

MODELO DE GRAVEDAD DE CHOQUES PARA COSTA RICA: EFECTO DEL TRÁFICO, LÍMITE DE VELOCIDAD, ROL DE LA VÍCTIMA Y TIPO DE CHOQUE

*Berny Madriz Mesén,
Jonathan Agüero Valverde*

Resumen

En Costa Rica, los choques viales son la principal causa de muerte para las personas de 0 a 45 años y cobraron la vida de más de 700 personas en el 2009. Sin embargo, poco se sabe acerca de los factores que contribuyen a aumentar la gravedad de dichos choques. Este documento investiga los factores que afectan la gravedad de las lesiones en los choques en Costa Rica. Se estimaron modelos logit ordenados para las personas involucradas en choques que se producen en los segmentos de carretera, controlado por características de las personas, de los choques y de la carretera. También se muestra el uso de modelos de respuesta ordenados para la estimación de la variación de las proporciones en cada nivel de gravedad de choque con los cambios en los atributos de infraestructura tales como tráfico, ancho del carril, ancho del espaldón y límite de velocidad. Los resultados de esta investigación indican que a medida que el tráfico, número de carriles, ancho de los carriles y ancho del espaldón aumentan la gravedad de los choques disminuye. Los resultados del modelo también sugieren que los aumentos en el límite de velocidad están asociados con el aumento de la probabilidad de accidentes de alta gravedad. En cuanto al tipo de accidente, los vuelcos tienen la gravedad esperada más alta, seguido de atropello a ciclista y salida de la vía. Además, los pasajeros de motocicletas, peatones y pasajeros de vehículos tienen una mayor probabilidad de choques graves que los conductores de vehículos.

Palabras Clave: Modelos de gravedad, modelos logit ordenados, Costa Rica, accidentes de tránsito

Abstract

In Costa Rica, road crashes are the leading cause of death for young people aged 0-45 years, and claimed the lives of more than 700 people in 2009; however, little is known about the contributing factors to crash severity. This paper investigates the factors that affect injury severities in Costa Rica. Ordered logit models were estimated for persons involved in crashes occurring in road segments while controlling for person, crash and roadway characteristics. Also the use of ordered response models for estimation of the change of proportions in each crash severity level with changes in infrastructure attributes such traffic, lane width, shoulder width and speed limit is proposed and illustrated. The findings of this research indicate that as traffic, number of lanes, lane width and shoulder width increase, the likelihood of high severity crashes decrease. The model results also suggest that increases in the speed limit are associated with the increasing likelihood of high severity crashes. In terms of type of crash, rollover crashes have the higher expected severity, followed by hit bicyclist and ran-of-the-road crashes. In addition, motorcycle passengers, pedestrians and vehicle passengers have a higher likelihood of severe crashes than vehicle drivers.

Keywords: Severity models, ordered logit, Costa Rica, traffic accidents.

Recibido: 23 de marzo 2015 **Aprobado:** 03 de setiembre 2015

1. INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, los choques viales son la principal causa de muerte para los jóvenes de 0 a 45 años de edad (Agüero-Valverde y Pujol,

2012), y cobraron la vida de más de 700 personas en el 2009 (World Health organization, 2010). Por otra parte, Costa Rica tuvo una tendencia estable en las muertes de tráfico de alrededor de 16 por 100 000 habitantes desde 2000 hasta 2009 (World



Health organization, 2010). Claramente, las tasas de muertes y lesiones por accidentes de tráfico son inaceptablemente altas en todo el mundo y Costa Rica no es la excepción. El objetivo del Decenio de Acción para la Seguridad Vial de estabilizar y reducir la tendencia al aumento de víctimas mortales de accidentes de tránsito (World Health organization, 2010), sólo se puede lograr con un esfuerzo sostenido en todos los países. Como parte de ese esfuerzo, es necesario comprender mejor los factores que contribuyen a aumentar la gravedad de choques en Costa Rica.

Los modelos de respuesta ordenada de gravedad de choques han sido propuestos desde la década de los noventas para establecer relaciones estadísticas entre la gravedad de un choque y las características de las personas, vehículos, carreteras y el medio ambiente que se presenta en un accidente. Los modelos de respuesta ordenados aprovechan la naturaleza establecida de los niveles de gravedad de lesiones en choques para estimar mejor los efectos que las variables explicativas tienen en el resultado del choque.

Además, el cambio en las proporciones de cada tipo de accidente debido a los cambios en las variables explicativas tales como tránsito, límite de velocidad, y ancho del carril son de gran interés para la estimación de las frecuencias de choque. Actualmente, el Manual de Seguridad en las Carreteras de los Estados Unidos (HSM) (ASSHTO, 2010) expone proporciones constantes de los diferentes niveles de gravedad de choque; sin embargo, esta claro que esas proporciones no son constantes. Los modelos de respuesta ordenados proveen una manera fácil y confiable para estimar cómo esas proporciones se transforman con los cambios en variables independientes importantes, que describen la infraestructura para los diferentes tipos de vías. Por ejemplo, el cambio de proporciones de cada nivel de gravedad debido a las variaciones en el tránsito promedio diario anual (TPDA) para un determinado tipo de carretera se puede presentar tanto en la forma de ecuaciones como en gráficas. Esto es lo que Geedipally, Bonneson, Pratt y Lord (2013) llaman la función de distribución de la gravedad.

El objetivo de este documento es establecer los efectos del TPDA, límite de velocidad, ancho de carriles, ancho de espaldón y tipo de víctima

en la gravedad de los choques a través de la utilización de modelos de respuesta ordenados para Costa Rica. También, se busca usar modelos de respuesta ordenados para la estimación de la variación de las proporciones en cada nivel de gravedad de choques, con los cambios en los atributos de infraestructura tales como TPDA y límites de velocidad.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera, en primer lugar, se presenta una revisión de la literatura relacionada con la aplicación de modelos de respuesta ordenada al análisis de gravedad de choques. Luego, se presenta la metodología estadística y se describen los datos analizados. A continuación se analizan los resultados. Por último, se ofrecen las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

1.1 Revisión Bibliográfica

Uno de los primeros estudios que propusieron el uso de modelos de respuesta ordenados fue presentado por O'Donnell y Connor en 1996. En el artículo, los autores compararon modelos logit y probit ordenados para estimar las probabilidades de cuatro niveles de gravedad de las lesiones en función de los atributos del conductor y del choque. Sus resultados sugieren que la gravedad de las lesiones aumenta con la velocidad, la antigüedad del vehículo, la edad de los ocupantes, el sexo femenino, niveles de alcohol en la sangre mayores a un 0,08 por ciento, y la falta de uso de cinturón de seguridad. Este modelo presenta los efectos marginales de las covariables, pero no se analizaron los factores de carretera como el TPDA o el límite de velocidad.

Duncan, Khattak y Council (1998) analizó la gravedad de los choques entre camiones y automóviles de pasajeros utilizando modelos probit ordenados. Los autores encontraron que las variables que aumentan la gravedad de las lesiones de los ocupantes de vehículos de pasajeros incluyen la oscuridad, los altos diferenciales de velocidad, límites de velocidad elevados, pendiente, estar en el vehículo golpeado en la parte trasera, la conducción en estado de ebriedad y ser mujer. Por otro lado, el TPDA por carril y el asiento infantil fueron encontrados como variables para disminuir la gravedad de la

lesión. Este modelo también presenta los efectos marginales de las covariables.

