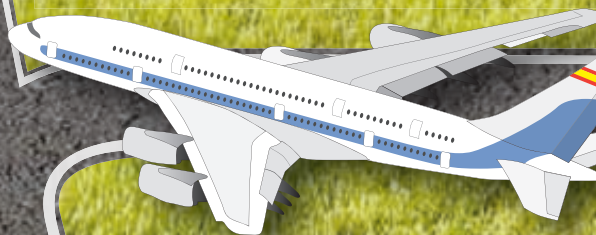
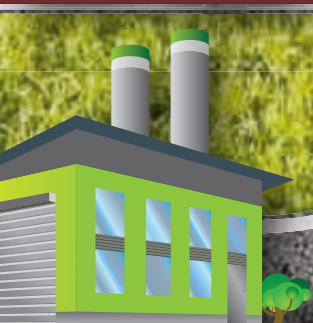


càrreteras

4ª ÉPOCA • Nº204 • NOV/DIC 2015

REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA





nº 204 / nov-dic 2015

EMPRESAS COLABORADORAS

EIFFAGE
INFRAESTRUCTURAS

RUS
TRIALSA
PANASFALTON

D&C
COLORS, S.A.

Kao Corporation S.A.

PROBISA

4 editorial

Conservar por convencimiento y responsabilidad

artículos técnicos

6 Mezcla reciclada templada con emulsión a tasa total en capa de rodadura: una propuesta de diseño, fabricación y puesta en obra

Antonio Ramírez / José Ramón Otero / Patricia Díaz / José Manuel Lizárraga / Francisco Guisado / Emilio Martínez

18 Variación diaria y estacional de la deflexión relativa y la deflexión máxima en varios tipos de fisuras transversales reflejadas en pavimentos semirrígidos

Mª Esther Castillo Díez

26 Medellín (Colombia), caso de mejora de la movilidad y la seguridad en vías urbanas

Jose Antonio Fernández Álvarez

35 Ignorancias sabidas

Enrique Miralles Olivar

43 Sistemas de protección de pasajeros en el transporte de estudiantes en Costa Rica

Carlos Roberto Güémez Shedden

53 La evolución de la ayuda europea al desarrollo del transporte por carretera en África Sub-sahariana

Antonio José Torres Martínez

62 Incidencia de la distancia de visibilidad sobre la accidentalidad en carreteras

Julián David Chala Gómez / Mauro Alejandro Vega Parra / Carlos Fabián Flórez Valero

elecciones 20D

70 Los partidos dicen sí a una mayor inversión en conservación y a un Pacto de Estado para la planificación viaria

tribunas

74 Declaración de Madrid. Por una movilidad limpia y eficiente

76 Conclusiones del VII Congreso Nacional de Seguridad Vial *La red convencional en el foco de la seguridad vial*

Enrique Casquero de la Cruz

78 área de servicio

90 guía profesional de empresas colaboradoras

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente

Alberto Bardesi Orúe-Echevarría

Vocales

Fernando Argüello Álvarez
Mercedes Aviñó Bolinches
Luis Ayuso Sánchez
Francisco García Sánchez
Carlos Gasca Cuota
Jesús Leal Bermejo
José Miguel Ortega Julio
Elena de la Peña González
Vicente Pérez Mena
Juan José Potti Cuervo
Sebastián de la Rica Castedo
Miguel Ángel Salvia
Fuencisla Sancho Gómez
Jesús Soria Heras
Margarita Torres Rodríguez
Iñaki Zabala Zuazo

PRESIDENTE

Juan Fco. Lazcano Acedo

DIRECTOR

Jacobo Díaz Pineda

DIRECTORA EJECUTIVA

Marta Rodrigo Pérez

DIRECTOR TÉCNICO

Recaredo Romero Amich

REDACTORA JEFE

Susana Rubio Gutiérrez

DISEÑO Y MAQUETACIÓN

José María Gil

EDICIÓN Y PUBLICIDAD

COMUNICACIÓN Y DISEÑO

O'Donnell, 18 - 5º H
28009 Madrid
Tel.: +34 91 432 43 18
Fax: +34 91 432 43 19
comdis@cydiseno.com
www.cydiseno.com

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

Goya, 23 - 3º y 4º Derecha
28001 MADRID
Tel.: +34 91 577 99 72
Fax: +34 91 576 65 22
aec@aecarretera.com
www.aecarretera.com

SUSCRIPCIÓN ANUAL

(Año 2015)

España:
66 Euros (IVA incluido)

Europa:
109 Euros

América:
160 \$ / 124 Euros

Depósito Legal:
M- 19.439-1975

ISSN:
0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de *Carreteras* no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.

