



Desarrollo de Modelos de Predicción de Choques
Aplicables a Franjas Resonantes en Bermas en Autopistas

Benjamín Colucci, PhD, PE, PTOE, FITE, PAE, JD

Universidad de Puerto Rico - Mayagüez

Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

PO Box 9000, Mayagüez, PR

Teléfono: 787-834-6385

Fax: 787-265-5695

benjamin.colucci1@upr.edu

Dafne Valle Javier, ME

Universidad de Puerto Rico - Mayagüez

Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

PO Box 9000, Mayagüez, PR

Teléfono: 787-834-6385

Fax: 787-265-5695

dafne.valle@upr.edu

1.- Resumen

En los Estados Unidos 53% de los choques fatales ocurre después que un conductor cruza el borde o la línea de eje de la carretera, mientras que 67% ocurren en áreas rurales. Las franjas resonantes son utilizadas en bermas como tratamiento de seguridad capaz de alertar a los conductores que el vehículo está saliendo de la vía de rodaje. Investigaciones han comprobado que la franja resonante es efectiva cuando el aumento en ruido en el interior del vehículo está en el orden de 6-15 dB.

La Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico comenzó la implantación de franjas resonantes longitudinales intermitentes en las bermas de las autopistas. Estas franjas resonantes fueron construidas en la autopista PR-52 que es parte del Sistema Nacional de Autopistas. En el 2010, el Manual de Seguridad de Carreteras (HSM) fue publicado con el propósito de proveer herramientas para la toma de decisión de cuan efectivo es una medida o un grupo de medidas en la reducción de choques en un lugar específico. Los Factores de Modificación de Choques (CMF) incorporados en el HSM cuantifican el efecto de un tratamiento en particular en relación a la frecuencia de choques esperados. El HSM no incluye factores de modificación de choques asociados a franjas resonantes longitudinales intermitentes en bermas de autopistas.

En esta ponencia se documenta el desarrollo de los CMF's para franjas resonantes longitudinales intermitentes en bermas de autopistas. Se realizó un estudio observacional "antes" y "después" aplicando el Método Empírico de Bayes, el cual ayuda a predecir el número de choques que podrían ocurrir en el periodo "después" si la medida de seguridad no se hubiera implantado. Además, resume el procedimiento asociado al desarrollo de modelos de predicción (SPF) para un grupo de referencia o segmentos de autopistas en Puerto Rico.

2. -Introducción

La red de carreteras del Estado Libre Asociado de Puerto Rico consta de 26,866 kilómetros de los cuales 26,720 están pavimentadas y 146 sin pavimentar. En 2012, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) del Departamento de Transportación de los Estados Unidos (US DOT) reportó 29,915 millones de vehículos-kilómetros recorridos en la red de carreteras insulares de los cuales el 39.6% correspondió al Sistema Nacional de Carreteras (NHS). El sistema interestatal que incluye autopistas urbanas y rurales con instalaciones de peaje generó el 29.6% del total de vehículos-kilómetros recorridos. (FHWA, 2012)

Durante la última década, se reportaron aproximadamente 4,397 fatalidades relacionadas con choques automovilísticos en la isla de los cuales aproximadamente 25% son choques de vehículos que salen de la vía de rodaje. (TSC, 2013) Un análisis preliminar de los choques de vehículos que salen de la vía de rodaje utilizando la media móvil de 5 años resultó en 134 fatalidades. Por otra parte, un alarmante cifra de 1.96 fatalidades/ 100 MVMT se reportaron en Puerto Rico en comparación con 1.13 fatalidades / 100 MVMT en los EE.UU. continentales. (FARS, 2013)

En base a estos hechos, el Departamento de Transportación y Obras Públicas de Puerto Rico (DTOP) concentra sus esfuerzos para mejorar la seguridad en la red de carreteras mediante la aprobación del Plan Estratégico de Seguridad Vial de Puerto Rico. (DTOP, 2014) En el Plan Estratégico, los choques asociados a vehículos de motor que salen de la vía de rodaje han sido identificados como uno de la Zona Énfasis en base a que contribuyen significativas en las fatalidades ocasionadas por choques de tránsito en la isla. La revisión de las políticas de ingeniería con relación a la seguridad vial en conjunto con la educación sobre el uso de innovadores tratamientos tales como las franjas resonantes intermitentes en las bermas de las carreteras están listados como estrategias que tienen el potencial de reducir los choques de vehículos que salen de la vía de rodaje durante los próximos 5 años en carreteras con alta velocidad dentro del sistema interestatal (NHS). La meta del Plan Estratégico es la reducción en un 5% de los choques de los vehículos que salen de la vía de rodaje para el año 2016.