Renski y Khattak (1999) estudiaron el efecto de los aumentos de límite de velocidad en la gravedad de las lesiones del accidente. Para ello, los autores analizaron los accidentes de un solo vehículo en las carreteras de Carolina del Norte mediante un análisis de comparación por parejas y modelos probit ordenados. Los resultados mostraron una mayor probabilidad de lesiones menores y no incapacitantes, en segmentos en los que los límites de velocidad se aumentaron de 55 mph a 60 mph o bien 65 mph. Los segmentos de carreteras donde los límites de velocidad aumentaron 10 mph resultaron en una mayor probabilidad de aumento de la gravedad en comparación con las que aumentaron solo 5 mph. En este trabajo se presentan los efectos marginales, pero las características de la carretera no se incluyeron.

Khattak (2001) analizó la gravedad de las lesiones en accidentes de choque trasero multivehículo, utilizando modelos probit ordenados para los conductores en Carolina del Norte entre 1994 y 1995. Los resultados del modelo muestran que encontrarse en un vehículo más nuevo reduce la severidad de lesiones para los conductores. Los modelos también revelaron que los factores de carretera como TPDA, límite de velocidad y el número de carriles no muestran una correlación significativa con la gravedad del choque.

Kockelman y Kweon (2002), desarrollaron modelos probit ordenados para examinar el riesgo de los diferentes niveles de lesiones sufridas bajo todo tipo de accidentes, los choques de dos vehículos, y los accidentes de un solo vehículo. Los resultados del trabajo sugieren que las camionetas y los vehículos utilitarios deportivos son menos seguros que los vehículos de pasajeros en condiciones de accidente de un solo vehículo, pero más seguro para sus conductores en dos accidentes de vehículos. Los modelos no incluyeron variables de la infraestructura vial.

Khattak, Bawlovich, Soulerette y Hallmark (2002) estudiaron los factores relacionados con la severidad del choque para conductores de la tercera edad, utilizando modelos probit ordenados. Los resultados más interesantes fueron: la edad avanzada del conductor y la ausencia de

sistemas de protección de los ocupantes, así como conducir ebrio se correlacionan con el aumento de la gravedad. Entre los factores de carretera, se encontró que el límite de velocidad se correlaciona con aumentos en la gravedad de la lesión, pero no se analizaron otros factores tales como el TPDA y el ancho del carril.

Abdel-Aty (2003) estimó modelos logit y probit ordenados, así como logit multinomiales de gravedad del choque para los segmentos de carretera, las intersecciones señalizadas y las plazas de peaje de Florida en 2003. El análisis mostró que los conductores de mayor edad, los conductores varones y los que no llevaban el cinturón de seguridad tenían mayor probabilidad de una lesión grave. Los factores de infraestructura no se incluyeron en el análisis.

En un estudio de los accidentes de peatones, Zajac e Ivan (2003) propusieron el uso de modelos probit ordenados para evaluar el efecto de la calzada y las características de tipo de zona en la gravedad de la lesión. Muchas de las variables de carretera como el TPDA, el límite de velocidad y parqueo paralelo se encontraron no significativas; sin embargo, el ancho de la calzada presentó una correlación positiva con los aumentos en la severidad del choque.

En un análisis de los efectos del consumo de alcohol del conductor en la gravedad de los choques, Traynor (2005) utilizó modelos logit, logit ordenados y Tobit. Las estimaciones de los modelos logit ordenados indican que el consumo de alcohol del conductor aumenta la gravedad de las lesiones como resultado de un accidente. Al igual que en muchos otros casos, no se incluyeron los factores de carretera en los modelos.

Neyens y Boyle (2008) estudiaron la influencia de la distracción del conductor en la gravedad de las lesiones sufridas por los conductores adolescentes y sus pasajeros mediante un modelo de logit ordenado con datos del Sistema General de Estimación del USDOT del año 2003 (GES por sus siglas en inglés). Como era de esperar, el exceso de velocidad y la distracción por teléfono celular o por pasajero aumenta la probabilidad de accidentes para los conductores adolescentes y sus pasajeros. Variables que representan los factores de infraestructura no se incluyeron en el análisis.

Pai y Saleh (2008) estimaron modelos logit ordenados para el estudio de la gravedad de la

lesión de motociclistas en intersecciones tipo T en el Reino Unido. Entre las variables se incluyeron las condiciones de luz de la calle analizada y el control de la intersección, pero los resultados no fueron concluyentes. Por otro lado, los choques en carreteras no urbanizadas se correlacionaron con aumentos en la gravedad de los choques.

Para intersecciones no semaforizadas, Haleem y Abdel-Aty (2010) estimaron modelos probit ordenados, así como probit binario y modelos logit anidados. Entre los resultados, el TPDA en la carretera principal se correlacionó con la disminución de la gravedad mientras que otras características de la carretera, como el ancho del hombro derecho y el hombro izquierdo (en la mediana) en la carretera principal aumentan la gravedad del choque.

También se han propuesto modelos más sofisticados de respuesta ordenada. Wang y Abdel-Aty (2008) propusieron el uso de modelos de probabilidades proporcionales parciales, donde uno o más coeficientes son diferentes según los niveles de gravedad. Eluru, Bagherib, Miranda-Moreno y Fu (2012) sugirieron el uso de la segmentación latente basado en modelos logit ordenados para relajar el supuesto de que el efecto de los factores exógenos en la gravedad de la lesión es constante a través de todos los accidentes. Más detalles sobre los modelos de gravedad de choque se pueden encontrar en Savolainen, Mannering, Lord y Quddus (2011).

A partir de la revisión de la literatura en los modelos ordenados de gravedad del choque surgen dos deficiencias: a) la mayoría de los documentos se centran en las víctimas y las características de choque, pero poco se sabe sobre el efecto de los factores de la calzada la gravedad del choque, a excepción del TPDA que se analiza en varios artículos; y b) 80 % de las muertes de tránsito ocurren en países de ingresos medios (World Health Organization, 2013); sin embargo, prácticamente toda la literatura de la gravedad del choque proviene de estudios realizados en países de ingresos elevados. El presente estudio se suma al creciente cuerpo de conocimientos sobre la gravedad del choque mediante el análisis de los factores que contribuyen a la severidad, especialmente características de la vía tales como el TPDA, el número de carriles y ancho de carriles y espaldón

Además, se presenta la perspectiva de un país latinoamericano de renta media (Costa Rica). Existen modelos de respuestas ordenadas más sofisticados; no obstante, los modelos logit ordenados proporcionan una manera fácil y confiable para analizar niveles de gravedad de choque y estimar el cambio en las proporciones de cada uno de estos niveles con los cambios en los factores de infraestructura.

2. METODOLOGÍA

Los modelos de probabilidad ordenados o de respuesta ordenada se derivan mediante la definición de una variable continua z_i , no observada o latente que se especifica típicamente como una función lineal de variables observadas y no observadas (Washington y Karlaftis, 2011):

$$z_i = \beta X_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Donde X_i es un vector de variables para la observación i , β es un vector de parámetros estimables y ε_i es una perturbación aleatoria o término de error.

Los datos ordinales observados, y_i , son asignados a la variable latente z_i de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} y_i &= 1 \text{ if } z_i \leq \mu_1 \\ y_i &= 2 \text{ if } \mu_1 < z_i \leq \mu_2 \\ y_i &= 3 \text{ if } \mu_2 < z_i \leq \mu_3 \\ y_i &= 4 \text{ if } z_i > \mu_3 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde μ_i son los umbrales estimables que definen y_i , y los niveles de gravedad observados para este análisis son los siguientes: (1) ninguna herida, (2) lesiones menores, (3) lesiones mayores y (4) lesiones fatales.