La revista *Carreteras* aparece citada actualmente en las siguientes bases de datos científicas: Engineering Index, Ulrichs, Dialnet (Publicaciones Técnicas y Científicas de la Universidad de La Rioja), DIIT (Documentación Internacional de Investigación del Transporte de la OCDE), IEDCYT (Instituto de Estudios Documentales sobre Ciencia y Tecnología del CSIC), ICYT (Ciencia y Tecnología del CSIC), CIRBIC (Catálogo Colectivo de los Fondos de las Bibliotecas del CSIC), Centro de Documentación del Transporte y las Comunicaciones del Ministerio de Fomento, Latindex (Servicio Regional de Información para Revistas Técnicas de América Latina, Caribe, España y Portugal) y la holandesa Scopus.

Conservar por convencimiento y responsabilidad

Por citar un ejemplo ilustrativo, hoy en día se registra en la frontera francesa un tránsito de 20.000 camiones diarios, frente a los 400 vagones que cruzan los Pirineos transportando mercancías cada día.

En el caso de los viajeros, por cada 4 personas que utilizan el AVE, 10.000 se desplazan por carretera.

Unos datos que ponen de manifiesto la importancia de conservar las infraestructuras viarias. El patrimonio carretero español, considerando las redes dependientes de las administraciones provinciales y locales, tiene un valor estimado que rondaría los 500.000 millones de euros. Sería imposible en las actuales circunstancias construir una malla semejante, de manera que resulta inexcusable asegurar su sostenibilidad presente y futura.

La conservación y mantenimiento de las redes de carreteras, además de favorecer la seguridad, constituyen una inversión de alta eficacia y notable eficiencia. Contribuyen a alcanzar el objetivo último de prolongar la vida de la infraestructura en condiciones de segu-

ridad mediante una adecuada utilización de los siempre escasos recursos disponibles.

Sin duda, se ha avanzado mucho en la concienciación sobre la responsabilidad de conservar sistemáticamente las carreteras. Pero también no es menos cierto que aún queda mucho camino por recorrer.

Y no acabaremos de recorrer este camino hasta que sean los propios usuarios quienes exijan a los gestores públicos que focalicen los esfuerzos inversores en la conservación.

Se ha planteado que la asignación de recursos a la conservación se establezca mediante una ley que asegure una inversión mínima anual asociada al valor patrimonial de las carreteras. Pero tan importante como promulgar una ley es tomar conciencia de la necesidad y la responsabilidad que exigen asegurar que la red viaria funcione.

Es preciso que exista el convencimiento de que nos encontramos ante una necesidad que hemos de satisfacer para lograr la sostenibilidad del sistema de comunicaciones por carretera. ■

Incidencia de la distancia de visibilidad sobre la accidentalidad en carreteras

Effect of sight distance on road accident occurrence

Julián David CHALA GÓMEZ

Pontificia Universidad Javeriana (110231594 Bogotá, Colombia)

Mauro Alejandro VEGA PARRA

Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia)

Carlos Fabián FLÓREZ VALERO

Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia)

RESUMEN

Se han desarrollado diferentes estudios 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 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 (Pnc), sobre la accidentalidad en carreteras por medio de funciones de desempeño de seguridad. Para ello se utilizaron el diseño geométrico existente de una carretera sencilla bidireccional perteneciente a la red primaria nacional de Colombia, el modelo digital de elevación, las velocidades de operación medidas en campo, el tránsito promedio diario anual (TPD) y bases de accidentalidad de los últimos seis años.

