
114	36	243	Auto adelanta auto
115	74	379	Auto adelanta camión
116	109	489	Auto adelanta camión
117	105	555	Auto adelanta auto
118	97	578	Auto adelanta auto
119	68	353	Auto adelanta auto
120	69	347	Auto adelanta camión
121	82	460	Auto adelanta auto
122	55	292	Auto adelanta camión
123	80	384	Auto adelanta camión
124	95	478	Auto adelanta camión
125	67	369	Auto adelanta auto
126	72	331	Auto adelanta camión
127	74	370	Auto adelanta auto

OBS	Va Km/h	DVA medida	Condición
128	90	550	Auto adelanta bus
129	73	416	Auto adelanta auto
130	52	402	Auto adelanta camión
131	100	515	Auto adelanta auto
132	100	592	Auto adelanta auto
133	90	556	Auto adelanta camión
134	66	270	Auto adelanta auto
135	56	332	Auto adelanta camión
136	57	340	Camión adelanta camión
137	57	266	Auto adelanta camión
138	75	376	Auto adelanta camión
139	51	279	Auto adelanta camión
140	90	533	Auto adelanta auto
141	80	492	Auto adelanta auto
142	99	538	Auto adelanta auto
143	118	563	Auto adelanta camión
144	47	279	Auto adelanta camión
145	83	453	Auto adelanta auto
146	74	404	Auto adelanta camión
147	77	587	Bus adelanta camión
148	59	334	Auto adelanta camión
149	68	405	Auto adelanta camión
150	75	358	Auto adelanta camión
151	73	361	Auto adelanta auto
152	73	385	Auto adelanta auto
153	55	316	Camión adelanta camión
154	62	278	Auto adelanta auto
155	81	473	Auto adelanta auto
156	75	348	Auto adelanta camión
157	77	375	Auto adelanta camión
158	42	243	Auto adelanta camión
159	34	298	Auto adelanta camión
160	48	266	Auto adelanta camión
161	48	245	Auto adelanta camión
162	65	270	Auto adelanta bus
163	78	367	Auto adelanta auto

OBS	Va Km/h	DVA medida	Condición
164	65	271	Camión adelanta camión
165	51	246	Auto adelanta camión
166	58	267	Auto adelanta auto
167	77	395	Auto adelanta camión
168	42	231	Auto adelanta camión
169	62	313	Auto adelanta camión
170	58	343	Camión adelanta camión
171	48	258	Bus adelanta camión
172	57	254	Auto adelanta camión
173	53	284	Camión adelanta camión
174	71	365	Auto adelanta auto
175	50	264	Auto adelanta camión
176	67	363	Auto adelanta camión
177	75	409	Auto adelanta auto
178	88	489	Auto adelanta camión
179	55	333	Auto adelanta camión
180	104	701	Auto adelanta auto
181	51	281	Auto adelanta camión
182	79	496	Auto adelanta camión
183	69	460	Auto adelanta camión
184	80	460	Auto adelanta camión
185	71	449	Auto adelanta bus
186	88	517	Auto adelanta camión
187	63	264	Auto adelanta auto
188	65	414	Auto adelanta camión
189	67	468	Auto adelanta camión
190	46	242	Auto adelanta camión
191	64	312	Auto adelanta camión
192	60	330	Camión adelanta camión
193	42	419	Camión adelanta auto
194	54	298	Auto adelanta auto
195	59	274	Auto adelanta camión
196	89	485	Auto adelanta auto
197	105	590	Auto adelanta camión
198	80	439	Auto adelanta auto
199	85	582	Auto adelanta camión

Fuente: propia

5.2 Confiabilidad de datos

5.2.1 Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling (AD)

Una prueba de bondad de ajuste tiene por objetivo evaluar si los datos se ajustan razonablemente bien a una distribución de probabilidad de variable aleatoria continua.

Para realizar la prueba AD se tienen las siguientes hipótesis:

H0: los datos provienen de una distribución específica

H1: los datos no provienen de una distribución específica

La fórmula es:

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

Ecuación 11. Fórmula prueba Anderson-Darling

Donde: n = el tamaño de la muestra

F(x) = CDF para la distribución especificada

i = la i - ésima muestra, calculada cuando los datos se ordenan en orden ascendente

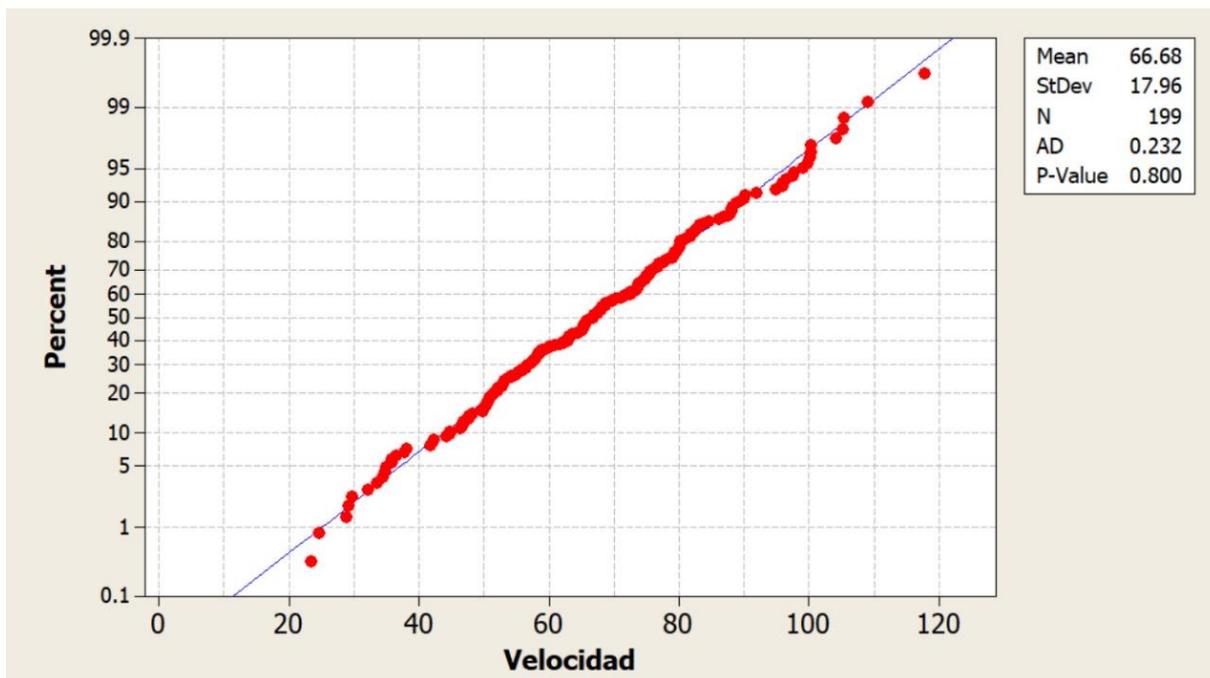
La fórmula para el valor *p* depende del valor estadístico AD y se calcula con las siguientes fórmulas (James A. Koziol, 1987):

Tabla 7. Fórmula del valor *p* según AD

Estadística AD	Fórmula del valor p
DA ≥ 0,60	$P = \exp(1,2937 - 5,709(AD) + 0,0186(AD)^2)$
0,34 < DA < 0,60	$P = \exp(0,9177 - 4,279(AD) - 1,38(AD)^2)$
0,20 < DA < 0,34	$P = 1 - \exp(-8,318 + 42,796(AD) - 59,938(AD)^2)$
DA ≤ 0,20 < DA < 0,34	$P = 1 - \exp(-13,436 + 101,14(AD) - 223,73(AD)^2)$