Los parámetros de umbral μ_i se estiman en conjunto con los parámetros del modelo β . El problema de la estimación del modelo se convierte ahora en un problema de determinación de la probabilidad de 4 respuestas ordenadas específicas para cada observación. Para esto, es necesario hacer la suposición de la distribución para el término de error. Para este estudio, se supone que ε tiene una distribución logística. Bajo este supuesto, la distribución de probabilidad acumulativa está dada por:

$$P(y \leq j) = \Lambda(\mu_j - X\beta) = 1 / [1 + e^{-(\mu_j - X\beta)}] \quad (3)$$

La probabilidad de estar en la categoría de gravedad j viene dada por:

$$P(y = j) = \Lambda(\mu_j - X\beta) - \Lambda(\mu_{j-1} - X\beta) \\ P(y = j) = 1 / [1 + e^{-(\mu_j - X\beta)}] - 1 / [1 + e^{-(\mu_{j-1} - X\beta)}] \quad (4)$$

Donde:

$\beta_0 = 0$, la constante en el predictor lineal se iguala a cero.

$$\mu_0 = -\infty.$$

$$\mu_4 = +\infty.$$

Para el caso particular del modelo presentado aquí las probabilidades se definen como:

$$P(y = 1) = 1 / [1 + e^{-(\mu_1 - X\beta)}] \\ P(y = 2) = 1 / [1 + e^{-(\mu_2 - X\beta)}] - 1 / [1 + e^{-(\mu_1 - X\beta)}] \\ P(y = 3) = 1 / [1 + e^{-(\mu_3 - X\beta)}] - 1 / [1 + e^{-(\mu_2 - X\beta)}] \\ P(y = 4) = 1 / [1 + e^{-(\mu_4 - X\beta)}] \quad (5)$$

El efecto de las variables en las categorías de lesiones intermedias es ambiguo en modelos logit ordenados dado que los coeficientes sólo muestran la probabilidad de estar en las categorías extremas. Para obtener un estimado de los efectos en las categorías interiores de gravedad, los efectos marginales se estiman para cada categoría. Para las variables continuas, las derivadas parciales muestran los efectos marginales:

$$\partial P(y=1)/\partial X = -(e^{-(\mu_1 - X\beta)} / [1 + e^{-(\mu_1 - X\beta)}]^2) \beta \\ \partial P(y=2)/\partial X = (e^{-(\mu_1 - X\beta)} / [1 + e^{-(\mu_1 - X\beta)}]^2 - e^{-(\mu_2 - X\beta)} / [1 + e^{-(\mu_2 - X\beta)}]^2) \beta \\ \partial P(y=3)/\partial X = (e^{-(\mu_2 - X\beta)} / [1 + e^{-(\mu_2 - X\beta)}]^2 - e^{-(\mu_3 - X\beta)} / [1 + e^{-(\mu_3 - X\beta)}]^2) \beta \\ \partial P(y=4)/\partial X = -(e^{-(\mu_3 - X\beta)} / [1 + e^{-(\mu_3 - X\beta)}]^2) \beta \quad (6)$$

Para las variables categóricas, los efectos marginales se calculan como la diferencia en las probabilidades estimadas con las variables categóricas cambiando de cero a uno. Para los efectos de este artículo, los efectos marginales se estiman en la media de las variables independientes.

Se proponen tres medidas de bondad de ajuste para los modelos: el Criterio de Información de Akaike (1974) (AIC por sus siglas en inglés), la desviación residual, y la pseudo χ^2 (O'Donnell y Connor, 1996). Además, se utilizó la prueba de

razón de verosimilitud para la selección de las variables incluidas en el modelo.

En el caso general, la AIC se define como:

$$AIC = 2k - 2\ln L_b \quad (7)$$

Donde k es el número de parámetros en el modelo y $\ln L_b$ es el logaritmo de la verosimilitud en la convergencia. Los valores más bajos de AIC indican un mejor ajuste para el modelo. La segunda parte en el lado derecho de la Ecuación 7 ($-2\ln L_b$) también se conoce como la desviación residual, que es indicativo de la bondad del ajuste para un modelo. Como en el caso de la AIC, para la desviación residual se prefieren valores más bajos.

El pseudo χ^2 se define por:

$$\chi^2 = 1 - (\ln L_p / \ln L_0) \quad (8)$$

Donde $\ln L_0$ es el logaritmo de la verosimilitud calculada para un modelo con solo las constantes. El pseudo χ^2 es análogo al coeficiente de determinación en modelos de regresión lineal donde se prefieren valores más altos.

La prueba de razón de verosimilitud se basa en la estadística D:

$$D = -2\ln L_n + 2\ln L_a \quad (9)$$

Donde $\ln L_n$ es el logaritmo de la verosimilitud del modelo nulo y $\ln L_a$ es el logaritmo de la verosimilitud del modelo alternativo. El modelo nulo es un caso especial del modelo alternativo, dado que tiene un mayor número de variables independientes que el primero. La estadística de D tiene una distribución de probabilidad que es de aproximadamente χ^2 con grados de libertad igual a la diferencia en el número de parámetros entre el modelo alternativo y modelo nulo.

3. DESCRIPCIÓN DE DATOS

La base de datos de choques utilizada en el análisis procede del Consejo de Seguridad Vial de Costa Rica (COSEVI). La base de datos original incluye todos los accidentes registrados digitalmente en el país para los años 2008 a 2011.

Se registraron cuatro niveles de gravedad para las víctimas de accidentes de tránsito: sin lesiones, lesiones leves, lesiones graves y lesiones fatales. La base de datos fue filtrada para retener sólo los choques que ocurrieron fuera de intersecciones en la red vial nacional, dado que existen datos del inventario disponible en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT). Cada accidente fue localizado espacialmente en su respectivo segmento de carretera por medio de las coordenadas del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) contenidas en el archivo digital y los datos de infraestructura se obtuvieron del inventario digital de carreteras. Todas las personas involucradas en los accidentes seleccionados se incluyeron con lo que se obtuvo un tamaño de muestra de 27 494 personas.

La Tabla 1 muestra las estadísticas descriptivas de las variables incluidas en los modelos. Un número importante de variables fue incluido en los modelos iniciales y se retiraron las variables que resultaron significativas. Factores de infraestructura tales como el tipo de superficie, el alineamiento horizontal y vertical, y la calidad de la señalización resultaron estadísticamente no significativos. Otras variables que se consideran importantes como la edad o la hora del choque presentan una porción significativa de valores incompletos para el conjunto de datos; por lo tanto, no se incluyeron en el análisis. Otras variables, como el uso del cinturón de seguridad y conducir ebrio no fueron codificadas en la base de datos.

De las estadísticas resumen se desprende que más del 86 % de las personas involucradas en accidentes automovilísticos en las carreteras de Costa Rica resultan ilesas, mientras que el 11 % de las víctimas presentan heridas leves, 1,5 % presentan lesiones graves y 0,1 % de las accidentados son víctimas mortales. En cuanto al tipo de accidente, la colisión entre los vehículos es el tipo más común con más del 90 % de los casos, con los atropellos en un distante segundo lugar con un 3 %. Para el rol de la víctima el tipo más común, como era de esperar, es el de conductor de vehículos con 94 %, seguido por los pasajeros de vehículos con un 3 % y los peatones con un 1,5 %. Por género, el 13 % de las personas eran mujeres.