PALABRAS CLAVE: Tráfico, Seguridad vial, Distancia de visibilidad, Probabilidad de no cumplimiento, Accidentalidad, Velocidad, Consistencia, Diseño geométrico.

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 years were used.

KEY WORDS: Traffic, Road safety, Sight distance, Probability of non-compliance, Accident occurrence, Speed, Consistency, Geometric design.

El diseño geométrico de vías, como práctica de la ingeniería, ha empleado un enfoque de tipo restrictivo y determinista^(1 a 10), basado en el cumplimiento o no de un conjunto de parámetros que están en función de la velocidad de diseño. Asimismo 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. 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.

Asimismo, teniendo 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 y, de acuerdo con resultados obtenidos en estudios de visibilidad en dos y tres dimensiones⁽¹¹⁾, la variación de las distancias de visibilidad disponible puede ser considerable, a tal punto que se puede subestimar o sobreestimar en el diseño. Estas consideraciones resaltan la necesidad de realizar un análisis tridimensional⁽¹²⁾ que permita relacionar los criterios de consistencia con las distancias de visibilidad requerida y disponible.

Dado lo anterior el presente artículo pretende cuantificar el riesgo de alejarse de las especificaciones de diseño durante la fase de operación de las carreteras a partir de un análisis por confiabilidad en el cual se evalúa la distancia de visibilidad disponible y requerida.

Antecedentes

En la literatura existen diversos estudios que han empleado los análisis probabilísticos para establecer parámetros de diseño en carreteras. F. P. Navin^(13 y 14) planteó la necesidad de utilizar las técnicas basadas en confiabilidad con el objeto de analizar la aleatoriedad de los parámetros de diseño bajo la premisa que son independientes y se distribuyen de forma normal y así establecer medidas de seguridad. Faghiri, Easa y otros^(15 y 16) aplicaron métodos de confiabilidad para evaluar distancias de visibilidad en intersecciones con vías férreas.

Las técnicas de confiabilidad en general han sido empleadas para analizar condiciones operacionales en carreteras, para lo cual se establece la probabilidad de no cumplimiento como la diferencia entre oferta y demanda dentro del análisis. Echaveguren, Bustos y De Solminihac⁽¹⁷⁾ concluyeron dentro de su análisis por confiabilidad que factores como la variación de la velocidad de operación, la fricción y el radio de curvatura tienen un impacto significativo sobre la probabilidad de no cumplimiento.

Ismail y Sayed, por su parte⁽¹⁸⁾, evaluaron el riesgo de alejarse de las especificaciones de diseño, por la naturaleza probabilística que



Foto 1. Curva abscisa K41+650.

tienen los parámetros de entrada; los resultados demuestran que bajo las especificaciones técnicas vigentes existe un alto riesgo de encontrar distancias de visibilidad restringidas en la etapa de operación. Estos resultados confirman la necesidad de calibrar las especificaciones actuales con el fin de mejorar la seguridad en las carreteras⁽¹⁹⁾.

La distancia de visibilidad incide en forma significativa en la seguridad vial, ya que afecta las expectativas de los conductores y su percepción tanto del trazado como del entorno y el tránsito. Richl y Sayed⁽²⁰⁾ señalan que las distancias de visibilidad se pueden estimar de diversas formas entre las cuales se encuentran los modelos cuasi analíticos a partir de herramientas de programas informáticos que permiten triangular la superficie del terreno y generar una perspectiva desde la posición del conductor para calcular la distancia de visibilidad en tres dimensiones (3D), o analíticos, los cuales presentan fórmulas para estimar distancias de visibilidad en dos dimensiones (2D).

En este sentido como se mencionó anteriormente la variación de las distancias de visibilidad en 2D y 3D puede variar significativamente; posteriormente Sarhan y Hassan⁽²¹⁾ 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 consideró modelos de alineamientos en tres dimensiones.

Materiales y métodos

El corredor objeto de estudio es una vía nacional primaria de Colombia (la ruta 8002) que comunica los municipios de Plato y El Difícil en el departamento de Magdalena, de calzada sencilla bidireccional, cuyo trazado se desarrolla por terrenos con topografía principalmente montañosa en una longitud aproximada de 73,6 km.

