



FACULTAD DE INGENIERÍA  
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Incidencia de la Distancia de Visibilidad sobre la  
Accidentalidad en Carreteras

Presentado Por:  
Julián David Chala Gómez  
Mauro Alejandro Vega Parra

Director:  
Carlos Fabián Flórez Valero

Bogotá D.C. Abril de 2014

## Aprobación

El Trabajo de grado con título “Incidencia de la Distancia de Visibilidad sobre la Accidentalidad en Carreteras”, desarrollado por los estudiantes Julián David Chala Gómez y Mauro Alejandro Vega Parra, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

---

Calor Fabián Flórez Valero  
Director

---

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda  
Jurado 1

---

Carlos Felipe Urazán Bonells  
Jurado 2

**Incidencia de la Distancia de Visibilidad sobre la  
Accidentalidad en Carreteras**

**Julián David Chala Gómez  
Mauro Alejandro Vega Parra**

*La Pontificia Universidad Javeriana no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.*

## **Agradecimientos**

Expresamos nuestros agradecimientos en primer lugar a Dios por llenarnos de paciencia y sabiduría en todo este proceso y permitirnos alcanzar con éxito este nuevo logro académico.

Agradecemos especialmente a nuestras familias, por el apoyo incondicional, por encontrarse a nuestro lado cada momento y por su gran esfuerzo y comprensión para que culmináramos con éxito esta etapa de nuestras vidas.

Agradecemos al Ingeniero Carlos Fabián Flórez director y guía del presente proyecto de investigación. A la firma de consultoría Ingetec S.A. y especialmente al Ingeniero Edgar Iván Dussan, quien nos suministró la información topográfica, orto-fotografías y cartografía de la vía objeto de estudio, así mismo quisiéramos agradecer al Ingeniero José Ramón Fernández representante para Colombia de ISTRAM, quien nos brindó su colaboración para la determinación de la distancia de visibilidad en tres dimensiones mediante la herramienta ISPOL®.

## **Dedicatoria**

Este trabajo de grado está dedicado a nuestras familias por el apoyo incondicional en cada una de las etapas de nuestra investigación, por no dejarnos desfallecer e impulsarnos con su amor y comprensión hacia el camino del éxito.

Los Autores

Con gran orgullo dedico este trabajo de grado a mi hija Sara Juliana, quien llega a mi vida justo en el instante en que concluye esta investigación, proporcionándome así el último impulso y motivación para culminar con éxito esta etapa de mi vida, y a mi esposa Alejandra, con quien emprendo el nuevo camino de ser excelentes padres.

Julián David Chala Gómez

A Dios por ser mi guía, a mi madre y abuelas Amelia y Ana por su apoyo incondicional, paciencia y valiosos consejos. A mis hermanos y sobrinas para quienes siempre quiero ser un ejemplo y especialmente dedico este trabajo a mi padre Mauro Vega Mesa Q.E.P.D.

Mauro Alejandro Vega Parra

## Resumen

Diferentes estudios han sido desarrollados con el fin de cuantificar la influencia de la distancia de visibilidad sobre la accidentalidad en carreteras mediante técnicas tanto deterministas como probabilísticas. Sin embargo, los estudios realizados han empleado en sus análisis distancias de visibilidad en dos dimensiones (2D) y velocidades de operación obtenidas mediante modelos de predicción. En este proyecto de investigación se presenta un estudio de confiabilidad en el cual se evalúa la influencia de la variabilidad de la distancia de visibilidad de parada, a través de la probabilidad de no cumplimiento ( $P_{nc}$ ), sobre la accidentalidad en carreteras por medio de funciones de desempeño de seguridad (Spfs). Para ello se utilizaron el diseño geométrico existente de una carretera sencilla bidireccional perteneciente a la red primaria nacional, el modelo digital de elevación (MDE), las velocidades de operación medidas en campo, el tránsito promedio diario anual (TPDa) y las bases de accidentalidad de los últimos seis (6) años. Para el análisis de confiabilidad se definió la función de estado límite en términos de la distancia de visibilidad disponible en tres dimensiones (3D) (oferta), y la distancia de visibilidad de parada (demanda). El cálculo de la  $P_{nc}$  se llevó a cabo usando las técnicas de simulación de Estimativos Puntuales, Monte Carlo y el método de Primer Orden Segundo Momento (FOSM). Una vez calculada la probabilidad de no cumplimiento, se estableció un modelo de predicción de accidentes que relaciona la longitud del segmento, el volumen vehicular TPDa y la  $P_{nc}$  con el número de accidentes ocurridos para el periodo de seis (6) años, los resultados del análisis muestran que bajo las condiciones de visibilidad y operación del corredor, cerca del 26% de las curvas cumplirían con la distancia de visibilidad de parada requerida, así mismo se concluye que las Spfs empleadas presentan una relación estadística positiva entre la  $P_{nc}$  y el número de accidentes.

## Abstract

Different studies have been developed in order to quantify the influence of sight distance on road accident by using deterministic and probabilistic techniques. However, said studies employed in their analyses sight distances in two dimensions (2D) and operating speeds obtained by prediction models. This research project presents a reliability study, in which the effect of stopping sight distance variability on road accident occurrence, evaluated through Safety Performance Functions (SPFs) that incorporate Probability of non-compliance (Pnc). For this purpose the following were used: the geometric design of an existing simple two-way road belonging to a national primary road-network, the Digital Elevation Model (DEM), the operating speeds measured in the field, the Annual Average Daily Traffic (AADT), and accident records during the previous six (6) years were used. For the reliability analysis the limit state function was defined in terms of sight distance available in three dimensions (3D) (supply), and stopping sight distances (demand). The Pnc calculation was performed using the Point Estimate Method, Monte Carlo Simulation method, and First Order Second Moment Method (FOSM). After calculating the non-compliance probability, it was established an accident prediction model relating the length of the segment, the Annual Average Daily Traffic (AADT), and the Pnc with the number of accidents registered during the aforementioned six-year period. The analysis results show that, under the corridor's sight and operation conditions, about 26% of the curves would comply with stopping sight distances; it is also concluded that the SPFs employed provided a better fit between Pnc and the number of accidents.

# Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
1 Introducción .....	1
1.1 Síntesis.....	3
2 Estado del Conocimiento .....	5
2.1 Elementos de diseño geométrico.....	5
2.1.1 Velocidad .....	5
2.1.2 Distancia de visibilidad de parada.....	8
2.1.3 Diseño geométrico de curvas horizontales.....	12
2.1.4 Diseño geométrico de curvas verticales.....	13
2.2 Teoría de la confiabilidad.....	16
2.2.1 Métodos de análisis de confiabilidad.....	20
2.2.2 Análisis de confiabilidad en el diseño vial.....	24
2.3 Funciones de desempeño de seguridad.....	28
3 Marco Metodológico .....	33
3.1 Generalidades de la vía de estudio .....	34
3.2 Datos de entrada.....	34
3.2.1 Modelo digital de elevación (MDE) .....	35
3.2.2 Restitución de la geometría de la vía.....	36
3.2.3 Estudio de velocidad .....	37
3.2.4 Bases de accidentalidad.....	43
3.2.5 Transito .....	45
3.3 Análisis de confiabilidad.....	47
3.3.1 Función de estado limite .....	47
3.3.2 Distancia de visibilidad disponible 3D .....	48
3.3.3 Distribución de los datos .....	49
3.4 Función de desempeño de seguridad.....	51
4 Resultados y discusión.....	54
4.1 Probabilidad de no cumplimiento.....	54

4.2 Funciones de desempeño de seguridad.....	62
5 Conclusiones y recomendaciones .....	66
6 Bibliografía.....	70
Anexo A. Geometría de la Vía Objeto de Estudio .....	77
Anexo B. Estudio de Velocidades .....	78
Anexo C. Medidas de Ajuste de la Prueba Kolmogorov Smirnov.....	79
Anexo D. Rutinas Matlab.....	80
Anexo E. Velocidades Modelos de Predicción .....	81

## Lista de Tablas

Pág.

Tabla 2.1. Modelos de predicción de velocidad en el mundo .....	6
Tabla 2.2. Modelos de predicción de velocidad en Colombia.....	7
Tabla 2.3. Elementos del tiempo de percepción reacción.....	9
Tabla 2.4. Tiempo de percepción reacción .....	9
Tabla 2.5. Tiempo de percepción reacción en relación al estado de conciencia.....	10
Tabla 2.6. Constante equivalente de desaceleración para un objeto inesperado.....	11
Tabla 2.7. Constante equivalente de desaceleración para un objeto esperado.....	11
Tabla 2.8. Coeficientes de fricción lateral máximos.....	12
Tabla 2.9. Altura del obstáculo y del ojo del conductor.....	16
Tabla 3.1. Datos estadísticos MDE.....	36
Tabla 3.2. Datos estadísticos geometría horizontal .....	36
Tabla 3.3. Datos estadísticos geometría vertical .....	37
Tabla 3.4. Valores de z para varios niveles de confianza.....	38
Tabla 3.5. Desviaciones estándares de velocidades puntuales.....	38
Tabla 3.6. Características radar Falcon HR.....	41
Tabla 3.7. Medidas estadísticas curva número uno .....	42
Tabla 3.8. Transito promedio diario anual.....	47
Tabla 3.9. Funciones de distribución de probabilidad de las variables aleatorias .....	51
Tabla 4.1. Parámetros de la función de desempeño de seguridad.....	62
Tabla 4.2. Pruebas de bondad de ajuste de los modelos de predicción .....	63

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2.1. Curva vertical convexa .....	13
Figura 2.2. Curva vertical cóncava .....	13
Figura 2.3. Estado limite en un modelo de análisis por confiabilidad .....	17
Figura 2.4. Índice de confiabilidad .....	18
Figura 2.5. Margen de seguridad .....	19
Figura 2.6. Probabilidad de no cumplimiento .....	20
Figura 2.7. Relación de la probabilidad de no cumplimiento y el índice de confiabilidad ..	20
Figura 2.8. Métodos de simulación .....	21
Figura 2.9. Diferencia entre los métodos FORM y SORM .....	23
Figura 2.10. Diferencia entre la distancia de visibilidad disponible en 2D y 3D .....	26
Figura 3.1. Desarrollo metodológico .....	33
Figura 3.2. Localización general de la vía de estudio .....	34
Figura 3.3. Modelo digital de elevación .....	35
Figura 3.4. Restitución geometría horizontal .....	36
Figura 3.5. Restitución geometría vertical .....	37
Figura 3.6. Angulo de incidencia .....	39
Figura 3.7. Fotografía de la curva de la abscisa K7+550 .....	40
Figura 3.8. Fotografía de la curva de la abscisa K44+700 .....	40
Figura 3.9. Formato de campo velocidad puntual .....	41
Figura 3.10. Identificación de los datos atípicos curva uno .....	42
Figura 3.11. Formato para el registro de accidentes .....	43
Figura 3.12. Velocidades de operación .....	44
Figura 3.13. Distribución del número de accidentes .....	45
Figura 3.14. Número de accidentes por curva .....	46
Figura 3.15. Transito promedio diario anual .....	47
Figura 3.16. Zonas con problemas de visibilidad (a) .....	49
Figura 3.17. Zonas con problemas de visibilidad (b) .....	49
Figura 3.18. Análisis por confiabilidad con variables deterministas .....	50
Figura 3.19. Prueba de Kolmogorov Smirnov curva número uno .....	50
Figura 3.20. Variación de la Pnc Vs velocidad de operación .....	52
Figura 3.21. Variación de los accidentes Vs velocidad de operación .....	52
Figura 4.1. Probabilidad de no cumplimiento vs número de simulaciones .....	54
Figura 4.2. Probabilidad de no cumplimiento sentido de avance .....	55
Figura 4.3. Probabilidad de no cumplimiento sentido inverso .....	56
Figura 4.4. Pnc para cada curva en cada sentido de circulación .....	57

Figura 4.5. Margen de seguridad sentido de avance.....	58
Figura 4.6. Margen de seguridad sentido inverso .....	58
Figura 4.7. Distancia de visibilidad disponible 2D vs 3D .....	59
Figura 4.8. Técnicas de estimación de velocidad de operación .....	60
Figura 4.9. Criterio de consistencia I, (Lamm et al., 1998) .....	61
Figura 4.10. Relación entre los accidentes esperados y la Pnc.....	63
Figura 4.11. Residuales de Pearson - modelo de predicción para el total de accidentes.....	64
Figura 4.12. Residuales de Pearson - modelo de predicción para solo daños.....	65
Figura 4.13. Residuales de Pearson - modelo de predicción para muertos y heridos.....	65

# 1 Introducción

El diseño geométrico de vías, como práctica de la ingeniería, ha empleado un enfoque de tipo restrictivo y determinista (Echaveguren, Vargas-Tejeda, Altamira, & Riveros, 2009), basado en el cumplimiento o no de un conjunto de parámetros, que están en función de la velocidad específica de cada elemento geométrico que constituye la vía. Paralelamente, los parámetros de diseño poseen un nivel de incertidumbre durante su etapa de operación que constituye un problema probabilístico, mas no determinista como lo establecen las actuales especificaciones y guías de diseño geométrico en Colombia y en el mundo.

Por otro lado, las especificaciones técnicas vigentes contenidas en los diferentes manuales de diseño geométrico de carreteras, se establecen a partir de parámetros evaluables en una o dos dimensiones. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la carretera está constituida espacialmente por el trazado de sus ejes en planta, perfil y su sección transversal, definiendo así una configuración tridimensional que interactúa con los usuarios y determina las condiciones de operación de la vía. Adicionalmente, de acuerdo con resultados obtenidos en estudios de visibilidad en dos y tres dimensiones (Hassan, Gibreel, & Easa, 2000), la variación de las distancias de visibilidad disponible puede ser considerable a tal punto que se puede subestimar o sobre estimar en el diseño, por lo que se hace necesario realizar un análisis tridimensional (Gibreel, Easa, Hassan, & El-Dimeery, 1999), que permita relacionar los criterios de consistencia con las distancias de visibilidad requeridas y disponibles.

Algunos autores, (Glennon, Harwood, Free, & Gray, 1978; Lamm, Hayward, & Cargin, 1986; McLean, 1981), entre otros, introdujeron un nuevo concepto y una nueva filosofía al de diseño geométrico de carreteras, denominado consistencia en el diseño, enfatizando en la necesidad de evitar diseños restrictivos, y proponiendo un diseño y una evaluación integral de la carretera. Algunas de las variables que se contemplan para evaluar la consistencia en el diseño son: la velocidad, la aceleración, la fricción y las distancias de visibilidad. Un diseño inconsistente se traduce en una escasa relación entre los componentes del modelo tridimensional de la vía, que va en contra de las expectativas del conductor, reduciendo así las distancias mínimas de visibilidad que le permiten circular y maniobrar de forma segura, o induciéndolo incluso a ajustar su velocidad de forma errónea, lo cual aumenta el riesgo de accidentes.

Los criterios para la evaluación de la consistencia en diseño vial más utilizados se basan en el análisis de las velocidades de operación y su variación entre los elementos de la carretera (Gibreel et al., 1999), los diferentes tipos de vehículos y los conductores que circulan en un tramo específico. No obstante, existen otros criterios que tienen en cuenta a su vez parámetros como la estabilidad dinámica (Lamm, Choueri, & Mailaender, 1991), el grado de curvatura e índices de alineamientos (Lamm, Choueiri, Hayward, & Paluri, 1988), la carga mental de los conductores (Messer, 1980) y la tasa media de accidentes (Wilson, 1968). A pesar del grado de aceptación que han tenido este tipo de criterios de consistencia dentro del área de la ingeniería de carreteras, vale la pena resaltar que los planteamientos presentados constituyen parámetros evaluables en una o dos dimensiones, por lo que se ratifica la necesidad de realizar análisis en tres dimensiones.

Dado que la visibilidad en las carreteras constituye un factor de seguridad (Olson, Cleveland, Fancher, Kostyniuk, & Schneider, 1984), se hace necesario establecer la relación entre la probabilidad de no tener la visibilidad mínima y la ocurrencia de accidentes. En este sentido, muchos han sido los estudios realizados cuya finalidad ha sido encontrar dicha relación. Silyanov, (1973); Sparks, (1968) y Urbanik, Hinshaw, & Fambro, (1989) coincidieron en la existencia de una relación decreciente entre la distancia de visibilidad de parada y la tasa de accidentes. Babkov, (1975) encontró que la existencia de una distancia de visibilidad limitada fue la causa principal del 8% al 10% de los accidentes en la antigua Unión Soviética. Olson et al., (1984), concluyeron que en las curvas cuya distancia de visibilidad es limitada, el porcentaje de accidentes es de aproximadamente 60% del total de accidentes. Sin embargo, Fambro, Fitzpatrick, & Koppa, (1997) concluyeron que no existe una relación significativa entre la distancia de visibilidad y la tasa de accidentes.

Teniendo en cuenta que los principales componentes del tránsito son los usuarios, los vehículos y la infraestructura, siendo esta última la encargada de garantizar la seguridad, y además, enfatizando en el objetivo principal de un diseño geométrico que es proporcionar condiciones de comodidad y seguridad al usuario, se crea la necesidad de evaluar la confiabilidad y seguridad de un diseño geométrico en función de la distancia de visibilidad y la probabilidad de ocurrencia de accidentes dentro de un tramo de carretera.

Adicionalmente, es necesario resaltar que los accidentes son eventos complejos que involucran gran variedad de factores como la geometría de la vía, el comportamiento de los conductores, el ambiente, las velocidades de operación, el tipo de vehículo, factores institucionales y humanos, entre otros, cuya incertidumbre establece el problema en términos probabilísticos.

Entendiendo lo anterior el presente proyecto de investigación pretende evaluar la incidencia de la variabilidad de las distancia de visibilidad de parada sobre la accidentalidad en carreteras, a partir de un análisis de confiabilidad en términos de distancias de visibilidad. Para lo anterior se requiere por un lado determinar las distancias de visibilidad disponibles a lo largo de un corredor de estudio y su función de distribución de probabilidad y por otro calcular las distancias de visibilidad requeridas de acuerdo con las especificaciones locales vigentes. Estas dos variables constituyen la función de estado límite, la cual permite calcular la probabilidad de no cumplimiento por medio de diferentes técnicas de simulación. Finalmente los resultados obtenidos del estudio de confiabilidad se contrastan con los registros de accidentalidad suministrados por el Ministerio de Transporte, de tal forma que se pueda evaluar los efectos de la variabilidad de la visibilidad sobre la seguridad vial, a partir de funciones de desempeño que relacionen el margen de seguridad con las tasas de accidentalidad.

## **1.1 Síntesis**

En el Capítulo 2 se evidencia la motivación y el marco conceptual del proyecto de investigación. Se presentan algunos de los parámetros que intervienen dentro del diseño geométrico de carreteras que son relevantes para el estudio, así mismo se conceptualiza acerca de la teoría de la confiabilidad, los métodos existentes para su análisis y su aplicación dentro del diseño geométrico de vías. De la misma manera se presentan los conceptos que comprenden las funciones de desempeño de seguridad (Spfs) y los antecedentes de estas en las carreteras.

El Capítulo 3 se presenta el diseño metodológico empleado para el desarrollo de la investigación dentro del cual se encuentra la descripción de cada uno de los datos de entrada, empleados para la determinación de las distancias de visibilidad en tres dimensiones (3D) y las distancia de visibilidad requerida.

Así mismo se presenta la función de estado límite y los métodos de análisis de confiabilidad para su evaluación y por último se relaciona el modelo general de las funciones de desempeño de seguridad (Spfs) a emplear dentro de la investigación.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos tanto del análisis de confiabilidad como de las funciones de desempeño de seguridad establecidas y se discuten los resultados por medio de una amplia revisión bibliográfica. Por último el Capítulo 5 contiene las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## **2 Estado del Conocimiento**

### **2.1 Elementos de diseño geométrico**

Los elementos que constituyen el diseño geométrico de cualquier tipo de carretera son el alineamiento horizontal (planta), el alineamiento vertical (perfil) y la sección transversal. Tradicionalmente las guías de diseño a nivel mundial definen los parámetros de cada uno de estos elementos en función de la velocidad de diseño, en el presente capítulo se conceptualizara sobre algunos de los parámetros que constituyen o intervienen dentro del diseño geométrico de una carretera y que son relevantes para el desarrollo del presente estudio.

#### **2.1.1 Velocidad**

##### **2.1.1.1 Velocidad de diseño**

El diseño geométrico de carreteras se basa en la definición de velocidad de diseño (Vd), la cual se asigna para un determinado proyecto de acuerdo con el tipo de carretera y las características topográficas de la zona donde se construirá. Tradicionalmente esta velocidad se encuentra entre el percentil 95 y el 98, que corresponden dentro de una función de distribución de probabilidad normal a la media más dos veces la desviación estándar (Layton & Dixon, 2012). La velocidad de diseño se considera como la máxima velocidad posible a la cual se desplazara un determinado conductor dentro de la carretera en condiciones seguras.

Alrededor de esta velocidad se encuentran definidos los parámetros mínimos que dimensionan la carretera, como el radio de curvatura, las distancias de visibilidad, la longitud de la curva vertical, el ancho de carril entre otros. Sin embargo, algunos autores no encuentran lógico este tipo de enfoque ya que el diseño geométrico no corresponde a un problema de tipo determinístico sino probabilístico (Echaveguren et al., 2009; Ibrahim & Sayed, 2011; Lamm, Psarianos, & Mailaender, 1999; Layton & Dixon, 2012), por tanto existirán valores mínimos y máximos para dichos parámetros.

### 2.1.1.2 Velocidad específica

En el medio Colombiano y Latinoamericano, se introdujo este nuevo concepto de velocidad y se debe principalmente al comportamiento de los conductores, y es función principalmente de las oportunidades y restricciones que otorga el trazado de la vía, el tráfico, las condiciones medioambientales, las señales de tránsito y el tipo de vehículo y según el Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, 2008, se considera como “*la velocidad máxima más probable con que sería abordado cada elemento geométrico*” (INVÍAS, 2008, p. 39), por ende es la velocidad con la cual se debe diseñar el elemento. La asignación de la velocidad específica a un elemento determinado tanto en planta como en perfil dependerá de la velocidad de diseño y de la geometría del elemento inmediatamente anterior y no podrá superar la velocidad de diseño en más de 20 Km/h.

### 2.1.1.3 Velocidad de operación

La velocidad de operación según American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004, se define como “*la velocidad que se mide cuando los vehículos transitan en condiciones de libre flujo*” (AASHTO, 2004, p. 67), y es equivalente al percentil 85, que corresponde dentro una función de distribución Normal a la media más una desviación estándar (Layton & Dixon, 2012). La determinación de la velocidad de operación se realiza por medio de estudios de velocidad o por medio de modelos de predicción de velocidad elaborados para cada país o región. La definición de estos modelos se realiza a partir de mediciones de velocidad en zonas con ciertas combinaciones geométricas, las cuales son definidas por el investigador; en Colombia el Fondo de Prevención Vial & la Universidad del Cauca, (2009), realizaron un estudio por medio del cual generaron algunos modelos de predicción de velocidades aplicables al medio Colombiano partiendo de modelos ya elaborados a nivel mundial por diferentes autores, en la Tabla 2.1 y la Tabla 2.2, se presenta el resumen de los modelos a nivel mundial y en Colombia respectivamente.

**Tabla 2.1. Modelos de predicción de velocidad en el mundo**

Modelo	Fuente
$V_{85} = 94,398 - \frac{3188,656}{R}$	Lamm et al., (1988)

Modelo	Fuente
$V_{85} = 95,594 - 1,597 \times Dc, Dc = 1746,38$	Lamm et al., (1988)
$V_{85} = e^{(4,561 - 0,0058 \times D)}, D = \frac{5729,58}{R}$	Morrall and Talarico (1994)
$V_{85} = 102,45 - 0,0037 \times Lc - \frac{8995 + 5,73 \times Lc}{R}$	TAC (1999)
$V_{85} = 103,66 - 1,95 \times Dc$	Ottensen and Krammes (2000)
$V_{85} = 102,44 - 1,57 \times Dc + 0,012 \times Lc - 0,01 \times Dc \times Lc$	Ottensen and Krammes (2000)
$V_{85} = \frac{129,88 - 623,10}{R^{1/2}}$	Kanellaidis et al., (1990)
$V_{85} = 95,41 - 1,48 \times Dc - 0,012 \times Dc^2$	Islam and Seneviratne (1994)
$V_{85} = 103,03 - 2,41 \times Dc - 0,029 \times Dc^2$	Islam and Seneviratne (1994)
$V_{85} = 120,16 - \frac{5596,72}{R}$	Castro et al., (2008)

Fuente: Citado por (Ibrahim, 2011)

**Tabla 2.2. Modelos de predicción de velocidad en Colombia**

Combinación Geométrica	Modelo	Fuente
Curva horizontal sobre pendiente $-9\% \leq -4\%$	$V_{85} = 35,43 + 0,219 \times R$	Colombia
Curva horizontal sobre pendiente $-4\% \leq 0\%$	$V_{85} = 105,98 - \frac{3709,90}{R}$	Fitzpatrick et al., (2000)
Curva horizontal sobre pendiente $0\% \leq 4\%$	$V_{85} = 94,39 - \frac{3188,66}{R}$	Lamm et al., (1988)
Curva horizontal sobre pendiente $4\% \leq 49\%$	$V_{85} = 37,18 + 0,1 \times R + 0,04 \times R_{n-1}$	Colombia
Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	$V_{85} = 102,70 - \frac{730,39}{R} - \frac{1498,90}{L_H}$	Colombia
Curva horizontal combinada con curva vertical convexa	$V_{85} = 93,79 - \frac{867,61}{R} - \frac{935,62}{L_H}$	Colombia
Curva vertical cóncava sobre recta	$V_{85} = V_{85}$	Colombia

Combinación Geométrica	Modelo	Fuente
Curva vertical convexa SLDV sobre recta	$V_{85}=V_{85}$	Colombia
Curva vertical convexa CLDV sobre recta	$V_{85}=105,08 - \frac{149,69}{K}$	Fitzpatrick et al., (2000)

Fuente: Citado por (Fondo de Prevención Vial & Universidad del Cauca, 2009)

Donde  $V_{85}$  es la velocidad de operación en Km/h,  $R$  es el radio de la curva horizontal en metros,  $R_{n-1}$  es el radio de la curva horizontal anterior en metros,  $K$  es la variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje (m/%), *SLDV* sin distancia de visibilidad y *CLDV* con distancia de visibilidad.

### 2.1.2 Distancia de visibilidad de parada

La distancia de visibilidad de parada fue definida por Olson et al., (1984) como criterio básico de seguridad vial, y según el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS 2008, se considera como “*la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo pueda detenerlo antes de llegar a un obstáculo que aparezca en su trayectoria al circular a la velocidad específica del elemento en el cual se quiera verificar*” (INVIAS, 2008, p. 58). Esta distancia corresponde a la suma de dos longitudes, la primera es la distancia definida por el tiempo de percepción y reacción del conductor al observar un obstáculo en la vía y la segunda es la distancia recorrida durante el frenado, la cual es medida desde la aplicación de los frenos hasta cuando el vehículo se detiene totalmente. Existen dos modelos matemáticos que definen la distancia de visibilidad, el primero se basa en la fricción pavimento-neumático y el segundo, Ecuación (2.1), se fundamenta en la tasa de desaceleración del vehículo; este último fue adoptado por la normatividad Colombiana.

$$DVP = 0,278 \times Ve \times t + 0,039 \times \frac{Ve^2}{a} \quad (2.1)$$

Donde:

Ve: Velocidad específica del elemento (Km/h)

t: Tiempo de percepción reacción (s)

a: Tasa de desaceleración (m/s<sup>2</sup>)

DVP: Distancia de visibilidad de parada (m)

La ecuación anteriormente presentada, aplica únicamente a segmentos planos con pendientes iguales a 0%, para pendientes diferentes de 0% se debe modificar la Ecuación (2.1), quedando de la siguiente manera:

$$DVP = 0,278 \times Ve \times t + \frac{Ve^2}{254 \times \left( \frac{a}{g} \pm \frac{m}{100} \right)} \quad (2.2)$$

Donde:

- g: Es la constante gravitacional (m/s<sup>2</sup>)
- m: Pendiente longitudinal (%)
- t: Tiempo de percepción reacción (s)

#### 2.1.2.1 Tiempo de percepción reacción

El tiempo de percepción reacción está constituido por cuatro elementos, en la Tabla 2.3, se describe cada uno de ellos.

**Tabla 2.3. Elementos del tiempo de percepción reacción**

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
Percepción	Tiempo para ver el objeto
Razonamiento	Tiempo para entender las implicaciones que trae la presencia del objeto
Decisión	Tiempo para la toma de la decisión
Ejecución	Tiempo para iniciar la acción a ejecutar

Fuente: (Layton & Dixon, 2012)

El tiempo de percepción reacción utilizado para el cálculo de la distancia de visibilidad de parada en Colombia y en Estados Unidos es de 2,5 segundos y representa a un conductor que es lento para reaccionar dadas las condiciones cambiantes de la carretera. En la Tabla 2.4, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de diferentes estudios que se realizaron para la determinación del tiempo de percepción reacción.

**Tabla 2.4. Tiempo de percepción reacción**

<b>Autor</b>	<b>Percentil 85 (s)</b>	<b>Percentil 95 (s)</b>
Gazis et al.	1,48	1,75
Wortman et al.	1,80	2,35

<b>Autor</b>	<b>Percentil 85 (s)</b>	<b>Percentil 95 (s)</b>
Chang et al.	1,90	2,50
Sivak et al.	1,78	2,40

Fuente: (Layton & Dixon, 2012)

Así mismo, El Khoury, (2005) plantea dos situaciones de respuesta de los conductores. En la primera el conductor es sorprendido ante una situación inesperada en la que se ve forzado a frenar, mientras que en una situación contraria, el conductor es consciente que puede producirse un evento que lo obligue a frenar y por lo tanto permanece alerta. La Tabla 2.5 presenta los resultados obtenidos para las dos situaciones descritas anteriormente.