Aunque las franjas resonantes longitudinales discontinuas son percibidas como una medida rentable para reducir los choques de vehículos que salen de la vía de rodaje, la edición inicial del 2010 del Manual de Seguridad de Carreteras (HSM) publicado por AASHTO no incluye Modelos de Predicción de Choques ni Factores de Modificación de Choques para las

aplicaciones en autopista con peajes. En 2009, la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico inició la aplicación de las franjas resonantes longitudinales discontinuas en segmentos de autopistas con peajes.

Este trabajo se centrará en el desarrollo de modelos de predicción de choques para un grupo de referencia de segmentos de autopista. Estos modelos se realizarán combinando los datos históricos de choques y los datos del Sistema de Monitoreo de Carreteras de Puerto Rico por un período de estudio de 2 años y 3 años.

3.- Objetivos

Los objetivos de esta investigación son:

- Proveer una visión general de las franjas resonantes utilizadas para reducir los choques de los vehículos que salen de la vía de rodaje en autopistas con altas velocidades.
- Desarrollar modelos de predicción de choques utilizando información de exposición y los datos históricos de choque en Puerto Rico.
- Realizar un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de las variables independientes relacionadas a los volúmenes vehiculares promedios anuales y la longitud del segmento en el número esperado de choques para el período de estudio.

4.- Revisión de Literatura

4.1- Franjas Resonantes

Las franjas resonantes son una medida de seguridad o tratamiento en una carretera pavimentada, capaz de alertar a los conductores de que su vehículo está saliendo de la vía de rodaje. En los Estados Unidos, este tratamiento especial ha demostrado ser eficaz (FHWA, 2013). Las franjas resonantes pueden tener carácter permanente o provisional. Ejemplos de instalación permanente de franjas resonantes son: sobre la línea central de una carretera de dos vías o en las bermas de una carretera. En el caso de franjas resonantes provisionales se utilizan comúnmente para alertar a los vehículos de los cambios en la vía. Las franjas resonantes transversales temporeras en las zonas de construcción se utilizan comúnmente en las instalaciones de autopistas rurales de alta velocidad para ayudar en la reducción de la velocidad de los vehículos que se acercan la zona de construcción de la

carretera. En adición, las franjas resonantes transversales se utilizan para alertar a los conductores de un cambio potencial o peligros en la carretera. En la Figura 1 se ilustran los diferentes tipos de aplicaciones de franjas resonantes longitudinales y transversales recomendadas por la Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transportación de los Estados Unidos.