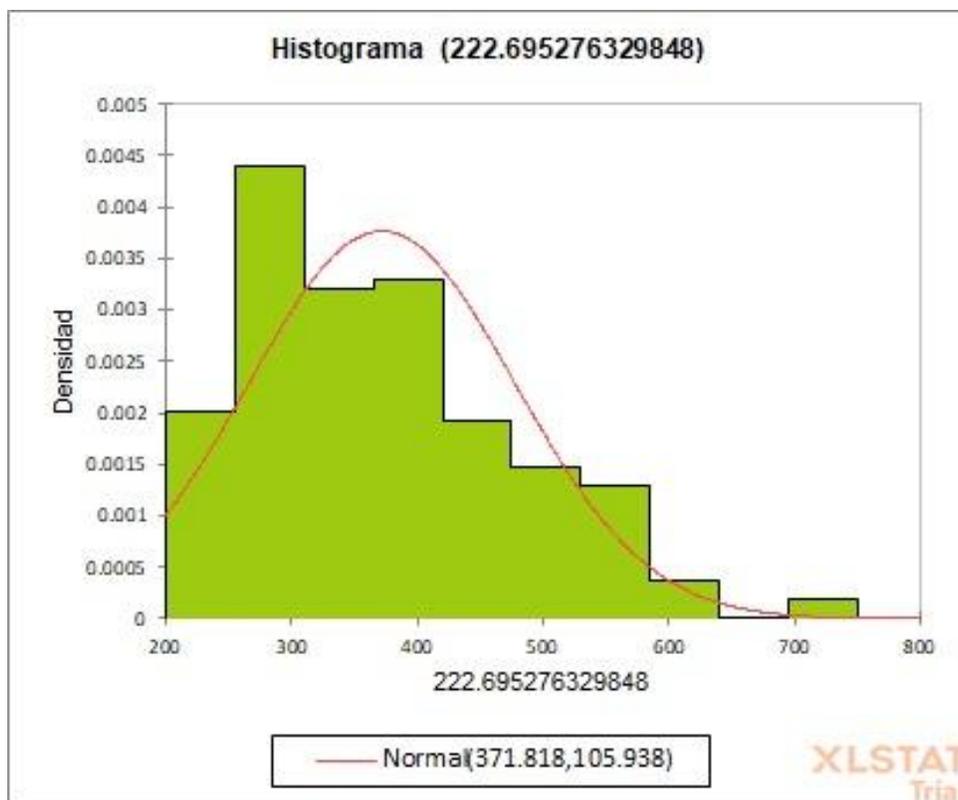
Fuente: Goodness-of-Fit Techniques by Ralph B. D'Agostino, Michael A. Stephens – James A. Koziol

Para el cálculo estadístico se utilizó el software de análisis estadístico Minitab. El cálculo de AD está basado en la suma de cuadrados de las distancias entre la probabilidad acumulada teórica y la probabilidad acumulada empírica; mientras más pequeño sea el valor de AD, más evidencia hay a favor de la hipótesis H_0 . El comportamiento de los datos obedeció a una distribución normal en la prueba de “*Anderson Daling (AD)*” con un valor de $AD = 0.232$ (ver gráficas 4 y 5).



Gráfica 8. Prueba Anderson-Darling (AD)

Fuente: elaboración propia en Software Minitab



Gráfica 9. Frecuencia de datos distribución normal

Fuente: elaboración propia en XLSTAT

5.2.2 Cálculo de tamaño de muestra

La metodología para calcular el tamaño de muestra en una población infinita se basó en la utilización de fórmulas estadísticas que permiten obtener un tamaño representativo sin la necesidad de examinar toda la población. Uno de los métodos más comunes es la fórmula de la muestra aleatoria simple, que considera la varianza de la población, el nivel de confianza deseado y el margen de error aceptable.

La fórmula típica es:

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{E^2}$$

Ecuación 12. Cálculo tamaño de la muestra

Donde:

- n es el tamaño de la muestra.
- Z representa el valor crítico asociado al nivel de confianza deseado.
- σ^2 es la varianza de la población
- E es el margen de error permitido.

Esta fórmula asegura que, con un nivel de confianza específico, el tamaño de la muestra sea suficiente para estimar parámetros poblacionales con la precisión deseada. Es importante señalar que este enfoque asume una población infinita o, al menos, una población considerablemente grande en comparación con el tamaño de la muestra, lo que permite prescindir de correcciones adicionales.

Es fundamental seleccionar valores apropiados para el nivel de confianza y el margen de error en función de los objetivos del estudio y las limitaciones prácticas. Este método facilita la obtención de muestras representativas de una población infinita de manera eficiente y estadísticamente sólida.

El tamaño de muestra fue de 199 individuos, al realizar el cálculo con un nivel de confianza de 99% y error esperado del 4% para una población infinita obtenemos que la muestra necesaria suficiente para estimar parámetros poblacionales con la precisión deseada es de 197.6 individuos; por lo tanto, el tamaño de la muestra es apropiado.

5.3 Análisis de varianza ANOVA

Se utilizó análisis de varianza ANOVA para determinar su significancia estadística a valores $P < 0.05$, se determinó que las variables que guardan mayor significancia estadística son: velocidad de vehículo que adelanta (V_a), velocidad del vehículo adelantado (V_o), y longitud de entre tangencias (L_e) como lo muestra la Tabla 8.

Las variables continuas fueron ajustadas en grupos de intervalos discretos para realizar el modelo, sus resultados guardaron congruencia por lo que se puede afirmar que:

Tabla 8. *Significancia estadística para cada variable*

Variable independiente	Valor P		
V_a	0	R^2	73.60%
V_o	0.001	R^2 ajustado	73%
L_e	0		
Se	0.357		

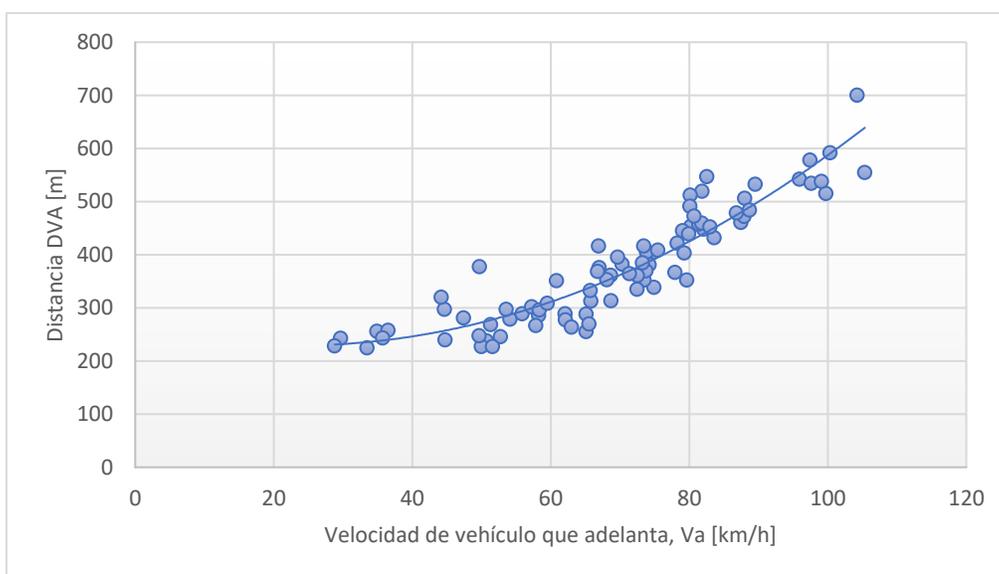
Fuente: *propia*

En los adelantamientos realizados, la variable independiente con mayor significancia estadística fue la velocidad del vehículo que adelanta, junto con la variable geométrica longitud de entretangencias, seguido de la variable velocidad de operación medido para un grupo de individuos. Su coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado reflejan confiabilidad del resultado.