El modelo digital de elevaciones y la restitución de la geometría en planta y perfil se construyó a partir de información secundaria de datos Lidar ("Light Detection and Ranging"), fotografías aéreas y cartografía existente de la zona. Las distancias de visibilidad disponible en 3D se estimaron con base en el modelo digital de elevaciones y la geometría de la vía mediante métodos cuasi analíticos, para un total de cincuenta y una curvas.

Para establecer los valores esperados de la velocidad de operación y su función de distribución se realizaron estudios de velocidad puntual por medio de radar sobre el total de curvas estudiadas del corredor tanto en el sentido de avance como en el sentido inverso, adicionalmente se calcularon mediante la aplicación de modelos de predicción de velocidades de acuerdo con la referencia (XII). Los valores medios para el tiempo de percepción reacción y la tasa de desaceleración se tomaron de la literatura y sus funciones de distribución se presentan en la Tabla 1. Los datos de accidentalidad fueron suministrados por el Ministerio de Transporte de Colombia a través del grupo de seguridad vial para el periodo comprendido entre 2007 a 2012, donde además de la frecuencia de accidentes se relacionan la localización y severidad.

Los análisis de confiabilidad permiten determinar la probabilidad de falla de los modelos empleados en ingeniería o la probabilidad de que dichos modelos no cumplan las funciones para las cuales fueron diseñados. Un análisis por confiabilidad requiere en términos generales definir una función de estado límite, determinar la distribución de probabilidad y los parámetros (media y desviación) de cada una de las variables aleatorias que definen la función, aplicar alguna técnica de simulación y estimar la *probabilidad de no cumplimiento* (Pnc).

La forma más común de evaluar la probabilidad de no cumplimiento es a partir del margen de seguridad, el cual constituye una función de estado límite que compara la oferta y la demanda de determina-



Figura 1. Estado límite en un modelo de análisis por confiabilidad adaptado de la referencia (XV).



Foto 2. Curva abscisa K44+700.

do sistema, donde 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. Visto de esta forma, la función de estado límite se expresa de la siguiente manera:

$$MS = E(C) - E(D) \quad (1)$$

Donde:

- MS es el margen de seguridad, y
- $E(C)$ y $E(D)$ son la capacidad y demanda del sistema con n variables, cada una con una función de distribución de probabilidad que representa la incertidumbre del modelo.

La falla o no cumplimiento del sistema ocurre cuando $MS < 0$. En términos de seguridad vial y específicamente en accidentalidad cabe resaltar 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. La Figura 1 presenta los estados de falla y seguridad descritos anteriormente.

Para el caso particular del presente estudio la función de estado límite se presenta en términos de la distancia de visibilidad disponible en tres dimensiones (DVD) y la distancia de visibilidad requerida (DVP) como se presenta a continuación:

$$MS = DVD - DVP \quad (2)$$

La distancia de visibilidad de parada requerida se calculó de acuerdo con el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras^(XVI), como se muestra a continuación:

$$DVP = 0,278 \cdot v \cdot t + \frac{v^2}{254 \left(\frac{a}{9,81} \pm \frac{m}{100} \right)} \quad (3)$$

Donde:

- DVP es la distancia de visibilidad de parada en metros,
- v es la velocidad de operación en km/h,
- t es el tiempo de percepción reacción en segundos,
- a es la tasa de desaceleración en m/s^2 , y
- m es la pendiente en porcentaje.

Dentro del análisis de confiabilidad, la DVP y la pendiente m se asumieron como variables de tipo deterministas, mientras que la velocidad de operación (v), el tiempo de percepción reacción (t) y la tasa de desaceleración (a) son variables aleatorias cuyas características se describen en la Tabla 1.

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)* de esta 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



Foto 3. Curva abscisa K7+500.