Finalmente, en términos de factores de carretera, el TPDA tiene una media de 29 849 vehículos, con un máximo de 99 656 vehículos. El número de carriles van de 1 a 7 con un promedio de 3,1 carriles, mientras que el ancho medio de carril es de 3,5 m y el ancho medio del espaldón es sólo 0,35 m.

4. RESULTADOS

Los modelos se estimaron utilizando el lenguaje de programación R (R Development Core Team, 2013), un entorno de software libre para el análisis estadístico usado ampliamente en la academia para realizar análisis estadísticos complejos. La Tabla 2 muestra las estimaciones de los coeficientes y las medidas de bondad de ajuste para el modelo logit ordenado final. Como se mencionó antes, se estimaron varios modelos añadiendo progresivamente nuevas variables. Si la variable resultaba significativa y la prueba de razón de verosimilitudes mostraba una mejoría estadísticamente significativa en la bondad del ajuste, dicha variable se mantuvo; de lo contrario, se descartó la variable.

Un modelo probit ordenado también se ajustó a las mismas variables mostradas en la Tabla 2 pero no se presenta aquí por brevedad. Las medidas de bondad de ajuste para el modelo probit resultaron inferiores en comparación con las del modelo de logit; por lo tanto, se seleccionó el modelo logit ordenado. La desviación residual y el AIC para el modelo probit eran 19.349,83 y 19,393,83, mientras que los valores para el modelo logit fueron menores (18,920.77 y 18,964.77 respectivamente). Además, el valor del seudo q^2 para el modelo logit ordenado fue mayor que el valor para el modelo probit; 0,228 frente a 0,211.

El valor del seudo q^2 para el modelo resultó relativamente alto en comparación con otros modelos logit o probit ordenados de gravedad de choques reportados en trabajos previos. Khattak (2001) reportó valores de seudo q^2 de 0,03, 0,067 y 0,066 para los tres modelos probit ordenados estimados; Duncan et al (1998) estimó valores de 0,075 y 0,067 para los modelos probit, Kockelman y Kweon (2002) encontraron valores de 0,045 a 0,086 por sus 6 modelos probit ordenados, y Abdel-

Tabla 1. Resumen estadístico de los datos.

Variable	Frecuencia	Promedio (proporción)*	d.e.	Mediana	Percentil 25	Percentil 75	Mínimo	Máximo
Gravedad del choque								
Sin lesión	23883	0.8687	0.0020					
Lesiones menores	3134	0.1140	0.0019					
Lesiones graves	430	0.0156	0.0007					
Lesiones fatales	47	0.0017	0.0002					
Múltiples vehículos	24792	0.9017	0.0018					
Atropello a peatón	868	0.0316	0.0011					
Atropello a ciclista	304	0.0111	0.0006					
Contra animal	45	0.0016	0.0002					
Caída de ocupante	89	0.0032	0.0003					
Contra objeto fijo	439	0.0160	0.0008					
Vuelco	177	0.00564	0.0005					
Salida de la vía	315	0.01156	0.0006					
Otros	465	0.0169	0.0008					
Conductor (base)	25847	0.9401	0.0014					
Pasajero	853	0.0310	0.0010					
Rol de la persona								
Conductor motocicleta	121	0.0044	0.0004					
Pasajero motocicleta	116	0.0042	0.0004					
Peatón	456	0.016	0.0008					
Ciclista	65	0.0024	0.0003					
Género								
Masculino (base)	23867	0.8680	0.0020					
Femenino	3627	0.1319	0.0020					
Factores de infraestructura								
TPDA/1000	27494	29.819	4.456	24.726	9.665	42.174	0.090	99.656
Número de carriles	27494	3.133	1.376	2	2	4	1	7
Ancho de carril	27494	3.519	0.525	3.5	3.3	3.8	2.1	6.3
Ancho de espaldón	27494	0.349	0.632	0	0	0.5	0	3.5
Límite de velocidad	27494	50.39845	13.634	45	40	60	15	80

*Proporciones son presentadas para variables categóricas.

Tabla 2. Modelo Logit ordenado para la gravedad de choques

Variable	Coeficiente	Error estándar	t	Pr(t)	Efectos marginales		
					Sin heridos	Heridos leves	Heridos graves
Múltiples vehículos (base)							
Atropello a peatón	0.7681	0.1196	6.4237	0.0000	-0.09073	0.08473	0.00547
Atropello a ciclista	1.4797	0.1397	10.5955	0.0000	-0.22398	0.20642	0.01596
Contra animal	0.9503	0.3575	2.6581	0.0079	-0.12195	0.11354	0.00765
Caida de ocupante	0.6619	0.2813	2.3533	0.0186	-0.07632	0.07133	0.00454
Contra objeto fijo	0.6568	0.1346	4.8812	0.0000	-0.07513	0.07023	0.00446
Vuelco	1.7339	0.1575	11.0117	0.0000	-0.28249	0.25840	0.02190
Salida de la vía	1.2442	0.1280	9.7195	0.0000	-0.17516	0.16229	0.01171
Otros	0.6218	0.1273	4.8847	0.0000	-0.07018	0.06563	0.00414
Conductor (base)							
Pasajero	3.5814	0.0772	46.4026	0.0000	-0.68957	0.54618	0.12867
Conductor motocicleta	3.0773	0.1822	16.8934	0.0000	-0.60356	0.50502	0.08887
Pasajero motocicleta	3.9309	0.1849	21.2564	0.0000	-0.74866	0.54057	0.18515
Peatón	3.7927	0.1456	26.0501	0.0000	-0.72705	0.54805	0.15990
Ciclista	2.6242	0.2732	9.6045	0.0000	-0.50211	0.43839	0.05768
Masculino (base)							
Femenino	-0.3138	0.0637	-4.9246	0.0000	0.02548	-0.02397	-0.00137
TPDA/1000	-0.0076	0.0014	-5.5053	0.0000	0.00068	-0.0064	-0.0004
Número de carriles	-0.0758	0.0259	-2.9246	0.0035	0.00675	-0.00634	-0.00037
Ancho de carril	-0.0975	0.0424	-2.3018	0.0214	-0.00815	-0.00048	-0.00048
Ancho de espaldón	-0.0816	0.0360	-2.2677	0.0234	0.00726	-0.00682	-0.00040
Límite de velocidad	0.0102	0.0018	5.5628	0.0000	-0.00091	0.00085	0.00005
umbrales							
μ_1	2.1521	0.1887	11.4067	0.0000			
μ_2	5.1599	0.1978	26.0872	0.0000			
μ_3	7.5861	0.2422	31.3251	0.0000			