5.4 Comportamiento de la distancia de visibilidad de adelantamiento (ecuaciones de regresión)

Una vez identificada la variable más significativa en el cálculo de la DVA, se calculó para distintos casos, las ecuaciones que describen el comportamiento de la maniobra.

En las gráficas de la 10 a la 13 se logra visualizar el comportamiento de la variable DVA (m) en función de la V_a (km/h) por tipo de adelantamiento para Auto – Auto, Auto – Camión, Auto – Bus y de manera general para todos los datos en conjunto. La condición de adelantamiento Camión – Camión no se tuvo en cuenta por haber generado coeficiente de determinación R^2 bastante bajo.



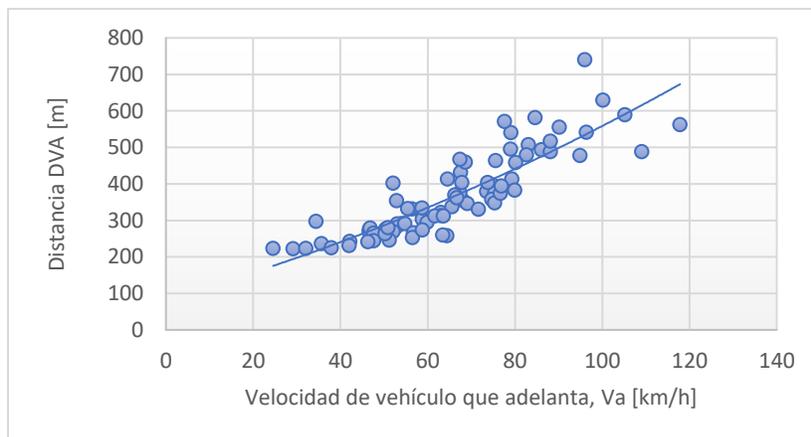
Gráfica 10. Condición general de adelantamiento para Auto – Auto en función de V_a

Fuente: Propia

La curva que mejor se ajusta a los datos obedece a la ecuación cuadrática, ecuación 14:

$$DVA = 0.0609(V_a)^2 - 2.8373(V_a) + 262.32 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.8593$$



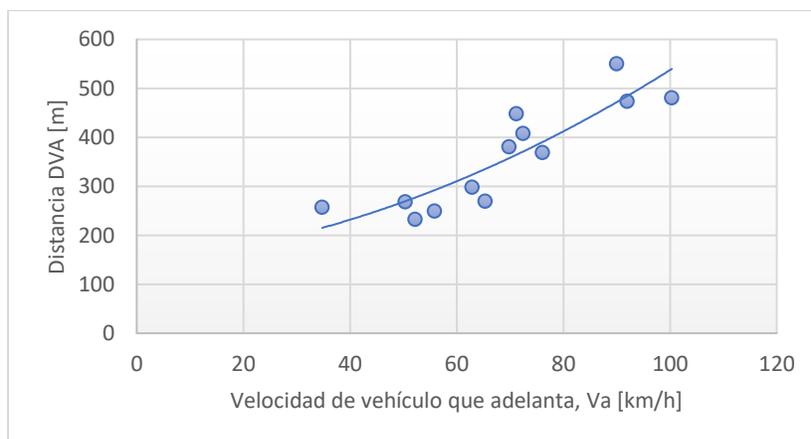
Gráfica 11. Condición general de adelantamiento para Auto – Camión en función de V_a

Fuente: Propia

La curva que mejor se ajusta a los datos obedece a la ecuación cuadrática, ecuación 15:

$$DVA = 0.0144(V_a)^2 + 3.2875(V_a) + 86.024 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.7561$$



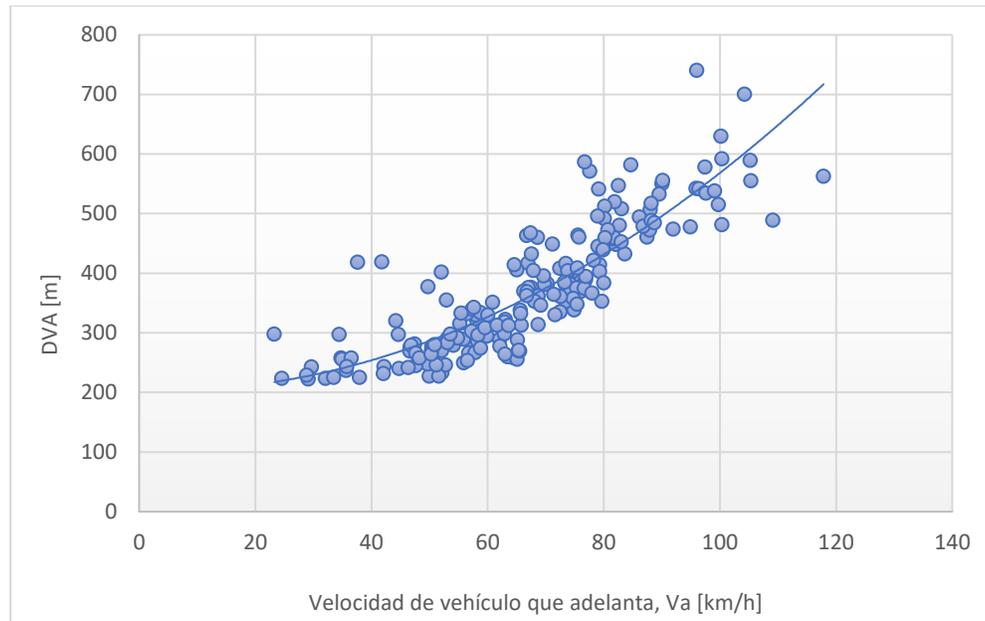
Gráfica 12. Condición general de adelantamiento para Auto – Bus en función de V_a

Fuente: Propia

La curva que mejor se ajusta a los datos obedece a la ecuación cuadrática, ecuación 16:

$$DVA = 0.0292(V_a)^2 + 1.0066(V_a) + 144.82 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.779$$



Gráfica 13. Condición general de adelantamiento en función de DVA

Fuente: propia

La curva que mejor se ajusta a los datos obedece a la ecuación cuadrática, ecuación 17:

$$DVA = 0.0399(Va)^2 - 0.3468(Va) + 204.02 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.7477$$