Parámetro	Media	Desviación estándar	Distribución	Referencia
v	Estudio de velocidades	Estudio de velocidades	Normal	Análisis de los datos de campo
t	1,5 s	0,40 s	Log normal	(XVII)
a	4,2 m/s^2	0,60 m/s^2	Normal	(XVIII)

Tabla 1. Funciones de distribución de probabilidad de las variables del sistema.

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 cero. Teniendo en cuenta lo anterior, la forma apropiada del modelo corresponde con la propuesta por varios autores en las referencias (III, XII y XIX a XXIII), que se relaciona a continuación:

$$\hat{E}(Y) = a_0 \times L^{a_1} \times V \times e^{\sum b_j x_j} \quad (4)$$

Donde:

- $\hat{E}(Y)$ es el número de accidentes esperados,
- a_0, a_1 y b_j son parámetros del modelo,
- L es la longitud de la curva (m),
- V el tránsito 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.

Como medidas para evaluar la bondad del ajuste se pueden utilizar dos medidas estadísticas empleadas por Ibrahim, Sayed y Sawalha^(III y XXIII), que fueron propuestas por McCullagh y Nelder^(XXIV).

La primera corresponde al estadístico de Pearson y la segunda es la "Scaled Deviance" ("Desviación") 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:

$$\text{Pearson } \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - Y_i]^2}{\text{Var}(Y_i)} \quad (5)$$

Donde:

- y_i es el número de accidentes observados,
- Y_i es el número de accidentes esperados, y
- $\text{Var}(Y_i)$ es la varianza del número de accidentes esperados.

Resultados y discusión

Una vez definida la función de estado límite, las funciones de distribución y los parámetros de cada variable que define esta, se programaron rutinas con el objeto de estimar la *probabilidad de no cumplimiento (Pnc)* de la visibilidad a través de diferentes técnicas de simu-

lación como simulaciones de Monte Carlo, Series de Taylor y Estimativos Puntuales.

Los resultados de cada una de las técnicas de simulación se presentan en la Figura 2 (a) y (b) para el sentido de avance y el sentido inverso respectivamente, en las que se muestra que las diferentes técnicas de simulación empleadas se ajustan entre sí, lo que reafirma la validez de los resultados. Asimismo la Figura 2 permite establecer que bajo las condiciones de visibilidad ofrecidas por el corredor y las velocidades a las cuales circulan los vehículos, el 25,5% de las curvas cumplirían con la distancia de visibilidad de parada requerida en el sentido del abscisado 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.

Estudios realizados por Ibrahim y Sayed⁽¹⁰⁾ establecen que para un estudio de caso sobre una autopista en Canadá, que el 20% de las curvas tendrían Pnc de alrededor de 0,12 mientras que el 50% de las curvas tendrían Pnc de 0,46. Estos resultados fueron obtenidos 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, Gibreel y Easa⁽¹⁰⁾ las distancias de visibilidad pueden variar significativamente en 2D y 3D. La Figura 3 muestra las diferencias encontradas al estimar la distancia de visibilidad en 3D con la metodología propuesta en la presente investigación y las distancias de visibilidad en 2D propuestas por Ibrahim y Sayed⁽¹⁰⁾. 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.

Como resultado tanto de la estimación de velocidades a partir de los modelos de predicción, como del estudio de velocidades puntuales, se obtuvieron las velocidades de operación de cada una de las curvas. La Figura 4 presenta las diferencias encontradas en la estimación de velocidades y permite observar que en la mayoría de los casos los modelos de predicción sobreestiman la velocidad de operación, lo cual también hace que la Pnc sea