**Tabla 2.5. Tiempo de percepción reacción en relación al estado de conciencia**

<b>Medida</b>	<b>Inesperado</b>	<b>Esperado</b>
Media (s)	1,31	0,54
Desviación (s)	0,61	0,10
50 percentil (s)	1,18	0,53
85 percentil (s)	1,87	0,64
95 percentil (s)	2,45	0,72
99 percentil (s)	3,31	0,82

Fuente: (El Khoury, 2005)

#### 2.1.2.2 Tasa de desaceleración

La tasa de desaceleración es una de las variables más complejas que conforma el modelo matemático actual de la distancia de visibilidad de parada, ya que depende de múltiples factores tales como factores humanos, la fricción pavimento-neumático, el tipo de vehículo, las condiciones medioambientales, entre otros.

Fambro et al., (1997), realizaron una investigación, en el marco del programa nacional de cooperación para la investigación en carreteras de los Estados Unidos, el cual buscaba identificar y corroborar algunas de las constantes adoptadas en guías de diseño anteriores elaboradas por la AASHTO.

Los experimentos realizados para determinar la constante de desaceleración aplicable al modelo, se basaron en la selección de diferentes tipos de vehículos, con distintos sistemas de frenos sobre condiciones de pavimento tanto húmedo como seco, así mismo la presencia del objeto sobre la trayectoria del vehículo se varió con el fin de establecer la diferencia entre la reacción de un conductor que conoce de la presencia del objeto previamente y otro que es sorprendido por este, en la Tabla 2.6 y la Tabla 2.7, se presentan los resultados obtenidos para cada una de estas situaciones.

**Tabla 2.6. Constante equivalente de desaceleración para un objeto inesperado**

Medida	Constante Equivalente de Desaceleración (g <sup>**</sup> )		
	Estudio 2 (ABS)	Estudio 2 (Sin ABS)	Estudio 3 (Sin ABS)
Media	0,63	0,62	0,55
Percentil 75	0,50	0,49	0,43
Percentil 90	0,42	0,42	0,37
Percentil 95	0,38	0,38	0,32
Percentil 99	0,28	0,29	0,24
AASHTO	0,30	0,30	0,30

**Tabla 2.7. Constante equivalente de desaceleración para un objeto esperado**

Medida	Constante Equivalente de Desaceleración (g <sup>**</sup> )		
	Estudio 2 (ABS)	Estudio 2 (Sin ABS)	Estudio 3 (Sin ABS)
Media	0,55	0,49	0,45
Percentil 75	0,46	0,44	0,36
Percentil 90	0,40	0,41	0,31
Percentil 95	0,37	0,39	0,27
Percentil 99	0,30	0,35	0,21
AASHTO	0,30	0,30	0,30

Fuente: (Fambro et al., 1997)

\* El coeficiente de fricción asumido para la condición de pavimento húmeda fue para una velocidad de 55 mph

\*\* (g) Equivale a 9,8226 m/s<sup>2</sup>

De acuerdo con los resultados obtenidos para cada una de las diferentes situaciones se concluyó que las desaceleraciones obtenidas no son mayores a 5,6 m/s<sup>2</sup> cuando el objeto aparece de manera inesperada sobre la trayectoria del vehículo.

Aproximadamente el 90% de los conductores presentan una desaceleración no mayor de 3,4 m/s<sup>2</sup>, esta tasa de desaceleración permite al conductor mantenerse sobre el carril y conservar el control de la dirección durante maniobras de frenado en pavimentos húmedos.

### 2.1.3 Diseño geométrico de curvas horizontales

Las curvas horizontales son un elemento esencial en el diseño geométrico de carreteras, diferentes estudios han demostrado que un gran porcentaje de los accidentes que se pueden llegar a presentar dentro de una carretera ocurren dentro de este tipo de elemento (Ibrahim, 2011; L. Richl & Sayed, 2006). La actual práctica de diseño implica la selección del radio de curvatura, que está en función de la velocidad de diseño y del peralte que requiere la curva horizontal para garantizar la estabilidad del vehículo dentro de la curva, véase la Ecuación (2.3).

$$R_{\min} = \frac{V_e^2}{127 \times (e_{\max} + f_{\max})} \quad (2.3)$$

Donde:

Ve: Velocidad de específica del elemento (Km/h)

e<sub>max</sub>: Peralte máximo (%)

f<sub>max</sub>: Coeficiente de fricción lateral

El valor mínimo de peralte establecido por la normatividad colombiana es de 1,5% y el valor máximo depende del tipo de vía que se construirá y varía entre 6 – 8 %. Los valores de fricción lateral son función de la velocidad de diseño y oscilan entre 0,23 para una velocidad de 40 Km/h y 0,08 para una velocidad de 130 Km/h. En la Tabla 2.8, se pueden observar algunos coeficientes de fricción lateral empleados en Estados Unidos, Canadá y Colombia.

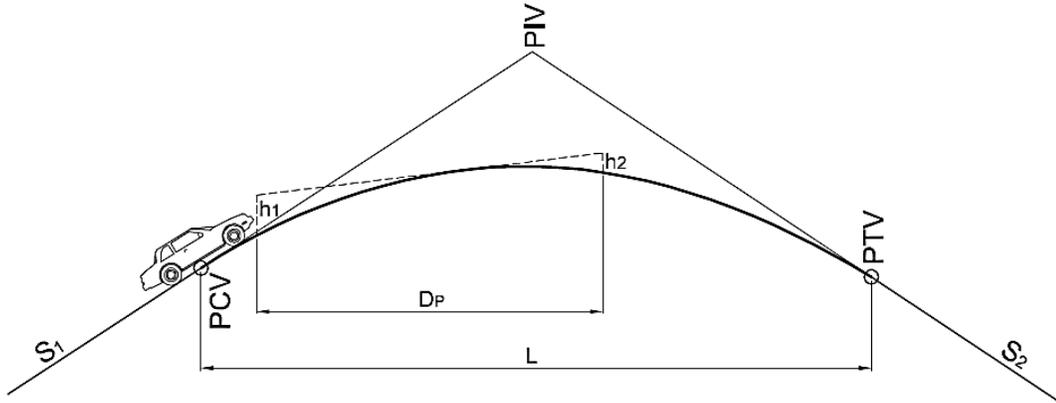
**Tabla 2.8. Coeficientes de fricción lateral máximos**

Velocidad (Km/h)	TAC 1999	AASHTO 2004	INVIAS 2008
30	0,31	0,28	0,28
50	0,21	0,19	0,19
80	0,14	0,14	0,14
100	0,12	0,12	0,12
130	0,08	0,08	0,08

Fuente: Adaptada de (Layton & Dixon, 2012)

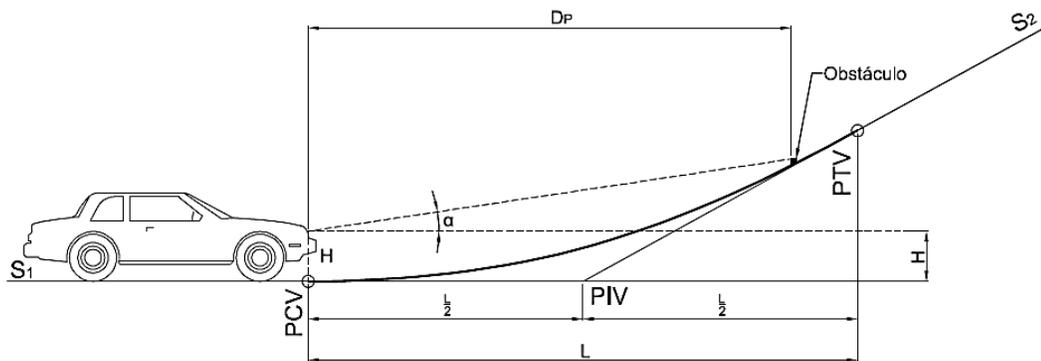
### 2.1.4 Diseño geométrico de curvas verticales

El diseño geométrico vertical está compuesto por un conjunto de alineaciones rectas con una pendiente determinada, que se encuentra en función de la velocidad de diseño, el tipo de carretera y la topografía de la zona. Estas alineaciones rectas o tangentes verticales se encuentran unidas por elementos curvos (parábolas), que pueden ser de dos tipos, convexas, Figura 2.1, o cóncavas, Figura 2.2.



**Figura 2.1. Curva vertical convexa**

Fuente: Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2008



**Figura 2.2. Curva vertical cóncava**

Fuente: Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2008

Algunos autores, Fambro et al., (1997); Olson et al., (1984) y Urbanik et al., (1989), han realizado diferentes estudios orientados hacia la determinación de la influencia de la distancia de visibilidad sobre la accidentalidad en curvas verticales, llegando a diferentes resultados, que convergen hacia la existencia de una relación entre una distancia de visibilidad limitada y el incremento del número de accidentes.

El diseño vertical de una vía en la actualidad se fundamenta en la determinación de la longitud de la curva vertical que se encuentra definida por un conjunto de parámetros que fundamentalmente obedecen a criterios de operación, drenaje y seguridad, siendo este último el que más importancia tiene.

#### 2.1.4.1 Longitud mínima, curva vertical convexa, criterio de seguridad

El criterio de seguridad, que define la longitud mínima de la curva se fundamenta en la distancia de visibilidad de parada y presenta dos relaciones, la primera cuando la distancia de visibilidad de parada es menor que la longitud de la curva vertical ( $DVP < LCV$ ), Ecuación (2.4), y la segunda cuando la distancia de visibilidad de parada es mayor que la longitud de la curva vertical ( $DVP > LCV$ ), Ecuación (2.5), las cuales se definen a continuación:

- Cuando la distancia de visibilidad de parada es menor que la longitud de la curva vertical ( $DVP < LCV$ )

$$L_{\min} = \frac{A \times DVP^2}{200 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (2.4)$$

- Cuando la distancia de visibilidad de parada es mayor que la longitud de la curva vertical ( $DVP > LCV$ )

$$L_{\min} = 2 \times DVP - \frac{200 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

- A: Diferencia algebraica entre la pendiente de entrada y la salida (%)
- h1: Altura del ojo del conductor (m)
- h2: Altura del obstáculo (m)
- DVP: Distancia de visibilidad de parada (m)

#### 2.1.4.2 Longitud mínima, curva vertical cóncava, criterio de seguridad

Del mismo modo que para la curva vertical convexa, el criterio de seguridad se fundamenta en la distancia de visibilidad de parada y presenta las mismas relaciones respecto a la longitud de la curva vertical convexa, sin embargo la diferencia yace en que para este tipo de curva se analizan las posibles restricciones que se presentan al transitar en la noche y estima la longitud del sector de carretera iluminado hacia adelante, como la distancia de visibilidad. La Ecuación (2.6) y la Ecuación (2.7), definen la longitud mínima de la curva vertical para curvas cóncavas.

- Cuando la distancia de visibilidad de parada es menor que la longitud de la curva vertical ( $DVP < LCV$ )

$$L_{\min} = \frac{A \times DVP^2}{200 \times (H + DVP \times \tan \alpha)} \quad (2.6)$$

- Cuando la distancia de visibilidad de parada es mayor que la longitud de la curva vertical ( $DVP > LCV$ )

$$L_{\min} = 2 \times DVP - \frac{200 \times (0,6 + DVP \times \tan \alpha)}{A} \quad (2.7)$$

Donde:

- A: Diferencia algebraica entre la pendiente de entrada y la salida (%)
- H: Altura de los faros delanteros del vehículo (m)
- $\alpha$ : Ángulo de divergencia de los rayos de luz de los faros delanteros (°)
- DVP: Distancia de visibilidad de parada (m)

#### 2.1.4.3 Altura del objeto y del ojo del conductor

La altura del objeto y la altura del ojo del conductor son variables que afectan considerablemente la determinación de la longitud de la curva vertical, en cuanto la altura del objeto disminuya la longitud de la curva vertical aumentara caso contrario ocurrirá con la altura del ojo del conductor.

Fambro et al., (1997) y Olson et al., 1984), desarrollaron diferentes investigaciones para determinar estas constantes, basados en la definición de muestras sobre conductores tipo, y diferentes clases de vehículos con el fin de obtener valores medios de la población.

A pesar de que la definición de estos dos parámetros debería realizarse estrictamente desde el punto de vista de seguridad vial, las implicaciones económicas que puede acarrear consigo la disminución o aumento de alguno de estos será significativo para un proyecto determinado. En la Tabla 2.9 se presenta un resumen de los diferentes valores adoptados a lo largo de la historia por algunas guías de diseño. La normatividad local vigente establece para cada una de estas variables los siguientes valores: altura del ojo del conductor 1,08 m, altura del obstáculo 0,60 m, altura de las luces delanteras del vehículo 0,60 m y para el ángulo de divergencia del rayo de luz hacia arriba 1°.

**Tabla 2.9. Altura del obstáculo y del ojo del conductor**

<b>Guía de diseño</b>	<b>Altura del objeto (m)</b>	<b>Altura del ojo (m)</b>
AASHTO 1954	0,10	1,37
TAC 1963	0,10	1,37
AASHTO 1965	0,15	1,14
AASHTO 1971	0,15	1,14
TAC 1986	0,38	1,05
AASHTO 1984	0,15	1,07
TAC 1999	0,38	1,05
AASHTO 2001	0,60	1,07
AASHTO 2004	0,60	1,08
INVIAS 1998	0,15	1,15
INVIAS 2008	0,60	1,08

Fuente: Adaptada de (Fambro et al., 1997)

## **2.2 Teoría de la confiabilidad**

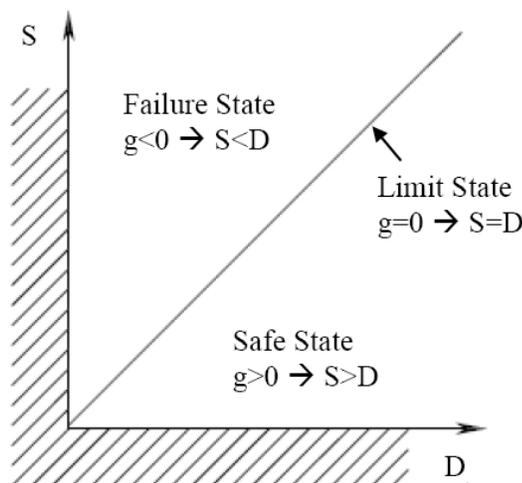
Las especificaciones técnicas y los manuales de diseño en ingeniería proporcionan las bases con las cuales se plantean los proyectos en las diferentes áreas de la ingeniería. Sin embargo, los modelos que definen estas especificaciones, han sido desarrollados en su mayoría, para un contexto determinista, desconociendo la incertidumbre inherente que presentan los diferentes parámetros que los definen.

Los análisis de confiabilidad tienen como principal objetivo determinar la probabilidad de falla de los modelos empleados en ingeniería, basados en la incertidumbre que tienen las diferentes variables que los componen. La teoría de probabilidad toma las funciones de probabilidad de las diferentes variables que definen los modelos, para cuantificar la probabilidad que dichos modelos no cumplan las funciones para las cuales fueron diseñados.

La probabilidad de no cumplimiento (Pnc) o de falla se evalúa a partir de funciones de estado límite, utilizadas principalmente en el área de diseño estructural y geotécnico. El estado límite último significa la falla del modelo, o en términos generales, indica que el modelo no cumple con las especificaciones técnicas de diseño. La función de estado límite utilizada en ingeniería está definida de la siguiente manera:

$$G(x) = S - D \quad (2.8)$$

Donde  $G(x)$  es la función de desempeño,  $S$  es la capacidad del sistema y  $D$  es la demanda, siendo ambas variables aleatorias del tipo  $X = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)$ . Las  $n$  variables representan la incertidumbre del modelo y cuentan con una función de distribución de probabilidad. La falla o no cumplimiento del sistema ocurre cuando  $G < 0$ . La Figura 2.3 presenta los estados de falla y seguridad descritos anteriormente.



**Figura 2.3. Estado límite en un modelo de análisis por confiabilidad**

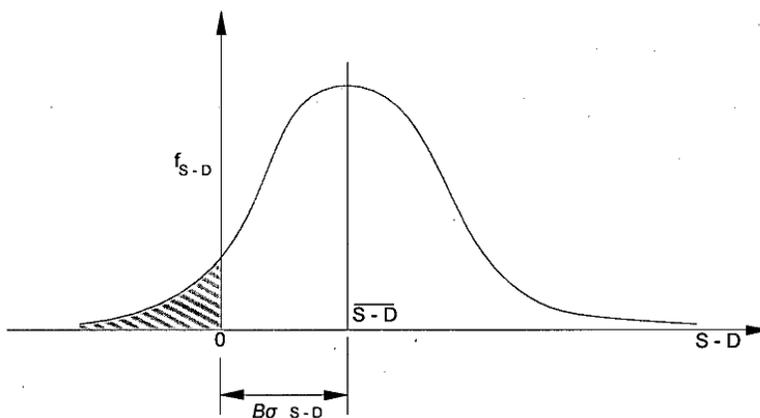
Fuente: (Ditlevsen & Madsen, 1996)

En temas de accidentalidad analizados dentro del diseño geométrico de vías, y más puntualmente en el caso que nos ocupa como el de visibilidad, hay que tener en cuenta que la falla del sistema no necesariamente conlleva a la ocurrencia de accidentes, ya que existen factores condicionantes como la presencia de obstáculos, vehículos o peatones, que permiten la ocurrencia de accidentes, es decir, un conductor que no tenga la distancia de visibilidad requerida podría eventualmente continuar su trayecto sin contratiempos. De esta forma, para el caso práctico de esta investigación, cuando la oferta excede la demanda, el sistema no cumple con las especificaciones técnicas de diseño.

Como resultado de los análisis de confiabilidad se obtienen el índice de confiabilidad y la probabilidad de no cumplimiento. El índice de confiabilidad está dado por la Ecuación (2.9).

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (2.9)$$

Donde  $\mu_G$  y  $\sigma_G$  representan la media y la desviación estándar de la función de desempeño (función de estado límite). La Figura 2.4 representa gráficamente el concepto de índice de confiabilidad.



**Figura 2.4. Índice de confiabilidad**

Fuente: (L. A. Richl, 2003)

Ang & Tang, (1975), plantearon un modelo que puede ser utilizado para derivar el valor esperado y la varianza de un parámetro de diseño cualquiera, este modelo a su vez puede ser utilizado para estimar el margen de seguridad, y está dado por:

$$MS = E(S) - E(D) \quad (2.10)$$

Donde MS representa el margen de seguridad,  $E(S)$  y  $E(D)$  son los valores esperados de capacidad y demanda. La Figura 2.5 representa el margen de seguridad.

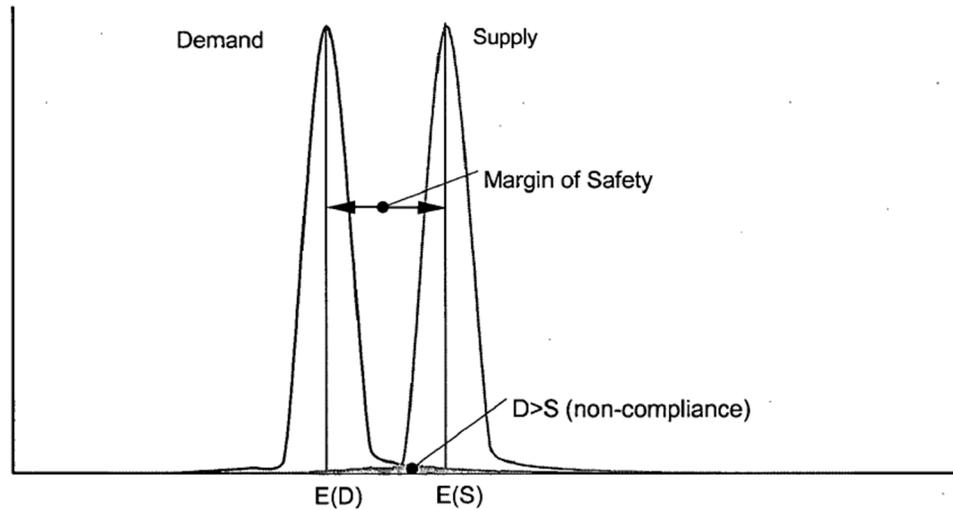


Figura 2.5. Margen de seguridad

Fuente: (L. A. Richl, 2003)

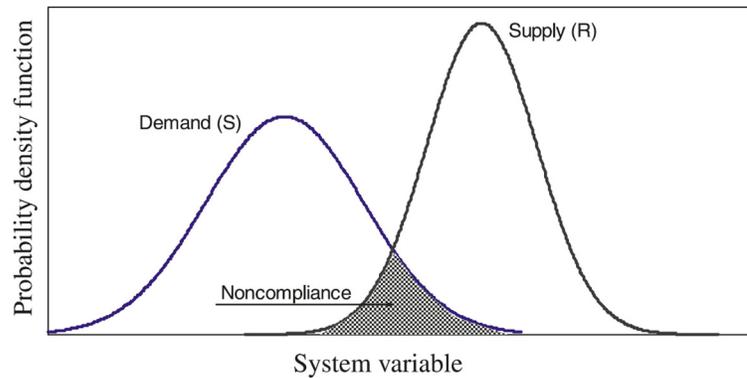
La probabilidad de no cumplimiento (Pnc) es una estimación de la posibilidad que un sistema en ingeniería falle bajo ciertas condiciones de operación, y está dada por:

$$Pnc = P(G < 0) = \int \dots \int f_x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 dx_3 \dots dx_n \quad (2.11)$$

Donde  $f_x$  es función de densidad de probabilidad conjunta (Pdf) de las variables  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

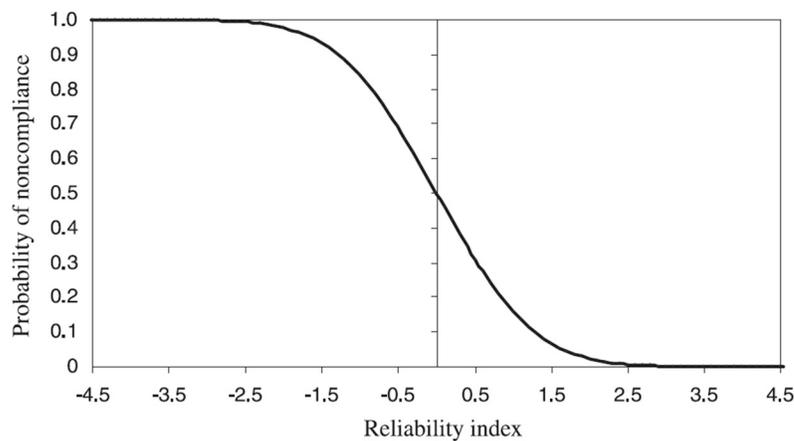
Así mismo, la probabilidad de no cumplimiento se puede expresar en términos del índice de confiabilidad como lo muestra la Ecuación (2.12). La Figura 2.6 muestra el concepto de Pnc, mientras que la relación con el índice de confiabilidad se presenta en la Figura 2.7.

$$Pnc = \Phi^{-1}(-\beta) \quad (2.12)$$



**Figura 2.6. Probabilidad de no cumplimiento**

Fuente: (Ismail & Sayed, 2009)



**Figura 2.7. Relación de la probabilidad de no cumplimiento y el índice de confiabilidad**

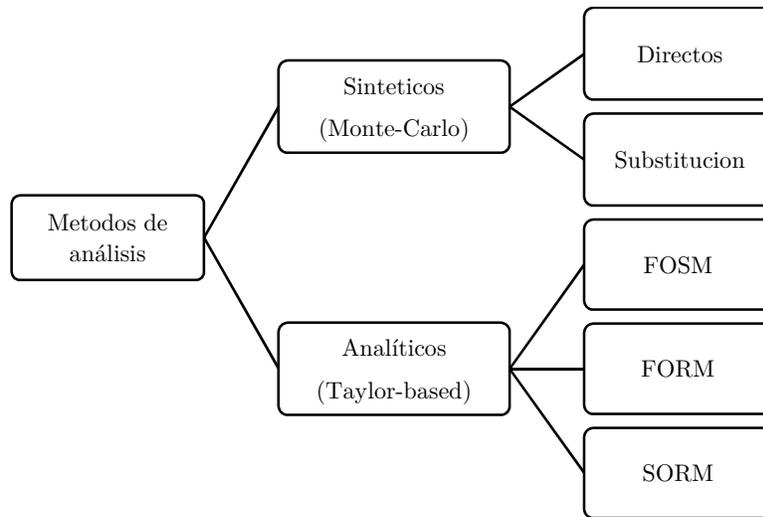
Fuente: (Ibrahim, 2011)

## 2.2.1 Métodos de análisis de confiabilidad

En la literatura existen diversos métodos para realizar simulaciones en términos de confiabilidad, las cuales se pueden separar en dos grupos diferentes de acuerdo con la forma de analizar las variables aleatorias, ya sea por probabilidad o por sus estadísticos como se presenta en la Figura 2.8.

### 2.2.1.1 Simulaciones de Monte Carlo

La probabilidad de falla o de no cumplimiento ( $P_{nc}$ ) al igual que el índice de confiabilidad  $\beta$  pueden ser hallados mediante simulaciones de Monte Carlo, para las cuales se requiere que las variables de los sistemas físicos o matemáticos estén descritas por funciones de densidad de probabilidad (Pdf's), que una vez conocidas, permiten realizar un muestreo aleatorio



**Figura 2.8. Métodos de simulación**

Fuente: Adaptado de (Hurtado, 2004)

De esta forma, se realiza un gran número de simulaciones a partir de las variables aleatorias, posteriormente se registra el número de simulaciones que arrojaron resultados negativos o fallas ( $n_f$ ) en la función de estado límite  $G_x \leq 0$ . Luego de  $N$  simulaciones, la probabilidad de no cumplimiento es determinada a partir de la Ecuación (2.13).

$$Pnc = \frac{n_f}{N} \quad (2.13)$$

Conforme  $N$  tiende a aumentar hacia  $\infty$ , la probabilidad de no cumplimiento esperada es mucho más exacta (Ibrahim, 2011). El método de Monte Carlo se apoya en técnicas de muestreo aleatorio para simular el comportamiento de los sistemas en ingeniería. Los principales procedimientos incluyen los siguientes pasos, (Sánchez Silva, 2005):

- Definir la función de estado límite, en términos de todas sus variables aleatorias (velocidad, tiempo de percepción reacción, tasa de desaceleración).
- Determinar la distribución de probabilidad y los parámetros (media y desviación) de cada una de las variables aleatorias que definen la función de estado límite.
- Generar valores aleatorios para cada una de las variables con base en su función de distribución de probabilidad.

- Evaluar la función de estado límite determinísticamente, utilizando los valores aleatorios que toman las variables en la simulación, un número de veces  $N$  lo suficientemente grande como para aproximar el resultado.
- Extraer la información estadística de los resultados.
- Determinar la probabilidad de no cumplimiento ( $P_{nc}$ ) de acuerdo con la Ecuación (2.13).

#### 2.2.1.2 Métodos analíticos (Taylor-Based)

Los métodos analíticos más utilizados para calcular la probabilidad de no cumplimiento son conocidos como métodos de primer orden y segundo momento (First Order Second Moment FOSM), los cuales se basan en aproximaciones de primer orden sobre los dos primeros momentos (media y desviación estándar). Cuando la aproximación es de primer orden se denominan métodos de confiabilidad de primer orden (FORM), y cuando es de segundo orden se llaman métodos de confiabilidad de segundo orden (SORM), (Sánchez Silva, 2005). Estos dos últimos están basados en series de Taylor de la función de estado límite sobre el punto de diseño. Los métodos analíticos como First Order Second Moment (FOSM), First Order Reliability Method (FORM) y Second Order Reliability Method (SORM), requieren que las variables aleatorias estén definidas por, (Ibrahim, 2011):

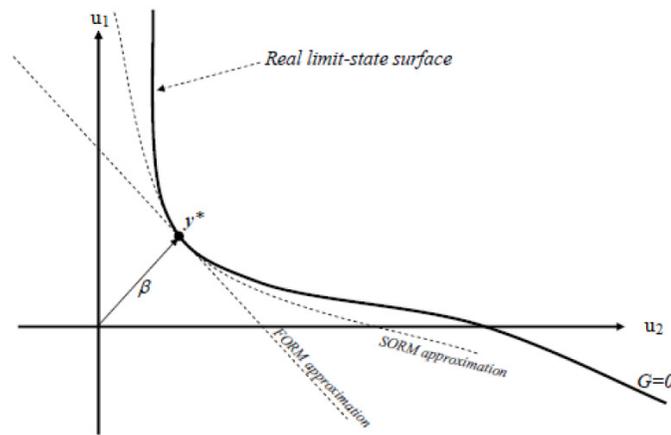
- Su función de densidad conjunta.
- Un método de aproximación
- Estén transformadas en un conjunto de variables independientes en el espacio normal estándar.

El análisis de confiabilidad por métodos aproximados incluye los siguientes pasos:

- Identificar la distribución de cada una de las variables aleatorias
- Formular el problema de confiabilidad en términos de la función de estado límite

- Transformar las variables aleatorias en variables distribuidas normalmente no correlacionadas.
- Encontrar el punto de diseño a través de procesos iterativos. Esto se logra cuando el índice de confiabilidad  $\beta$  y el punto de diseño convergen.
- Finalmente, estimar la Pnc y el  $\beta$  del problema.

La diferencia entre los FORM y los SORM está en su superficie de aproximación como se indica en la Figura 2.9.



**Figura 2.9. Diferencia entre los métodos FORM y SORM**

Fuente: (Haukaas, 2007)

### 2.2.1.3 Estimativos puntuales

Rosenblueth, (1975) propuso un método simple para obtener los momentos de la función de desempeño por medio de la evaluación de la función de desempeño en un juego de puntos discretos escogidos. Los puntos óptimos para evaluar los momentos de la función de densidad de probabilidad para cada variable aleatoria es el valor promedio  $\pm$  la desviación estándar.