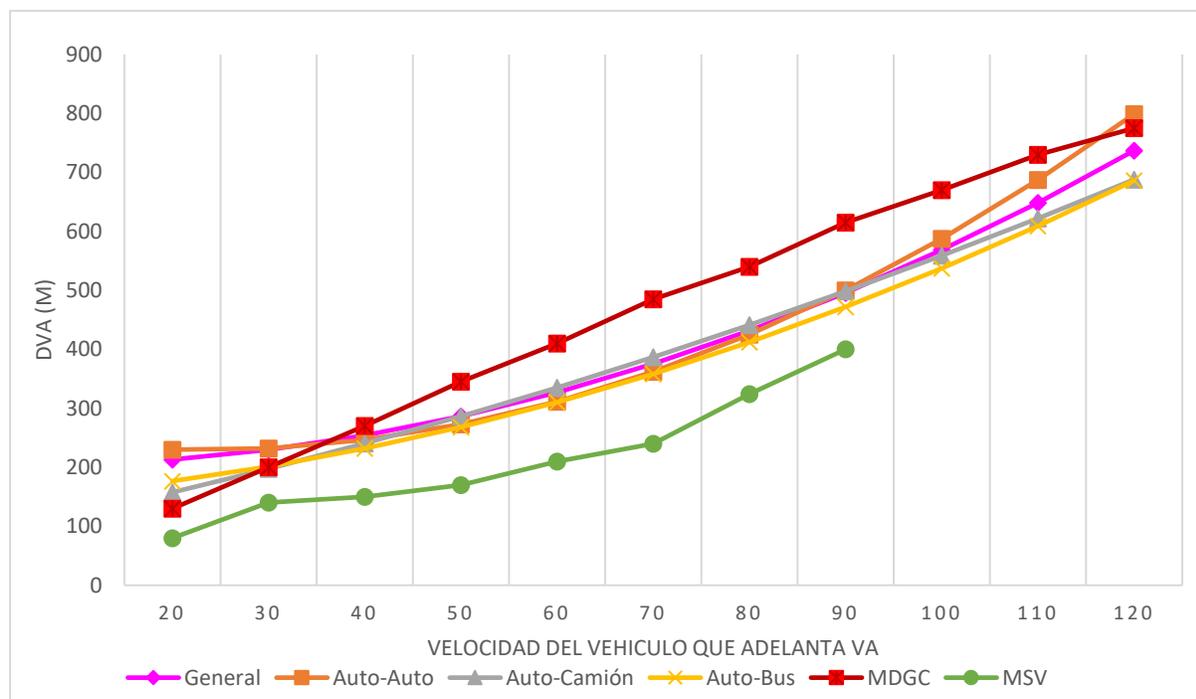
La **Tabla 9** muestra la comparación entre la DVA obtenidas con la metodología planteada en este trabajo y la DVA propuesto por el MDGC 2008 y el MSV 2015.

Tabla 9. Comparación DVA en función de Va

Va [Km/h]	DVA [m]				DVA, MDGC 2008 [m]	DVA, MSV 2015 [m]
	General	Auto - Auto	Auto Camión	Auto - Bus		
20	213.044	229.934	157.534	176.632	130	-
30	229.526	232.011	197.609	201.298	200	80
40	253.988	246.268	240.564	231.804	270	140
50	286.43	272.705	286.399	268.15	345	150
60	326.852	311.322	335.114	310.336	410	170
70	375.254	362.119	386.709	358.362	485	210
80	431.636	425.096	441.184	412.228	540	240
90	495.998	500.253	498.539	471.934	615	324
100	568.34	587.59	558.774	537.48	670	400
110	648.662	687.107	621.889	608.866	730	-
120	736.964	798.804	687.884	686.092	775	-

Fuente: Propia

En la Gráfica 14 se ilustra la comparación entre las DVA obtenidas con la metodología planteada en esta investigación y la DVA propuesta por los manuales vigentes. Se logra observar que los valores de DVA planteados por MDGC 2008 están por encima de lo encontrado para velocidades de operación entre 40 km/h y 110 km/h, y que los valores de DVA que presenta el Manual de Señalización Vial 2015 están por debajo de lo que se encontró en campo.



Gráfica 14. Comparación de DVA en función de V_a .

Fuente: Propia

5.5 Niveles de confianza

En el ámbito de la estadística, la estimación precisa de parámetros poblacionales es esencial para la toma de decisiones informadas y la comprensión profunda de fenómenos observados. Sin embargo, ante la imposibilidad de evaluar todos los elementos de una población, la estadística proporciona herramientas para inferir características a partir de muestras representativas. Uno de los conceptos fundamentales en este proceso de inferencia estadística es el de los Niveles de Confianza (NC).

Los niveles de confianza constituyen un marco esencial que permite cuantificar la certeza asociada a las estimaciones realizadas a partir de muestras. Se utilizaron los procedimientos estadísticos enfocados en la distribución normal y la distribución t de Student en la determinación

del nivel de confianza del parámetro principal objeto de este estudio (DVA) y dada la significancia estadística presentada por los valores de V_a y V_o se analizará también el nivel de confianza para el parámetro Delta V que representa la diferencia de velocidades entre V_a y V_o .

5.5.1 Nivel de confianza DVA

En la **Tabla 10** se muestra el resumen del cálculo de la DVA para un nivel de confianza del 95%. Se presenta únicamente el límite superior puesto que el criterio de diseño geométrico requiere de un valor mínimo con el cual los conductores puedan realizar la maniobra de manera segura. La DVA con NC del 95% marca el límite de la distancia mínima requerida para realizar la maniobra de manera segura en función de la velocidad y en las condiciones en que fue desarrollado este experimento.