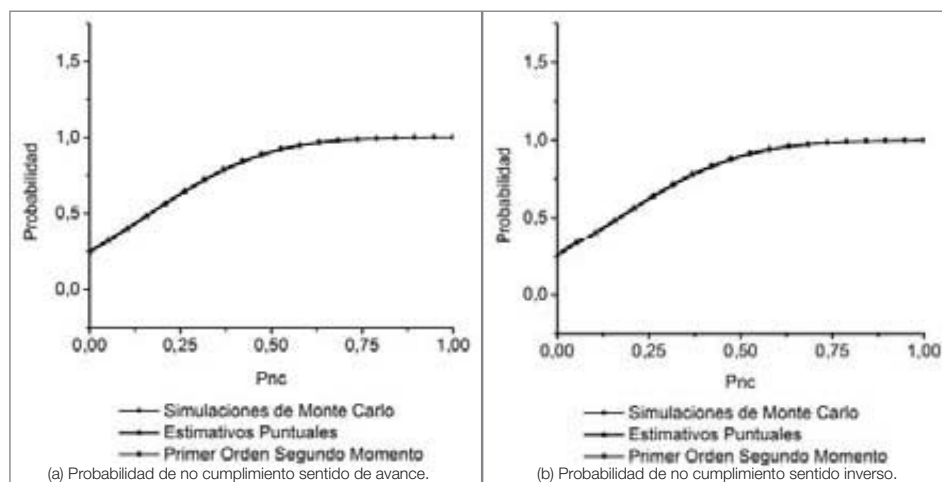


Figura 2. Distribución acumulada Pnc para curvas horizontales, comparación entre técnicas.

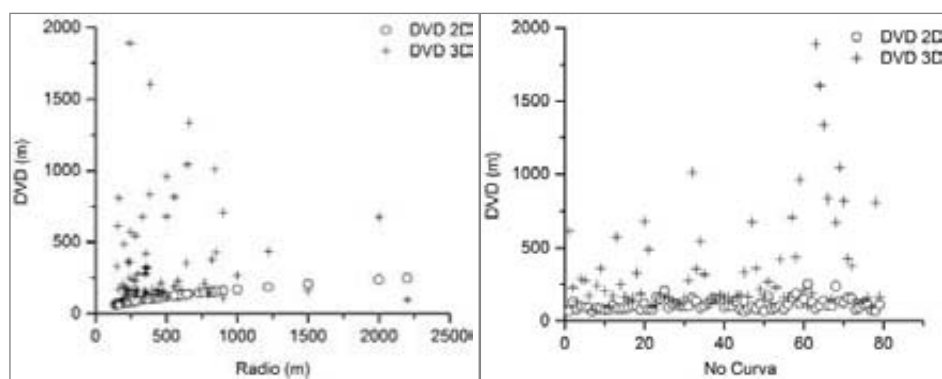


Figura 3. Distancia de visibilidad 2D Vs 3D.

mayor. Estos resultados ratifican la importancia de realizar mediciones en campo que permitan establecer las condiciones reales del corredor.

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.

Asimismo, con el objeto de evaluar la incidencia de la visibilidad en cada tipo de accidentes, se construyeron matrices discriminadas por accidentes con solo daños y accidentes con lesionados y muertos; y se eliminaron 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 (6), (7) y (8), que corresponden al modelo de predicción

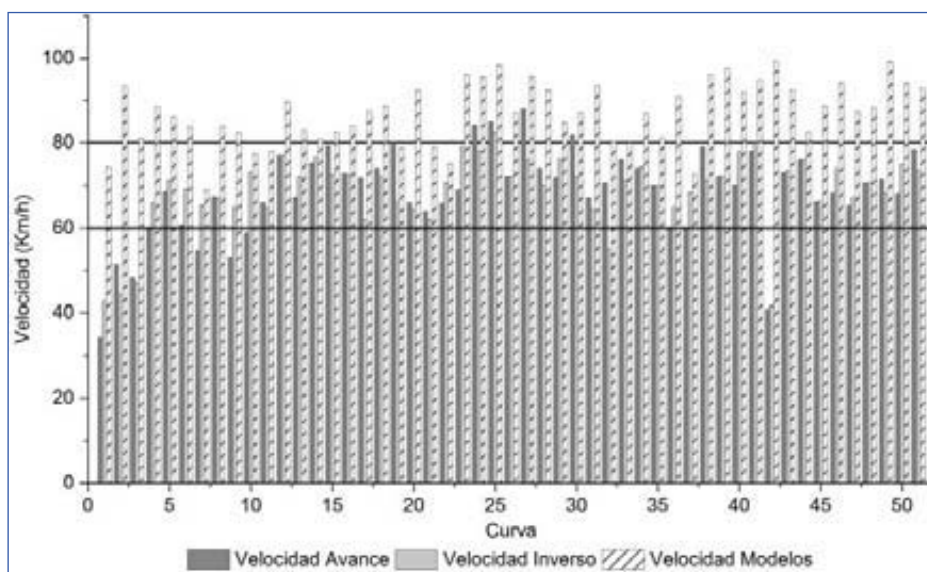


Figura 4. Velocidades de operación – modelos de predicción Vs mediciones de campo.