Si el problema tiene  $n$  variables aleatorias, se tendrán  $2n$  combinaciones de la función de desempeño. Con las  $2n$  funciones de desempeño se puede calcular un valor esperado de la función de desempeño  $E(y)$  y la varianza de la misma  $V(y)$ , mediante las Ecuaciones (2.14) y respectivamente (2.15).

$$\bar{Y} = y_0 \prod_{i=1}^n \left[ \frac{(y_1^+ + y_2^-)}{2} \right] \frac{1}{y_0} \quad (2.14)$$

$$COV_y = \sqrt{\prod_{i=1}^n \left( 1 + \left[ \frac{y_i^+ - y_i^-}{y_i^+ + y_i^-} \right]^2 \right)} - 1 \quad (2.15)$$

Fuente: (Sánchez Silva, 2005)

### 2.2.2 Análisis de confiabilidad en el diseño vial

Los métodos probabilísticos fueron utilizados por primera vez en el diseño geométrico de vías por Moyer & Berry, (1941), para determinar la velocidad a la cual los vehículos deben circular sobre curvas horizontales de forma segura. Como resultado del estudio identificaron los valores de percentil para las velocidades de operación a diferentes velocidades de diseño, recomendando el percentil 85 como una medida de la velocidad de operación.

Navin, (1990, 1991) planteo la necesidad de utilizar las técnicas basadas en confiabilidad para entender los elementos aleatorios que afectan los problemas de seguridad en las carreteras. Es así como en 1990 llevo a cabo una investigación con el fin de determinar medidas de seguridad para diferentes factores de diseño como curvas horizontales, curvas verticales y distancias de visibilidad tanto de parada como adelantamiento. El análisis del margen de seguridad se realizó bajo la premisa que las variables involucradas son independientes y se distribuyen de forma normal.

Algunos autores se han enfocado en el estudio de las distancias de visibilidad requeridas en las carreteras, con el fin de comparar valores probabilísticos con los valores deterministas contemplados en los manuales de diseño. Faghiri & Demetsky, (1988) y Easa, (1994), demostraron las ventajas de utilizar los métodos de confiabilidad al evaluar distancias de visibilidad en intersecciones de vías férreas con carreteras. Así mismo, las técnicas de confiabilidad han sido empleadas para analizar ciertas condiciones operacionales en las carreteras como las restricciones de visibilidad en curvas horizontales, (Echaveguren, Bustos, & De Solminihac, 2005; Ibrahim & Sayed, 2011).

Echaveguren et al., (2005) presentaron una metodología para evaluar el margen de seguridad en curvas horizontales existentes a partir de un análisis de confiabilidad. Dentro del estudio presentado se incluyó: la representación del comportamiento de los conductores por la variación de la velocidad de operación, las condiciones de la superficie del pavimento por medio de la fricción, y el procedimiento para hallar el índice de confiabilidad que permite evaluar el margen de seguridad. Como resultado obtuvieron que algunos parámetros como el radio de curvatura, la resistencia al deslizamiento y la macro textura tienen un impacto significativo sobre la probabilidad de no cumplimiento.

Ismail & Sayed, (2010) establecieron una metodología para evaluar el riesgo de desviarse de las especificaciones de diseño, por la naturaleza probabilística que pueden tener los parámetros de entrada. El análisis consistió en la medida del riesgo sobre curvas horizontales con distancias de visibilidad restringidas para dos casos de estudio, los resultados mostraron que el diseño propuesto bajo las especificaciones técnicas existentes tiene un alto riesgo de presentar distancias de visibilidad restringidas. Estos resultados confirman la necesidad de calibrar las especificaciones actuales con el fin de mejorar la seguridad en las carreteras (Ibrahim, 2011).

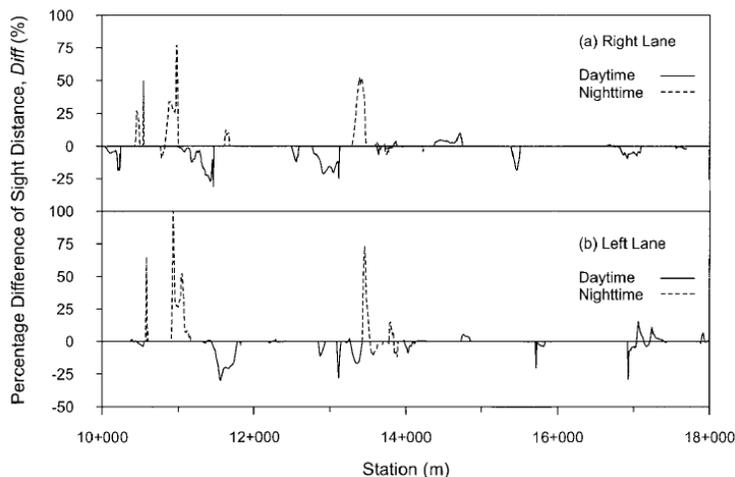
La distancia de visibilidad es una de las distintas variables que afectan las expectativas del conductor, ya que incide de forma directa en la percepción del corredor, el entorno, el tránsito y otros factores externos por parte del conductor, condicionando la necesidad de ajustar la velocidad de operación, lo cual afecta tanto las condiciones de operación de la vía, como la seguridad de la misma. La distancia de visibilidad disponible depende tanto de las características geométricas tales como la configuración de los alineamientos horizontal, vertical, y la sección transversal como de la topografía de la zona.

En la práctica, existen especificaciones técnicas contenidas en los manuales de diseño geométrico, como A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, AASHTO 2004 y el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS 2008, en los cuales se plantean modelos matemáticos para el cálculo de las distancias de visibilidad mínimas en función a parámetros de diseño como la velocidad de operación. La estimación de las distancias de visibilidad tanto disponible como requerida, se realizan bajo proyecciones en dos dimensiones (2D), separando el componente horizontal del vertical, sin embargo existen investigaciones (Echaveguren et al., 2009;

Gibreel et al., 1999), que demuestran la necesidad de analizar la visibilidad en los diseños viales a partir de modelos en tres dimensiones (3D) que representen la configuración real del corredor y el área de influencia.

La estimación de las distancias de visibilidad disponible en 3D puede realizarse de tres formas diferentes, (L. Richl & Sayed, 2006). La primera, a partir de herramientas de software que permiten visualizar la configuración en tres dimensiones del diseño final y su entorno, sin embargo esta metodología es más utilizada para dar un toque estético a los diseños. La segunda se refiere al modelo cuasi analítico, por medio del cual se emplean herramientas de computacionales (AutoCAD Civil 3D, Bentley Inroads, Instram ISPOL) que permiten triangular la superficie del terreno y posteriormente generan una perspectiva desde la posición del conductor y calcula la distancia sobre la línea de visibilidad hasta la intersección con la superficie del terreno; este enfoque aunque resulta bastante practico y acertado, está condicionado a ciertos requerimientos de hardware. Finalmente, el enfoque más utilizado tanto en la teoría como en la práctica, es el analítico, el cual está incluido en las guías de diseño como la establecida por la AASTHO, en donde se presentan formulas simples para estimar distancias de visibilidad en 2D principalmente en curvas horizontales.

En el estudio de evaluación de consistencia y seguridad en carreteras presentado por Hassan et al., (2000), se demostró que las distancias de visibilidad en 2D y 3D pueden variar significativamente, sobrestimando o incluso subestimando las distancias en 3D como se muestra en la Figura 2.10.



**Figura 2.10. Diferencia entre la distancia de visibilidad disponible en 2D y 3D**

Fuente: (Hassan et al., 2000)

La evaluación de las distancias de visibilidad en tres dimensiones se basó en métodos de modelación por elementos finitos, en los cuales se tuvo en cuenta las secciones transversales de los corredores en estudio. Esta modelación sirvió como base para diferentes aplicaciones distintas a la mencionada anteriormente, como la evaluación de la visibilidad en tramos que combinan curvas horizontales con curvas verticales cóncavas sobre todo en condiciones nocturnas, evaluación de distancias de visibilidad de adelantamiento, y el planteamiento de algunas recomendaciones generales en cuanto a la combinación del alineamiento horizontal con el vertical. Finalmente, para el análisis de consistencia, se presentan los perfiles de velocidad máxima que se pueden desarrollar de acuerdo con las condiciones de visibilidad del corredor.

Paralelamente, el análisis de confiabilidad ha sido aplicado junto con el método de simulaciones de Monte Carlo para evaluar las distancias de visibilidad requeridas y la probabilidad de sus limitaciones (Khoury & Hobeika, 2007; Sarhan & Hassan, 2008). Khoury & Hobeika, (2007) incorporaron el grado de incertidumbre a la distancia de visibilidad de adelantamiento. El objeto del estudio se enfocó en la calibración de la distancia de visibilidad de adelantamiento requerida, concluyendo que el modelo utilizado por la AASHTO sobrestima la distancia requerida.

Por su parte Sarhan & Hassan, (2008) utilizaron las simulaciones de Montecarlo para estimar la probabilidad de no cumplimiento asociada a distancias de visibilidad insuficientes. Para la elaboración del estudio, se realizaron distintos diseños viales en los cuales se combinaron diferentes elementos de geometría, como curvas horizontales sobre tangentes verticales, curvas en cresta y curvas cóncavas. Posteriormente se procedió al cálculo y elaboración de los perfiles de visibilidad en dos y tres dimensiones. En un trabajo posterior, Sarhan & Hassan, (2009) estudiaron el efecto de la curvatura vertical localizada en curvas horizontales sobre las distancias de visibilidad disponibles, basados en métodos de confiabilidad para calcular la probabilidad de no cumplimiento. Su metodología considero modelos de alineamientos en tres dimensiones.

Ismail & Sayed, (2009) presentaron una metodología para la calibración de las especificaciones técnicas, arrojando resultados consistentes con las probabilidades de no cumplimiento. Su planteamiento consistió en determinar el valor objetivo para calibrar las especificaciones de diseño de curvas verticales convexas bajo condiciones de seguridad en el diseño.

Echaveguren et al., (2005) señalaron que las características geométricas de tipo determinista que se utilizan en las especificaciones técnicas, son seleccionadas y evaluadas de acuerdo con un comportamiento uniforme tanto de los conductores como de las condiciones de la superficie del pavimento. Por esta razón plantearon una metodología que estima el índice de confiabilidad por medio del método de Hasofer-Lind para el diseño de curvas horizontales en vías de bajos volúmenes de tránsito, de acuerdo con la variabilidad de las componentes del diseño. Esta metodología contempla la variabilidad de la resistencia al deslizamiento, la textura del pavimento, el comportamiento del conductor y los elementos de diseño geométrico.

### 2.3 Funciones de desempeño de seguridad

Usualmente la frecuencia y la severidad de los accidentes se relacionan con la seguridad de su ubicación (tramos, segmentos, intersecciones). Por lo tanto, diferentes investigadores han elaborado modelos matemáticos para estudiar la relación de las características geométricas y del tráfico con la frecuencia de accidentes, estos modelos son conocidos como Modelos de Predicción de Accidentes (CPMs, Collision Prediction Models).

No obstante, recientemente se ha adoptado el término de Funciones de Desempeño de Seguridad (Spfs, Safety Performance Functions) dado que el primero puede confundirse con modelos netamente de predicción. Las funciones de desempeño de seguridad permiten estimar la frecuencia de accidentes esperada en función del volumen vehicular y las características geométricas de la vía. Hadayeghi, (2009) presenta el siguiente planteamiento básico de lo que es una función de desempeño, (Ibrahim, 2011):

$$E(A) = f(\beta, X) \quad (2.16)$$

Donde  $E(A)$  es el número de accidentes esperado para un periodo de tiempo,  $\beta$  es el vector de coeficientes de las covariables individuales, y  $X$  es la matriz de covariables. El principal objetivo del análisis es estimar el vector de coeficientes  $\beta$ , lo cual depende principalmente de la técnica de regresión que se utilice. Entre los principales modelos de regresión para estimar la probabilidad de la frecuencia de accidentes que se encuentran en la literatura se encuentran los siguientes.

### 2.3.1.1 Modelo de regresión de Poisson

En este modelo se tiene que la probabilidad que un tramo tenga  $y_i$  accidentes está dada por:

$$P\{Y_i = y_i | \theta_i\} = \frac{e^{-\theta_i} \theta_i^{y_i}}{y_i!}; \theta_i = e^{\beta \cdot X_i} \quad (2.17)$$

Donde  $Y_i$  es el número de accidentes ocurridos en un tramo,  $\theta_i$  es un parámetro de Poisson relacionado con las características del tramo (tráfico, características geométricas),  $\beta$  es el vector de coeficientes de la regresión estimado para las variables,  $X_i$  es vector de variables que influyen en los accidentes.

La limitación que presenta el modelo está en que su valor medio y su varianza deben ser iguales, y estudios de accidentalidad realizados por diversos investigadores como R. Kulmala & Roine, (1988), Risto Kulmala, (1995), Cameron & Trivedi, (1998) y Winkelmann, (2003), muestran que los accidentes tienden a ser sobre dispersos, es decir la varianza es mayor que la media, (Ibrahim, 2011).

Miaou & Lum, (1993) explican las razones por las cuales los accidentes presentan sobre dispersión en los datos:

- Los modelos de predicción no incluyen todas las variables que explican la razón de ocurrencia de los accidentes registrados.
- Incertidumbre en la variable tráfico
- Falta de homogeneidad de las condiciones del tramo en estudio, como la iluminación, las condiciones del clima y demás variables ambientales.

### 2.3.1.2 Modelo Poisson-Gamma

Este modelo también es conocido como modelo de regresión Binomial Negativo (NB) y ajusta la sobre dispersión que presenta en el modelo de Poisson. La función de densidad de probabilidad del modelo NB está dada por:

$$\{Y_i = y_i | \mu_i, k\} = \frac{\Gamma(y_i + k)}{y_i! \Gamma(k)} \left( \frac{k}{k + \mu_i} \right)^k \left( \frac{\mu_i}{k + \mu_i} \right)^{y_i}; \theta_i = \mu_i \times e^{(\mu_i)} \quad (2.18)$$

Donde  $\mu_i = e^{\beta \cdot X_i}$  y  $e^{(\mu_i)}$  corresponden al efecto aleatorio multiplicativo,  $k$  es el parámetro de dispersión inversa y la media y la varianza están dadas por:

$$E(Y_i) = \mu_i; \text{Var}(Y_i) = \mu_i + \frac{\mu_i^2}{k} \quad (2.19)$$

### 2.3.1.3 Desarrollo de las SPFs

Algunos autores como Risto Kulmala, (1995) e Ibrahim & Sayed, (2011) han utilizado los modelos de regresión NB para desarrollar las funciones de desempeño de seguridad SPFs, y como resultado han encontrado que para diferentes segmentos de vía, la media  $\mu$  está relacionada con las diferentes condiciones específicas del tramo como el tráfico, la geometría y las condiciones ambientales, para lo cual plantean la siguiente ecuación, (El-Basyouny & Sayed, 2009; Ibrahim & Sayed, 2011):

$$\ln(\mu) = \ln(L) + \ln(\alpha_0) + \alpha_1 \times \ln(V) + \sum_{j=1}^m b_j \cdot x_j \quad (2.20)$$

Donde la longitud del segmento L es una variable de compensación, V es el trafico promedio diario (TPD),  $x_j$  es cualquiera de las m variables adicionales y  $\alpha_0, \alpha_1, b_j$  son los parámetros del modelo.

Por otro lado, con el fin de evaluar el ajuste del modelo o el grado de precisión, se utilizan SD (Scaled Deviance) y el estadístico de Pearson  $\chi^2$  según McCullagh & Nelder, (1989), las cuales están definidas como:

$$SD = 2 \sum_{i=1}^n \left[ y_i \ln \left( \frac{y_i}{\mu_i} \right) - (y_i + K) \ln \left( \frac{y_i + k}{\mu_i + k} \right) \right] \quad (2.21)$$

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \mu_i)}{\left( \mu_i + \frac{u_i^2}{k} \right)} \quad (2.22)$$

Donde SD y el estadístico de Pearson  $\chi^2$  están distribuidos asintóticamente con n-p grados de libertad, siendo p el número de parámetros del modelo. (Ibrahim, 2011).

#### 2.3.1.4 Antecedentes SPFs en carreteras

Los primeros modelos utilizados para evaluar el efecto de la geometría en la ocurrencia de accidentes fueron los modelos de regresión lineal. Sin embargo, algunos autores como Jovanis & Chang, (1986) y Miaou & Lum, (1993), demostraron que este tipo de regresión es inapropiada, debido a errores que presenta al momento de describir los eventos aleatorios como el tráfico y los discretos como el número de accidentes (Ibrahim, 2011) citado de (Miaou, 1994) y (Lee, Nam, & Park, 2005). De esta forma, los modelos lineales fueron reemplazados por los modelos Binomiales Negativos (NB).

Miaou, Hu, Wright, Rathi, & Davis, (1992) estudiaron la relación que existe entre los accidentes de camiones y el diseño geométrico de la vía, por medio del modelo de regresión de Poisson. Como resultado, se concluye que el volumen de tráfico, el grado de curvatura y la pendiente longitudinal están estrechamente relacionados con este tipo de accidentes. Hadi, Aruldas, Chow, & Wattleworth, (1995) emplearon un modelo de regresión binomial negativo para calibrar los efectos de la sección transversal sobre la seguridad vial, separando los accidentes según su gravedad en accidentes con víctimas y accidentes con solo daños. Los resultados muestran que el tipo de vía, el ancho de berma interna y externa, el ancho del separador y en general las características de la sección transversal, se presenta un cambio en la ocurrencia de accidentes.

Wang, Hughes, & Stewart, (1998) investigaron el efecto de algunas variables como el volumen de tráfico, el tipo de intersecciones, y la configuración de la sección transversal sobre la ocurrencia de accidentes, por medio del modelo de regresión de Poisson. Los resultados muestran que el número de accidentes esperado aumenta con el número de intersecciones y el grado de exposición. Mientras que decrece al tener una sección transversal con bermas y separador de mayores dimensiones.

Rengarasu, Hagiwara, & Hirasawa, (2009) propusieron una metodología para evaluar el efecto de las características geométricas y la sección transversal sobre la ocurrencia de accidentes. El estudio muestra que la ocurrencia de accidentes está ligada a una combinación en las características geométricas de la vía, el comportamiento de los conductores y el tipo de vehículo. La metodología empleada para el análisis fue a partir de árboles de decisión.

Easa & You, (2009) presentaron un estudio en el cual plantearon Funciones de desempeño de seguridad (SPFs) para alineamientos en 3D en vías rurales de dos carriles. Como metodología realizaron cinco (5) modelos estadísticos dependiendo de la combinación de la geometría en planta-perfil. Así mismo, para cada combinación, emplearon diferentes técnicas estadísticas de regresión como el modelo de Poisson, el modelo Binomial Negativo, entre otros. Los resultados muestran que el grado de curvatura, el tráfico promedio diario (TPD), el ancho de la sección y la densidad de accesos son los factores más influyentes en la ocurrencia de accidentes.

### 3 Marco Metodológico

En este capítulo se describen los diferentes datos de entrada que se emplearon en el desarrollo de la investigación, así mismo se presentan los métodos utilizados para el cálculo de la probabilidad de no cumplimiento (Pnc) y la determinación de las funciones de desempeño de seguridad (SPF). Finalmente, se relaciona la Pnc con las tasas de accidentalidad permitiendo de esta manera establecer el efecto de la variabilidad de la distancia de visibilidad de parada sobre la accidentalidad en las carreteras. La Figura 3.1 presenta la metodología aplicada para el desarrollo de la investigación.

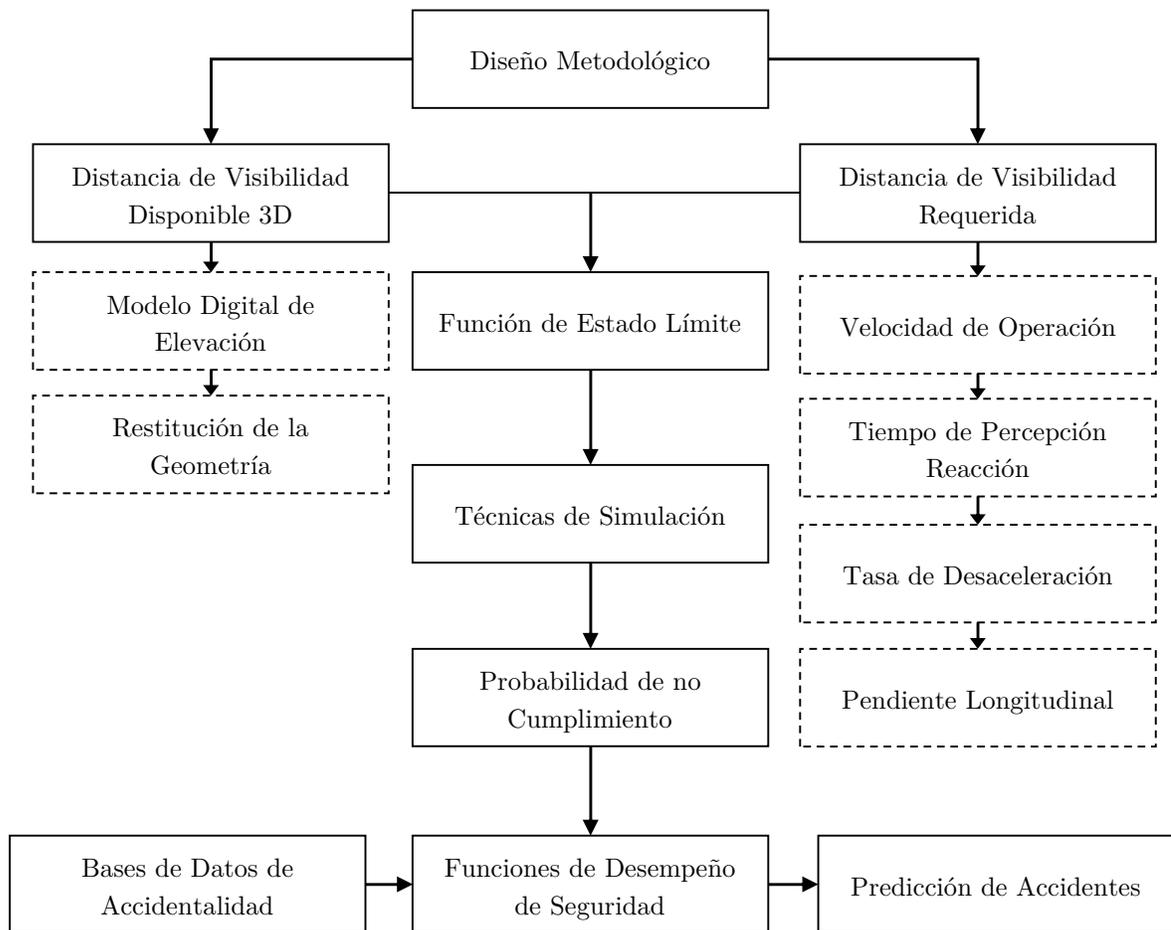


Figura 3.1. Desarrollo metodológico

### 3.1 Generalidades de la vía de estudio

El corredor vial en estudio se encuentra ubicado en el departamento del Magdalena, entre los municipios de Plato y El Difícil, y corresponde a una vía nacional primaria (Ruta Invias 8002) de calzada sencilla y bidireccional, cuyo trazado se desarrolla por terrenos con topografía principalmente montañosa en una longitud aproximada de 73,6 Km. En la Figura 3.2 se presenta la localización general de la zona en estudio.



Figura 3.2. Localización general de la vía de estudio

Fuente: Adaptado de (Invias 2008)

### 3.2 Datos de entrada

De acuerdo con la Figura 3.1, los datos de entrada utilizados dentro de la investigación se dividen en dos partes: i) La información que permite calcular la distancia de visibilidad disponible (DVD) en 3D, que corresponde a la topográfica que describe el modelo digital de elevación (MDE) y la configuración geométrica de la vía existente objeto de estudio. ii) La información que permite determinar la distancia de visibilidad requerida, que hace referencia a las variables del modelo matemático de acuerdo con la normatividad local legal vigente, dentro de las cuales se puede encontrar, la velocidad de operación ( $V_{85}$ ), el tiempo de percepción reacción (PRT) y la tasa de desaceleración ( $a$ ).

### 3.2.1 Modelo digital de elevación (MDE)

El modelo digital de elevación (MDE) construido, incluye la definición tridimensional de la vía y la configuración del terreno adyacente a esta. La información topográfica empleada en la triangulación corresponde a información secundaria de datos Lidar por sus siglas en ingles Light Detection and Ranging, en formato plano (x, y, z) de la zona en estudio. El procedimiento consiste en la generación de un modelo vectorial TIN (Triangulated Irregular Network) mediante software como Auto CAD Civil 3D o Istram ISPOL. El modelo vectorial, se puede definir como una “*estructura de datos compuesta por un conjunto de triángulos irregulares adosados, y contruidos a partir de tres puntos cercanos no colineales, formando un plano que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle en función a la densidad de puntos medidos*”, (Felicísimo, 1994, p. 14).

El Modelo Digital de Elevaciones empleado en el desarrollo de este proyecto cuenta con aproximadamente tres (3) puntos/m<sup>2</sup>, lo cual permite un grado de aproximación ideal para el modelamiento. La Figura 3.3 presenta un extracto del Modelo Digital de Elevaciones empleado en el estudio, por su parte la Tabla 3.1 consolida los datos estadísticos del MDE construido.

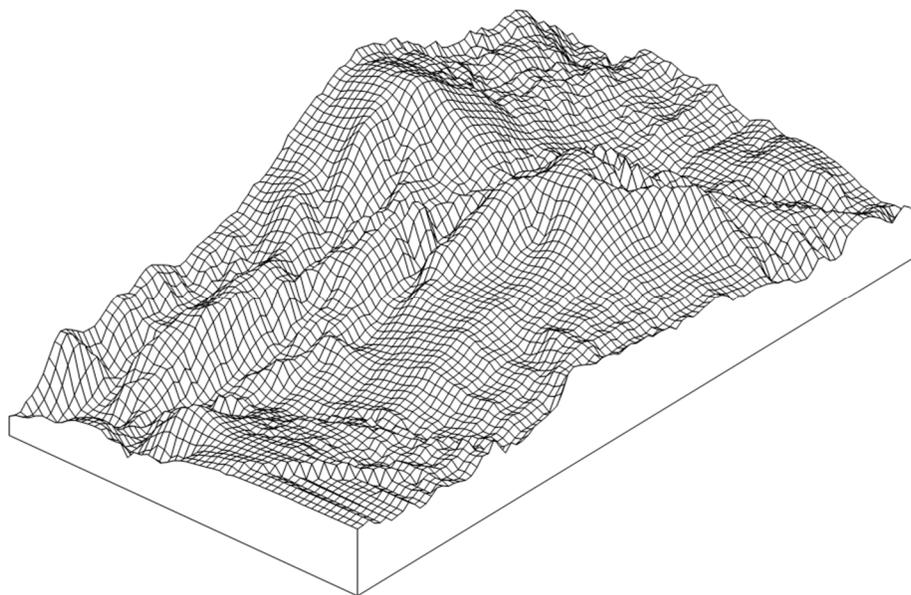


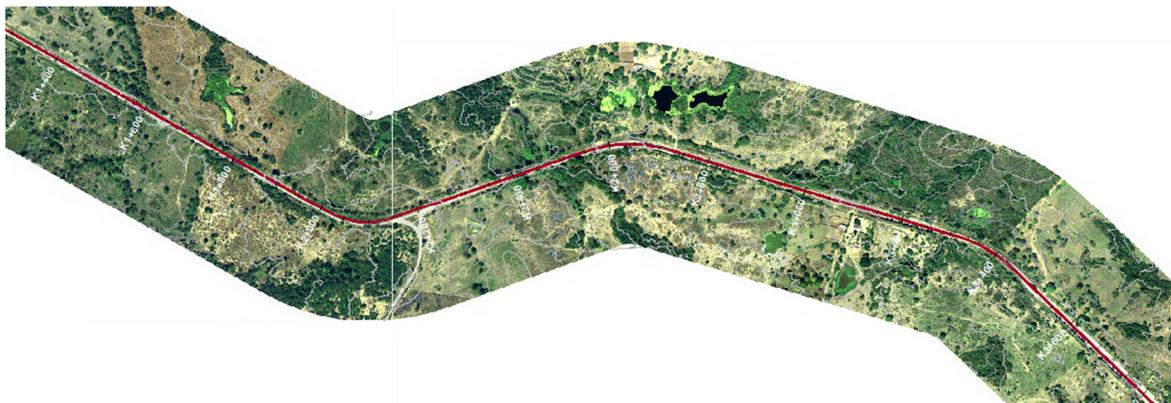
Figura 3.3. Modelo digital de elevación

**Tabla 3.1. Datos estadísticos MDE**

Descripción	Valor
Longitud estudiada	73,593 Km
Número total de puntos	133'298.578 Puntos
Elevación mínima	4,94 m.s.n.m
Elevación máxima	210,290 m.s.n.m
Superficie aproximada	29,6 Km <sup>2</sup>

### 3.2.2 Restitución de la geometría de la vía

La restitución del alineamiento en planta consistió en adaptar diferentes tipos de elementos geométricos como tangentes, curvas circulares y espirales, a las condiciones de la vía existente, a partir de información secundaria como orto-fotografías aéreas y/o cartografía de la zona, véase la Figura 3.4. La restitución geométrica se efectuó por medio de la herramienta computacional AutoCAD Civil 3D<sup>®</sup>, la Tabla 3.2 presenta los datos estadísticos generales de la geometría horizontal.

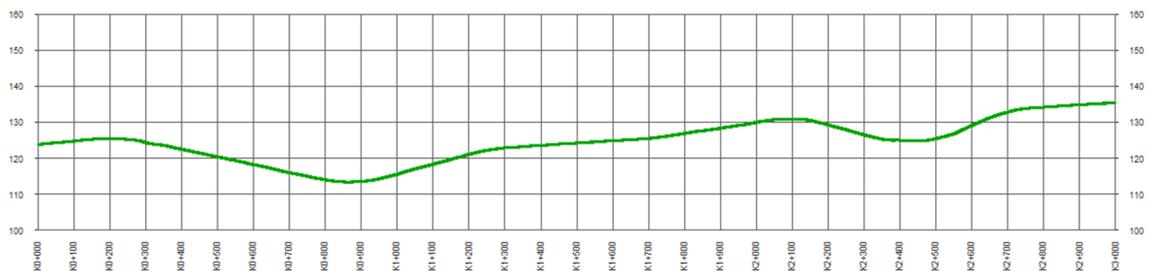


**Figura 3.4. Restitución geometría horizontal**

**Tabla 3.2. Datos estadísticos geometría horizontal**

Descripción	Valor
Número de tangentes	177
Número de curvas circulares	21
Número de curvas espiral círculo espiral	37
Número de curvas espiral espiral	21
Radio mínimo (m)	140
Radio máximo (m)	2200
Longitud de espiral mínima (m)	30
Longitud de espiral máxima (m)	125
Velocidad de diseño (Km/h)	60

Una vez restituida la geometría horizontal y junto con el MDE, se procedió a reconstruir la geometría vertical, que consistió básicamente en extraer el perfil existente del terreno natural, véase la Figura 3.5, y geometrizarlo mediante tangentes y curvas verticales bien sean cóncavas o convexas. La Tabla 3.3 presenta los datos estadísticos generales de la geometría vertical.