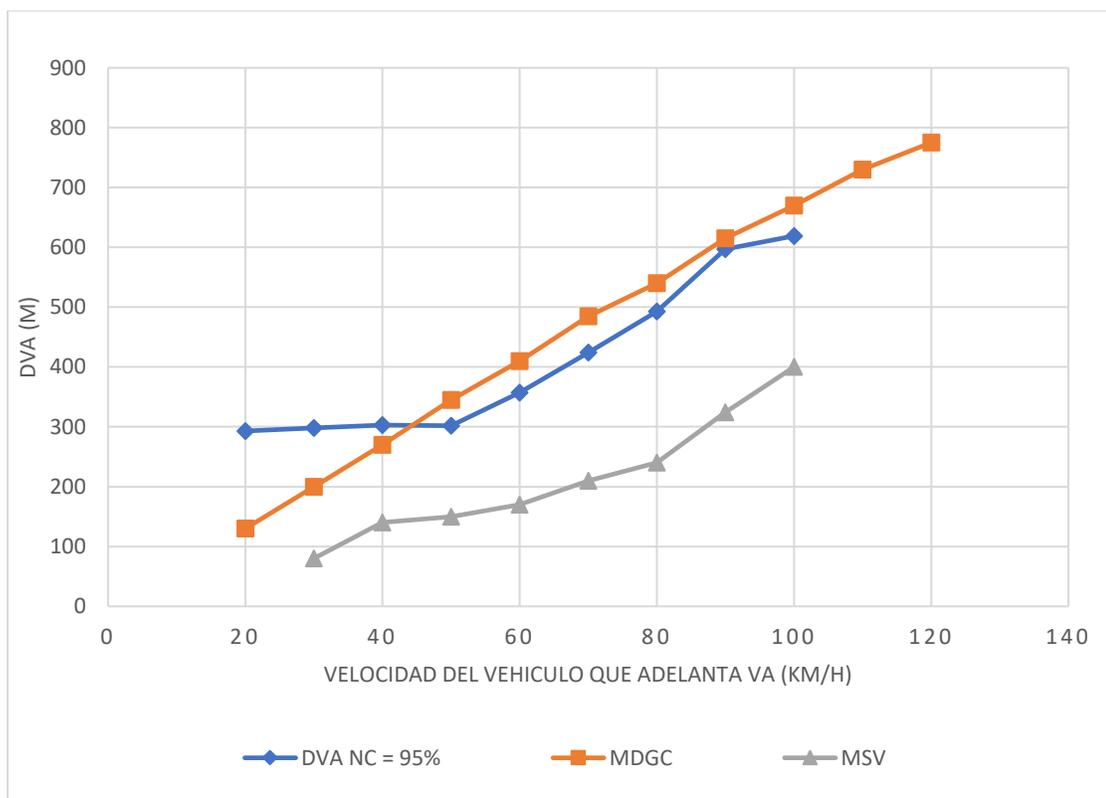
Tabla 10. Cálculo DVA NC = 95%

Va [Km/h]	DVA [m]	n	σ	DVA (m)	DVA, MDGC 2008 [m]	DVA, MSV 2015 [m]
	Media			Nc 95%		
20	243	4	31.71	293	130	-
30	262	11	53.35	298	200	80
40	276	14	46.16	303	270	140
50	290	43	38.90	302	345	150
60	339	41	58.25	357	410	170
70	405	40	57.86	423	485	210
80	475	26	45.54	493	540	240
90	552	11	66.68	597	615	324
100	568	9	65.95	619	670	400
-	-	-	-	-	730	-
-	-	-	-	-	775	-

Fuente: Propia

En la Gráfica 15 se muestra la comparación de la DVA medida en campo con un nivel de confianza del 95% según el procesamiento estadístico de la distribución normal y los manuales

vigentes en Colombia; en el cual se puede evidenciar que, la DVA con este nivel de confianza se asemeja aún más a los valores del MDGC que la descrita por la curva de proyección lineal presentada en la gráfica 14.



Gráfica 15. Comparativa de la variación de la DVA con $NC = 95\%$ y la normatividad colombiana vigente

Fuente: Propia

5.5.2 Nivel de confianza Delta V

El parámetro Delta V se define como la diferencia de velocidades existente entre el vehículo que adelanta (V_a) y el vehículo que es adelantado (V_o). El MDGC toma un valor de Delta V igual a 15 km/h en todos los casos. Sin embargo, del trabajo de realizado en campo se encontró que el

Delta V promedio es de 21 km/h y que el 95% de los datos presentan un Delta V entre 20 y 23 km/h como se muestra en la Tabla 11.

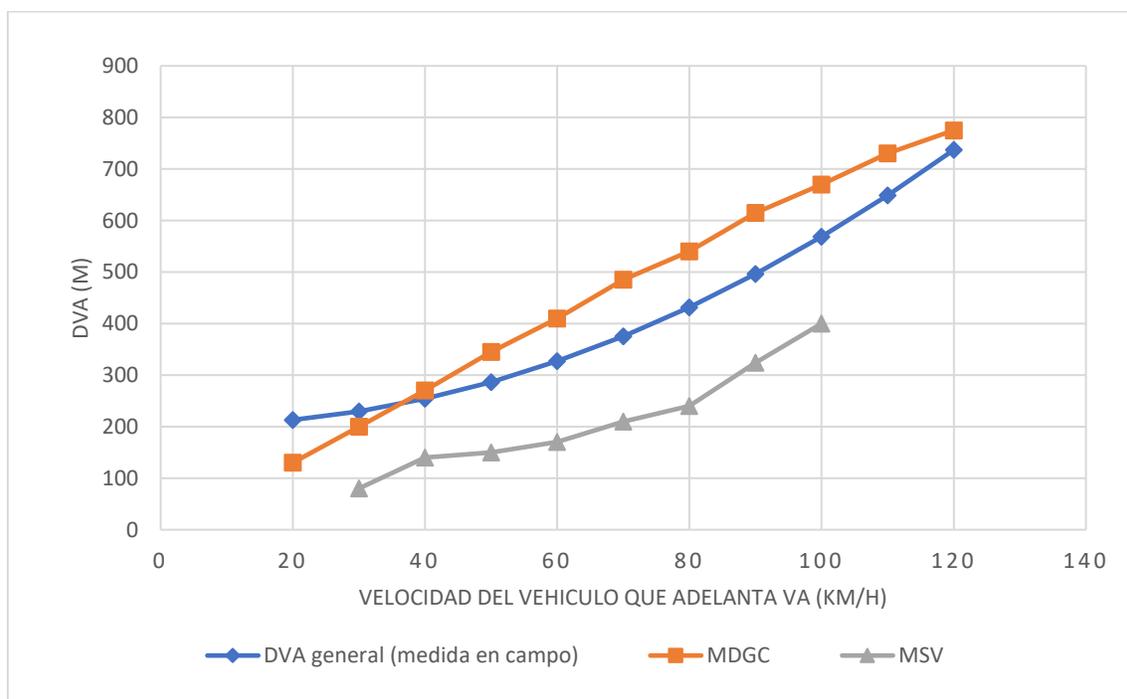
Tabla 11. Intervalo de confianza 95% para Delta V

Delta V [Km/h]	n	σ	Delta V [Km/h]	Delta V [Km/h]
Media			inferior	Superior
21	199	11.05	20	23

Fuente: Propia

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- I. La DVA obtenida en campo y proyectada mediante el análisis de regresión lineal guarda similitud a las distancias DVA descritas en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008; sin embargo, para velocidades de 20 y 30 km/h la distancia descrita en el MDGC es ligeramente inferior a la requerida por los conductores según las mediciones de campo, mientras que para velocidades superiores a 40 km/h la DVA del MDGC es ligeramente mayor, tal y como se puede apreciar en la **Gráfica 16**. En contra posición, el Manual de Señalización Vial 2015 considera distancias de adelantamiento sub dimensionadas; se debe tener en cuenta que este último manual no disgrega la distancia de adelantamiento en fases.



Gráfica 16. Comparativa de la variación de la DVA según la velocidad entre las mediciones y la normatividad colombiana vigente

Fuente: Propia

II. Se calcularon dos ecuaciones para el cálculo de la DVA para carreteras en terreno montañoso adaptadas al comportamiento de los conductores en Colombia.

- a. Ecuación cuadrática de regresión simple en función de la velocidad del vehículo que adelanta

$$DVA = 0.0399(Va)^2 - 0.3468(Va) + 204.02 \quad (17)$$

$$R^2 = 75\%$$

- b. Ecuación multifactorial con variables independientes la velocidad del vehículo que adelanta y la longitud de entre tangencia

$$DVA = 6.34Vo - 0.107Le - 77.9 \quad (18)$$

$$R^2 = 73\%$$

Donde, Va: velocidad del vehículo que adelanta (km/h)

Le: longitud de entre tangencia (Le)

La

Tabla 12 propone máximas distancia de adelantamiento en función a la entre tangente y Va, a partir de la ecuación 18.

Tabla 12. Distancia de adelantamiento en función de Le y Va.