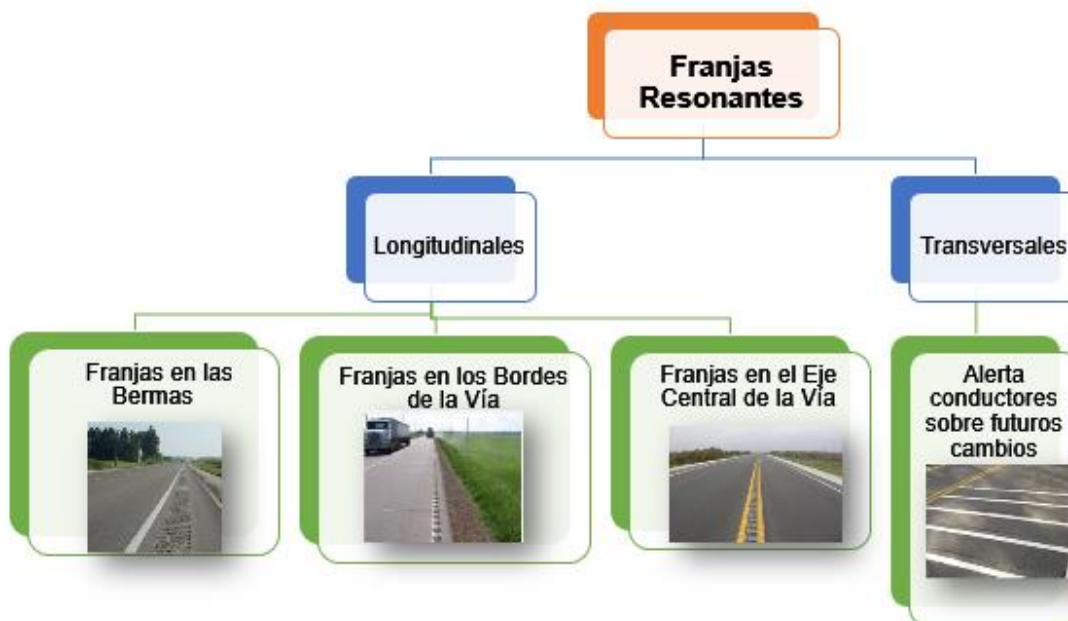


Figura 1. Franjas Resonantes Longitudinales y Transversales

(Recurso: <http://safety.fhwa.dot.gov/>)

4.2- Comparación de Guías de Diseño de Franjas Resonantes: Puerto Rico versus Estados Unidos

La Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico (ACT) publicó la Directriz de Diseño Núm. 409 para la instalación de franjas resonantes en las vías públicas de Puerto Rico (ACT, 2012). En la tabla 1 se provee una comparación entre el Informe Técnico 5040.39 emitido por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, el Informe Núm. 641 del Programa de Investigación Nacional Cooperativo de Carreteras (NCHRP) de la Junta de Investigación en Transportación (TRB) y la Directriz de Diseño Núm. 409.

Tabla 1. Comparación de las Especificaciones Locales y Nacionales de las Franjas Resonantes

Requisitos	FHWA (TA 5040.39) Guías Federales de Estados Unidos	TRB (NCHRP #641) Valores Comunes en Estados Unidos	ACT (DD#409) Especificaciones de Puerto Rico
A-Ancho Mínimo de la Berma (pies)	4	4	4
B-Espacio Lateral (pulgadas)	9	12	12
C- Ancho de la Franja Resonante (pulgadas)	7	7	7
D-Longitud de la Franja Resonante (pulgadas)	16	16	16 a 18
E-Espaciamiento de centro a centro (pulgadas)	No especificado	12	12
Profundidad de la Franja Resonante (pulgadas)	1/2	½	1/2 a 5/8
Espacio de Entrada para Ciclistas (pies)	10 a 12	10 a 12	6 a 12
Velocidad Mínima Rotulada (mph)	50	45 a 50	No especificado

Las Guías de Diseño para franjas resonantes de Puerto Rico indican que no se pueden instalar en cualquier estructura o puente. Las franjas tienen que ser instalada a 25 metros (82 pies) antes y después de cualquier estructura o puente. En adición no se permite la instalación de las franjas en las juntas del pavimento.

5.- Metodología

El desarrollo de los modelos de predicción de choques es parte de un proyecto de investigación a gran escala que en última instancia pretende realizar el desarrollo de los Factores de Modificación de Choques para franjas sonoras discontinuas en autopistas en Puerto Rico. El desarrollo de los modelos de predicción de choques corresponde a la Fase A del diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.