**Figura 3.5. Restitución geometría vertical**

**Tabla 3.3. Datos estadísticos geometría vertical**

Descripción	Valor
Pendiente máxima (%)	7,49
Pendiente mínima (%)	0.00
Número de curvas cóncavas	109
Número de curvas convexas	96
Número total de curvas verticales	205
Longitud mínima de curva vertical (m)	12,20
Longitud máxima de curva vertical (m)	349,52
Coefficiente K mínimo	11,00
Coefficiente K máximo	121,15

En el Anexo A, se presentan los elementos geométricos empleados para el desarrollo de la investigación, que corresponden a un conjunto de curvas horizontales del corredor en estudio, las cuales fueron seleccionadas con base en las distancias de visibilidad 3D calculadas y la localización de los accidentes de acuerdo con los registros de accidentalidad.

### 3.2.3 Estudio de velocidad

La determinación de las velocidades de operación dentro del corredor en estudio se realizó por medio de un estudio de velocidad puntual, ya que es una metodología que se emplea dentro de la ingeniería de tránsito para determinar velocidades seguras en curvas horizontales, establecer la longitud de zonas de adelantamiento, realizar análisis de accidentalidad y de flujo vehicular, entre otros.

### 3.2.3.1 Planeación del estudio

La planeación del estudio se efectuó siguiendo la metodología planteada por Cal & Mayor y Asociados & Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, (2005), la cual establece el siguiente procedimiento:

- Fijar el error máximo tolerable de inferencia. Los valores comúnmente utilizados para este error de acuerdo con Box & Oppenlander, (1995) están comprendidos entre uno (1) y cinco (5) km/h.
- Seleccionar el nivel de confianza, que es la probabilidad (expresada en porcentaje) de que el parámetro estimado no rebase el error tolerable máximo, véase la Tabla 3.4, siendo los niveles de 95% y 95,5% los más usados en la medida de las velocidades. En casos muy especiales en que se necesite mayor confianza en los resultados, se emplean niveles de 99% y 99,7%.

**Tabla 3.4. Valores de z para varios niveles de confianza**

Nivel de confianza %	Valor de la constante z
68,30	1,00
90,00	1,64
95,00	1,96
95,50	2,00
99,00	2,58
99,70	3,00

Fuente: (Cal & Mayor y Asociados & Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, 2005)

- Determinar la varianza del estimador, lo que se suele expresar por medio de la desviación estándar a partir de los resultados obtenidos en estudios anteriores como se muestra en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5. Desviaciones estándares de velocidades puntuales para distintos tipos de tránsito y vía**

Tipo de tránsito	Tipo de vía	Desviación estándar (Km/h)
Rural	Dos Carriles	8,5
Rural	Cuatro Carriles	6,8
Intermedio	Dos Carriles	8,5
Intermedio	Cuatro Carriles	8,5
Urbano	Dos Carriles	7,7
Urbano	Cuatro Carriles	7,9

Fuente: (Cal & Mayor y Asociados & Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, 2005)

➤ Determinar el tamaño de la muestra por medio de la Ecuación (3.1).

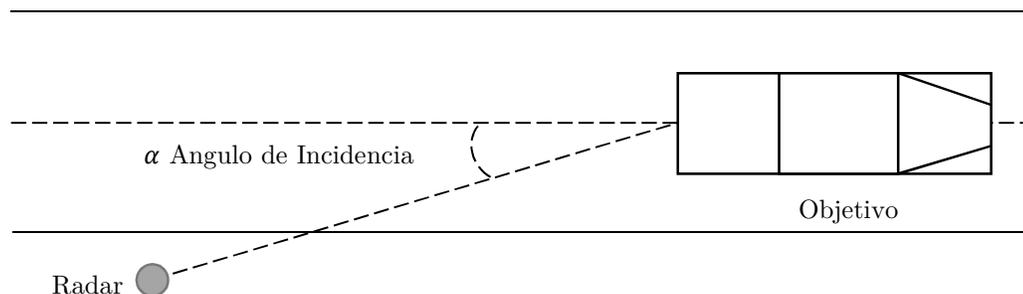
$$NOB = \left( \frac{z \times Stdv}{Err} \right)^2 \quad (3.1)$$

Donde NOB es el número mínimo de observaciones, Stdv es la desviación estándar, z es una constante que depende del nivel de confianza y Err es el error máximo tolerable.

El número mínimo de observaciones obtenido para el estudio fue treinta y uno (31), con un nivel de confianza de 95%, una desviación estándar de 8,5 Km/h y un error máximo tolerable de 3 Km/h.

### 3.2.3.2 Procedimiento de medida directa de velocidad con radar

Los medidores de velocidad a base de radar son los instrumentos más empleados actualmente para medir velocidades puntuales, no obstante, es precisamente este método al que más le temen los conductores de todas las técnicas que se utilizan en la práctica. A fin de que su presencia no afecte la velocidad natural de los vehículos, el estudio debe realizarse apuntando a los vehículos por la parte de atrás. Así mismo, el ángulo de incidencia no debe ser mayor a 15°, para evitar posibles errores en la medición, véase la Figura 3.6.



**Figura 3.6. Ángulo de incidencia**

Fuente: Adaptado (Cal & Mayor y Asociados & Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, 2005)

### 3.2.3.3 Localización

El estudio de velocidad puntual se efectuó en cada una de las curvas que componen el corredor vial, como se presenta en las Figura 3.7 y Figura 3.8. En el Anexo A se encuentra la localización exacta (abscisa, coordenadas norte y este) de cada una de estas.



**Figura 3.7. Fotografía de la curva de la abscisa K7+550**



**Figura 3.8. Fotografía de la curva de la abscisa K44+700**

El estudio de velocidades se realizó para cada uno de los sentidos de flujo y la localización para su medición dentro de la curva fue en la mitad de la longitud de cada una de estas.

#### 3.2.3.4 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la medición fue un radar Falcon HR cuyo principio de funcionamiento es el efecto Doppler, en la Tabla 3.6 se presentan las características técnicas y de operación del equipo.

**Tabla 3.6. Características radar Falcon HR**

<b>Tipo</b>	De una sola pieza, movimiento estacionario/direccional, sistema Doppler.
<b>Frecuencia</b>	K-Band 24,125 GHz +100 MHz
<b>Precisión</b>	Estacionario +1 mph (+1km/h), Movimiento +1/-2 mph (+1/-2 km/h)
<b>Componentes Electrónicos</b>	100% de estado sólido, circuitos integrados, y procesador de señal digital.
<b>Temperatura de Operación</b>	-22°F a +140°F (-30°C a +60°C) 90% humedad relativa a 37°C.

### 3.2.3.5 Formato de campo

Con el objeto de registrar de forma organizada la información, se adoptó el formato sugerido por la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá en su Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte como aparece en la Figura 3.9.

<b>VELOCIDAD PUNTUAL</b>											
Fecha: (D.M.A.)		Hora Inicio:		Localización:		Hoja:					
Dia:		Hora Final:				De:					
Condición climática		Longitud Base (si se usó):			Sentido:						
		Estado del pavimento:			Procedimiento:						
No.	Lectura <sup>1</sup> [seg] - [KPH]	Tipo de Vehículo <sup>2</sup>	No.	Lectura <sup>1</sup> [seg] - [KPH]	Tipo de Vehículo <sup>2</sup>	No.	Lectura <sup>1</sup> [seg] - [KPH]	Tipo de Vehículo <sup>2</sup>	No.	Lectura <sup>1</sup> [seg] - [KPH]	Tipo de Vehículo <sup>2</sup>
1			26			51			76		
2			27			52			77		
3			28			53			78		
Notas:											
* Depende de si se miden tiempos de recorrido o velocidades (empleando Cronómetro o Radar respectivamente).											
<sup>1</sup> L = Automóviles a flujo libre; B = Bus o Busetas a flujo restringido; BL = Bus o Busetas a flujo libre; C = Camión a flujo restringido; CL = Camión a flujo libre; si se trata de un automóvil a flujo restringido, no se registra nada.											
Constituyen un "pelotón" los vehículos que se siguen a corta distancia, en él, se mide solamente la velocidad del que encabeza el pelotón.											
Observaciones:											
LOGO CONTRATANTE		NOMBRE DE LA ENTIDAD CONTRATANTE				NOMBRE DEL ESTUDIO					
NOMBRE:		NOMBRE:		NOMBRE:		LOGO DEL CONTRATISTA		NOMBRE DEL CONTRATISTA			
FIRMA:		FIRMA:		FIRMA:							
CARGO:		CARGO:		CARGO:							
FECHA:		FECHA:		FECHA:							
ELABORÓ				REVISÓ							

**Figura 3.9. Formato de campo velocidad puntual**

Fuente: (Cal & Mayor y Asociados & Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, 2005)

### 3.2.3.6 Procesamiento de la información

El procesamiento de la información consistió en la identificación de los datos atípicos dentro de la muestra que generen una distorsión o desviación de la información. Para lo cual se empleó el diagrama de caja, los resultados para la curva número uno (1) se presentan en la Figura 3.10 y en la Tabla 3.7 los datos para su construcción.

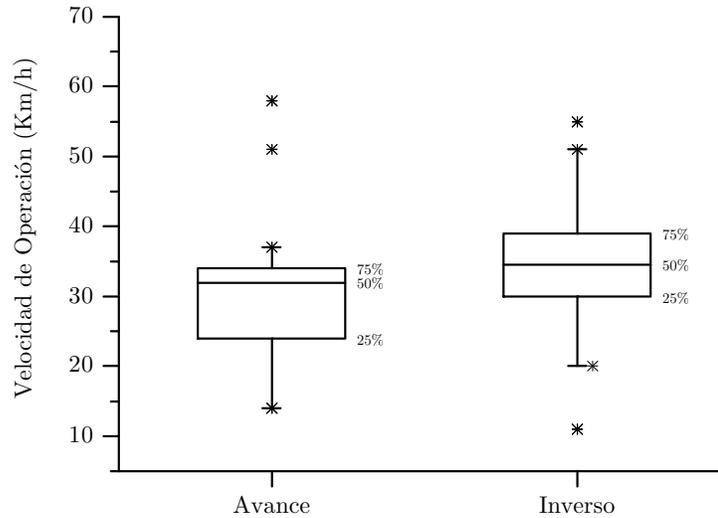
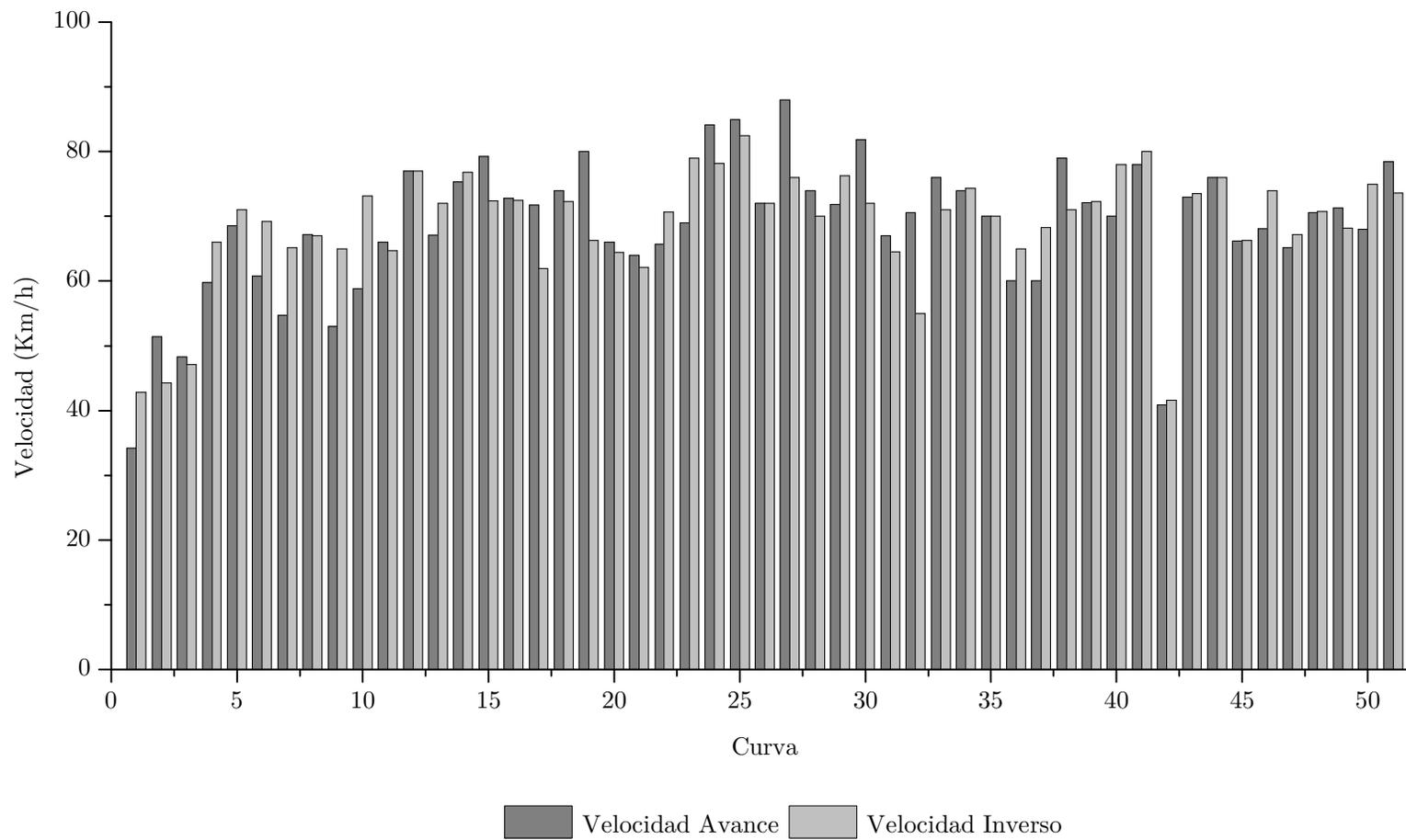


Figura 3.10. Identificación de los datos atípicos curva uno

Tabla 3.7. Medidas estadísticas curva número uno

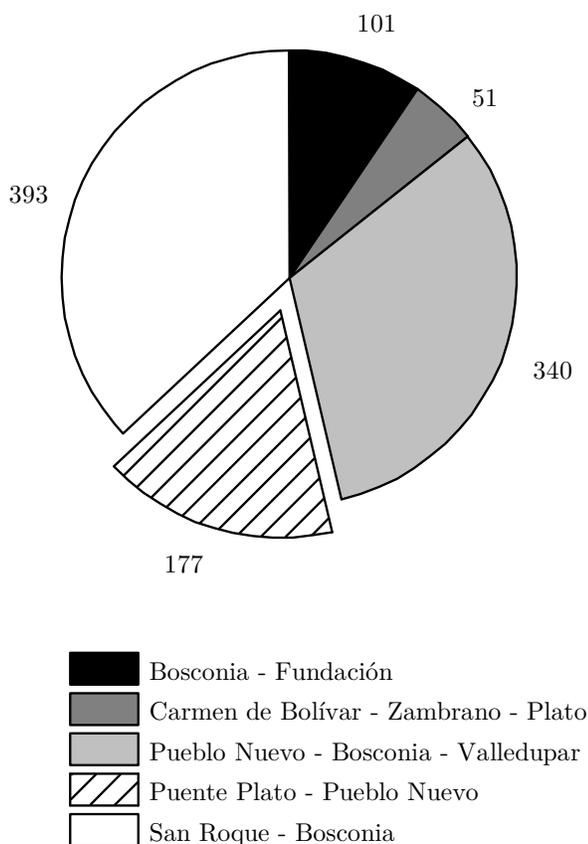
Sentido de Avance		Sentido Inverso	
Cuartil 1	24,25	Cuartil 1	30,00
Cuartil 3	34,00	Cuartil 3	39,00
Bigote	14,63	Bigote	13,50
Atípico Inferior	9,63	Atípico Inferior	16,50
Atípico Superior	48,63	Atípico Superior	52,50
Mínimo	14	Mínimo	11,00
Máximo	58	Máximo	55,00
V85	36,65	V85	43,65
$\sigma$	9,50	$\sigma$	9,40
N	30	N	30
Media	31,30	Media	34,73





**Figura 3.12. Velocidades de operación**

De acuerdo con las bases de datos el corredor entre los municipios de Plato y Pueblo Nuevo presenta un total de ciento setenta y siete (177) accidentes, de los cuales fueron excluidos cincuenta y siete (57) por encontrarse fuera del sector en estudio, y cuarenta y cinco (45) más por localizarse en sectores que están siendo intervenidos por obras y de los cuales no se pudo obtener velocidades de operación. La Figura 3.13 presenta la distribución de los accidentes a lo largo del área de influencia del proyecto y la Figura 3.14 relaciona el número de accidentes por curva para el corredor estudiado.



**Figura 3.13. Distribución del número de accidentes**

### 3.2.5 Transito

Los datos de volúmenes vehiculares correspondientes a los años 2007 a 2011 Fueron suministrados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Sin embargo, debido a que el corredor hace parte del proyecto concesionado Ruta del Sol Sector III desde el año 2012, los volúmenes vehiculares correspondientes a este año fueron suministrados por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). La Tabla 3.8 y Figura 3.15 muestran los Tráficos Promedios Diarios Anuales (TPDa) para el periodo de análisis.

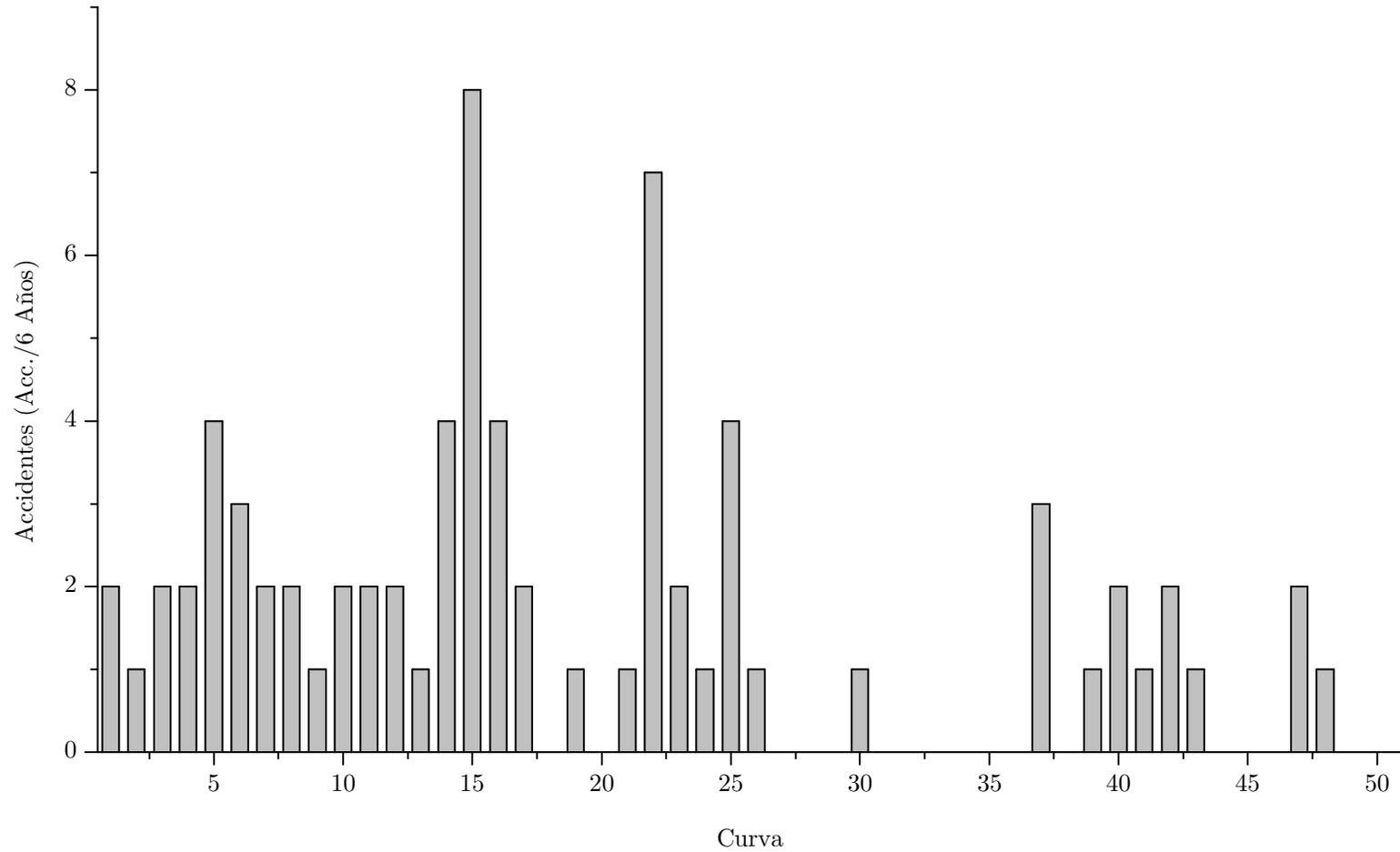
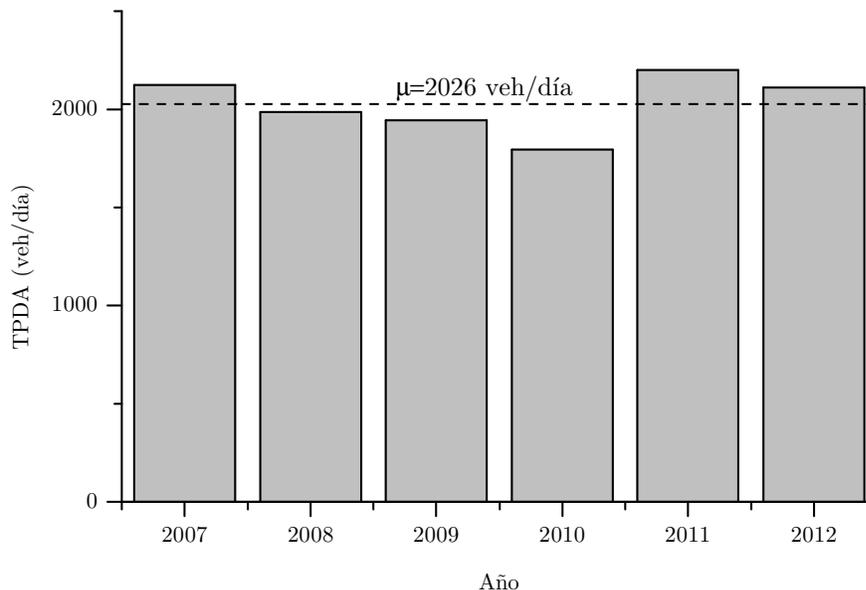


Figura 3.14. Número de accidentes por curva

**Tabla 3.8. Transito promedio diario anual**

<b>Año</b>	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<b>TPDa (veh/día)</b>	2124	1985	1944	1795	2201	2110



**Figura 3.15. Transito promedio diario anual**

### 3.3 Análisis de confiabilidad

En este apartado se establece la función de estado límite, se describen los métodos o procedimientos utilizados para la determinación tanto de la distancia de visibilidad disponible en 3D como la distancia de visibilidad de parada, variables que componen la función de estado límite, así mismo se indican cuáles son las variables aleatorias y sus funciones de distribución a emplear dentro del análisis de confiabilidad.

#### 3.3.1 Función de estado límite

Como se mencionó en el numeral 2.2, dentro de la literatura existen diferentes técnicas para aproximarse al índice o margen de confiabilidad y la probabilidad de falla o probabilidad de no cumplimiento (Pnc) de un determinado problema. Los métodos empleados en el presente trabajo son: el método de primer orden segundo momento, el método de estimativos puntuales y las simulaciones de Monte Carlo. De acuerdo con lo planteado en la Ecuación (2.10), la función de estado límite se expresa en términos de oferta y demanda, por lo cual para efectos de la presente investigación, se plantea la siguiente:

$$MS = DVD - DVP \quad (3.2)$$

Donde MS representa el margen de seguridad, DVD es la distancia de visibilidad disponible en 3D en metros y DVP, Ecuación (2.2), es la distancia de visibilidad de parada requerida en metros. De esta forma la función de estado limite queda:

$$MS = DVD - 0,278 \times Ve \times t + \frac{Ve^2}{254 \times \left( \frac{a}{g} \pm \frac{m}{100} \right)} \quad (3.3)$$

Dado que las condiciones de operación de la vía cambian dependiendo del sentido de circulación por factores como la direccionalidad del volumen vehicular y la distancia de visibilidad disponible (que adicionalmente depende directamente de la posición del vehículo, y la perspectiva del conductor), se realizó el análisis de confiabilidad por sentido de circulación. De la misma manera dentro de la presente investigación las variables aleatorias son: la velocidad, la tasa de desaceleración y el tiempo de percepción reacción, las cuales serán descritas en el numeral 3.3.3.

### 3.3.2 Distancia de visibilidad disponible 3D

La distancia de visibilidad disponible está definida por la configuración tridimensional del corredor vial, es decir, por el trazado horizontal, vertical y la sección transversal, y por la disposición espacial de la superficie del terreno natural adyacente a la carretera. Su estimación se realizó por medio de la herramienta computacional Istram ISPOL, empleando para ello el MDE, la restitución geométrica de la vía mencionada en el numeral 3.2.2 y los parámetros estipulados dentro del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras INVIAS 2008, como la altura de los ojos del conductor (1,08m) y la altura del obstáculo (0,60m) en las Figura 3.16 y Figura 3.17 se presenta en planta algunas zonas del corredor que presentan problemas de visibilidad. El algoritmo que emplea en software para el cálculo de la distancia de visibilidad disponible, requiere del MDE y del trazado horizontal, vertical y transversal de la vía así como también de los parámetros adicionales mencionados anteriormente. Una vez se tenga la totalidad de los datos de entrada el software realiza el cálculo de la distancia de visibilidad disponible ubicándose en un abscisa determinada, de acuerdo con la configuración establecida y traza una visual continua hasta el punto donde por condiciones geométricas o topográficas no sea posible observar el obstáculo establecido, de esta manera se puede decir que la distancia de visibilidad calculada por Istram ISPOL, es la distancia de visibilidad máxima disponible y se calculó en un intervalo de 10 m para cada una de las curvas de la vía.



Figura 3.16. Zonas con problemas de visibilidad (a)

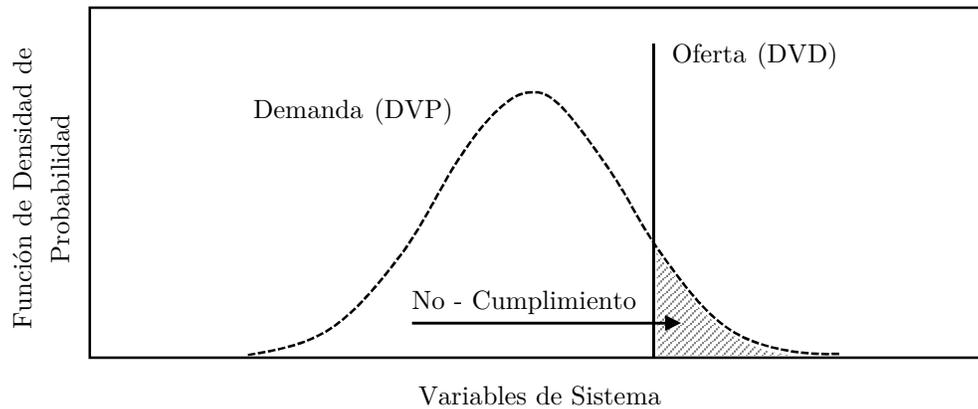


Figura 3.17. Zonas con problemas de visibilidad (b)

### 3.3.3 Distribución de los datos

#### 3.3.3.1 Distancia de visibilidad disponible 3D

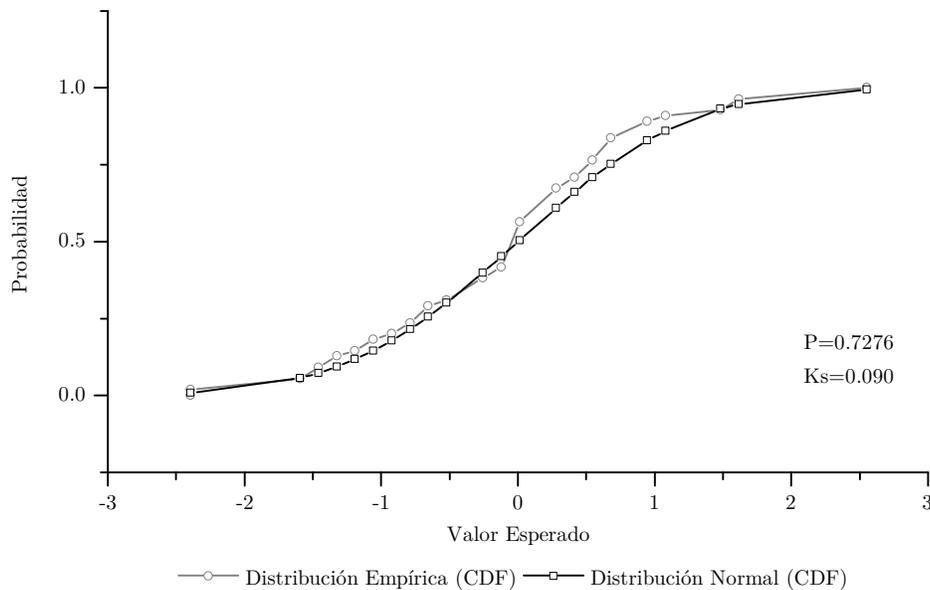
De acuerdo con Ibrahim, (2011), la distancia de visibilidad disponible corresponde a una variable de tipo determinista, mientras que en relación a la distancia de visibilidad de parada se encuentran variables tanto aleatorias (velocidad de operación, tiempo de percepción reacción y la tasa de desaceleración) como deterministas (pendiente). En función a lo anterior, el análisis por confiabilidad se desarrolla como aparece en la Figura 3.18.