Nota: Desviación Residual: 18920.77, AIC: 18964.77, Seudo Q_2 : 0.228

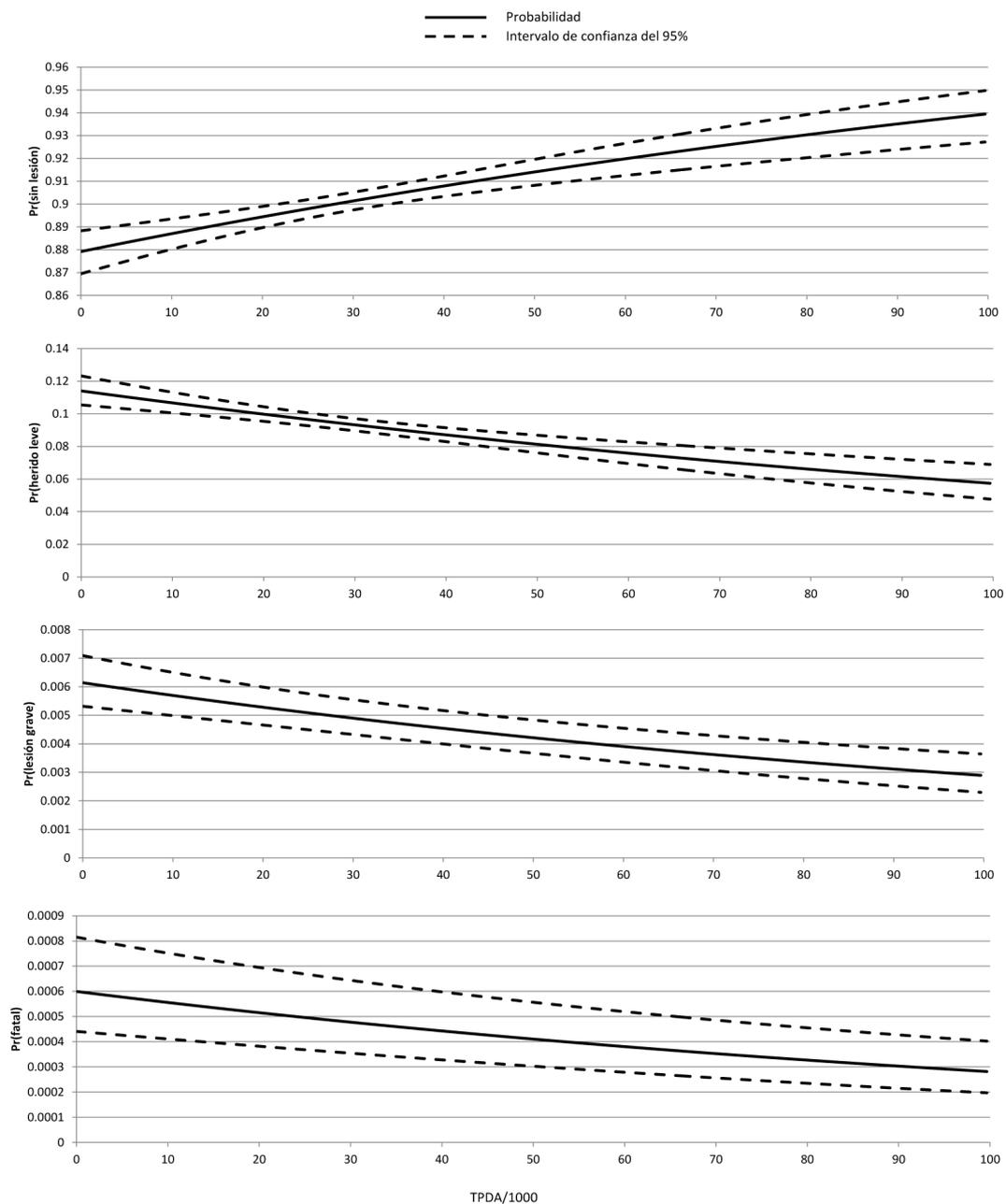


Figura 1. Efectos del TPDA en la probabilidad para diferentes gravedades del choque

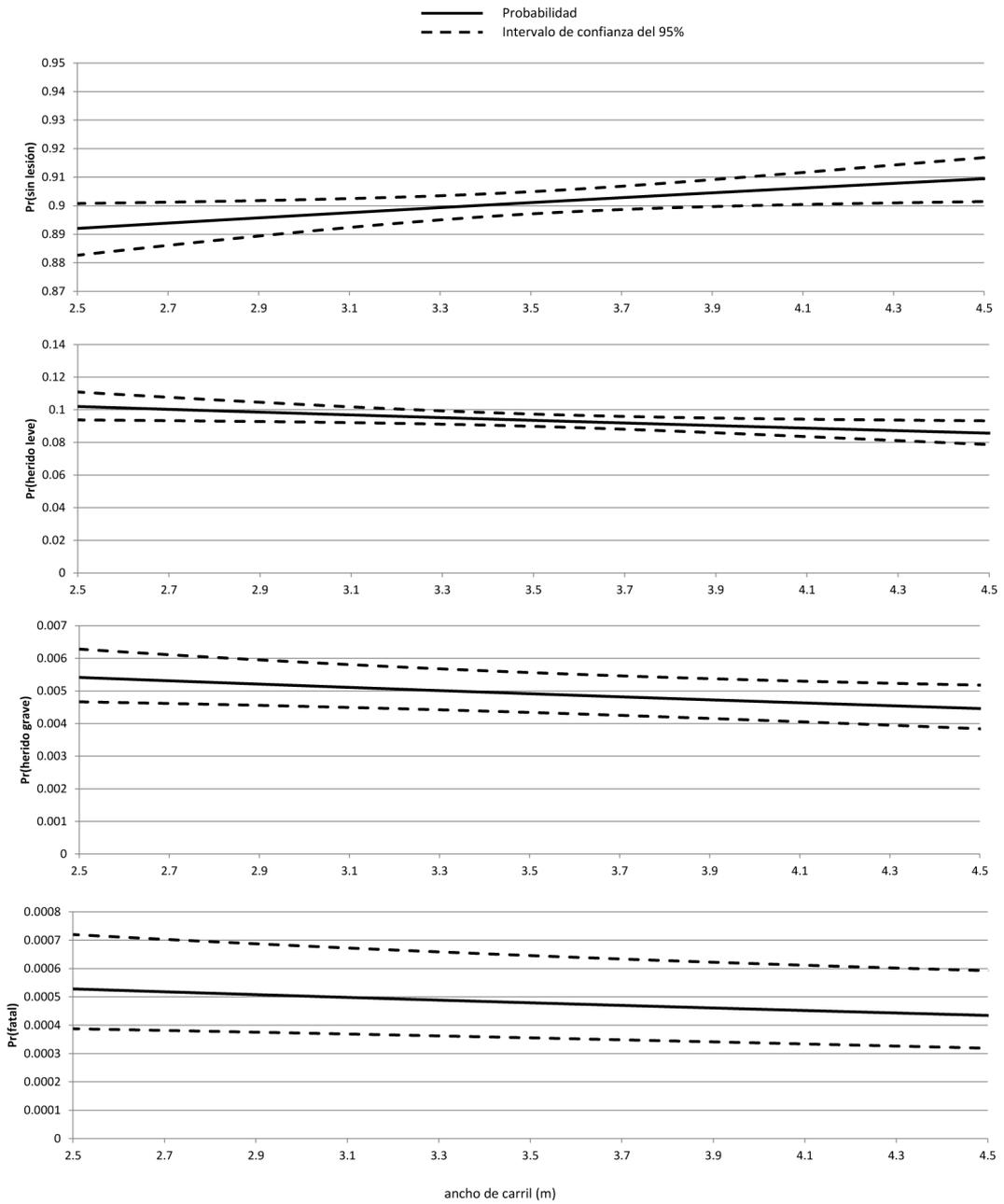


Figura 2. Efectos del ancho de carril en la probabilidad para diferentes gravedades del choque

Tabla 3. Efecto del número de carriles en la probabilidad para cada gravedad del choque.

Número de carriles	Nivel de gravedad			
	Sin heridos	Heridos leves	Heridos graves	Fatales
2	0.89335	0.10079	0.00534	0.00052
3	0.90035	0.09421	0.00495	0.00048
4	0.90695	0.08801	0.00460	0.00045
5	0.91315	0.08218	0.00426	0.00042
6	0.91897	0.07669	0.00395	0.00038

Aty (2003) reportó un valor de 0,093 para su modelo probit ordenado de segmentos de ruta. Por otra parte, O'Donnell y Connor (1996) encontraron valores de 0,36 y 0,356 para los modelos probit y logit ordenados, respectivamente.