Le (m)	Va (km/h)									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	102	165	229	292	356	419	482	546	609	673
150	97	160	224	287	350	414	477	541	604	667
200	91	155	218	282	345	408	472	535	599	662
250	86	149	213	276	340	403	466	530	593	657
300	81	144	207	271	334	398	461	524	588	651
350	75	139	202	266	329	392	456	519	583	646
400	70	133	197	260	324	387	450	514	577	641
450	65	128	191	255	318	382	445	508	572	635
500	59	123	186	249	313	376	440	503	566	630
550	54	117	181	244	308	371	434	498	561	625

Le (m)	Va (km/h)									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
600	49	112	175	239	302	366	429	492	556	619
650	43	107	170	233	297	360	424	487	550	614
700	38	101	165	228	291	355	418	482	545	608
750	33	96	159	223	286	350	413	476	540	603
800	27	91	154	217	281	344	408	471	534	598

Fuente: *Propia*

- III. Al emparejar las DVA obtenidas del trabajo de campo con los valores que exigen los manuales de diseño y señalización del país, se logró determinar mayor congruencia con el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008, para terreno montañoso; no es factible revisar las Da del MSV 2015 por la falta de información y referencias.
- IV. La significancia estadística se reconoce mediante el valor p , se asume un riesgo del 5% en asumir por declarar una diferencia significativa, si este valor es inferior a 0.05 se puede concluir que dicha variable es significativa. En la **Tabla 13** se puede observar que las variables significativas son: la velocidad del vehículo que adelanta, la velocidad del vehículo que es adelantado y la longitud de entre tangencia. El MDGC considera que la diferencia de velocidades entre el vehículo que adelanta y el que es adelantado es de 15 km/h para todos los casos; sin embargo, al verificar la significancia estadística de estas dos velocidades, es prudente considerar nuevas investigaciones que lleven a replantear dicho supuesto.

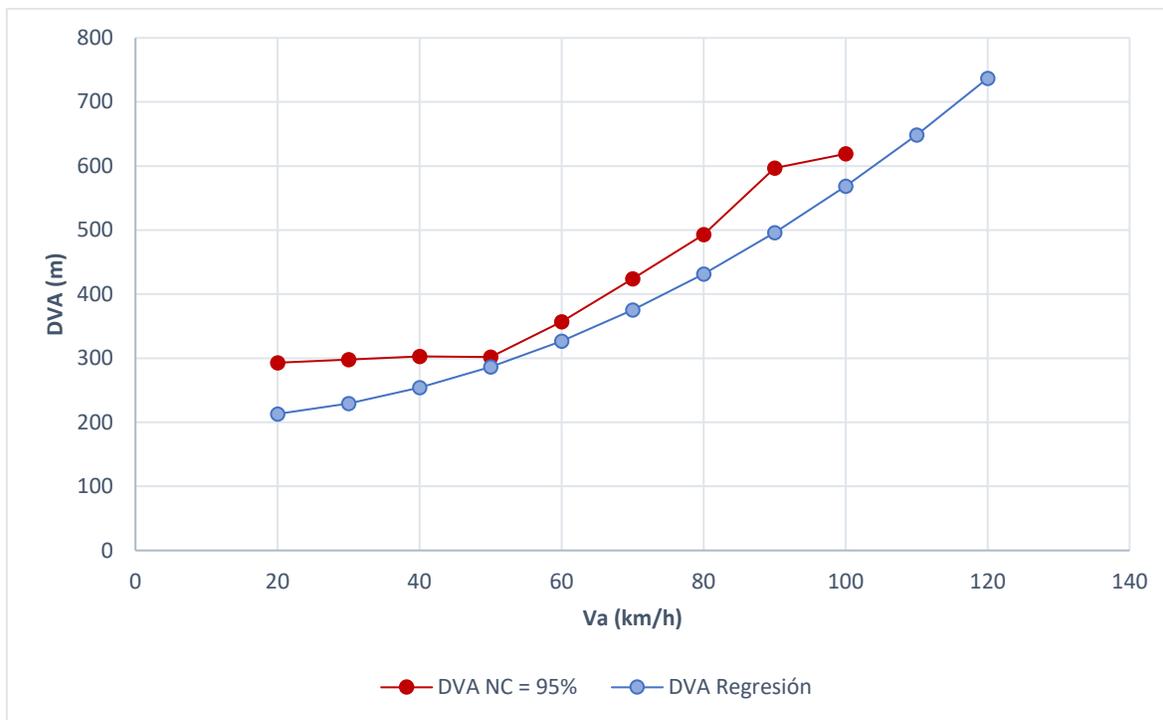
Tabla 13. *variables con significancia estadística*

Variable independiente	Valor P
V_a	0
V_o	0.001

$$\frac{Le}{0}$$

Fuente: propia

- V. Se determinó que las variables que más influyen en los conductores para realizar la maniobra de adelantamiento, es la velocidad del vehículo que adelanta, lo cual es consistente con el cálculo que realiza el MDGC 2008. El Manual de Señalización 2015 dispone las DVA para vías existentes, es decir que considera las velocidades de operación: Velocidad de vehículo que adelanta y velocidad de vehículo adelantado, esta variable guarda significancia estadística en menor grado a la variable Velocidad de Vehículo que adelanta. Además, se encontró que la variable geométrica longitud de entretangencias (Le) también se debe considerar para el cálculo de la DVA (Ecuación 18).
- VI. El cálculo de nivel de confianza para la DVA proporciona un criterio más conservador en la búsqueda de parametrizar la maniobra en condiciones particulares de usuarios colombianos. En la Gráfica 17 se muestran las curvas del cálculo de la DVA mediante regresión lineal y con nivel de confianza del 95%; de este modo, se podría establecer que el criterio para el cálculo de la DVA esté delimitado por procedimientos estadísticos que respalden un nivel de confianza adecuado y con esto garantizar la seguridad de los actores viales.



Gráfica 17. Comparativa de la DVA calculada mediante regresión línea vs DVA con NC = 95%

VII. La normatividad italiana propone la siguiente ecuación para el cálculo de la DVA:

$$DVA = 5.5 V_p \quad (19)$$

Donde: DVA: Distancia de visibilidad de adelantamiento en metro

V_p : velocidad de diseño

Si tomamos esta ecuación como referencia y dividimos la DVA y la V_a medidas en campo y tomamos el promedio de estos datos, obtenemos que:

$$DVA = 5.7 V_a \quad (20)$$

La constante es muy similar a la del manual italiano.

7 CONCLUSIONES

Sobre la metodología:

- ❖ La metodología demostró ser práctica, ágil y eficiente para la recolección y procesamiento de datos. El uso de filmaciones con drones para capturar maniobras de adelantamiento en condiciones reales de operación fue muy efectivo y permitió obtener información confiable sin alterar el comportamiento de los conductores. Esta metodología es fácilmente replicable en otros estudios.
- ❖ El uso de drones como herramienta de filmación facilitó la toma de datos, al ser equipos fáciles de transportar, que brindan seguridad al poder pilotarlos a distancia y entregan información de alta calidad. Su principal limitación fue la corta autonomía de vuelo, que obligaba a disponer de varias baterías, aumentando los costos.
- ❖ Las tomas aéreas ortogonales permitieron medir aceleraciones medias de los vehículos durante la maniobra. Aunque no se calculó en este estudio, esta información abre la posibilidad para estimar empíricamente otras variables como la distancia de percepción y reacción (D1). Se recomienda incorporar este análisis en futuras investigaciones.