**Figura 3.18. Análisis por confiabilidad con variables deterministas**

### 3.3.3.2 Velocidad

De acuerdo con el estudio de velocidades efectuado dentro de la investigación, se obtuvieron las velocidades de operación para cada una de las curvas objeto de estudio. Con el fin de determinar su función de distribución se aplicó la prueba de Kolmogorov Smirnov, la cual a su vez permite comprobar si los datos medidos en campo se comportaban siguiendo una función de distribución normal como lo sugieren diferentes investigaciones en el tema (El Khoury, 2005; Fitzpatrick et al., 2000; L. Richl & Sayed, 2006). El resultado obtenido para la curva uno (1) se presenta en la Figura 3.19. En el Anexo C, se relacionan las medidas estadísticas de la prueba para cada una de las curvas, los cuales permiten concluir que la velocidad de operación de la vía de estudio se puede asumir con distribución de forma normal.



**Figura 3.19. Prueba de Kolmogorov Smirnov curva número uno**

### 3.3.3.3 Tiempo de percepción reacción y tasa de desaceleración

El tiempo de percepción reacción y la tasa de desaceleración son las variables más complejas dentro del modelo matemático de la distancia de visibilidad requerida o de parada y como se mencionó en los numerales 2.1.2.1 y 2.1.2.2 han sido estudiadas por diferentes autores, por lo que sus funciones de distribución de probabilidad teóricas y las medidas estadísticas que definen estas, serán tomadas de la literatura. En la Tabla 3.9 se presentan los valores estadísticos y funciones de probabilidad de cada una de las variables aleatorias establecidas para el proyecto de investigación.

**Tabla 3.9. Funciones de distribución de probabilidad de las variables aleatorias**

Parámetro	Media	Desviación Estándar	Distribución	Referencia
V85	Ver Anexo B	Ver Anexo B	Normal	-
PRT	1,5 s	0,40 s	Log Normal	Lerner, (1995)
a	4,2 m/s <sup>2</sup>	0,60 m/s <sup>2</sup>	Normal	Fambro et al. (1997)

## 3.4 Función de desempeño de seguridad

Dado que la visibilidad en las carreteras constituye un factor de seguridad, se hace necesario establecer la relación entre la probabilidad de no cumplimiento (Pnc) y la ocurrencia de accidentes. En la Figura 3.20 se presenta la relación de la probabilidad de no cumplimiento Pnc con la velocidad de operación de la cual se puede inferir que bajo las condiciones existentes de operación, se evidencia que los problemas de visibilidad, evaluados a partir del análisis de confiabilidad, se presentan generalmente a velocidades superiores a los 60 Km/h. Este mismo umbral de velocidades es el que presenta la mayor frecuencia de accidentes de acuerdo con lo registrado en las bases de datos del Ministerio de Transporte y presentado en la Figura 3.21. Lo anterior ratifica la necesidad de estudiar la relación entre las probabilidades de no cumplimiento Pnc y la ocurrencia de accidentes. Para esto, es indispensable establecer la forma apropiada del modelo, el cual como condición debe arrojar resultados lógicos, es decir, por un lado el modelo no debe predecir accidentes negativos y por otro lado para valores nulos de exposición (ej. Si no hay tránsito de vehículos por lo que TPD=0) el total de la predicción de accidentes debe ser 0. Teniendo en cuenta lo anterior, la forma apropiada del modelo corresponde con la propuesta por Ackaah & Salifu, (2011); Greibe, (2003); Ibrahim & Sayed, (2011); Ibrahim, (2011); Risto Kulmala, (1995); L. A. Richl, (2003); Z. Sawalha & Sayed, (2006), la cual se relaciona a continuación:

$$\hat{E}(Y) = a_0 \times L^{a_1} \times V \times e^{\sum_j b_j x_j} \quad (3.4)$$

Donde  $a_0, a_1, a_n, b_j$  son parámetros del modelo, L es la longitud de la curva (m), V el transito promedio diario anual (veh/día), e es la base de los neperianos y  $x_j$  cualquier variable adicional que se desee incluir en el modelo de predicción. Los parámetros del modelo se estimaron de tal forma que se minimice el error entre los accidentes registrados en cada curva, y los accidentes calculados con el modelo.

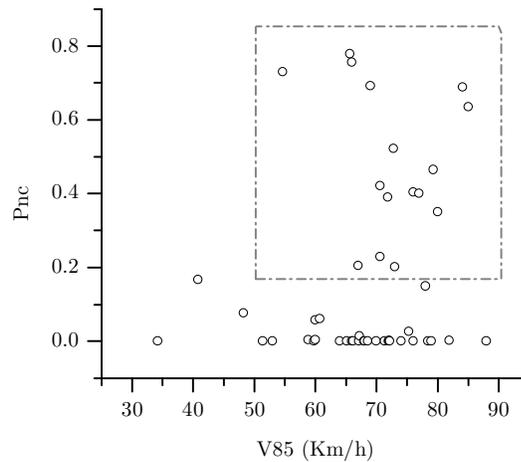


Figura 3.20. Variación de la Pnc Vs velocidad de operación

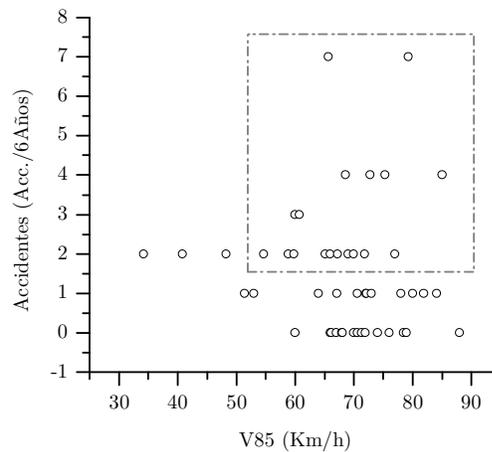


Figura 3.21. Variación de los accidentes Vs velocidad de operación

### 3.4.1.1 Medidas de bondad de ajuste del modelo

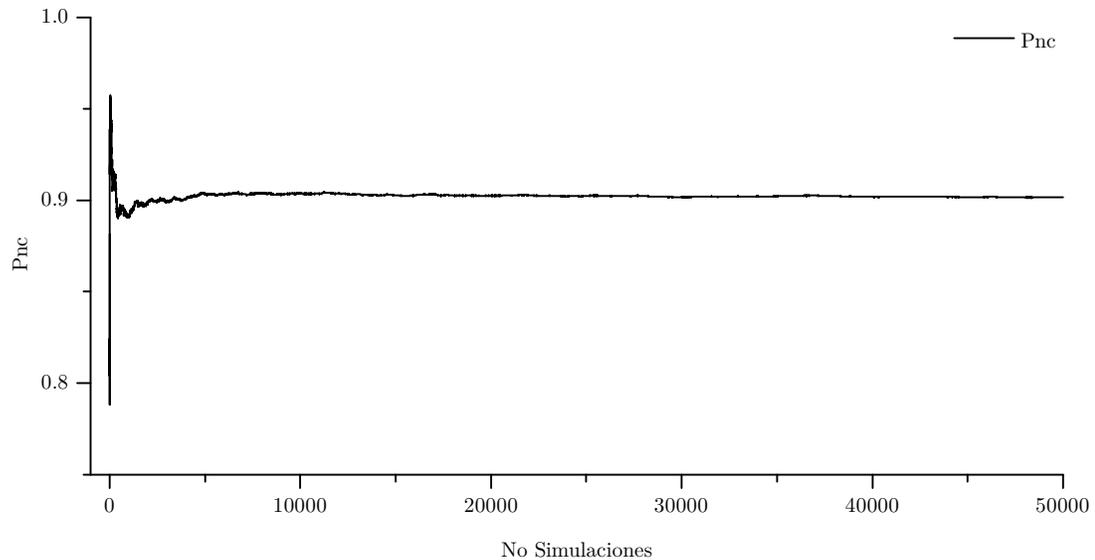
Con el objeto de evaluar la bondad del ajuste se pueden utilizar dos medidas estadísticas empleadas por (Ibrahim & Sayed, 2011; Z. Sawalha & Sayed, 2006) que fueron propuestas por McCullagh & Nelder, (1989): La primera corresponde al estadístico de Pearson y la segunda es la Scaled Deviance (Desvianza) que depende de la función de probabilidad utilizada. Para el presente proyecto de investigación se empleó el estadístico de Pearson el cual se encuentra definido por la ecuación que se relaciona a continuación:

$$Pearson\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - Y_i]^2}{Var(Y_i)} \quad (3.5)$$

## 4 Resultados y discusión

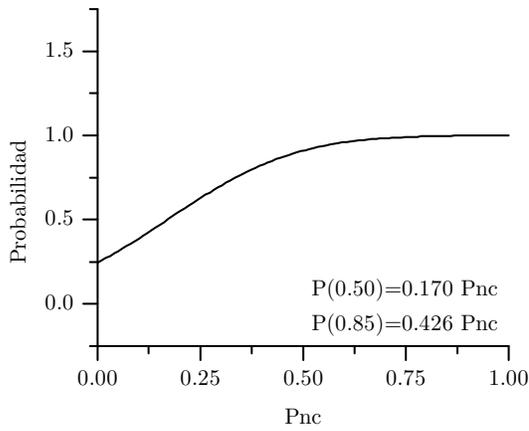
### 4.1 Probabilidad de no cumplimiento

Una vez definida la función de estado límite, las funciones de distribución y los parámetros de cada variable que define esta, se programaron rutinas en MATLAB® (MATrix LABoratory), véase el Anexo D, con el objeto de estimar la probabilidad de no cumplimiento ( $P_{nc}$ ) de la visibilidad a través de las técnicas de simulación mencionadas en el numeral 3.3.1, empleando para ello DVD 3D crítica, es decir la DVD 3D mínima encontrada dentro de cada curva. Los resultados de cada una de las técnicas de simulación, se presentan en la Figura 4.2 y Figura 4.3 para el sentido de avance y el sentido inverso respectivamente. Para el caso de las simulaciones de Montecarlo, se estableció el número de simulaciones en función a la relación de la  $P_{nc}$  y el número de iteraciones como se presenta en la Figura 4.1, donde se puede apreciar que la  $P_{nc}$  se estabiliza alrededor de 20.000 simulaciones.



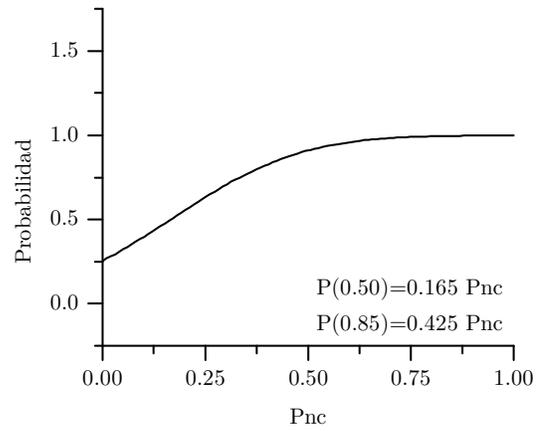
**Figura 4.1. Probabilidad de no cumplimiento vs número de simulaciones**

La Figura 4.2 (d) y la Figura 4.3 (d) muestran que las diferentes técnicas de simulación empleadas se ajustan entre sí, con diferencias máximas de hasta 1%, lo cual para efectos prácticos del análisis de accidentalidad es más que suficiente como se corrobora más adelante en el análisis de las funciones de desempeño de seguridad. De la misma manera en la Figura 4.4 se relacionan las  $P_{nc}$  para cada sentido de circulación en donde se pueden evidenciar diferencias significativas que alcanzan hasta un 63,4% entre las  $P_{nc}$ .



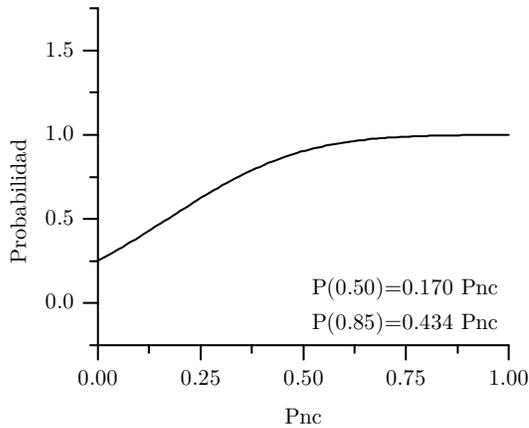
— Función de probabilidad acumulada

a) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales Estimativos Puntuales



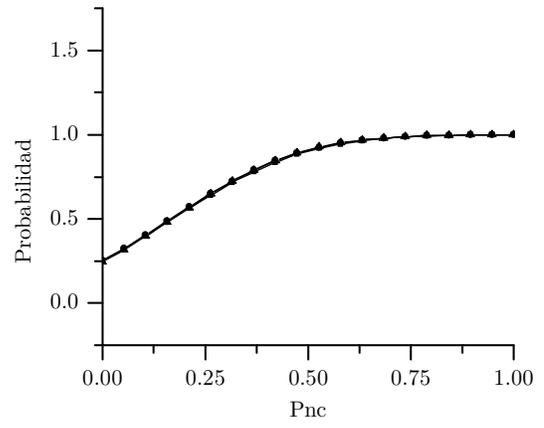
— Función de probabilidad acumulada

b) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales FOSM



— Función de probabilidad acumulada

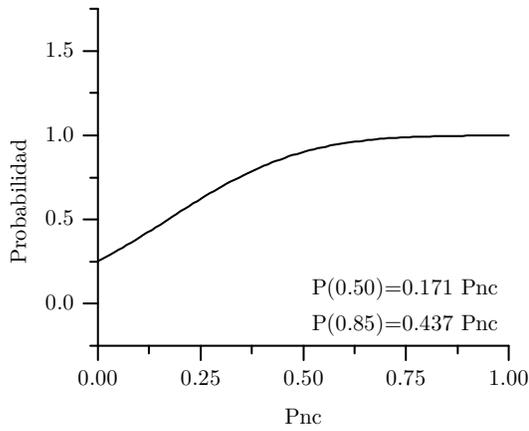
c) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales Simulaciones de Monte Carlo



—●— Simulaciones de Monte Carlo  
 —▲— Estimativos Puntuales  
 —●— Primer Orden Segundo Momento

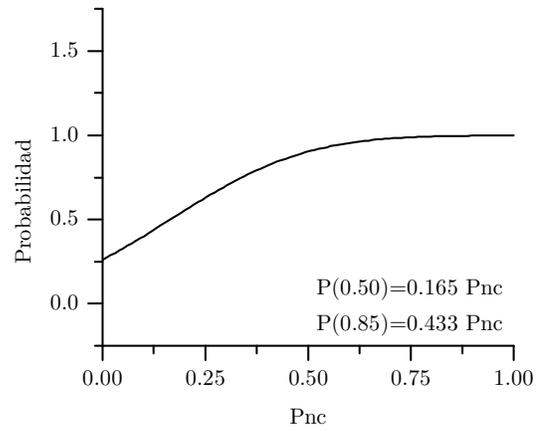
d) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales Comparación entre técnicas

**Figura 4.2. Probabilidad de no cumplimiento sentido de avance**



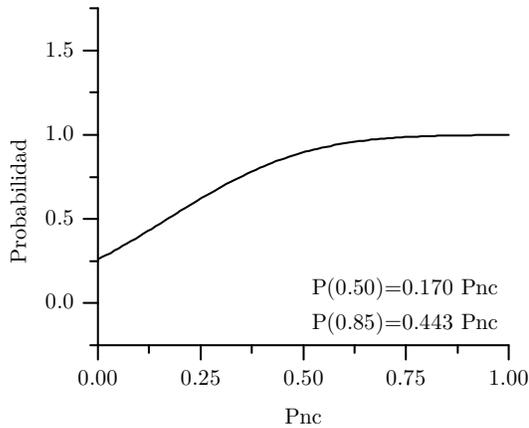
— Función de probabilidad acumulada

a) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales Estimativos Puntuales



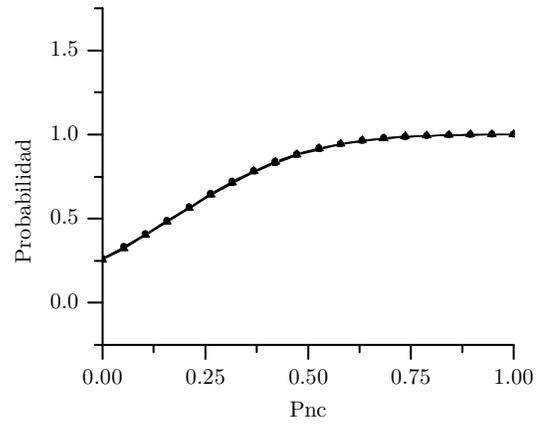
— Función de probabilidad acumulada

b) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales FOSM



— Función de probabilidad acumulada

c) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales Simulaciones de Monte Carlo



—■— Simulaciones de Monte Carlo  
 —▲— Estimativos Puntuales  
 —●— Primer Orden Segundo Momento

d) Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales Comparación entre técnicas

**Figura 4.3. Probabilidad de no cumplimiento sentido inverso**

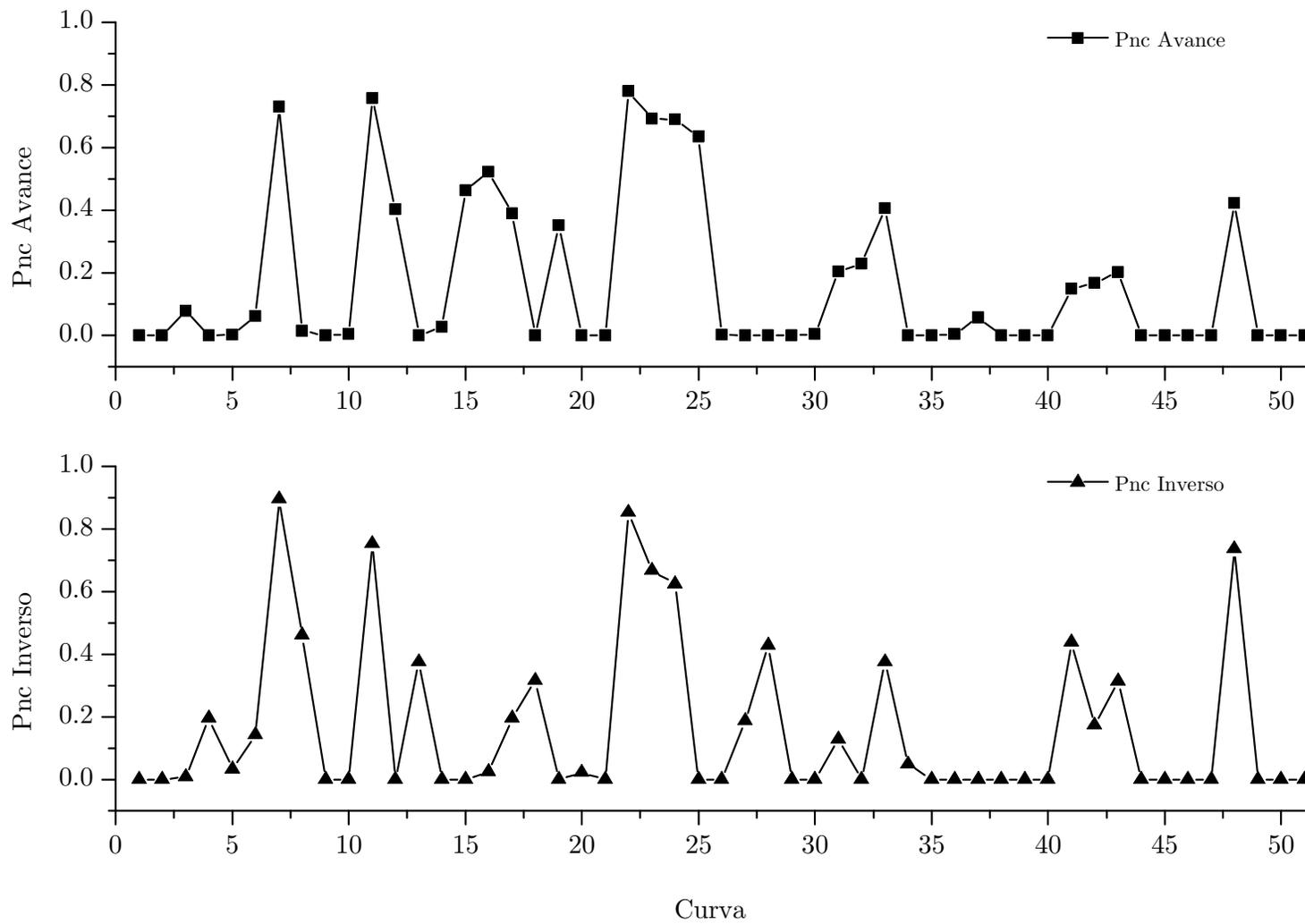
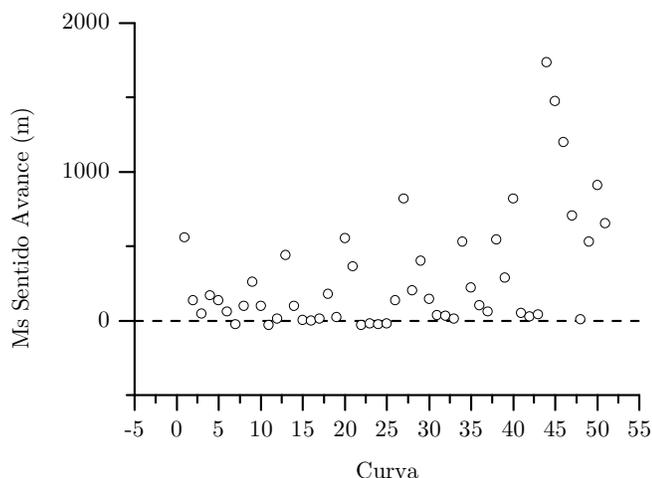
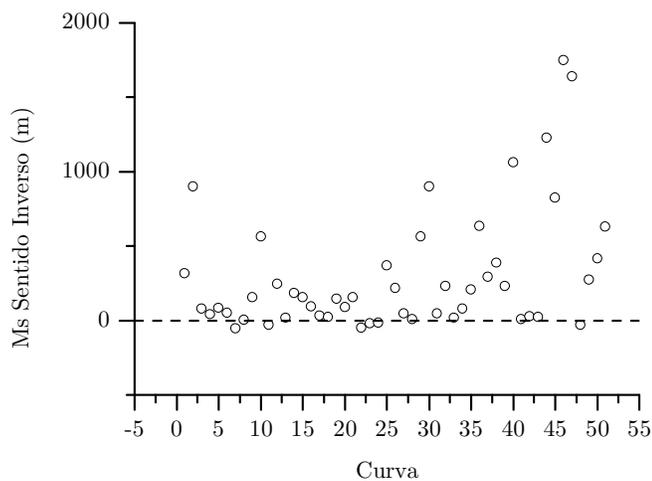


Figura 4.4. Pnc para cada curva en cada sentido de circulación

Así mismo la Figura 4.2 (d) y la Figura 4.3 (d) permiten establecer que bajo las condiciones de visibilidad y operación del corredor, el 25,5% de las curvas cumplirían con la distancia de visibilidad de parada requerida en el sentido del abcsisado y el 26,2% en el sentido inverso. De la misma manera, el 50% de las curvas tendrían una Pnc de 0,16 en ambos sentidos de circulación, mientras que el 15% de las curvas presentan Pnc superiores a 0,43. Adicionalmente, la Figura 4.5 y Figura 4.6 muestran que tan solo el 13,7% de las curvas presentan problemas de visibilidad en el sentido de avance y el 11,7% en el sentido inverso, es decir que la distancia de visibilidad de parada es mayor que la distancia de visibilidad disponible, lo cual en términos matemáticos quiere decir que el margen de seguridad (MS) es negativo. Estos resultados ratifican la distribución de las Pnc presentadas anteriormente.

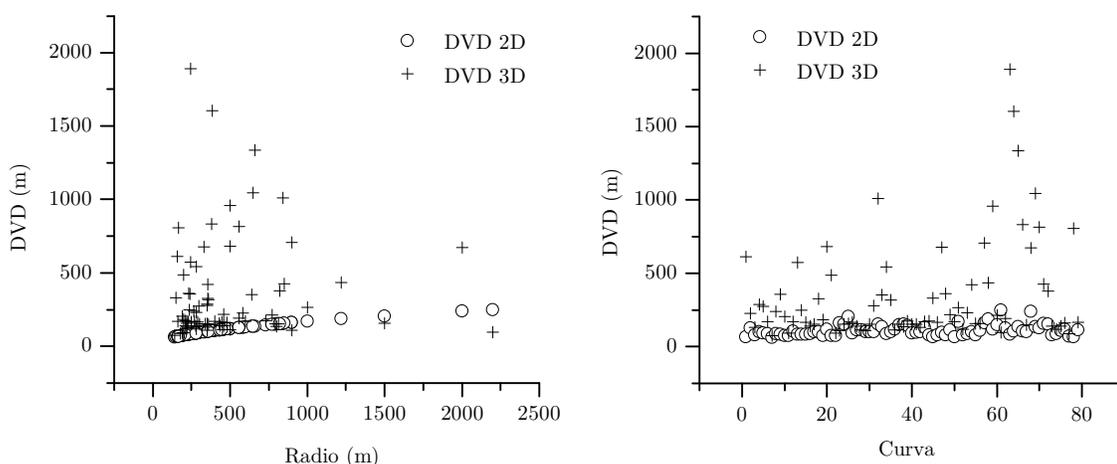


**Figura 4.5. Margen de seguridad sentido de avance**



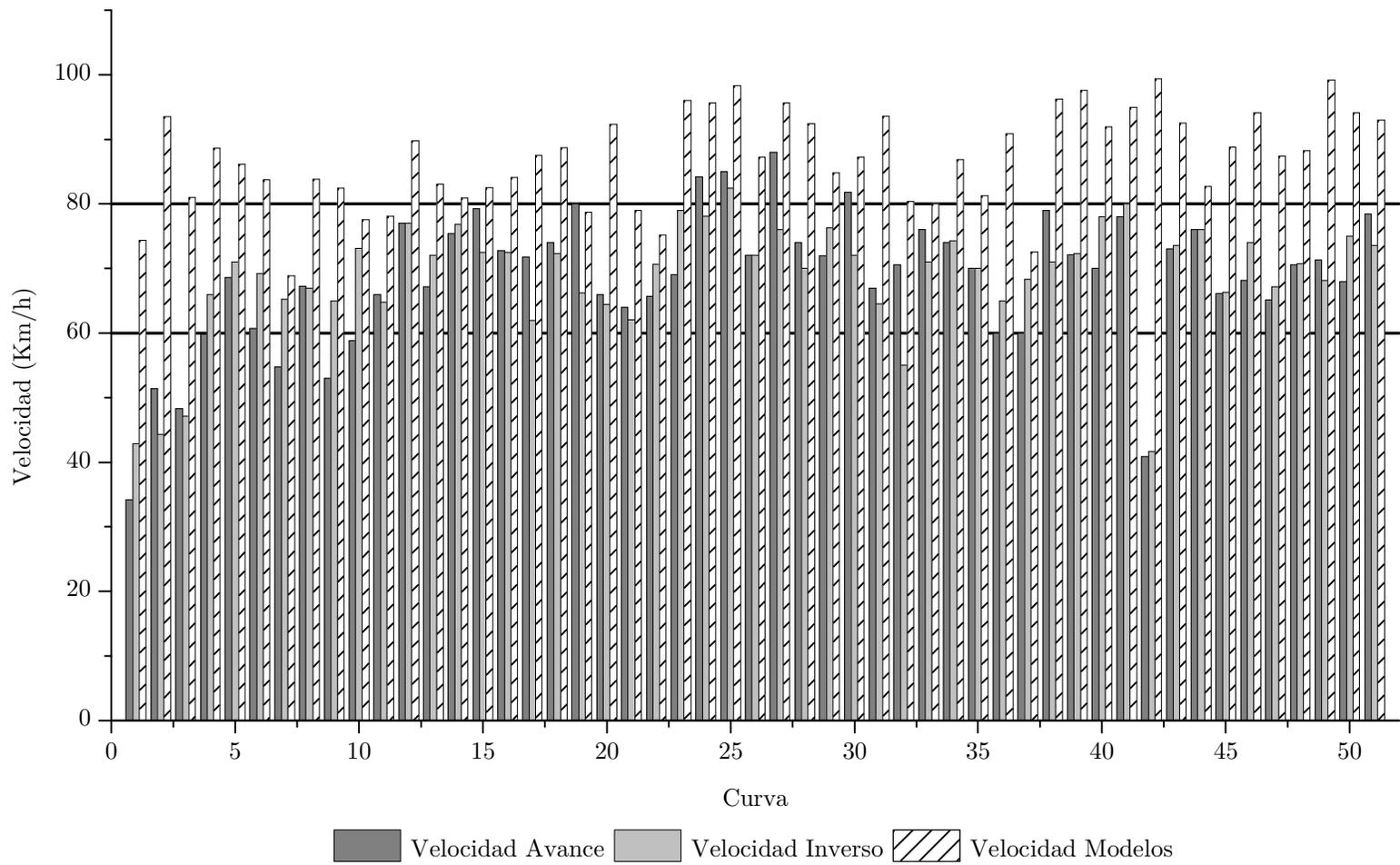
**Figura 4.6. Margen de seguridad sentido inverso**

Investigaciones realizados por Ibrahim, (2011), establecen que para un estudio de caso sobre una autopista en Canadá, el 20% de las curvas tendrían Pnc de alrededor de 0,12 mientras que el 50% de las curvas tendrían Pnc de 0,46 a partir de distancias de visibilidad en 2D y velocidades de operación calculadas por medio de modelos de predicción de velocidades encontrados en la literatura. Sin embargo, de acuerdo con lo establecido por Hassan et al., (2000) las distancias de visibilidad pueden variar significativamente en 2D y 3D. La Figura 4.7 muestra las diferencias encontradas al estimar la distancia de visibilidad en 3D con la metodología propuesta, y las distancias de visibilidad en 2D propuestas por Ibrahim, (2011). En el caso particular del presente estudio se evidencia que la distancia de visibilidad disponible 2D se subestima acercándose así a la distancia de visibilidad de parada, lo cual hace que la Pnc sea mayor.