Los resultados del modelo muestran que las mujeres presentan un menor riesgo de lesiones que los hombres para los datos analizados. Este hallazgo es inconsistente con los resultados de Evans (2004), Kockelman y Kweon (2002), Abdel-Aty (2003), Neyens y Boyle (2008), y O'Donnell y Connor (1996). Sin embargo, las unidades de análisis son diferentes entre los estudios reportados y el presente análisis: los estudios de Evans, Kockelman y Kweon y Abdel-Aty incluyeron sólo los conductores y los estudios de O'Donnell y Connor, y Neyens y Boyle se incluyen otros ocupantes del vehículo, pero no fueron incluidos los motociclistas, ciclistas o peatones incluidos en este trabajo. El resultado sugiere que después de controlar por el tipo de víctima (sobre todo después de incluir a las personas fuera de los vehículos) las mujeres tienen riesgo de lesiones menores que los hombres. Los efectos marginales muestran un aumento de la probabilidad de ninguna lesión (2,5 %), y una pequeña disminución en las probabilidades de lesiones leves (-2,4 %), lesiones graves (-0,1 %), y las lesiones mortales (-0,013%) para las mujeres

en comparación con los hombres. En términos relativos, sin embargo, los cambios son de 2,7 %, -32,9 %, -36,6 % y -36,8 % para ninguna lesión, lesiones leves, lesión grave y lesiones mortales respectivamente.

En cuanto al tipo de accidente, todos los tipos modelados presentaron una mayor gravedad esperada estadísticamente significativa en comparación con el accidente entre dos o más vehículos (línea base). Algunos tipos de accidentes como vuelcos han sido investigados en el pasado y presentan resultados consistentes con los hallazgos de este trabajo. Los vuelcos resultaron ser particularmente graves en Kockelman y Kweon (2002) y Castro, Paleti y Bhat (2013). En segundo lugar en magnitud se encuentra el coeficiente de “atropello a ciclista”, lo cual era de esperar debido a la vulnerabilidad de los ciclistas, tercero se encuentra el de “salida de la vía”.

El rol de la persona en el accidente tiene un gran impacto en la gravedad. Un pasajero de la motocicleta tiene casi un 75 % menos probabilidad de resultar ileso y un 54 %, 18 % y 2,3 % más de probabilidad de resultar con heridas leves, con heridas graves y con heridas fatales, respectivamente, en comparación con un conductor del vehículo. Por otra parte, el riesgo promedio de muerte para el conductor del vehículo

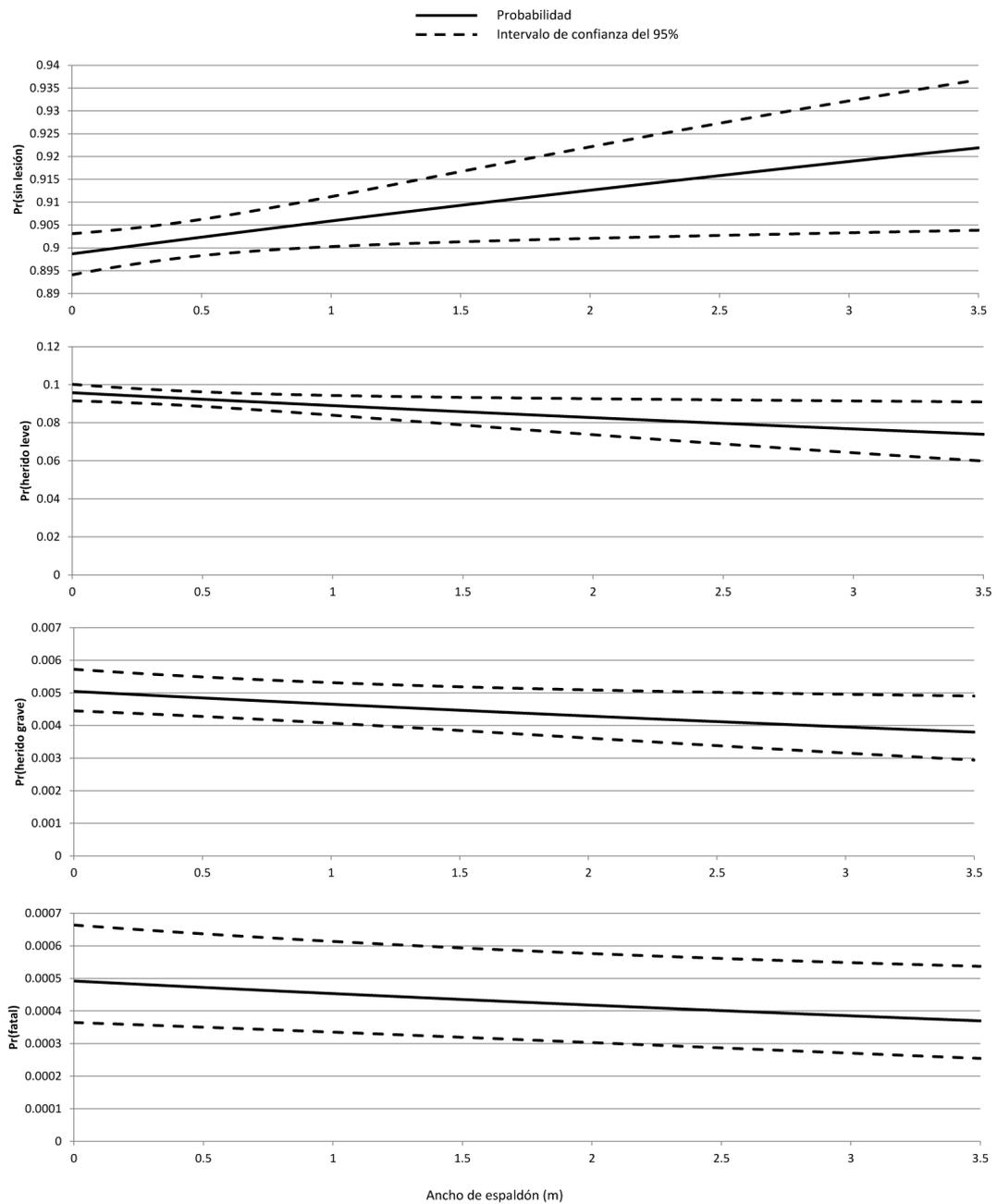


Figura 3. Efectos del ancho de espaldón en la probabilidad para diferentes gravedades del choque