Sobre el modelo estadístico:

- ❖ La prueba de AD permite evaluar si los datos muestrales se ajustan adecuadamente a una distribución teórica específica. En esta investigación, se planteó como hipótesis nula que los datos de distancia de adelantamiento

registrados seguían una distribución normal. Considerando un nivel de significancia del 5%, los resultados de la prueba AD arrojaron un valor estadístico de 0.232 y un valor p mayor a 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que, desde un punto de vista estadístico, no hay evidencia para afirmar que los datos difieren significativamente de una distribución normal. En consecuencia, se puede concluir que el supuesto de normalidad requerido por varias pruebas paramétricas se cumple razonablemente para este conjunto de datos según la prueba AD. Por ello, el uso de técnicas estadísticas que asumen dicho supuesto, como el ANOVA, resulta adecuado y sus resultados son válidos dentro del contexto de esta investigación. En síntesis, la prueba de AD aplicada brinda soporte estadístico para avalar el empleo de métodos paramétricos en el análisis de los datos de distancia de adelantamiento recabados en el estudio.

- ❖ Para determinar un tamaño de muestra (n) adecuado, se aplicó la fórmula para muestreo aleatorio simple en poblaciones infinitas, fijando un nivel de confianza del 99% y un error máximo permisible del 4% en las estimaciones. Según los resultados de esta fórmula, se estableció que el tamaño muestral mínimo requerido era de 197 observaciones. Finalmente, el estudio se llevó a cabo con una muestra de 199 casos, levemente superior al tamaño calculado. El hecho de haber fijado un nivel de confianza alto (99%) y un error máximo bastante bajo (4%), permitió determinar un valor de n que asegura precisión y representatividad de los resultados incluso al estimar parámetros de la población total. Así, la aplicación rigurosa de la técnica de muestreo probabilístico empleada y la selección de los parámetros correspondientes, condujeron a establecer un tamaño

de muestra apropiado, el cual resulta más que suficiente para los propósitos de la investigación, garantizando la posibilidad de generalizar las conclusiones con un margen de error mínimo.

- ❖ Por lo tanto, desde la perspectiva del muestreo, el tamaño seleccionado de 199 observaciones brinda total validez a los análisis efectuados y la capacidad de extrapolar los hallazgos del estudio a la población objetivo.
- ❖ El análisis de varianza ANOVA permite identificar qué variables independientes tienen un efecto estadísticamente significativo en la variable respuesta, en este caso la distancia de visibilidad de adelantamiento (DVA). Los resultados indican claramente que la velocidad del vehículo que adelanta (V_a), la velocidad del vehículo adelantado (V_o) y la longitud de entre tangencia (L_e) son factores altamente significativos, con valores p menores a 0.05. Por el contrario, otros parámetros geométricos como el radio de curvatura y la pendiente no mostraron una influencia estadísticamente significativa en la DVA, según el ANOVA aplicado. Estos hallazgos son relevantes porque sugieren que los modelos normativos actuales en Colombia podrían requerir ajustes, al menos para vías en terreno montañoso.
- ❖ Así, el análisis ANOVA permite concluir que la velocidad de operación del vehículo que adelanta y la longitud disponible de vía recta son determinantes a la hora que un conductor nacional decide efectuar o no la maniobra de sobrepaso

vehicular. Los resultados deberían motivar revisiones a la normativa vigente en cuanto a los parámetros más influyentes en la DVA

- ❖ En el análisis de D2 por la descripción de las trayectorias, se determinó mayor dispersión de datos en las trayectorias cuando las velocidades alcanzan hasta 70 km/h, esto debido a que el vehículo adelantado tiene variación de velocidad, en cambio, para velocidades mayores a 80 km/h la distancia D2 oscila entre 120 a 140 metros, y menor dispersión en su trayectoria.
- ❖ Este estudio se realizó bajo condiciones ideales de operación; es decir, se seleccionaron tramos sin obstáculos en el alineamiento horizontal y vertical, se eligieron horas valle, días soleados y calzada vehicular en buen estado.
- ❖ No se tomaron datos relacionados con la relación peso/potencia de los vehículos que conforman el parque automotor ni se definió un vehículo representativo para dicho parque. Además, no hubo una clasificación por tipo de conductor (edad, experiencia, etc.)
- ❖ Al examinar detenidamente las fórmulas y procedimientos inherentes a los niveles de confianza, se revela su capacidad para arrojar luz sobre la fiabilidad de nuestras inferencias estadísticas. Ya sea mediante la utilización de la distribución normal para muestras grandes o la distribución t de Student para muestras pequeñas, estos niveles nos permiten traducir la variabilidad inherente en datos muestrales en términos cuantificables de certeza. En la práctica, la comprensión de los niveles de confianza se traduce en la habilidad de los investigadores para proponer criterios acertados. La interpretación correcta de un intervalo de

confianza, respaldado por un nivel de confianza específico, impulsa la toma de decisiones informada y fomenta la transparencia en el proceso de investigación.

Sobre los resultados:

- ❖ Las mediciones realizadas en campo dan como resultados distancias de visibilidad de adelantamiento muy similares a las del MDGC. Por otro lado, las distancias propuestas por la norma de señalización resultan escasas y potencialmente riesgosas. Para mejorar la consistencia entre las prácticas reales y la regulación, se requiere recalibrar los criterios de cálculo de la visibilidad de sobrepaso. Las ecuaciones desarrolladas en este estudio, con parámetros ajustados al comportamiento nacional, constituyen un primer paso en esa dirección. Pero se necesita aún mayor investigación, que incorpore otras variantes geométricas y agregue muestras de mediciones en otros tipos de terreno y considere evaluar la significancia de variables que no fueron medidas en este estudio como por ejemplo la relación peso/potencia del parque automotor.
- ❖ Las trayectorias graficadas a partir de las tomas aéreas ortogonales permitieron visualizar el desarrollo espacial de la maniobra de adelantamiento durante la fase D2, que corresponde al recorrido del vehículo invadiendo el carril contrario. Se observa que la distancia D2 presenta una tendencia creciente en función de la velocidad de operación del vehículo que adelanta. Sin embargo, la dispersión es mayor en el rango entre 50 y 70 km/h, mientras que para velocidades superiores a 80 km/h existe menos variabilidad. Esto se puede explicar debido a que a mayor velocidad la influencia de la velocidad del vehículo adelantado es menor, porque

se ecualizan más rápido las velocidades durante la maniobra. En cambio, a velocidades más bajas subsiste durante más tiempo la diferencia de marchas. En síntesis, el estudio de las trayectorias medidas en terreno aporta interesantes perspectivas sobre el efecto de la velocidad relativa entre los vehículos que intervienen en el adelantamiento.

- ❖ El MDGC supone que el vehículo que adelanta viaja a una velocidad (V_a) de 15km/h por encima de la velocidad del vehículo que es adelantado (V_o), y esto se aplica para todos los casos; sin embargo, este supuesto parece cuestionable a la luz de la significancia demostrada de estas variables por separado; además, el valor promedio de la diferencia entre V_a y V_o (Delta V) que se obtuvo de las mediciones de campo fue de 21 km/h y el intervalo de confianza (IC) con un NC = 95% está entre 20 y 23 km/h.
- ❖ El conocimiento profundo de los niveles de confianza no solo fortalece la capacidad de los investigadores para expresar la certeza de sus hallazgos, sino que también proporciona una herramienta crítica para la evaluación de la validez y la solidez de los resultados obtenidos a partir de datos muestrales. Con el análisis para nivel de confianza del 95%, la gráfica que podría representar la mínima distancia que requieren los conductores colombianos para realizar la maniobra de adelantamiento de manera segura se aproxima a la propuesta por el MDGC (2008)

que a su vez fue tomada de la AASHTO (2004); sin embargo, el supuesto de considerar ΔV como una constante igual a 15km/h, parece no ser adecuada.