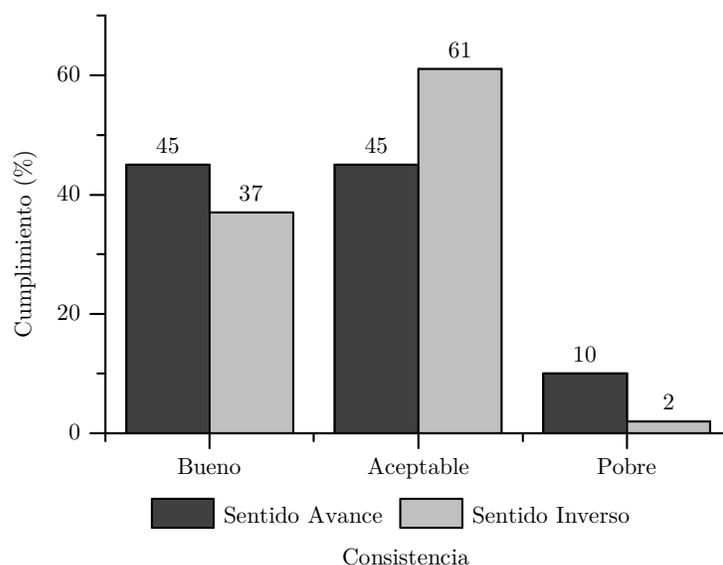
**Figura 4.7. Distancia de visibilidad disponible 2D vs 3D**

Como resultado tanto de la estimación de velocidades a partir de los modelos de predicción, véase el Anexo E, como del estudio de velocidades puntuales, se obtuvieron las velocidades de operación de cada una de las curvas. La Figura 4.8 presenta las diferencias encontradas en la estimación de velocidades, y permiten observar que en la mayoría de los casos los modelos de predicción sobreestiman la velocidad de operación (Echaveguren, 2012), ya que los modelos de predicción son desarrollados para condiciones geométricas y rasgos culturales de los usuarios de una zona en particular, lo cual también hace que la Pnc sea mayor. Estos resultados ratifican la importancia de realizar mediciones en campo que permitan establecer las condiciones reales del corredor.



**Figura 4.8. Técnicas de estimación de velocidad de operación**

De acuerdo con la Figura 4.8, el 84% de las curvas exceden la velocidad de diseño ( $V_d$ ) del corredor en estudio (60 Km/h) en el sentido de avance y el 90% en el sentido inverso. No obstante, de acuerdo con las especificaciones de diseño geométrico contenidas en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS 2008, los elementos de la geometría se deben diseñar con la velocidad específica, que es la velocidad máxima más probable con que sería abordado dicho elemento geométrico. Así mismo, la normativa establece que la velocidad específica de un determinado elemento debe estar entre la  $V_d$  y la  $V_d + 20$  Km/h. En función a lo anterior, la Figura 4.8 muestra que tan solo el 8% de las curvas exceden la velocidad específica del corredor (80 Km/h) en el sentido de avance y el 2% en el sentido inverso. Por otro lado, de acuerdo con los criterios de consistencia de (Lamm, Psarianos, Choueiri, & Soilemezoglou, 1998), el criterio I relaciona la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño para curvas aisladas, estableciendo los siguientes umbrales de consistencia: Bueno:  $V_{85} - V_d \leq 10$ , Aceptable:  $10 < V_{85} - V_d \leq 20$  y Pobre  $V_{85} - V_d > 20$



**Figura 4.9. Criterio de consistencia I, Lamm et al., 1998**

De acuerdo con la Figura 4.9, se puede observar que tan solo en el 10% de las curvas se presenta una consistencia pobre en el sentido de avance y el 2% en el sentido inverso, concluyendo de esta manera que el 90% y el 98% de las curvas se encuentran cumpliendo con los umbrales establecidos por la normatividad técnica local legal vigente.

## 4.2 Funciones de desempeño de seguridad

Con la información de accidentalidad registrada en las bases de datos del Ministerio de Transporte de Colombia, se construyeron las matrices base para la estimación de los accidentes, las cuales incluyen la longitud del segmento  $L(m)$ , el volumen vehicular TPDa (Veh/día), el número de accidentes registrados  $A$  y la  $Pnc$  calculada mediante el método FOSM para cada curva. Así mismo, con el objeto de evaluar la incidencia de la visibilidad en cada tipo de accidentes, se construyeron matrices discriminando por accidentes con solo daños y accidentes con lesionados y muertos, eliminando de las matrices aquellas curvas que no presentaran accidentes. Los modelos de predicción de accidentes que incluyen la  $Pnc$  como medida de riesgo se presentan en las Ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3), que corresponden al modelo de predicción para el total de accidentes (*tot*), solo daños (*sdo*) y muertos y heridos (*mhe*) respectivamente. El resultado de la estimación de los parámetros se presenta en la Tabla 4.1.

$$\hat{E}(y)_{tot} = 4,45 \times 10^{-4} \times L^{0,152} \times 2026 \times e^{0,490 \times Pnc} \quad (4.1)$$

$$\hat{E}(y)_{sdo} = 1,56 \times 10^{-4} \times L^{0,292} \times 2026 \times e^{0,735 \times Pnc} \quad (4.2)$$

$$\hat{E}(y)_{mhe} = 1,19 \times 10^{-4} \times L^{0,355} \times 2026 \times e^{0,751 \times Pnc} \quad (4.3)$$

Tabla 4.1. Parámetros de la función de desempeño de seguridad

Par,	Total ( <i>tot</i> )				Solo daños ( <i>sdo</i> )				Muertos y heridos ( <i>mhe</i> )			
	EST	SE	t	Prob> t	EST	SE	t	Prob> t	EST	SE	t	Prob> t
a0	4,45E-04	5,43E-04	0,820	0,419	1,56E-04	1,59E-04	0,977	0,340	1,19E-04	2,30E-04	0,517	0,612
a1	0,152	0,243	0,626	0,536	0,292	0,200	1,462	0,159	0,355	0,384	0,926	0,368
b1	0,490	0,421	1,166	0,253	0,735	0,444	1,656	0,113	0,751	0,496	1,516	0,148

Los parámetros estimados para el modelo muestran una relación positiva entre las variables incluidas y los accidentes calculados, principalmente con la  $Pnc$  como se esperaba. Además, el estadístico  $t$  de cada uno de los parámetros presenta un nivel de confianza del 95%. De acuerdo con los resultados, un cambio en 0,1 en la  $Pnc$  conlleva a un aumento de 0,097 en el total de accidentes, 0,104 en los accidentes con solo daños y 0,112 en los accidentes con muertos y heridos. La Figura 4.10 presenta la relación entre los accidentes calculados y la  $Pnc$  para una curva con valores medios de exposición ( $L=150m$ ;  $TPDA=2026$ ).

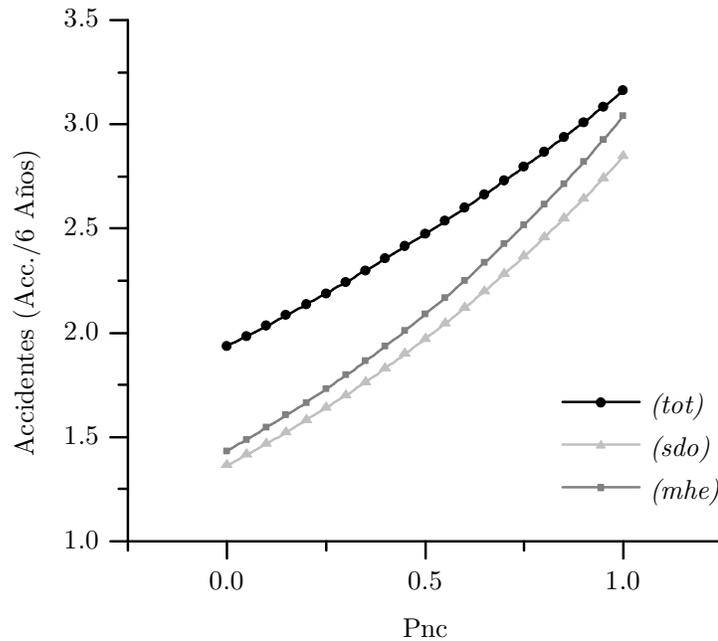


Figura 4.10. Relación entre los accidentes esperados y la Pnc

Los resultados del análisis de la bondad de ajuste para cada uno de los tres modelos, de acuerdo con el numeral 3.4.1.1 se presentan en la Tabla 4.2. De los cuales se puede concluir en función al estadístico de Pearson  $\chi^2$  que los modelos presentan un buen ajuste, con un nivel de confianza del 95%, ya que los valores obtenidos son menores que el valor crítico  $\chi^2(0.05)$  para un nivel de significancia de 5%. No obstante, el p valor para el modelo con el total de accidentes (0.6) permite inferir que la forma más adecuada de relacionar los accidentes con la Pnc es clasificándolos en función a la severidad del evento.

Tabla 4.2. Pruebas de bondad de ajuste de los modelos de predicción

Parámetro	Total	Solo Daños	Muertos y Heridos
$\chi^2 (0,05)$	42,56	31,41	27,59
GL*	29,00	20,00	17,00
$\chi^2$	26,96	7,52	11,01
p-valor	0,600	0,995	0,850

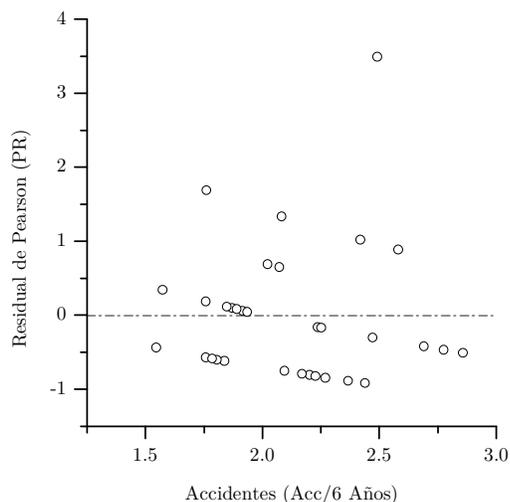
\*GL: Grados de libertad

Adicionalmente se utilizó el método gráfico propuesto por Z. A. Sawalha, (2002) para evaluar el ajuste de los datos, en el que se compara el Residual de Pearson (PR) respecto a la frecuencia de los accidentes estimados.

El Residual de Pearson (PR) se define como la diferencia entre el número de accidentes observados y estimados, dividido por la desviación estándar de los accidentes estimados, que para el caso de una distribución de Poisson es igual a la media esperada y se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$PR_i = \frac{y_i - Y_i}{\sqrt{Var(Y_i)}} \quad (4.4)$$

Gráficamente se puede decir que para un modelo cuyos datos se ajusten a los valores observados, el residual de Pearson debe acercarse a cero. Las Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13 muestran que las diferencias encontradas entre los accidentes estimados y los observados no son significativas tanto para el total de accidentes como para los accidentes solo daños y los accidentes con muertos y heridos. Así mismo, el residual de Pearson se ajusta de forma aceptable alrededor de cero, de acuerdo con (Z. A. Sawalha, 2002).



**Figura 4.11. Residuales de Pearson - modelo de predicción para el total de accidentes**

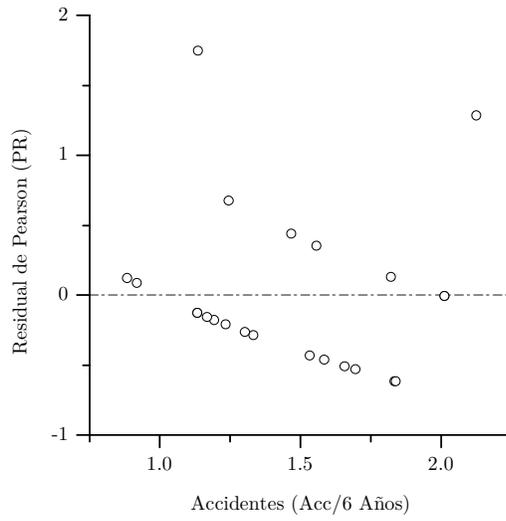


Figura 4.12. Residuales de Pearson - modelo de predicción para solo daños

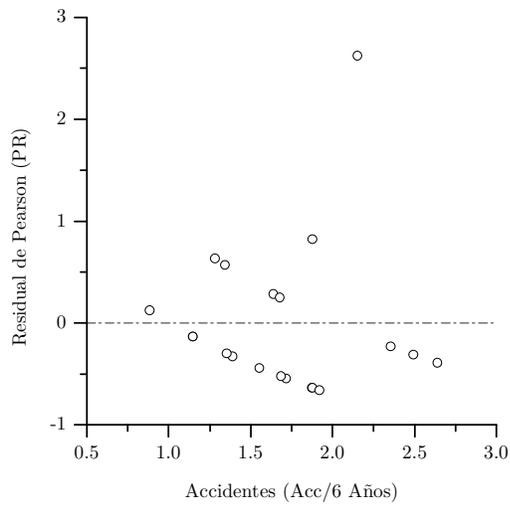


Figura 4.13. Residuales de Pearson - modelo de predicción para muertos y heridos

## 5 Conclusiones y recomendaciones

Diversos autores han resaltado la naturaleza determinista de los parámetros que definen el diseño geométrico de carreteras., y a su vez han recomendado la implementación de un enfoque de tipo probabilista que permita evaluar la variabilidad propia de los parámetros de diseño a través de los análisis por confiabilidad. Sin embargo, se hace necesario establecer la relación entre la Pnc como medida de riesgo y la ocurrencia de accidentes. De este modo, el presente estudio estableció un modelo de predicción de accidentes que incorpora la Pnc como medida de riesgo del diseño geométrico, en términos de visibilidad, a partir de un conjunto de curvas horizontales pertenecientes al corredor Plato y El Difícil en el departamento del Magdalena en Colombia. Entendiendo que la distancia de visibilidad condiciona la seguridad en las carreteras, los resultados del presente estudio muestran una relación positiva entre la Pnc como parámetro de riesgo y la ocurrencia de accidentes, adicionalmente los modelos planteados presentan valores estadísticos de ajuste con niveles de significancia del 95%.

Paralelamente se resalta la importancia de incorporar la variabilidad de los parámetros de diseño geométrico de carreteras a través de un análisis de confiabilidad para un conjunto de datos propios de un corredor vial en Colombia que incluyen distancias de visibilidad en 3D, velocidades de operación medidas en campo, tiempos de percepción reacción y tasas de desaceleración. Se realizaron análisis por confiabilidad a las distancias de visibilidad ofrecidas por la configuración tridimensional de la carretera y las distancias de visibilidad de parada requeridas bajo las condiciones de operación actuales. Los resultados del análisis muestran que a pesar que el corredor vial cumple con las especificaciones mínimas de diseño en relación a distancias de visibilidad contenidas en los manuales de diseño geométrico de carreteras, durante la fase de operación la variabilidad propia de los parámetros de diseño hacen que exista una probabilidad de no cumplimiento, es decir, bajo las condiciones de operación actuales de la vía existe el riesgo de no contar con la distancia de seguridad mínima para frenar.

Las diferentes técnicas de simulación aplicadas muestran que tan solo el 26% de las curvas cumplirían con la distancia de visibilidad de parada requerida, mientras que el 50% tendrían una Pnc de 0,17, esto permite concluir que en contraste con resultados obtenidos en otras investigaciones, la Pnc se reduce cuando se realiza un estudio más detallado de las variables de diseño.

Cabe resaltar que a pesar que el estudio se limitó al análisis de visibilidad en curvas horizontales, la metodología propuesta puede adaptarse a otros elementos geométricos.

De acuerdo con los resultados, un cambio en 0,1 en la Pnc conlleva a un aumento de 0,097 en el total de accidentes, 0,104 en los accidentes con solo daños y 0,112 en los accidentes con muertos y heridos. Sin embargo, el modelo propuesto corresponde a una primera aproximación y futuras investigaciones deben propender por emplear métodos estadísticos que permitan una mejor descripción de las variables que componen el problema y se resalta que la aplicabilidad de este modelo como medida de riesgo se encuentra delimitada a terrenos de tipo ondulados, montañosos y escarpados.

Adicionalmente, la presente investigación constató la pertinencia de realizar análisis de las distancias de visibilidad en 3D a partir del contraste con otras metodologías que evalúan la visibilidad en 2D. Los resultados evidencian una subestimación de la visibilidad en el corredor cuando se analiza información en 2D, lo cual aumenta las probabilidades de no cumplimiento y por ende el riesgo calculado en el corredor.

En relación a las velocidades de operación, aunque los modelos de predicción de velocidad encontrados en la literatura proporcionan una aproximación de las velocidades en función de las características geométricas de las carreteras, no permiten incluir ciertas condiciones reales de operación como el volumen y composición vehicular, motivos de viaje, condiciones ambientales entre otros. Sin embargo su uso y aplicación arrojan resultados aceptables, además de incorporar un factor de seguridad sobre la velocidad de operación del corredor, más aun cuando se trata de proyectos de carreteras nuevas en los que evidentemente no se pueden obtener velocidades en campo y se hace necesario la predicción de velocidades a partir de modelos matemáticos.

De esta forma, el desarrollo de esta investigación también constató la pertinencia de realizar mediciones de velocidad en campo que permitan evaluar dichas condiciones reales de operación, como resultado se evidencia una sobreestimación de las velocidades cuando se estiman mediante los modelos de predicción, lo cual también aumenta las probabilidades de no cumplimiento y a su vez el riesgo en el corredor.

Dentro de los resultados del estudio de velocidades de operación se observó que existe un número de curvas en las cuales se excede la velocidad específica del elemento geométrico, aumentando el riesgo dentro del corredor. Dado lo anterior, se hace necesario concientizar sobre la regulación de los límites de velocidad en las carreteras, ya que aun cuando en la práctica de la ingeniería de tránsito se asume que la mayoría de los conductores (85%) son capaces de considerar la velocidad a la que pueden viajar con seguridad, pueden existir conductores que estén en disposición de asumir riesgos más altos (ej. aceptación de una mayor probabilidad de accidentes y lesiones) y decidir conducir a velocidades por encima de los límites establecidos a cambio de reducir los tiempos de viaje. Así mismo, los motivos o propósitos de viaje tienen una influencia importante en la elección de la velocidad, generando una variabilidad en las velocidades de operación.

El principal objetivo de la regulación de los límites de velocidad es lograr un balance entre los tiempos de viaje y el riesgo dentro del corredor. En términos de seguridad vial, regular los límites de velocidad pueden tener diferentes funciones. La primera como función de limitación, la cual está orientada a la reducción tanto de la probabilidad como de la gravedad de los accidentes mediante el establecimiento de un límite de velocidad máxima. La segunda, como función de coordinación, de tal forma que se pueda reducir la dispersión de velocidades dentro de un tramo, reduciendo así la posibilidad de conflictos entre vehículos.

### **Investigaciones futuras**

Teniendo en cuenta que el Gobierno Nacional ha definido como una prioridad y como una Política de Estado la seguridad vial, a través del Plan Nacional de Seguridad Vial 2011 – 2016 establecido por el Ministerio de Transporte, el presente estudio puede considerarse como un paso adelante hacia el diseño geométrico orientado a la seguridad de las carreteras, contribuyendo además en la ampliación del estado del arte en relación al vínculo existente entre la probabilidad de no cumplir con las especificaciones técnicas de diseño teóricas y la ocurrencia de accidentes.

Al cuantificar la Pnc como medida de riesgo, se puede identificar los sectores de las carreteras más propensos a la ocurrencia de accidentes, y de esta forma priorizar la inversión de los recursos disponibles para los planes de seguridad vial.

Paralelamente, estudios ex ante y ex post, permitirían evaluar la eficacia de las medidas adoptadas para reducir la ocurrencia de accidentes. En este sentido, la metodología desarrollada en la presente investigación puede constituir un insumo fundamental en la toma de decisiones orientadas a la gestión de la infraestructura vial y la operación de las carreteras.

A pesar que la presente investigación procuró profundizar en el estudio de las variables que conforman el modelo, como la velocidad de operación medida en campo y su función de distribución, se hace necesario hacer el mismo procedimiento con las tasas de desaceleración y los tiempos de percepción reacción, de tal forma que se pueda ajustar mucho más el modelo a las condiciones del medio Colombiano.

Paralelamente, el estudio separado de cada una de las variables que componen el modelo y su relación con la frecuencia de accidentes permitiría establecer políticas encaminadas a garantizar la seguridad vial como:

- Establecer umbrales para el otorgamiento y vigencia de las licencias de conducción dado que los tiempos de percepción reacción pueden variar de acuerdo con la edad, niveles de estrés y la expectativa o estado de alerta de los conductores.
- Verificación de estándares mínimos de textura y rugosidad en los pavimentos de tal forma que la fricción entre la superficie de rodadura y las llantas de los vehículos garanticen las tasas de aceleración requeridas.

Futuras investigaciones pueden ser encaminadas al análisis de las probabilidades de no cumplimiento a partir de diferentes técnicas fílmicas para estimar las distancias de visibilidad combinadas con mediciones de velocidad de operación mediante datos GPS. Esta metodología permitiría realizar análisis por tipo de vehículo, además de obtener un registro continuo e integral de todo el corredor en estudio.

Finalmente, con el objeto de optimizar los modelos de predicción de accidentes, se recomienda prestar principal atención a los procedimientos de registro de los accidentes y clasificación de la información específicamente al posicionamiento y/o georreferenciamiento de estos eventos, de tal forma que se cuente con bases de datos lo suficientemente confiables como para clasificar los accidentes y realizar el análisis en función a diferentes características de ocurrencia.

## 6 Bibliografía

- Ackaah, W., & Salifu, M. (2011). Crash prediction model for two-lane rural highways in the Ashanti region of Ghana. *IATSS research*, 35(1), 34-40.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2004). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
- Ang, A. H.-S., & Tang, W. H. (1975). *Probability concepts in engineering planning and design*. Wiley (New York).
- Babkov, V. F. (1975). Road conditions and traffic safety.
- Box, P. C., & Oppenlander, J. C. (1995). *Manual de estudios de ingeniería de tránsito*. Representaciones y Servicios de Ingeniería.
- Cal & Mayor y Asociados, S. C., & Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá. (2005). *Manual de Planeación y Diseño Para la Administración del Tránsito y el Transporte en Santafé de Bogotá (Segunda.)*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Cameron, C. A., & Trivedi, P. K. (1998). *Regression Analysis of Count Data (Econometric Society Monographs)*.
- Ditlevsen, O., & Madsen, H. O. (1996). *Structural reliability methods (Vol. 178)*. Wiley New York.
- Easa, S. M. (1994). Reliability-based design of sight distance at railroad grade crossings. *Transportation research part A: policy and practice*, 28(1), 1-15.
- Easa, S. M., & You, Q. C. (2009). Collision prediction models for three-dimensional two-lane highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2092(1), 48-56.

- Echaveguren, T. (2012). Análisis de consistencia de caminos bidireccionales usando mediciones continuas de velocidad de operación obtenidas con GPS. *Revista ingeniería de construcción*, 27(2), 55-70.
- Echaveguren, T., Bustos, M., & De Solminihaç, H. (2005). Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), 1030-1038.
- Echaveguren, T., Vargas-Tejeda, S., Altamira, A., & Riveros, D. (2009). Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: velocidad, aceleración, visibilidad y confiabilidad. En *XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (15°: 2009: Mar del Plata). Memorias del XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Mar del Plata, Argentina.*
- El Khoury, J. (2005). *Accounting for risk and level of service in the design of passing sight distances*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- El-Basyouny, K., & Sayed, T. (2009). Accident prediction models with random corridor parameters. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5), 1118-1123.
- Faghiri, A., & Demetsky, M. J. (1988). Reliability and Risk Assessment in the Prediction of Hazards at Rail-Highway Grade Crossings. *Transportation Research Record*, (1160), 45-51.
- Fambro, D. B., Fitzpatrick, K., & Koppa, R. J. (1997). *Determination of stopping sight distances*. Transportation Research Board.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos digitales del terreno*. Pentalfa Oviedo.
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., ... Bauer, K. M. (2000). *Speed prediction for two-lane rural highways*.

- Fondo de Prevención Vial, & Universidad del Cauca. (2009). *Elaboración de Metodologías de Trabajo para la Señalización de Velocidad y Zonas de Adelantamiento en la Red Nacional de Carreteras* (Primera.). Popayán: Universidad del Cauca.
- Gibreel, G. M., Easa, S. M., Hassan, Y., & El-Dimeery, I. A. (1999). State of the art of highway geometric design consistency. *Journal of transportation engineering*, 125(4), 305-313.
- Glennon, J. C., Harwood, D. W., Free, S., & Gray, C. W. (1978). Highway design consistency and systematic design related to highway safety. *Transportation Research Record*, (681).
- Greibe, P. (2003). Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis & Prevention*, 35(2), 273-285.
- Hadayeghi, A. (2009). *Use of advanced techniques to estimate zonal level safety planning models and examine their temporal transferability*. University of Toronto.
- Hadi, M. A., Aruldas, J., Chow, L.-F., & Wattleworth, J. A. (1995). Estimating safety effects of cross-section design for various highway types using negative binomial regression. *Transportation Research Record*, 1500, 169.
- Hassan, Y., Gibreel, G., & Easa, S. M. (2000). Evaluation of highway consistency and safety: Practical application. *Journal of transportation engineering*, 126(3), 193-201.
- Haukaas, T. (2007). *Engineering Decision Making with Numerical Simulation Models*. Vancouver, BC, Canada.
- Hurtado, J. E. (2004). *Structural reliability: statistical learning perspectives* (Vol. 17). Springer.
- Ibrahim, S. E.-B. (2011). *Risk-based design of horizontal curves with restricted sight distance*. University of British Columbia.

- Ibrahim, S. E.-B., & Sayed, T. (2011). Developing safety performance functions incorporating reliability-based risk measures. *Accident Analysis & Prevention*, 43(6), 2153–2159.
- Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. (2008). Manual de Diseño Geométrico de Diseño de Carreteras.
- Ismail, K., & Sayed, T. (2009). Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(5), 743-753.
- Ismail, K., & Sayed, T. (2010). Risk-Based Highway Design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2195(1), 3-13.
- Jovanis, P. P., & Chang, H.-L. (1986). Modeling the relationship of accidents to miles traveled. *Transportation Research Record*, 1068, 42-51.
- Khoury, J. E., & Hobeika, A. G. (2007). Assessing the risk in the design of passing sight distances. *Journal of transportation engineering*, 133(6), 370-377.
- Kulmala, R. (1995). *Safety at Rural Three-And Four-Arm Junctions. Development and Application of Accident Prediction Models* (Vol. 233).
- Kulmala, R., & Roine, M. (1988). Accident prediction models for two lane roads in Finland. En *Traffic Safety Theory and Research Methods, 1988, Amsterdam, Netherlands. Session 4*.
- Lamm, R., Choueiri, E. M., Hayward, J. C., & Paluri, A. (1988). *Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads*.
- Lamm, R., Choueri, E. M., & Mailaender, T. (1991). Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, (1303).

- Lamm, R., Hayward, J. C., & Cargin, J. G. (1986). Comparison of different procedures for evaluating speed consistency. *Transportation Research Record*, (1100).
- Lamm, R., Psarianos, B., Choueiri, E. M., & Soilemezoglou, G. (1998). *A practical safety approach to highway geometric design international case studies: Germany, Greece, Lebanon, and the United States*.
- Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook* (Vol. 2). McGraw-Hill New York.
- Layton, R., & Dixon, K. (2012). *Stopping Sight Distance* (pp. 1-28). Oregon Department of Transportation.
- Lee, J., Nam, D., & Park, D. (2005). Analyzing the relationship between grade crossing elements and accidents. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 3658-3668.
- Lerner, N. (1995). Age and driver perception-reaction time for sight distance design requirements. En *1995 Compendium of Technical Papers. Institute of Transportation Engineers 65th Annual Meeting*.
- McCullagh, P., & Nelder, J. A. (1989). General linear models. *Chapman and Halls, London*.
- McLean, J. (1981). Driver speed behaviour and rural road alignment design. *Traffic Engineering & Control*, 22(HS-032 471).
- Messer, C. J. (1980). Methodology for evaluating geometric design consistency. *Transportation Research Record*, (757).
- Miaou, S.-P. (1994). The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions. *Accident Analysis & Prevention*, 26(4), 471-482.

- Miaou, S.-P., Hu, P. S., Wright, T., Rathi, A. K., & Davis, S. C. (1992). Relationship between truck accidents and highway geometric design: a Poisson regression approach. *Transportation Research Record*, (1376).
- Miaou, S.-P., & Lum, H. (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. *Accident Analysis & Prevention*, 25(6), 689-709.
- Moyer, R. A., & Berry, D. S. (1941). Marking highway curves with safe speed indications. En *Highway Research Board Proceedings* (Vol. 20).
- Navin, F. P. (1990). Safety factors for road design: Can they be estimated? *Transportation Research Record*, (1280).
- Navin, F. P. (1991). Safe road design as limit state. En *Proceedings of the Conference, Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents, Part Two*.
- Olson, P. L., Cleveland, D. E., Fancher, P. S., Kostyniuk, L. P., & Schneider, L. W. (1984). *Parameters affecting stopping sight distance*.
- Rengarasu, T. M., Hagiwara, T., & Hirasawa, M. (2009). Effects of road geometry and cross-section variables on traffic accidents. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2102(1), 34-42.
- Richl, L. A. (2003). *Reliability based highway geometric design*. University of British Columbia.
- Richl, L., & Sayed, T. (2006). Evaluating the safety risk of narrow medians using reliability analysis. *Journal of transportation engineering*, 132(5), 366-375.
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 72(10), 3812-3814.
- Sánchez Silva, M. (2005). *Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos. Teoría y aplicaciones en ingeniería*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería.