para el total de accidentes (*tot*), solo daños (*sdo*) y solo muertos y heridos (*mhe*) respectivamente:

$$\hat{E}(y)_{tot} = 4,45 \times 10^{-4} \times L^{0,152} \times 2026 \times e^{0,490 \ln Pnc} \quad (6)$$

$$\hat{E}(y)_{sdo} = 1,56 \times 10^{-4} \times L^{0,292} \times 2026 \times e^{0,735 \ln Pnc} \quad (7)$$

$$\hat{E}(y)_{mhe} = 1,19 \times 10^{-4} \times L^{0,355} \times 2026 \times e^{0,75 \ln Pnc} \quad (8)$$

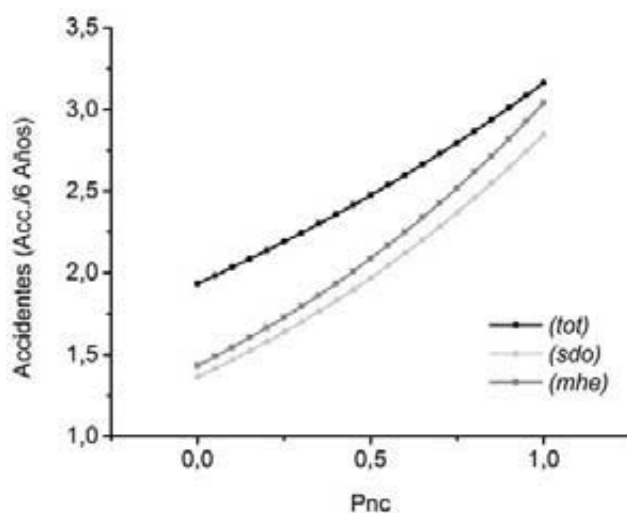


Figura 5. Relación entre los accidentes esperados y la Pnc.

El resultado de la estimación de los parámetros se presenta en la Tabla 2.

Los parámetros estimados para el modelo muestran una relación positiva entre las variables incluidas y los accidentes calculados, principalmente con la Pnc tal y 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 5 presenta la relación entre los accidentes calculados y la Pnc para una curva con valores medios de exposición (L igual a 150 m y TPDA igual a 2.026).

Conclusiones

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 - 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%.

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 Pnc, y por ende el riesgo 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

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
a_0	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
a_1	0,152	0,243	0,626	0,536	0,292	0,200	1,462	0,159	0,355	0,384	0,926	0,368
b_1	0,490	0,421	1,166	0,253	0,735	0,444	1,656	0,113	0,751	0,496	1,516	0,148

Tabla 2. Parámetros de la función de desempeño de seguridad.

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.

Adicionalmente 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.

Futuras investigaciones

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 a la ampliación del estado del arte en relación al vínculo existente entre la probabilidad de no cumplir las especificaciones técnicas de diseño teóricas y la ocurrencia de accidentes.

Al cuantificar la Pnc como medida de riesgo se pueden identificar los sectores de las carreteras más propen-



Foto 4. Curva con problemas de visibilidad – K6+600.

so a la ocurrencia de accidentes y, de esta forma, priorizar la inversión de los recursos disponibles para los planes de seguridad vial. Paralelamente estudios de antes y después 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 alimentan 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 a la edad, niveles de estrés y la expectativa o estado de alerta de los conductores.



Foto 5. Análisis de información, curva con problemas de visibilidad, K6+600.

- 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.

Se pueden encaminar futuras investigaciones al análisis de las probabilidades de no cumplimiento a partir de diferentes técnicas filmicas 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 georreferenciación 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.