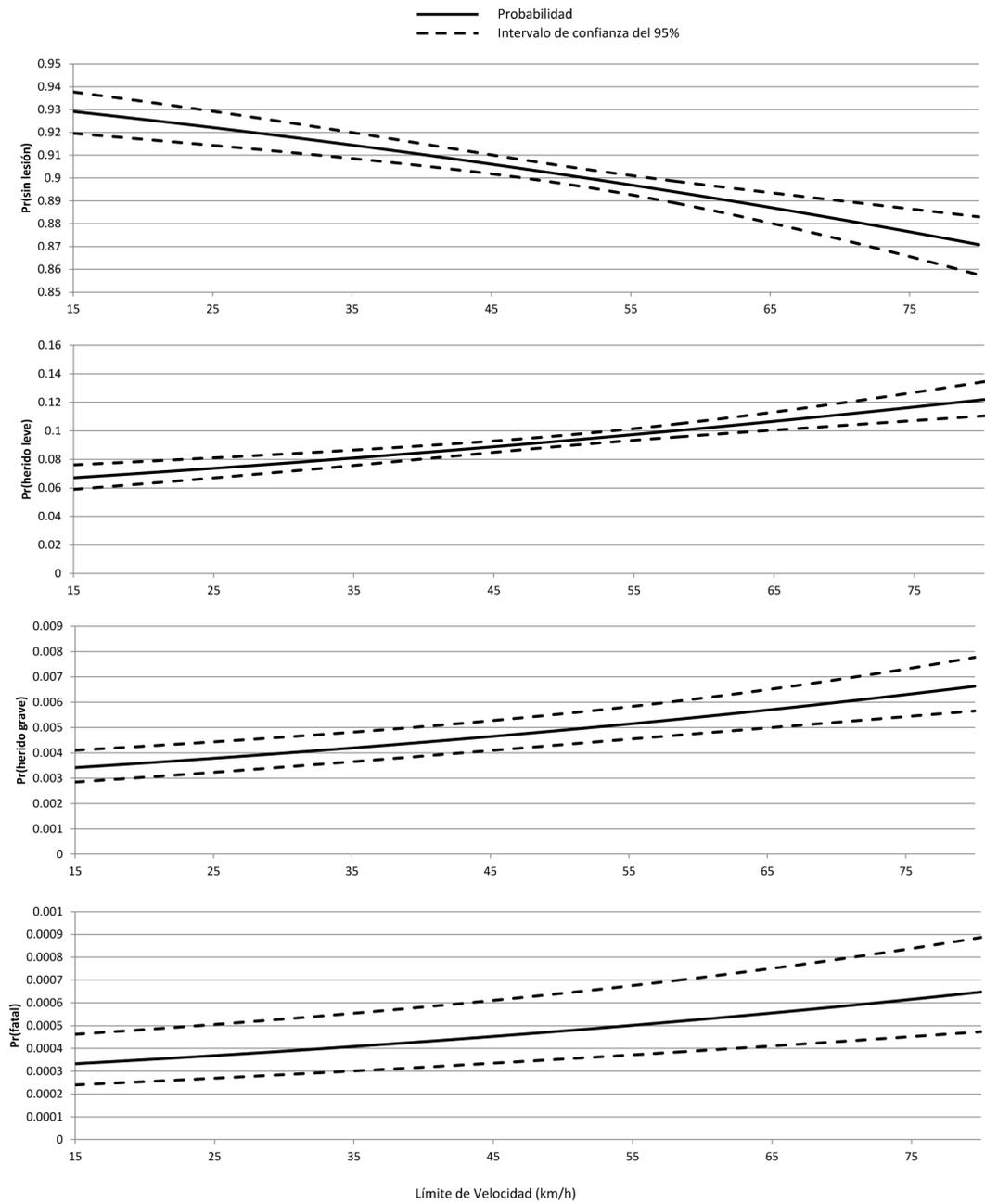


Figura 4. Efectos del límite de velocidad en la probabilidad para diferentes gravedades del choque

es 0.047 %, mientras que el riesgo promedio de lesiones fatales a los pasajeros de motocicletas es de 2,3 % o casi 50 veces mayor riesgo. Los peatones son segundos, con efectos marginales similares y 43 veces mayor riesgo de muerte que los conductores de vehículos. Los pasajeros del vehículo también experimentaron una mayor probabilidad de choques graves. Este hallazgo es consistente con los resultados de O'Donnell y Connor (1996), que encontraron que los pasajeros en todos los asientos tienen un mayor riesgo de lesión comparado con los conductores.

La Figura 1 muestra los efectos del TPDA en la gravedad del choque. El coeficiente es negativo y todos los niveles de gravedad disminuye con el TPDA en la figura a excepción de los choques sin lesiones; este hallazgo es consistente con Duncan *et al* (1998) y Khattak *et al* (2002). Es de esperar que a medida que aumenta la TPDA aumente la congestión y disminuyan las velocidades de operación, disminuyendo entonces la gravedad de los choques. Por otra parte, se espera que a medida que la congestión aumenta, igualmente, aumente la atención de los conductores y otros usuarios de la carretera; por lo tanto, se produzca una reducción de la gravedad de los choques.

Como ejemplo, se considera la probabilidad de lesiones mortales: para un TPDA de 1 000, el riesgo de accidentes mortales es 0,059 %, para un TPDA de 10 000 es 0,055 % y para un TPDA de 50 000, el riesgo es 0,041 %. Los números absolutos podrían parecer pequeños, ya que se toma en cuenta en el modelo todos los choques, aún sin heridos, lo que representan más del 85 % de las observaciones, pero en términos relativos, el riesgo de lesión fatal disminuye 7 % entre TPDA de 1 000 y 10 000 y 34 % entre 10 000 y 50 000.

Asimismo, el número de carriles resultó correlacionado con la disminución de la gravedad de la lesión, lo que es incompatible con las conclusiones de Castro *et al* (2013). La Tabla 3 muestra los efectos de número de carriles en las probabilidades de choque para cada nivel de gravedad. Cuando el número de carriles aumenta también lo hace la probabilidad de choques sin lesión mientras las proporciones de choques con lesiones menores, mayores y mortales disminuyen. El número de carriles en este caso podría ser un indicador de los estándares de diseño ya que

las carreteras con mayor número de carriles corresponden en general a las carreteras mayores y autopistas. Estándares de diseño más altos pueden resultar en carreteras indulgentes que a su vez se traducirá en accidentes de menor gravedad.

Al igual que en el caso de TPDA, el cálculo de las proporciones en términos relativos podría ser la mejor manera de mostrar el efecto del número de carriles en la gravedad del choque. En particular, el aumento de dos a seis carriles reduce en 35 % el riesgo de lesiones mortales, en 35 % el riesgo de lesión grave, y en 31 % el riesgo de lesiones menores.

El ancho de carril resultó estar inversamente relacionado con el riesgo de accidentes de alta gravedad. La Figura 2 muestra el cambio en las probabilidades para cada gravedad con cambios en el ancho de carril. Para ancho de carril, el cambio en las probabilidades es relativamente menos pronunciado que para el TPDA o número de carriles. Por ejemplo, el cambio relativo en las probabilidades cuando cambia de 2,7 m a 3,6 m de ancho de carril es de un aumento del 0,9 % en ninguna lesión y la reducción de un 8%, 9% y 8% para lesiones menores, lesión grave y lesiones mortales, respectivamente.

El ancho de los hombros o espaldones también se relaciona negativamente con la probabilidad de accidentes graves. Como en el caso del ancho de carril, el efecto del ancho del espaldón es menos pronunciado que otros factores de la carretera. El cambio relativo en las probabilidades entre ningún hombro (0 m) a hombros de 1,8 m de ancho es de un aumento del 1,3 % en la probabilidad de choques sin lesiones y reducciones de 14 %, 16 % y 16 % para lesiones menores, lesiones graves y lesiones mortales, respectivamente. La Figura 3 muestra el efecto del ancho del espaldón en la proporción de accidentes en cada nivel de gravedad de la lesión.