- Sarhan, M., & Hassan, Y. (2008). Three-dimensional, probabilistic highway design: sight distance application. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2060(1), 10-18.
- Sarhan, M., & Hassan, Y. (2009). Reliability-based methodology to calculate lateral clearance on three-dimensional alignment. En *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*.
- Sawalha, Z. A. (2002). *Traffic Accident Modeling: Statistical Issues and Safety*. University of British Columbia.
- Sawalha, Z., & Sayed, T. (2006). Traffic accident modeling: some statistical issues. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(9), 1115-1124.
- Silyanov, V. V. (1973). Comparison of the pattern of accident rates on roads of different countries. *Traffic Engineering & Control*, 14(9).
- Sparks, J. W. (1968). The Influence of Highway Characteristics on Accident Rates. *Public Works*, 99.
- Urbanik, I. I., Hinshaw, W., & Fambro, D. B. (1989). Safety effects of limited sight distance on crest vertical curves. *Transportation Research Record*, (1208).
- Wang, J., Hughes, W. E., & Stewart, R. (1998). *Safety effects of cross-section design for rural, four-lane, non-freeway highways*.
- Wilson, T. D. (1968). Road Safety By Design. *J. Inst. of Hwy. Engrs*, 15, 23-33.
- Winkelmann, R. (2003). *Econometric Analysis of Count Data*. Springer.

## **Anexo A. Geometría de la Vía Objeto de Estudio**

**Tabla A.1. Geometría de la vía objeto de estudio**

Pi	Coordenadas		Deflexión	Sentido	Radio (m)	Le (m)	Lc (m)	P%	Abscisas			
	Norte (m)	Este (m)							Te/Pc	Ec	Ce	Et/Pt
1	1574969,053	923356,244	21° 59' 20"	I	156,340	60,000	0,000	2,2	K3+994,66	K4+054,66	K4+054,66	K4+114,66
2	1575062,837	923764,388	03° 22' 34"	D	580,000		34,177	6,0	K4+455,84			K4+490,02
3	1575096,541	923962,938	18° 10' 32"	I	220,664	70,000	0,000	5,7	K4+603,90	K4+673,90	K4+673,90	K4+743,90
4	1575323,579	924391,710	06° 19' 43"	I	350,000		38,659	-3,2	K5+139,31			K5+177,97
5	1575459,858	924592,319	11° 34' 29"	D	297,004	60,000	0,000	-3,0	K5+341,01	K5+401,01	K5+401,01	K5+461,01
6	1575817,941	925468,939	35° 33' 28"	I	270,000	75,000	92,562	6,8	K6+223,47	K6+298,47	K6+391,04	K6+466,04
7	1576065,172	925622,727	52° 43' 50"	D	140,000	70,000	58,845	5,7	K6+527,83	K6+597,83	K6+656,67	K6+726,67
8	1576104,862	926034,984	21° 48' 21"	I	262,753	100,000	0,000	-7,5	K6+934,94	K7+034,94	K7+034,94	K7+134,94
9	1576230,059	926275,958	19° 08' 06"	D	239,542	80,000	0,000	0,7	K7+225,11	K7+305,11	K7+305,11	K7+385,11
10	1576267,034	926528,837	28° 29' 05"	I	191,088	95,000	0,000	6,9	K7+463,75	K7+558,75	K7+558,75	K7+653,75
11	1576436,297	926755,068	42° 09' 48"	D	200,000	65,000	82,178	5,0	K7+729,98	K7+794,98	K7+877,15	K7+942,15
12	1576304,798	928156,662	11° 28' 23"	I	399,515	80,000	0,000	-0,5	K9+159,81	K9+239,81	K9+239,81	K9+319,81
13	1576322,079	928318,007	14° 03' 09"	D	244,636	60,000	0,000	0,1	K9+341,67	K9+401,67	K9+401,67	K9+461,67
14	1576264,118	928733,614	48° 13' 16"	I	235,000	70,000	127,780	3,6	K9+680,55	K9+750,55	K9+878,33	K9+948,33
15	1576785,936	929347,756	35° 04' 51"	D	250,000	70,000	83,069	4,5	K10+499,44	K10+569,44	K10+652,51	K10+722,51
16	1576859,313	930139,258	33° 08' 27"	I	275,000	75,000	84,064	3,1	K11+283,59	K11+358,59	K11+442,66	K11+517,66
17	1577458,291	930893,970	30° 56' 31"	I	350,000	70,000	119,014	4,4	K12+229,60	K12+299,60	K12+418,61	K12+488,61
18	1577762,382	931008,396	07° 12' 10"	D	355,000		44,627	0,4	K12+659,15			K12+703,78
19	1578000,635	931134,137	25° 33' 35"	I	200,000	70,000	19,220	1,7	K12+870,27	K12+940,27	K12+959,49	K13+029,49
20	1578188,614	931140,565	02° 42' 46"	D	500,000		23,673	0,8	K13+125,19			K13+148,86
21	1578319,003	931150,610	21° 34' 10"	D	200,000	60,000	15,292	0,4	K13+199,58	K13+259,58	K13+274,87	K13+334,87

Pi	Coordenadas		Deflexión	Sentido	Radio (m)	Le (m)	Lc (m)	P%	Abscisas			
	Norte (m)	Este (m)							Te/Pc	Ec	Ce	Et/Pt
22	1578931,697	930971,265	85° 23' 15"	I	190,000	70,000	213,156	2,7	K13+693,83	K13+763,83	K13+976,99	K14+046,99
23	1579754,273	933041,497	08° 57' 12"	I	900,000		140,637	4,3	K15+993,06			K16+133,70
24	1580085,003	933592,827	05° 13' 54"	D	813,000		74,235	-2,1	K16+669,02			K16+743,25
25	1580554,035	934564,854	03° 12' 02"	I	1500,000		83,793	4,6	K17+743,48			K17+827,27
26	1581765,224	942790,015	37° 02' 34"	I	350,000	70,000	156,282	1,2	K26+123,02	K26+193,02	K26+349,30	K26+419,30
27	1582977,065	943991,303	11° 08' 53"	D	840,000		163,441	-0,4	K27+891,24			K28+054,68
28	1583755,926	945152,446	54° 24' 13"	D	640,000		607,695	-1,5	K29+041,94			K29+649,63
29	1583529,353	945752,759	24° 20' 17"	I	280,000	60,000	58,938	0,1	K29+871,85	K29+931,85	K29+990,79	K30+050,79
30	1583556,479	946176,797	46° 10' 39"	D	360,000	70,000	220,142	-0,1	K30+196,51	K30+266,51	K30+486,65	K30+556,65
31	1579955,314	955246,294	06° 41' 04"	I	600,002	70,000	0,000	-2,5	K40+558,05	K40+628,05	K40+628,05	K40+698,05
32	1579723,924	955588,031	13° 38' 27"	D	210,017	50,000	0,000	-0,5	K40+990,54	K41+040,54	K41+040,54	K41+090,54
33	1579175,355	955853,938	59° 45' 47"	I	229,000	60,000	178,861	2,4	K41+500,75	K41+560,75	K41+739,61	K41+799,61
34	1579072,004	956288,372	26° 43' 59"	D	330,000	80,000	73,971	0,9	K41+965,65	K42+045,65	K42+119,62	K42+199,62
35	1578599,094	956847,652	29° 24' 29"	I	230,000	70,000	48,051	0,9	K42+717,89	K42+787,89	K42+835,94	K42+905,94
36	1578435,463	957679,951	18° 23' 35"	D	460,000	80,000	67,668	2,7	K43+544,05	K43+624,05	K43+691,72	K43+771,72
37	1577919,709	958589,303	50° 12' 49"	I	160,000	80,000	60,222	0,8	K44+586,93	K44+666,93	K44+727,15	K44+807,15
38	1576470,043	961901,301	05° 01' 22"	I	900,000		78,897	-0,5	K48+514,62			K48+593,52
39	1576069,731	962653,867	04° 09' 46"	D	1220,000		88,637	-1,6	K49+362,14			K49+450,77
40	1575892,234	962936,028	12° 37' 14"	I	500,000		110,136	-0,9	K49+684,49			K49+794,63
41	1575555,480	963884,260	17° 23' 49"	I	769,367		233,605	0,4	K50+627,88			K50+861,48
42	1575514,717	965186,983	02° 16' 57"	I	2200,000		87,646	3,7	K52+003,32			K52+090,97
43	1575530,202	967092,904	20° 14' 52"	D	555,000	80,000	116,131	-1,9	K53+813,95	K53+893,95	K54+010,08	K54+090,08
44	1575145,033	968163,795	16° 33' 13"	I	242,285	70,000	0,000	0,3	K55+018,61	K55+088,61	K55+088,61	K55+158,61

Pi	Coordenadas		Deflexión	Sentido	Radio (m)	Le (m)	Lc (m)	P%	Abscisas			
	Norte (m)	Este (m)							Te/Pc	Ec	Ce	Et/Pt
45	1575131,422	968405,104	25° 12' 37"	D	385,000	70,000	99,400	-0,1	K55+208,75	K55+278,75	K55+378,15	K55+448,15
46	1574991,722	968663,056	08° 41' 24"	I	659,327	100,000	0,000	-0,1	K55+520,17	K55+620,17	K55+620,17	K55+720,17
47	1574841,809	969080,628	57° 35' 29"	I	380,000	70,000	311,960	0,7	K55+819,55	K55+889,55	K56+201,51	K56+271,51
48	1575509,839	969940,525	19° 45' 22"	D	360,000	60,000	64,132	2,3	K57+023,49	K57+083,49	K57+147,62	K57+207,62
49	1575645,602	970356,224	02° 45' 01"	I	2000,000		96,002	-1,1	K57+504,16			K57+600,17
50	1576075,339	971483,182	06° 12' 16"	D	646,417	70,000	0,000	-0,6	K58+688,22	K58+758,22	K58+758,22	K58+828,22
51	1576130,509	971692,923	07° 13' 30"	I	555,123	70,000	0,000	0,2	K58+904,98	K58+974,98	K58+974,98	K59+044,98

Pi: Punto de intersección

Le: Longitud de la espiral

Lc: Longitud de la curva circular

P: Pendiente longitudinal

Te: Punto tangente espiral

Ec: Punto espiral curva circular

Ce: Punto curva circular espiral

Et: Punto espiral tangente

Pc: Punto de curvatura

Pt: Punto de tangencia

## **Anexo B. Estudio de Velocidades**

**Tabla B.1. Estudio de velocidades**

Numero Curva	Sentido de Avance					Sentido de Inverso				
	Media	V85	Desviación	Mínimo	Máximo	Media	V85	Desviación	Mínimo	Máximo
1	28,85	34,20	6,08	14,00	37,00	34,86	42,85	7,62	20,00	51,00
2	42,16	51,40	9,94	22,00	58,00	34,85	44,30	9,11	20,00	49,00
3	38,05	48,30	8,62	25,00	50,00	37,52	47,10	8,18	24,00	54,00
4	50,28	59,80	8,38	37,00	63,00	57,15	66,00	10,10	39,00	66,00
5	58,92	68,55	8,04	47,00	71,00	62,82	71,00	9,22	45,00	80,00
6	51,88	60,75	8,25	39,00	68,00	57,74	69,20	8,87	39,00	73,00
7	40,68	54,70	10,80	27,00	60,00	56,15	65,20	9,14	40,00	70,00
8	56,88	67,20	8,81	43,00	71,00	60,82	67,00	10,14	41,00	76,00
9	42,67	53,00	8,42	27,00	56,00	54,86	65,00	8,85	41,00	69,00
10	51,68	58,80	7,48	38,00	70,00	61,58	73,10	9,13	48,00	77,00
11	51,71	66,00	9,96	37,00	68,00	53,96	64,75	9,56	39,00	73,00
12	67,10	77,00	9,77	54,00	86,00	65,52	77,00	10,00	48,00	78,00
13	59,13	67,10	8,47	46,00	80,00	62,20	72,00	8,69	48,00	80,00
14	65,30	75,35	10,21	51,00	83,00	65,91	76,85	9,79	51,00	84,00
15	68,45	79,30	9,93	55,00	83,00	64,35	72,45	8,18	51,00	80,00
16	61,74	72,80	9,44	47,00	80,00	63,84	72,50	8,56	50,00	78,00
17	59,40	71,80	9,37	44,00	76,00	58,38	62,00	6,12	50,00	72,00
18	64,95	74,00	8,37	51,00	78,00	65,40	72,30	7,24	53,00	76,00
19	69,95	80,00	9,91	55,00	84,00	57,41	66,25	8,23	47,00	78,00
20	56,76	66,00	8,61	44,00	73,00	55,80	64,40	9,53	40,00	76,00
21	52,88	64,00	9,39	40,00	71,00	52,63	62,10	8,75	40,00	69,00

Numero Curva	Sentido de Avance					Sentido de Inverso				
	Media	V85	Desviación	Mínimo	Máximo	Media	V85	Desviación	Mínimo	Máximo
22	57,18	65,70	7,40	44,00	72,00	61,61	70,70	9,46	46,00	77,00
23	58,91	69,00	9,50	45,00	74,00	67,90	79,00	8,89	53,00	81,00
24	73,65	84,15	9,93	60,00	87,00	69,75	78,15	8,94	52,00	82,00
25	76,57	85,00	9,14	61,00	90,00	71,60	82,45	9,19	57,00	88,00
26	64,76	72,00	8,38	50,00	80,00	63,41	72,00	9,61	48,00	85,00
27	75,65	88,00	9,73	62,00	90,00	64,71	76,00	9,08	51,00	77,00
28	65,60	74,00	7,96	53,00	78,00	61,77	70,00	9,37	50,00	83,00
29	64,21	71,90	8,10	50,00	81,00	69,70	76,30	7,77	57,00	85,00
30	71,64	81,85	9,12	57,00	84,00	63,60	72,00	7,94	50,00	74,00
31	60,95	67,00	8,59	50,00	83,00	56,73	64,55	8,20	46,00	78,00
32	63,82	70,60	7,50	46,00	72,00	49,71	55,00	5,72	41,00	63,00
33	64,60	76,00	9,64	50,00	81,00	63,18	71,00	8,23	50,00	76,00
34	66,18	74,00	8,48	52,00	78,00	66,95	74,30	7,10	56,00	82,00
35	63,71	70,00	8,35	50,00	79,00	60,83	70,00	9,15	45,00	71,00
36	50,57	60,00	8,29	35,00	61,00	55,33	65,00	8,75	44,00	67,00
37	53,73	60,00	6,06	45,00	65,00	60,45	68,30	8,08	45,00	77,00
38	72,05	79,00	8,00	58,00	85,00	62,57	71,00	8,55	50,00	81,00
39	65,75	72,15	8,08	50,00	86,00	63,72	72,35	8,45	50,00	82,00
40	64,57	70,00	6,90	50,00	79,00	68,90	78,00	8,56	57,00	84,00
41	71,10	78,00	8,41	56,00	84,00	69,85	80,00	8,76	52,00	81,00
42	31,59	40,85	9,18	20,00	50,00	33,79	41,65	7,25	20,00	46,00
43	63,24	73,00	8,72	47,00	79,00	65,36	73,55	8,47	50,00	80,00
44	66,22	76,00	7,73	53,00	77,00	70,76	76,00	8,26	57,00	88,00

Numero Curva	Sentido de Avance					Sentido de Inverso				
	Media	V85	Desviación	Mínimo	Máximo	Media	V85	Desviación	Mínimo	Máximo
45	58,30	66,15	7,98	46,00	76,00	56,84	66,30	7,74	46,00	74,00
46	58,13	68,10	8,33	45,00	74,00	67,38	74,00	7,31	56,00	79,00
47	57,50	65,15	6,17	48,00	72,00	62,30	67,15	6,44	50,00	74,00
48	59,50	70,60	9,51	50,00	78,00	65,25	70,75	8,00	51,00	81,00
49	63,30	71,30	7,91	50,00	74,00	59,80	68,15	6,43	52,00	71,00
50	60,90	68,00	7,37	50,00	74,00	63,10	75,00	8,54	50,00	78,00
51	71,33	78,45	8,29	57,00	86,00	64,74	73,60	7,40	56,00	83,00

Nota: Todas las medidas están dadas en Km/h.

**Anexo C. Medidas de Ajuste de la Prueba  
Kolmogorov Smirnov**

**Tabla C.1. Medidas de ajuste de la prueba Kolmogorov Smirnov**

No Curva	H	P	Ks	Cv
1	0	0,7276	0,0902	0,1798
2	0	0,8021	0,0925	0,1984
3	0	0,3881	0,1297	0,1963
4	0	0,3940	0,1305	0,1984
5	0	0,7575	0,0957	0,1963
6	0	0,7214	0,0941	0,1866
7	0	0,5926	0,1069	0,1903
8	0	0,2533	0,1447	0,1942
9	0	0,8148	0,0913	0,1984
10	0	0,5300	0,1123	0,1903
11	0	0,5915	0,1092	0,1942
12	0	0,6911	0,1074	0,2076
13	0	0,8956	0,0842	0,2028
14	0	0,9321	0,0799	0,2052
15	0	0,2729	0,1527	0,2101
16	0	0,4812	0,1258	0,2052
17	0	0,4206	0,1225	0,1903
18	0	0,5037	0,1250	0,2076
19	0	0,3833	0,1346	0,2028
20	0	0,7318	0,0980	0,1963
21	0	0,7294	0,0953	0,1903
22	0	0,6371	0,1075	0,1984
23	0	0,6495	0,1087	0,2028
24	0	0,5675	0,1203	0,2101
25	0	0,1954	0,1643	0,2076
26	0	0,7425	0,1003	0,2028
27	0	0,7772	0,0993	0,2076
28	0	0,4008	0,1342	0,2052
29	0	0,7010	0,1091	0,2127
30	0	0,9485	0,0769	0,2052
31	0	0,5458	0,1182	0,2028
32	0	0,5666	0,1234	0,2155
33	0	0,6725	0,1022	0,1942

No Curva	H	P	Ks	Cv
34	0	0,8378	0,0919	0,2052
35	0	0,1323	0,1718	0,2006
36	0	0,3735	0,1342	0,2006
37	0	0,3059	0,1455	0,2052
38	0	0,7864	0,0984	0,2076
39	0	0,8107	0,0995	0,2155
40	0	0,5695	0,1160	0,2028
41	0	0,4389	0,1316	0,2076
42	0	0,8390	0,0879	0,1963
43	0	0,8511	0,0895	0,2028
44	0	0,6337	0,1089	0,2006
45	0	0,5859	0,1200	0,2127
46	0	0,7043	0,1026	0,2006
47	0	0,0876	0,1933	0,2101
48	0	0,2027	0,1649	0,2101
49	0	0,6679	0,1109	0,2101
50	0	0,7650	0,0993	0,2052
51	0	0,1134	0,1922	0,2183

H: Tipo de hipótesis aceptada; 0 acepta la hipótesis nula, 1 rechaza la hipótesis nula.

P: Valor P de la prueba Kolmogorov Smirnov.

Ks: Medida estadística de la prueba Kolmogorov Smirnov.

Cv: Valor crítico de la prueba Kolmogorov Smirnov.

## Anexo D. Rutinas Matlab

## Rutina D.1. Calculo de la probabilidad de no cumplimiento por el método FOSM

```
%FORMATO PARA LA PRESENTACIÓN DE LOS DATOS
format short;
```

```
%LIMPIA LA PANTALLA Y LAS VARIABLES
clear all;
clc;
```

```
%DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES
```

```
char file;
double DVD;
double P;
double V85;
double A;
double t;
double DVDFILA;
double DVDCOL;
char opcion;
double cdatos;
int16 s;
double Derivv;
double Derivt;
double Deriva;
double CURVAS;
double MS;
double ms;
double dvd;
double dvp;
double SIZE;
double stdms;
double PncTOTAL;
double PncSTDTOTAL;
double PROMEDIOSCURVAS;
double STDCURVAS;
double cdatosC;
int16 j;
int16 i;
double Pnc;
double fdv;
double fdt;
double fda;
double v;
double p;
double a;
double t;
double x;
double y1;
double y2;
```

```

disp('CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO DE LA DISTANCIA DE
VISIBILIDAD DE PARADA')
disp('SERIES DE TAYLOR')
disp(' ')
disp('ELABORADO POR:')
disp('JULIAN DAVID CHALA GOMEZ')
disp('MAURO ALEJANDRO VEGA PARRA')
disp(' ')
disp('LA HOJA DE EXCEL DEBE TENER CINCO (5) HOJAS EN DONDE SE ENCUENTREN
LOS DATOS NECESARIOS (VER HOJA DE EJEMPLO
DATOS_DE_ANALISIS_AVANCE.xlsx),')
disp('EL NOMBRE DE CADA UNA DE ESTAS HOJAS DEBE SER DVD, P, V85, a, t
RESPETANDO LAS MAYÚSCULAS Y LAS MINÚSCULAS.')
```

```

disp(' ')

%SELECCION DEL ARCHIVO
file=input('INGRESE EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE EXCEL (ARCHIVO.xls Ó
ARCHIVO.xlsx): ', 's');

%LECTURA DE LOS DATOS DE CADA UNA DE LAS HOJAS
DVD=xlsread(file, 'DVD');
P=xlsread(file, 'P');
V85=xlsread(file, 'V85');
A=xlsread(file, 'a');
T=xlsread(file, 't');

%DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS MATRICES
[DVDFILA, DVDCOL]=size(DVD);

disp(' ')
opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS DATOS LEIDOS? (Si No) :', 's');

if opcion=='Si'
    %PRESENTACION DE LOS DATOS LEIDOS
    cdatos=cell(DVDFILA+1, DVDCOL+4);
    cdatos{1,1}='DATO No. ';
    cdatos{1,2}='DVD (m)';
    cdatos{1,3}='PENDIENTE (%)';
    cdatos{1,4}='V85 (Km/h)';
    cdatos{1,5}='DESV. V85 (Km/h)';

    %ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
    for s=1:DVDFILA
        cdatos{s+1,1}=s;
        cdatos{s+1,2}=DVD(s,1);
        cdatos{s+1,3}=P(s,1)*100;
        cdatos{s+1,4}=V85(s,1);
        cdatos{s+1,5}=V85(s,2);
    end

    %PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
    disp(' ')
end

```

```

disp('*****DATOS
LEIDOS*****')
disp(cdatos)
disp(' ')
pause
else
disp(' ')
end

%DEFINICION DE LAS MATRICES DE CEROS

Derivv=zeros(DVDFILA,1);
Derivt=zeros(DVDFILA,1);
Deriva=zeros(DVDFILA,1);
CURVAS=zeros(DVDFILA,3);

%DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES SIMBOLICAS PARA DETERMINAR LA DERIVADA
PARCIAL
%DE CADA UNA DE LAS VARIABLES ALEATORIAS
syms v a t p dvd

%FUNCIÓN OBJETIVO - MARGEN DE SEGURIDAD
MS=dvd-(((0.278*v*t)+((v^2)./(254*((a/9.81)+p)))));
disp('FUNCIÓN OBJETIVO DEL SISTEMA (MARGEN DE SEGURIDAD MS)')
pretty(MS)
disp(' ')

%DERIVADA PARCIAL RESPECTO A LA VELOCIDAD
fdv=diff(MS,v,1);
disp('DERIVADA PARCIAL DEL MS RESPECTO A LA VELOCIDAD')
pretty(fdv)
disp(' ')

%DERIVADA PARCIAL RESPECTO AL TIEMPO DE PERCEPCIÓN REACCIÓN
fdt=diff(MS,t,1);
disp('DERIVADA PARCIAL DEL MS RESPECTO AL TIEMPO DE PERCEPCIÓN REACCIÓN')
pretty(fdt)
disp(' ')
pause

%DERIVADA PARCIAL RESPECTO A LA DESACELERACIÓN
fda=diff(MS,a,1);
disp('DERIVADA PARCIAL DEL MS RESPECTO A LA DESACELERACIÓN')
pretty(fda)
disp(' ')

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABCISA O CURVA
for i=1:DVDFILA;
v= V85(i,1);
a= A(1,1);
t=T(1,1);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

```

```

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS MEDIO
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABCSCISA O CURVA
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABCSCISA O CURVA
CURVAS(i,2)=ms;

%EVALUA LAS DERIVADAS PARA CADA ABCSCISA O CURVA
Derivv(i,1)=eval(fdv);
Derivt(i,1)=eval(fdt);
Deriva(i,1)=eval(fda);

%CALCULA LA DESVIACIÓN ESTANDAR PARA CADA ABCSCISA O CURVA
stdms=((Derivv(i,1)*V85(i,2))^2)+((Derivt(i,1)*T(1,2))^2)+((Deriva(i,1)*
A(1,2))^2))^0.5;

%ALMACENA LA DESVIACIÓN ESTANDAR PARA CADA ABCSCISA O CURVA
CURVAS(i,3)=stdms;

%CALCULA LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO PARA CADA ABCSCISA O CURVA
Pnc = normcdf(0,ms,stdms);

%ALMACENA LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO PARA CADA ABCSCISA O CURVA
CURVAS(i,1)=Pnc;
end

opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS DATOS CALCULADOS? (Si No) :','s');

if opcion=='Si'
    %PRESENTACION DE LOS DATOS CALCULADOS
    cdatosC=cell(DVDFILA+1,DVDCOL+3);
    cdatosC{1,1}='DATO No.';
    cdatosC{1,2}='PNCi';
    cdatosC{1,3}='MSi';
    cdatosC{1,4}='DESV. MSi';

    %ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
    for j=1:DVDFILA
        cdatosC{j+1,1}=j;
        cdatosC{j+1,2}=CURVAS(j,1);
        cdatosC{j+1,3}=CURVAS(j,2);
        cdatosC{j+1,4}=CURVAS(j,3);
    end

    %PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
    disp(' ')
    disp('*****DATOS
CALCULADOS*****')
    disp(cdatosC)

```

```

disp(' ')
else
disp(' ')
end

%MEDIA Y DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO
PROMEDIOSCURVAS=mean(CURVAS);
STDCURVAS=std(CURVAS);

%clc;
PncTOTAL=PROMEDIOSCURVAS(1,1);
PncSTDTOTAL=STDCURVAS(1,1);

opcion=input('DESEA VISULIZAR LA MEDIA Y DESVIACIÓN DE LA PNC? (Si No)
:','s');

if opcion=='Si'
%PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
disp(' ')
disp('VALOR MEDIO PNC')
disp(' ')
disp(PncTOTAL)
disp('DESVIACIÓN ESTANDAR PNC')
disp(' ')
disp(PncSTDTOTAL)
else
disp(' ')
end

%DIBUJO DE LA FUNCION DE DISTRIBUCION DE LA PNC
figure
x = PncTOTAL-(4*PncSTDTOTAL):0.01:PncTOTAL+(4*PncSTDTOTAL);
y1 = normcdf(x,PncTOTAL,PncSTDTOTAL);
y2 = normpdf(x,PncTOTAL,PncSTDTOTAL);
plot(x,y2,'b--',x,y1,'r');
%axis([-1 1.5 0 1.8])
title('Función de Distribución de Probabilidad PNC');
xlabel('PNC');
ylabel('Probabilidad');
legend('Funcion de Densidad de Probabilidad','Funcion de Distribucion
Acumulada','Location','SouthOutside')
grid on;
whitebg('w')

opcion=input('DESEA EXPORTAR LOS DATOS CÁLCULADOS A MICROSOFT EXCEL? (Si
No) :','s');

if opcion=='Si'
cdatosCexp=cell(DVDFILA+1,10);
cdatosCexp{1,1}='DATO No.';
cdatosCexp{1,2}='DVD (m)';
cdatosCexp{1,3}='P';
cdatosCexp{1,4}='V85 (Km/h)';

```

```

cdatosCexp{1,5}='DESV. V85';
cdatosCexp{1,6}='a';
cdatosCexp{1,7}='t (m/s)';
cdatosCexp{1,8}='MS (m)';
cdatosCexp{1,9}='DESV. MS';
cdatosCexp{1,10}='PNC';

%ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
for j=1:DVDFILA
    cdatosCexp{j+1,1}=j;
    cdatosCexp{j+1,2}=DVD(j,1);
    cdatosCexp{j+1,3}=P(j,1);
    cdatosCexp{j+1,4}=V85(j,1);
    cdatosCexp{j+1,5}=V85(j,2);
    cdatosCexp{j+1,6}=A(1,1);
    cdatosCexp{j+1,7}=T(1,1);
    cdatosCexp{j+1,8}=CURVAS(j,2);
    cdatosCexp{j+1,9}=CURVAS(j,3);
    cdatosCexp{j+1,10}=CURVAS(j,1);
end

xlswrite('Simulaciones PNC.xlsx',cdatosCexp,'FOSM');
warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet');
else
disp(' ')
disp('RUTINA FINALIZADA')
end