Referencias bibliográficas

- I. K. Ismail y T. Sayed, "Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design", *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 36, n.o 5, pp. 743-753, 2009.
- II. S. E. Ibrahim, T. Sayed, y K. Ismail, "Methodology for safety optimization of highway cross-sections for horizontal curves with restricted sight distance", *Accid. Anal. Prev.*, vol. 49, pp. 476-485, 2012.
- III. S. E.-B. Ibrahim y T. Sayed, "Developing safety performance functions incorporating reliability-based risk measures", *Accid. Anal. Prev.*, vol. 43, n.o 6, pp. 2153-2159, 2011.
- IV. Y. Hassan, G. Gibreel, y S. M. Easa, "Evaluation of highway consistency and safety: Practical application", *J. Transp. Eng.*, vol. 126, n.o 3, pp. 193-201, 2000.
- V. G. M. Gibreel, S. M. Easa, Y. Hassan, y I. A. El-Dimeery, "State of the art of highway geometric design consistency", *J. Transp. Eng.*, vol. 125, n.o 4, pp. 305-313, 1999.
- VI. F. P. Navin, "Safety factors for road design: Can they be estimated?", *Transp. Res. Rec.*, n.o 1280, 1990.
- VII. F. P. Navin, "Safe road design as limit state", en *Proceedings of the Conference, Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents, Part Two*, 1991.
- VIII. A. Faghiri y M. J. Demetsky, "Reliability and Risk Assessment in the Prediction of Hazards at Rail-Highway Grade Crossings", *Transp. Res. Rec.*, n.o 1160, pp. 45-51, 1988.
- IX. S. M. Easa, "Reliability-based design of sight distance at railroad grade crossings", *Transp. Res. Part Policy Pract.*, vol. 28, n.o 1, pp. 1-15, 1994.
- X. T. Echaveguren, M. Bustos, y H. De Solminihaç, "Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts", *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 32, n.o 6, pp. 1030-1038, 2005.
- XI. K. Ismail y T. Sayed, "Risk-Based Highway Design", *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2195, n.o 1, pp. 3-13, 2010.
- XII. S. E.-B. Ibrahim, "Risk-based design of horizontal curves with restricted sight distance", University of British Columbia, 2011.
- XIII. L. Richl y T. Sayed, "Evaluating the safety risk of narrow medians using reliability analysis", *J. Transp. Eng.*, vol. 132, n.o 5, pp. 366-375, 2006.
- XIV. M. Sarhan y Y. Hassan, "Reliability-based methodology to calculate lateral clearance on three-dimensional alignment", en *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, 2009.
- XV. O. Ditlevsen y H. O. Madsen, *Structural reliability methods*, vol. 178. Wiley New York, 1996.
- XVI. Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, "Manual de Diseño Geométrico de Diseño de Carreteras". 2008.
- XVII. N. Lerner, "Age and driver perception-reaction time for sight distance design requirements", en *1995 Compendium of Technical Papers. Institute of Transportation Engineers 65th Annual Meeting.*, 1995.
- XVIII. D. B. Fambro, K. Fitzpatrick, y R. J. Koppa, *Determination of stopping sight distances*. Transportation Research Board, 1997.
- XIX. W. Ackaah y M. Salifu, "Crash prediction model for two-lane rural highways in the Ashanti region of Ghana", *IATSS Res.*, vol. 35, n.o 1, pp. 34-40, 2011.
- XX. P. Greibe, "Accident prediction models for urban roads", *Accid. Anal. Prev.*, vol. 35, n.o 2, pp. 273-285, 2003.
- XXI. R. Kulmala, "Safety at Rural Three-And Four-Arm Junctions. Development and Application of Accident Prediction Models", vol. 233. 1995.
- XXII. L. A. Richl, "Reliability based highway geometric design", University of British Columbia, 2003.
- XXIII. Z. Sawalha y T. Sayed, "Traffic accident modeling: some statistical issues", *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, n.o 9, pp. 1115-1124, 2006.
- XIV. P. McCullagh y J. A. Nelder, "General linear models", Chapman Halls Lond., 1989. ■