Finalmente, el trabajo desarrollado en esta investigación presenta una confiabilidad alta en cuanto a representar las condiciones generales de la población en las condiciones específicas en que fue considerado el modelo estadístico y la toma de datos, constituye un primer paso en dirección a mejorar el parámetro de DVA en el diseño geométrico de carreteras colombianas; es claro que, al ser una maniobra tan compleja y depender de distintas variables, tanto externas como el clima e internas como el tipo de conductor, es preciso ahondar en la investigación y cálculo de significancia para cada una de las variables que intervienen en dicha maniobra y con esto lograr, de ser necesario, una modificación normativa en aras de mejorar la seguridad de los conductores colombianos.

REFERENCIAS

- AASHTO (2004) *A policy on geometric design of highways and streets, 2004.*
- AASHTO (2018) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, American Association of State Highway and Transportation Officials.* Available at: www.transportation.org.
- Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) (2007) *Manual de Diseño Geométrico.*
- Agencia Nacional de Seguridad Vial ANSV (2023), *Observatorio - Estadísticas.* Histórico de víctimas, recuperado el 20 de noviembre de 2023. <https://www.ansv.gov.co>
- American Association of State Highway and Transportation Officials - AASTHO (2018) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 7th Edition.*
- Cirianni, F., Leonardi, G. and Palamara, R. (2016) ‘Overtaking sight distance on two-lane highways: Considerations and experimental verifications’, *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(18), pp. 9320–9326.
- Dirección General de Servicios Técnicos (2018) *Manual De Proyecto Geométrico De Carreteras 2018.*
- Flórez CF, Patiño C, Rodríguez JM, et al (2018). ‘Análisis multicausal de Accidentes de tránsito en dos ciudades de Colombia’ *Arch Med (Manizales)*, 2018. Doi: <https://doi.org/10.30554/archmed.18.1.2477.2018>.
- Glennon, J. C. (1988) ‘New and improved model of passing sight distance on two-lane highways’, *Transportation Research Record*, (1195), pp. 132–137.
- Harwood, D. W. et al. (2008) *Passing Sight Distance Criteria, Passing Sight Distance Criteria.* doi: 10.17226/23278.
- Harwood, D. W. and Glennon, J. C. (1989) ‘Passing sight distance design for passenger cars and trucks’, *Transportation Research Record*, 1(1208), pp. 59–69.

Hassan, Y., Easa, S. M. and Abd El Halim, A. O. (1996) 'Passing sight distance on two-lane highways: Review and revision', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(6 PART A), pp. 453–467. doi: 10.1016/0965-8564(95)00032-1.

Instituto Nacional de Medicina Legal Y Ciencias Forenses (2018) *Forensis*. Bogota.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2008) *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*, Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Instituto Nacional de Vías INVIAS (2008) 'Controles para el Diseño Geométrico', *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*, pp. 17–36.

INVIAS (2008) *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, Ciencia*. Available at: <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/inza/02-SubsistemaPolitico.pdf> %0Ahttps://www.iadb.org/es/acerca-del-bid/politica-de-desarrollo-rural%2C6229.html %0Ahttps://elpais.com/elpais/2016/08/26/ciencia/1472225923_727879.html %0Ahttps://www.redalyc.

Lieberman, E. B. (1981) 'Model for Calculating Safe Passing Distances on Two-Lane Rural Roads', pp. 70–76.

Llorca, C., Moreno, A. T. and Garcia, A. (2014) *Revisión de criterios de distancia de visibilidad de adelantamiento*.

Ministerio de Obras Públicas, D. de V. (2017) 'Manual De Carreteras - Instrucciones Y Criterios De Diseño', in *Manual de Carreteras*, p. 474.

Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones (2011) 'Manual de Carreteras del Paraguay', p. 388.

Ministerio de Transporte (2015) 'Manual De Señalización Vial Dispositivos Uniformes Para La Regulación De Tránsito En Calles, Carretras Y Ciclorrutas De Colombia', *Journal of*

Physics A: Mathematical and Theoretical, 44(8), p. 085201. Available at:

<http://arxiv.org/abs/1011.1669><http://dx.doi.org/10.1088/1751->

<http://stacks.iop.org/1751->

[8121/44/i=8/a=085201?key=crossref.abc74c979a75846b3de48a5587bf708f](http://stacks.iop.org/1751-8121/44/i=8/a=085201?key=crossref.abc74c979a75846b3de48a5587bf708f).

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018) *Manual de Diseño de Carreteras*.

MTOP (2003) 'Normas de Diseño Geométrico de Carreteras', *Mtop*, 2, pp. 1–475.

Available at: https://sjnavarro.files.wordpress.com/2011/08/manual-dedisecc3b1o-de-carretera_2003-ecuador.pdf.

Officials, A. A. of S. H. and T. (2011) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*.

Pineda, B. (2011a) 'Carreteras De Dos Carriles En Colombia', *Revista Politecnica*, 7, pp. 22–30.

Pineda, B. (2011b) 'Importancia de la maniobra de adelantamiento en carreteras de dos carriles', *Revista Politécnica ISSN*, 7, pp. 22–30.

Pineda, B. E. (2019) 'Aplicación de la distancia de visibilidad de adelantamiento en carreteras de dos carriles en Colombia', *Ingeniería y Desarrollo*, 37, p. 32.

Radelat, G. (2003) 'Principios de Ingeniería de Tránsito'. Washington DC: Instituto de ingeniero de transporte, p. 306.

Rivas, N. and Arboleda, C. (2005) 'Conferencias ingeniería de tránsito', *Universidad del Cauca*, 1.

Rosas, A (2015) 'Clasificación del terreno según la geometría de la vía', *Universidad del Cauca*,

Salud, O. M. de la (2015) 'Informe Sobre La Situación Mundial De La Seguridad Vial

2015’, *Informe Sobre La Situación Mundial De La Seguridad Vial 2015*, pp. 1–12. Available at: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/es/.

Salud, O. M. de la (2021) ‘*Plan Mundial Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2021 - 2030*’, <http://www.who.int/es/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>.

Sanchez Ordoñez José Fernando (2011) ‘Metodología Para La Evaluación De La Consistencia Del Trazado De Carreteras Interurbanas De Dos Carriles’, p. 319.

Valencia, V. (2016) ‘ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA FACILITAR EL ADELANTAMIENTO EN CARRETERAS CONVENCIONALES APLICANDO SIMULACIÓN’, *Universidad Politecnica de valencia*, 1, pp. 123–130.

Valkenburg, V. and Michael, H. . (1971) ‘CRITERIA FOR NO-PASSING ZONES’.

Wang, Y. and Cartmell, M. P. (1998) ‘New Model for Passing Sight Distance on Two-Lane Highways’, *Transportation Engineering*, p. 11.

Weaver, G. D. and Glennon, J. C. (1972) ‘Design and striping for safe passing operations’, pp. 36–39.

Doelp, A.J. (1990). Requirements for safe overtaking on two-lane rural roads. *Transportation Research Record*, 1287, 58-66.

Smith, J.D. (1998). Visibility Requirements in Highway Design and Traffic Operations. *Journal of Transportation Engineering*, 124(6), 513-518.

Viano, D.C., McCarthy, J. (1999). Speed kills in Indy car racing: Analysis and proposals. *SAE Technical Paper Series*, 1999-01-0712.