```

## Rutina D.2. Calculo de la probabilidad de no cumplimiento por el método de Estimativos Puntuales

```
%FORMATO PARA LA PRESENTACIÓN DE LOS DATOS
```

```
format short;
```

```
%LIMPIA LA PANTALLA Y LAS VARIABLES
```

```
clear all;
```

```
clc;
```

```
%DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES
```

```
char file;
```

```
double DVD;
```

```
double P;
```

```
double V85;
```

```
double A;
```

```
double t;
```

```
double DVDFILA;
```

```
double DVDCOL;
```

```
char opcion;
```

```
double cdatos;
```

```
int16 s;
```

```
double Derivv;
```

```
double Derivt;
```

```
double Deriva;
```

```
double CURVAS;
```

```
double MS;
```

```
double ms;
```

```
double dvd;
```

```
double dvp;
```

```
double SIZE;
```

```
double stdms;
```

```
double PncTOTAL;
```

```
double PncSTDTOTAL;
```

```
double PROMEDIOSCURVAS;
```

```
double STDCURVAS;
```

```
double cdatosC;
```

```
int16 j;
```

```
int16 i;
```

```
double Pnc;
```

```
double fdv;
```

```
double fdt;
```

```
double fda;
```

```
double v;
```

```
double p;
```

```
double a;
```

```
double t;
```

```
double x;
```

```
double y1;
```

```
double y2;
```

```
double MSm;
```

```
double MS1;
```

```

double MS2;
double MS3;
double MS4;
double MS5;
double MS6;

disp('CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO DE LA DISTANCIA DE
VISIBILIDAD DE PARADA')
disp('ESTIMATIVOS PUNTUALES')
disp(' ')
disp('ELABORADO POR:')
disp('JULIAN DAVID CHALA GOMEZ')
disp('MAURO ALEJANDRO VEGA PARRA')
disp(' ')
disp('LA HOJA DE EXCEL DEBE TENER CINCO (5) HOJAS EN DONDE SE ENCUENTREN
LOS DATOS NECESARIOS (VER HOJA DE EJEMPLO
DATOS_DE_ANALISIS_AVANCE.xlsx),')
disp('EL NOMBRE DE CADA UNA DE ESTAS HOJAS DEBE SER DVD, P, V85, a, t
RESPETANDO LAS MAYÚSCULAS Y LAS MINÚSCULAS.')
```

```

disp(' ')

%SELECCION DEL ARCHIVO
file = input('INGRESE EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE EXCEL (ARCHIVO.xls Ó
ARCHIVO.xlsx): ', 's');
```

```

%LECTURA DE LOS DATOS DE CADA UNA DE LAS HOJAS
DVD=xlsread(file, 'DVD');
P=xlsread(file, 'P');
V85=xlsread(file, 'V85');
A=xlsread(file, 'a');
T=xlsread(file, 't');
```

```

%DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS MATRICES
[DVDFILA, DVDCOL]=size(DVD);
```

```

disp(' ')
opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS DATOS LEIDOS? (Si No) :', 's');
```

```

if opcion=='Si'
    %PRESENTACION DE LOS DATOS LEIDOS
    cdatos=cell(DVDFILA+1, DVDCOL+4);
    cdatos{1,1}='DATO No.';
    cdatos{1,2}='DVD (m)';
    cdatos{1,3}='PENDIENTE (%)';
    cdatos{1,4}='V85 (Km/h)';
    cdatos{1,5}='DESV. V85 (Km/h)';

    %ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
    for s=1:DVDFILA;
        cdatos{s+1,1}=s;
        cdatos{s+1,2}=DVD(s,1);
        cdatos{s+1,3}=P(s,1)*100;
        cdatos{s+1,4}=V85(s,1);
    end
end
```

```

        cdatos{s+1,5}=V85(s,2);
    end

%PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
disp(' ')
disp('*****DATOS
LEIDOS*****')
disp(cdatos)
disp(' ')
else
disp(' ')
end

%DEFINICION DE LAS MATRICES DE CEROS
MSm=zeros(DVDFILA,1);
MS1=zeros(DVDFILA,1);
MS2=zeros(DVDFILA,1);
MS3=zeros(DVDFILA,1);
MS4=zeros(DVDFILA,1);
MS5=zeros(DVDFILA,1);
MS6=zeros(DVDFILA,1);

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA
for i=1:DVDFILA;
v= V85(i,1);
a= A(1,1);
t=T(1,1);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS MEDIO
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MSm(i,1)=ms;
end

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA
(V+desv)
for i=1:DVDFILA;
v= V85(i,1)+V85(i,2);
a= A(1,1);
t=T(1,1);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS (V+desv)
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

```

```

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA (V+desv)
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MS1(i,1)=ms;
end

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA (V-
desv)
for i=1:DVDFFILA;
v= V85(i,1)-V85(i,2);
a= A(1,1);
t=T(1,1);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS (V-desv)
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA (V-desv)
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MS2(i,1)=ms;
end

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA
(a+desv)
for i=1:DVDFFILA;
v= V85(i,1);
a= A(1,1)+A(1,2);
t=T(1,1);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS (a+desv)
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA (a+desv)
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MS3(i,1)=ms;
end

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA (a-
desv)
for i=1:DVDFFILA;
v= V85(i,1);
a= A(1,1)-A(1,2);
t=T(1,1);

```

```

dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS (a-desv)
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA (a-desv)
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MS4(i,1)=ms;
end

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA
(t+desv)
for i=1:DVDFILAS;
v= V85(i,1);
a= A(1,1);
t=T(1,1)+T(1,2);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS (t+desv)
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA (t+desv)
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MS5(i,1)=ms;
end

%EJECUTA UN BUCLE PARA DETERMINAR EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA (t-
desv)
for i=1:DVDFILAS;
v= V85(i,1);
a= A(1,1);
t=T(1,1)-T(1,2);
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA MS (t-desv)
dvp=(0.278*v.*t)+((v.^2)./(254*((a/9.81)+p)));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA (t-desv)
ms=dvd-dvp;

%ALMACENA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA ABSCISA O CURVA
MS6(i,1)=ms;
end

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD TOTAL

```

```

MS=MSm.*(((MS1+MS2)./2))./MSm.*(((MS3+MS4)./2))./MSm.*(((MS5+MS6)./2))./MSm);

%CALCULA EL COEFICIENTE DE VARIACION DEL MARGEN DE SEGURIDAD
COVMS=(((1+((MS1-MS2)/(MS1+MS2)).^2)).*(1+((MS3-MS4)/(MS3+MS4)).^2)).*(1+((MS5-MS6)/(MS5+MS6)).^2))-1).^0.5;

%CALCULA LA DESVIACIÓN ESTANDAR DEL MARGEN DE SEGURIDAD
STDMS=abs(MS.*COVMS);

%CALCULA LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO PARA CADA ABSCISA O CURVA
Pnc = normcdf(0,MS,STDMS);

opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS DATOS CALCULADOS? (Si No) :','s');

if opcion=='Si'
    %PRESENTACION DE LOS DATOS CALCULADOS
    cdatosC=cell(DVDFILA+1,DVDCOL+3);
    cdatosC{1,1}='DATO No.';
    cdatosC{1,2}='PNCi';
    cdatosC{1,3}='MSi';
    cdatosC{1,4}='DESV. MSi';

    %ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
    for j=1:DVDFILA
        cdatosC{j+1,1}=j;
        cdatosC{j+1,2}=Pnc(j,1);
        cdatosC{j+1,3}=MS(j,1);
        cdatosC{j+1,4}=STDMS(j,1);
    end

    %PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
    disp(' ')
    disp('*****DATOS CALCULADOS*****')
    disp(cdatosC)
    disp(' ')
else
    disp(' ')
end

%MEDIA Y DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO
PROMEDIOSCURVAS=mean(Pnc);
STDCURVAS=std(Pnc);

%clc;
PncTOTAL=PROMEDIOSCURVAS(1,1);
PncSTDTOTAL=STDCURVAS(1,1);

opcion=input('DESEA VISULIZAR LA MEDIA Y DESVIACIÓN DE LA PNC? (Si No) :','s');

```

```

if opcion=='Si'
%PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
disp(' ')
disp('VALOR MEDIO PNC')
disp(' ')
disp(PncTOTAL)
disp('DESVIACIÓN ESTANDAR PNC')
disp(' ')
disp(PncSTDTOTAL)
else
disp(' ')
end

%DIBUJO DE LA FUNCION DE DISTRIBUCION DE LA PNC
figure;
x = PncTOTAL-(4*PncSTDTOTAL):0.01:PncTOTAL+(4*PncSTDTOTAL);
y1 = normcdf(x,PncTOTAL,PncSTDTOTAL);
y2 = normpdf(x,PncTOTAL,PncSTDTOTAL);
plot(x,y2,'b--',x,y1,'r');
%axis([-1 1.5 0 1.8])
title('Función de Distribución de Probabilidad PNC');
xlabel('PNC');
ylabel('Probabilidad');
legend('Funcion de Densidad de Probabilidad','Funcion de Distribucion
Acumulada','Location','SouthOutside');
grid on;
whitebg('w');

opcion=input('DESEA EXPORTAR LOS DATOS CÁLCULADOS A MICROSOFT EXCEL? (Si
No) :','s');

if opcion=='Si'
cdatosCexp=cell(DVDFILA+1,10);
cdatosCexp{1,1}='DATO No.';
cdatosCexp{1,2}='DVD (m)';
cdatosCexp{1,3}='P';
cdatosCexp{1,4}='V85 (Km/h)';
cdatosCexp{1,5}='DESV. V85';
cdatosCexp{1,6}='a';
cdatosCexp{1,7}='t (m/s)';
cdatosCexp{1,8}='MS (m)';
cdatosCexp{1,9}='DESV. MS';
cdatosCexp{1,10}='PNC';

%ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
for j=1:DVDFILA
    cdatosCexp{j+1,1}=j;
    cdatosCexp{j+1,2}=DVD(j,1);
    cdatosCexp{j+1,3}=P(j,1);
    cdatosCexp{j+1,4}=V85(j,1);
    cdatosCexp{j+1,5}=V85(j,2);
    cdatosCexp{j+1,6}=A(1,1);
    cdatosCexp{j+1,7}=T(1,1);
    cdatosCexp{j+1,8}=MS(j,1);

```

```
        cdatosCexp{j+1,9}=STDMS(j,1);
        cdatosCexp{j+1,10}=Pnc(j,1);
    end

    xlswrite('Simulaciones PNC.xlsx',cdatosCexp,'EPUNTUAL');
    warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet');
    else
    disp(' ')
    disp('RUTINA FINALIZADA')
    end
```

### Rutina D.3. Calculo de la probabilidad de no cumplimiento por el método de Simulaciones de Montecarlo

FORMATO PARA LA PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

```
format short;
```

%LIMPIA LA PANTALLA Y LAS VARIABLES

```
clear all;
```

```
clc;
```

%DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

```
char file;
```

```
double DVD;
```

```
double P;
```

```
double V85;
```

```
double A;
```

```
double t;
```

```
double DVDFILA;
```

```
double DVDCOL;
```

```
char opcion;
```

```
double cdatos;
```

```
int16 s;
```

```
char opcion1;
```

```
double DVDmin;
```

```
int16 row;
```

```
int16 col;
```

```
double n;
```

```
double n1;
```

```
double v1;
```

```
double p1;
```

```
double a1;
```

```
double t1;
```

```
double dvd1;
```

```
double dvpl;
```

```
double ms1;
```

```
int16 c;
```

```
double x;
```

```
double x1;
```

```
double x2;
```

```
double x3;
```

```
double y1;
```

```
double y2;
```

```
double y3;
```

```
double CURVAS;
```

```
double ALEATORIOSV85;
```

```
double ALEATORIOSA;
```

```
double ALEATORIOST;
```

```
double MINALV85;
```

```
double MINTALV85;
```

```
double MAXALV85;
```

```
double MAXTALV85;
```

```
double MINALA;
```

```

double MINTALA;
double MAXALA;
double MAXTALA;
double MINALT;
double MINTALT;
double MAXALT;
double MAXTALT;
double MS;
double ms;
double dvd;
double dvp;
double SIZE;
double STDMS;
double PncTOTAL;
double PncSTDTOTAL;
double PROMEDIOSCURVAS;
double STDCURVAS;
int16 i;
double Pnc;
double fdv;
double fdt;
double fda;
double v;
double p;
double a;
double t;

disp('CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO DE LA DISTANCIA DE
VISIBILIDAD DE PARADA')
disp('SIMULACIONES DE MONTECARLO')
disp(' ')
disp('ELABORADO POR:')
disp('JULIAN DAVID CHALA GOMEZ')
disp('MAURO ALEJANDRO VEGA PARRA')
disp(' ')
disp('LA HOJA DE EXCEL DEBE TENER CINCO (5) HOJAS EN DONDE SE ENCUENTREN
LOS DATOS NECESARIOS (VER HOJA DE EJEMPLO
DATOS_DE_ANALISIS_AVANCE.xlsx),')
disp('EL NOMBRE DE CADA UNA DE ESTAS HOJAS DEBE SER DVD, P, V85, a, t
RESPETANDO LAS MAYÚSCULAS Y LAS MINÚSCULAS.')
disp(' ')

file = input('INGRESE EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE EXCEL (ARCHIVO.xls Ó
ARCHIVO.xlsx): ', 's');

DVD=xlsread(file, 'DVD');
P=xlsread(file, 'P');
V85=xlsread(file, 'V85');
A=xlsread(file, 'a');
T=xlsread(file, 't');

%DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LAS MATRICES
[DVDFILA, DVDCOL]=size(DVD);

```

```

disp(' ')
opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS DATOS LEIDOS? (Si No) :','s');

if opcion=='Si'
    %PRESENTACION DE LOS DATOS LEIDOS
    cdatos=cell(DVDFILA+1,DVDCOL+4);
    cdatos{1,1}='DATO No.';
    cdatos{1,2}='DVD (m)';
    cdatos{1,3}='PENDIENTE (%)';
    cdatos{1,4}='V85 (Km/h)';
    cdatos{1,5}='DESV. V85 (Km/h)';

    %ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
    for s=1:DVDFILA
        cdatos{s+1,1}=s;
        cdatos{s+1,2}=DVD(s,1);
        cdatos{s+1,3}=P(s,1)*100;
        cdatos{s+1,4}=V85(s,1);
        cdatos{s+1,5}=V85(s,2);
    end

    %PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
    disp(' ')
    disp('*****DATOS
    LEIDOS*****')
    disp(cdatos)
    disp(' ')
else
    disp(' ')
end

%DETERMINACION DEL NUMERO DE SIMULACIONES
opcion1=input('DESEA DETERMINAR EL NÚMERO DE SIMULACIONES OPTIMO? (Si No)
:','s');

if opcion1=='Si';
DVDmin=min(DVD);
[row,col]=find(DVD==DVDmin);
row=row(1,1);
n1=50000;
smc=zeros(n1,9);

%GENERA ALEATORIOS PARA LA CURVA 7 O ABSCISA 7
v1= normrnd(V85(row,1),V85(row,2),n1,1);
a1= normrnd(A(1,1),A(1,2),n1,1);
t1=abs(normrnd(T(1,1),T(1,2),n1,1));
dvd1=DVD(row,1);
p1=P(row,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA CADA SIMULACIÓN
dvp1=(0.278*v1.*t1)+((v1.^2)./(254*((a1/9.81)+p1)));

```

```

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA SIMULACIÓN
msl=dvdl-dvpl;

%ALMACENA CADA UNA DE LAS VARIABLES
for c=1:n1
smc(c,1)=v1(c,1);
smc(c,2)=a1(c,1);
smc(c,3)=t1(c,1);
smc(c,4)=dvdl(1,1);
smc(c,5)=dvpl(c,1);
smc(c,6)=msl(c,1);
end

%CALCULA LA PROBABILIDAD DE FALLA PARA CADA SIMULACION
for c=1:n1-1
smc(c+1,7)=mean(smc(1:c+1,6));
smc(c+1,8)=std(smc(1:c+1,6));
smc(c+1,9)=normcdf(0,smc(c+1,7),smc(c+1,8));
end

%FIGURA PROBABILIDAD DE FALLA VS NUMERO DE SIMULACIONES
x3 = 2:1:n1;
y3 = smc(2:n1,9);
plot(x3,y3,'b-','LineWidth',1);
title('Probabilidad de no Cumplimiento Vs No. Simulaciones');
xlabel('No. Simulaciones');
ylabel('PNC');
legend('Probabilidad de no Cumplimiento','Location','SouthOutside')
grid on;
whitebg('w')
disp(' ')
else
disp(' ')
end

%NUMERO DE SIMULACIONES
n=input('INGRESAR EL NÚMERO DE SIMULACIONES:');

%DEFINICION DE LA MATRIZ DE CEROS
CURVAS=zeros(DVDFILA,3);
ALEATORIOSV85=zeros(n,DVDFILA);
ALEATORIOSA=zeros(n,DVDFILA);
ALEATORIOST=zeros(n,DVDFILA);

%BUCLE QUE REALIZA LAS SIMULACIONES DE MONTECARLO
for i=1:DVDFILA
v= normrnd(V85(i,1),V85(i,2),n,1);
a= normrnd(A(1,1),A(1,2),n,1);
t=abs(normrnd(T(1,1),T(1,2),n,1));
dvd=DVD(i,1);
p=P(i,1);

%CALCULA LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA PARA CADA SIMULACIÓN

```

```

dvp=(0.278*v.*t)+(v.^2)./(254*((a/9.81)+p));

%CALCULA EL MARGEN DE SEGURIDAD PARA CADA SIMULACIÓN
ms=dvd-dvp;

%CALCULA EL VALOR MEDIO PARA EL MARGEN DE SEGURIDAD
MS=mean(ms);

%CALCULA LA DESVIACIÓN ESTANDAR PARA EL MARGEN DE SEGURIDAD
STDMS=std(ms);

%CALCULA LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO
Pnc = normcdf(0,MS,STDMS);

%ALMACENA LA PNC PARA CADA ABSCISA O CURVA
CURVAS(i,1)=Pnc;

%ALMACENA EL MS PARA CADA ABSCISA O CURVA
CURVAS(i,2)=MS;

%ALMACENA LA DESVIACIÓN ESTANDAR PARA CADA ABSCISA O CURVA;
CURVAS(i,3)=STDMS;

%ALMACENA ALEATORIOS V85
ALEATORIOSV85(:,i)=v(:,1);
%ALMACENA ALEATORIOS A
ALEATORIOSA(:,i)=a(:,1);
%ALMACENA ALEATORIOS T
ALEATORIOST(:,i)=t(:,1);
end

%VALOR MINIMO Y MAXIMO NUMEROS ALEATORIOS V85
MINALV85=min(ALEATORIOSV85);
MINTALV85=min(MINALV85);
MAXALV85=max(ALEATORIOSV85);
MAXTALV85=max(MAXALV85);

%VALOR MINIMO Y MAXIMO NUMEROS ALEATORIOS A
MINALA=min(ALEATORIOSA);
MINTALA=min(MINALA);
MAXALA=max(ALEATORIOSA);
MAXTALA=max(MAXALA);

%VALOR MINIMO Y MAXIMO NUMEROS ALEATORIOS T
MINALT=min(ALEATORIOST);
MINTALT=min(MINALT);
MAXALT=max(ALEATORIOST);
MAXTALT=max(MAXALT);

disp(' ')
opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS
NÚMEROS ALEATORIOS GENERADOS? (Si No) :','s');

```

```

if opcion=='Si'
%PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
disp(' ')
disp('VALOR MÍNIMO NUMEROS ALEATORIOS VELOCIDAD (V85)')
disp(' ')
disp(MINTALV85)
disp('VALOR MÁXIMO NUMEROS ALEATORIOS VELOCIDAD (V85)')
disp(' ')
disp(MAXTALV85)
disp('VALOR MÍNIMO NUMEROS ALEATORIOS DESACELERACIÓN (a)')
disp(' ')
disp(MINTALA)
disp('VALOR MÁXIMO NUMEROS ALEATORIOS DESACELERACIÓN (a)')
disp(' ')
disp(MAXTALA)
disp('VALOR MÍNIMO NUMEROS ALEATORIOS TIEMPO PERSEPCIÓN REACCIÓN (t)')
disp(' ')
disp(MINTALT)
disp('VALOR MÁXIMO NUMEROS ALEATORIOS TIEMPO PERSEPCIÓN REACCIÓN (t)')
disp(' ')
disp(MAXTALT)
else
disp(' ')
end

opcion=input('DESEA VISULIZAR LOS HISTOGRAMAS DE LOS NÚMEROS ALEATORIOS
GENERADOS? (Si No) :','s');

if opcion=='Si'

x1=ALEATORIOSV85(:,1);
x2=ALEATORIOSA(:,1);
x3=ALEATORIOST(:,1);

%HISTOGRAMA NUMEROS ALEATORIOS V85
subplot(3,1,1); % top subplot
hist(x1,50)
title('Histograma Números Aleatorios Velocidad');
xlabel('Clase');
ylabel('Frecuencia');
hold off;

%HISTOGRAMA NUMEROS ALEATORIOS A
subplot(3,1,2); % middle subplot
hist(x2,50)
title('Histograma Números Aleatorios Desaceleración');
xlabel('Clase');
ylabel('Frecuencia');
hold off;

%HISTOGRAMA NUMEROS ALEATORIOS T
subplot(3,1,3); % botton subplot

```

```

hist(x3,50)
title('Histograma Números Aleatorios Tiempo de Percepción Reacción');
xlabel('Clase');
ylabel('Frecuencia');
hold off;
disp(' ')
else
disp(' ')
end

%MEDIA Y DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA PROBABILIDAD DE NO CUMPLIMIENTO
PROMEDIOSCURVAS=mean(CURVAS);
STDCURVAS=std(CURVAS);
%clc;

PncTOTAL=PROMEDIOSCURVAS(1,1);
PncSTDTOTAL=STDCURVAS(1,1);

opcion=input('DESEA VISULIZAR LA MEDIA Y DESVIACIÓN DE LA PNC? (Si No)
:','s');

if opcion=='Si'
%PRESENTACION EN PANTALLA DE LOS DATOS
disp(' ')
disp('VALOR MEDIO PNC')
disp(' ')
disp(PncTOTAL)
disp('DESVIACIÓN ESTANDAR PNC')
disp(' ')
disp(PncSTDTOTAL)
else
disp(' ')
end

%DIBUJO DE LA FUNCION DE DISTRIBUCION DE LA PNC
figure
x = PncTOTAL-(4*PncSTDTOTAL):0.01:PncTOTAL+(4*PncSTDTOTAL);
y1 = normcdf(x,PncTOTAL,PncSTDTOTAL);
y2 = normpdf(x,PncTOTAL,PncSTDTOTAL);
plot(x,y2,'b--',x,y1,'r');
%axis([-1 1.5 0 1.8])
title('Función de Distribución de Probabilidad PNC');
xlabel('PNC');
ylabel('Probabilidad');
legend('Funcion de Densidad de Probabilidad','Funcion de Distribucion
Acumulada','Location','SouthOutside')
grid on;
whitebg('w')

opcion=input('DESEA EXPORTAR LOS DATOS CÁLCULADOS A MICROSOFT EXCEL? (Si
No) :','s');

if opcion=='Si'

```

```

cdatosCexp=cell(DVDFILA+1,10);
cdatosCexp{1,1}='DATO No.';
cdatosCexp{1,2}='DVD (m)';
cdatosCexp{1,3}='P';
cdatosCexp{1,4}='V85 (Km/h)';
cdatosCexp{1,5}='DESV. V85';
cdatosCexp{1,6}='a';
cdatosCexp{1,7}='t (m/s)';
cdatosCexp{1,8}='MS (m)';
cdatosCexp{1,9}='DESV. MS';
cdatosCexp{1,10}='PNC';

%ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS
for j=1:DVDFILA
    cdatosCexp{j+1,1}=j;
    cdatosCexp{j+1,2}=DVD(j,1);
    cdatosCexp{j+1,3}=P(j,1);
    cdatosCexp{j+1,4}=V85(j,1);
    cdatosCexp{j+1,5}=V85(j,2);
    cdatosCexp{j+1,6}=A(1,1);
    cdatosCexp{j+1,7}=T(1,1);
    cdatosCexp{j+1,8}=CURVAS(j,2);
    cdatosCexp{j+1,9}=CURVAS(j,3);
    cdatosCexp{j+1,10}=CURVAS(j,1);
end

xlswrite('Simulaciones PNC.xlsx',cdatosCexp,'MONTECARLO');
warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet');
else
disp(' ')
disp('ROUTINA FINALIZADA')
end

```

## **Anexo E. Velocidades Modelos de Predicción**

**Tabla E.1. Modelos de predicción de velocidades**

Curva	Lamm et al. (1988)	Lamm et al. (1999)	Morrall & Talarico (1994)	TAC (1999)	Ottesen & Krammes (2000)	Ottesen & Krammes (2000)	Kanellaidis et al. (1990)	Islam and Seneviratne (1994)	Islam and Seneviratne (1994)	Castro et al. (2008)	Media	Desv.
1	74,0	77,8	77,4	41,7	81,9	76,9	80,0	77,4	72,5	84,4	74,4	12,0
2	88,9	90,8	90,4	86,5	97,8	97,1	104,0	90,8	95,5	110,5	93,5	5,5
3	79,9	83,0	82,3	58,9	88,2	83,7	87,9	82,9	82,1	94,8	81,0	8,7
4	85,3	87,6	87,0	76,0	93,9	93,1	96,6	87,7	90,3	104,2	88,6	6,0
5	83,7	86,2	85,6	70,3	92,2	89,5	93,7	86,3	87,9	101,3	86,1	6,8
6	82,6	85,3	84,6	64,3	91,0	82,1	92,0	85,3	86,2	99,4	83,7	8,0
7	71,6	75,7	75,5	31,4	79,3	65,7	77,2	75,1	68,5	80,2	68,9	14,7
8	82,3	85,0	84,3	64,8	90,7	84,7	91,4	85,0	85,7	98,9	83,8	7,7
9	81,1	84,0	83,3	62,0	89,4	84,5	89,6	84,0	83,9	96,8	82,4	8,2
10	77,7	81,0	80,4	51,1	85,8	78,0	84,8	80,9	78,6	90,9	77,6	10,3
11	78,5	81,6	81,0	52,0	86,6	76,0	85,8	81,6	79,8	92,2	78,1	10,3
12	86,4	88,6	88,0	78,0	95,1	92,2	98,7	88,7	91,9	106,2	89,8	5,9
13	81,4	84,2	83,5	63,5	89,7	86,5	90,0	84,2	84,3	97,3	83,0	7,9
14	80,8	83,7	83,1	58,0	89,2	77,0	89,2	83,7	83,5	96,3	80,9	9,4
15	81,6	84,4	83,8	61,8	90,0	81,3	90,5	84,5	84,8	97,8	82,5	8,4
16	82,8	85,5	84,8	65,2	91,3	83,0	92,3	85,5	86,6	99,8	84,1	7,8
17	85,3	87,6	87,0	72,5	93,9	86,6	96,6	87,7	90,3	104,2	87,5	6,7
18	85,4	87,7	87,1	76,2	94,1	93,1	96,8	87,8	90,5	104,4	88,8	6,0
19	78,5	81,6	81,0	53,8	86,6	80,3	85,8	81,6	79,8	92,2	78,8	9,7
20	88,0	90,0	89,5	84,1	96,8	96,4	102,0	90,1	94,3	109,0	92,4	5,5
21	78,5	81,6	81,0	54,4	86,6	81,6	85,8	81,6	79,8	92,2	79,0	9,6

Curva	Lamm et al. (1988)	Lamm et al. (1999)	Morrall & Talarico (1994)	TAC (1999)	Ottesen & Krammes (2000)	Ottesen & Krammes (2000)	Kanellaidis et al. (1990)	Islam and Seneviratne (1994)	Islam and Seneviratne (1994)	Castro et al. (2008)	Media	Desv.
22	77,6	80,9	80,3	44,7	85,7	63,5	84,7	80,8	78,4	90,7	75,2	13,1
23	90,9	92,5	92,2	91,0	99,9	98,4	109,1	92,5	98,2	113,9	96,1	6,0
24	90,5	92,2	91,8	90,6	99,5	98,4	108,0	92,2	97,7	113,3	95,6	5,8
25	92,3	93,7	93,6	95,8	101,4	100,6	113,8	93,7	100,2	116,4	98,3	6,8
26	85,3	87,6	87,0	71,7	93,9	85,1	96,6	87,7	90,3	104,2	87,3	7,0
27	90,6	92,3	92,0	90,0	99,6	97,7	108,4	92,3	97,9	113,5	95,6	5,9
28	89,4	91,2	90,8	80,7	98,3	88,9	105,2	91,3	96,2	111,4	92,5	6,9
29	83,0	85,6	85,0	67,0	91,5	85,6	92,6	85,7	86,9	100,2	84,8	7,4
30	85,5	87,8	87,2	71,3	94,2	83,4	97,0	87,9	90,7	104,6	87,2	7,3
31	89,1	90,9	90,5	86,2	98,0	96,3	104,4	91,0	95,8	110,8	93,6	5,6
32	79,2	82,3	81,7	57,6	87,4	84,6	86,9	82,3	81,0	93,5	80,3	9,0
33	80,5	83,4	82,8	55,7	88,8	73,8	88,7	83,4	83,0	95,7	80,0	10,1
34	84,7	87,1	86,5	71,4	93,3	86,7	95,6	87,2	89,5	103,2	86,9	6,8
35	80,5	83,5	82,8	59,3	88,9	81,5	88,8	83,5	83,1	95,8	81,3	8,8
36	87,5	89,5	89,0	80,1	96,3	92,0	100,8	89,6	93,5	108,0	90,9	5,8
37	74,5	78,2	77,7	39,6	82,4	69,1	80,6	77,8	73,3	85,2	72,6	13,0
38	90,9	92,5	92,2	91,7	99,9	98,8	109,1	92,5	98,2	113,9	96,2	6,0
39	91,8	93,3	93,1	94,3	100,9	100,0	112,0	93,3	99,5	115,6	97,6	6,4
40	88,0	90,0	89,5	82,8	96,8	94,4	102,0	90,1	94,3	109,0	92,0	5,6
41	90,3	92,0	91,6	88,2	99,2	96,4	107,4	92,0	97,4	112,9	94,9	5,9
42	92,9	94,3	94,2	97,8	102,1	101,5	116,6	94,2	101,1	117,6	99,4	7,4
43	88,7	90,6	90,1	83,1	97,5	93,2	103,4	90,6	95,2	110,1	92,5	5,8
44	81,2	84,1	83,4	62,8	89,6	85,5	89,8	84,1	84,2	97,1	82,7	8,0

Curva	Lamm et al. (1988)	Lamm et al. (1999)	Morrall & Talarico (1994)	TAC (1999)	Ottesen & Krammes (2000)	Ottesen & Krammes (2000)	Kanellaidis et al. (1990)	Islam and Seneviratne (1994)	Islam and Seneviratne (1994)	Castro et al. (2008)	Media	Desv.
45	86,1	88,3	87,8	75,5	94,8	88,9	98,1	88,4	91,5	105,6	88,8	6,3
46	89,6	91,4	91,0	87,2	98,5	96,3	105,6	91,4	96,4	111,7	94,2	5,7
47	86,0	88,3	87,7	71,2	94,7	81,5	97,9	88,4	91,3	105,4	87,4	7,8
48	85,5	87,8	87,2	74,6	94,2	89,6	97,0	87,9	90,7	104,6	88,3	6,3
49	92,8	94,2	94,1	97,3	102,0	101,4	115,9	94,1	100,9	117,4	99,2	7,2
50	89,5	91,3	90,9	87,4	98,4	96,8	105,4	91,3	96,3	111,5	94,1	5,6
51	88,7	90,6	90,1	84,9	97,5	95,7	103,4	90,6	95,2	110,1	93,0	5,5

Nota: Todas las medidas están dadas en Km/h.