El coeficiente positivo para el límite de velocidad significa que los aumentos en el límite de velocidad están asociados con la probabilidad de choques más graves. Este resultado es consistente con las conclusiones de Duncan *et al* (1998), Renski *et al* (1999), y Khattak (2001); que encontraron una relación positiva entre el límite de velocidad y la gravedad. Comparando las probabilidades para límites de velocidad de 40 km/h y 60 km/h, se tiene que los cambios relativos en las probabilidades son -2 %, 16,8

%, 18,5 % y 18,6 % para choques sin lesión, lesiones leves, lesiones graves y lesiones mortales respectivamente. La Figura 4 muestra el efecto del límite de velocidad en la proporción de choques para cada nivel de gravedad.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este artículo investiga los factores que afectan la gravedad de los choques en Costa Rica. Se estimaron modelos logit ordenados de las víctimas en los accidentes que se producen en segmentos de carretera controlando por características de la persona, del choque y de la carretera. Los modelos propuestos aquí proporcionan una manera fácil y confiable para analizar niveles de gravedad del choque y estimar el cambio en las proporciones de cada tipo de gravedad con los cambios en los factores de la carretera, como TPDA, ancho del carril, ancho de espaldón y de límite de velocidad. Esas funciones de proporciones de gravedad del choque pueden complementar los análisis de frecuencia de choques propuestos en los manuales modernos de seguridad en las carreteras.

Los resultados de esta investigación indican que a medida que el TPDA, número de carriles, ancho de los carriles y ancho de espaldón aumentan, la probabilidad de choques de alta gravedad disminuye. Más investigaciones son necesarias para confirmar estos resultados, pero el resultado del modelo sugiere que el aumento de ancho de los carriles y espaldón no sólo reduce la frecuencia de choques (AASHTO, 2010), sino también tienen un efecto beneficioso sobre la gravedad del choque.

Los resultados del modelo sugieren que un aumento en el límite de velocidad está asociado con el aumento de probabilidad de accidentes graves. Comparando los límites de velocidad de 40 km/h y 60 km/h, los cambios relativos en las probabilidades son -2 %, 16,8 %, 18,5 % y 18,6 % para choques sin lesión, con lesiones leves, con lesiones graves y con lesiones mortales respectivamente.

En cuanto al tipo de accidente, los vuelcos tienen la gravedad esperada más alta, seguido de atropello a ciclista y salidas de la vía. Los resultados sugieren que después del efecto de

controlar, por el tipo de víctima (sobre todo después de incluir a las personas fuera de los coches), las mujeres tienen riesgo de lesiones menores que los hombres.

Los pasajeros de motocicletas, peatones y pasajeros de vehículos tienen una mayor probabilidad de accidentes graves que los conductores de vehículos. El riesgo de lesiones fatales para un pasajero de la motocicleta es casi 50 veces la de un conductor del vehículo; para los peatones el riesgo es más de 43 veces superior.

Existen otras variables, tales como el uso del cinturón de seguridad, conducir ebrio y la edad, que afectan el nivel de gravedad de un accidente; sin embargo, estas variables están mal codificadas o completamente ausentes en la base de datos de choques en Costa Rica. Es evidente que los sistemas de recolección de datos de accidentes deben mejorarse significativamente en Costa Rica con el fin de mejorar la gestión de la seguridad y reducir la siniestralidad vial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2010) *Highway Safety Manual*. Washington D.C. USA: American Association of State and Highway Transportation Officials.
- Abdel-Aty, M. (2003). Analysis of driver injury severity levels at multiple locations using ordered probit models. *J Safety Res.*, 34 (5), 597-603.
- Aguero-Valverde J., Pujol, R. (2012) *Análisis de choques viales en Costa Rica usando Funciones de Desempeño de Seguridad Vial (Proyecto 321-A9-255)*. San José: Universidad de Costa Rica, Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Automat Cont.*, 19 (6): 716–723.
- Castro, M., Paleti, R., Bhat, C. R. (2013). A spatial generalized ordered response model to examine highway crash injury severity. *Accid Anal Prev.*, 52: 188-203.
- Duncan, C., Khattak, A., Council, F. (1998) Applying the ordered probit model to injury severity in truck-passenger car rear-end collisions. *Transp Res Rec.*, 1635: 63-71.

- Eluru, N., Bagherib, M., Miranda-Moreno, L. F., Fu, L. (2012). A latent class modeling approach for identifying vehicle driver injury severity factors at highway-railway crossings. *Accid Anal Prev.*, 47: 119-127.
- Evans, L. (2004). *Traffic Safety*. Michigan: Science Serving Society.
- Geedipally, S. R., Bonneson, J. A., Pratt, M. P., Lord, D. (2013) Severity distribution function for freeway segments. Presented at *92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Haleem K., Abdel-Aty, M. A. (2010). Examining traffic crash injury severity at unsignalized intersections. *J Safety Res.*, 41 (4): 347-357.
- Khattak, A., Pawlovich, D., Souleyrette, R., Hallmark, S. (2002) Factors related to more severe older driver traffic crash injuries. *J Transp Eng.*, 128 (3): 243-249.
- Khattak, A. J. (2001). Injury severity in Multivehicle Rear-End Crashes. *Transp Res Rec.*, 1746: 59-68.
- Kockelman, K. M., Kweon, Y. (2002). Driver injury severity: an application of ordered probit models. *Accid Anal Prev.*, 34 (3): 313-321.
- Neyens, D. M., Boyle, L. N. (2008). The influence of driver distraction on severity of injuries sustained by teenage drivers and their passengers. *Accid Anal Prev.*, 40 (1): 254-259.
- O'Donnell, C. J., Connor, D. H. (1996). Predicting the severity of motor vehicle accident injuries using models of ordered multiple choice. *Accid Anal Prev.*, 28(6): 739-753.
- Pai, C. W., Saleh, W. (2008). Modelling motorcyclist injury severity by various crash types at T-junctions in the UK. *Saf Sci.*, 46 (8): 1234-1247.
- R Developing Core Team. (2013) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; 2013. Recuperado de: <http://www.R-project.org/>.
- Renski, H., Khattak, A., Council, F. (1999). Impact of speed limit increases on crash injury severity: Analysis of single-vehicle crashes on North Carolina interstate highways. *Transp Res Rec.*, 1665: 100-108.
- Savolainen, P. T., Mannering, F. L., Lord, D., Quddus, M. A. (2011) The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. *Accid Anal Prev.*, 43 (5): 1666-1676.
- Traynor, T. L. (2005). The impact of driver alcohol use on crash severity: A crash specific analysis. *Transp Res Part E.*, 41 (5): 421-437.
- Wang, X., Abdel-Aty, M. A. (2008). Analysis of left-turn crash injury severity by conflicting pattern using partial proportional odds models. *Accid Anal Prev.*, 40 (5): 1674-1682.
- Washington, S.P., Karlaftis, M.G., Mannering F. L. (2011). *Statistical and econometric methods for transportation data analysis*. Florida: CRC Press; 2011.
- World Health Organization. (2013). *Global status report on road safety 2013: supporting a Decade of Action*. Suiza: World Health Organization.
- Zajac, S. S., Ivan, J. N. (2003). Factors influencing injury severity of motor vehicle-crossing pedestrian crashes in rural Connecticut. *Accid Anal Prev.*, 35, 369-379.

SOBRE LOS AUTORES

Berny Madriz Mesén. Ingeniero Civil, Constructora Costarricense S.A., Boulevard MATRA, Ofibodegas Los Higueros, Bodega 7. Santa Ana, San José, 10903, Costa Rica
 Correo electrónico: bernyamm@gmail.com / bmadriz@cocosa.net
 Teléfono: 506-2282-7141
 Fax: 506-2282-7226

Jonathan Agüero-Valverde. Ph.D. Profesor Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, Universidad de Costa Rica Barrio Los Profesores, Calle B, No 11, Mercedes San Pedro, San José, 11503, Costa Rica
 Correo electrónico: jonathan.aguero@ucr.c.cr
 Telefono: 506-22834927
 Fax: 506-22834815