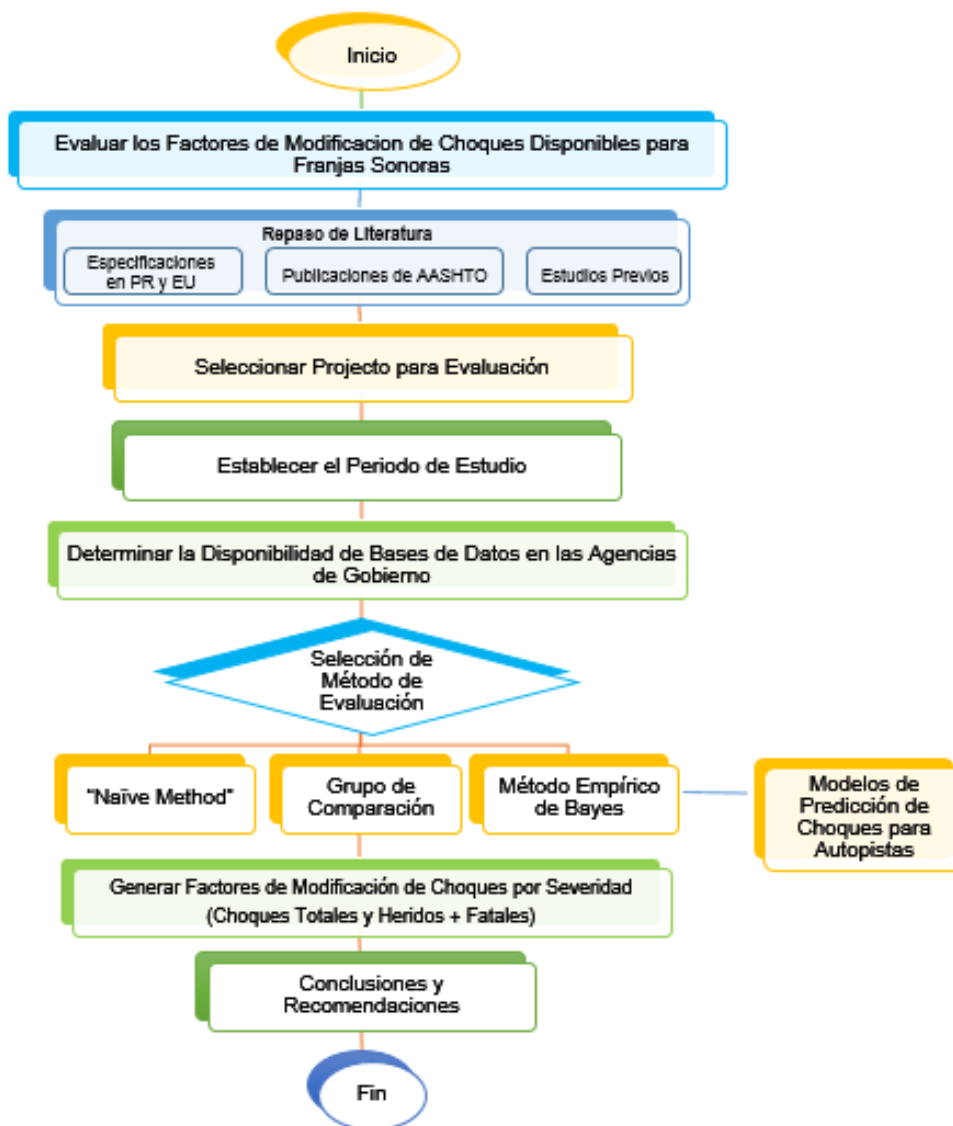


Figura 2. Metodología de la Investigación

Dos bases de datos se utilizaron en la fase A para desarrollar los modelos de predicción de choques; accidente histórico y la base de datos del Sistema de Monitoreo de Carreteras. La base de datos del Sistema de Monitoreo de Carreteras ofrece información relacionada al tránsito (Volúmenes Diarios Promedios, % de Camiones), geométrica (curva horizontal, pendiente) e información operacional de la vía (límite de velocidad rotulado). En esta investigación se utilizaron las características operacionales de la vía en combinación con los datos de choques durante un periodo de estudio que abarca desde 2006 hasta el año 2012.

La ACT realizó un proyecto piloto de instalación de franjas resonantes no continuas en las bermas de la autopista PR-52. La autopista PR-52 tiene una longitud total de 108.3 kilómetros y forma parte del Sistema Nacional de Carreteras. Esta autopista se origina en el norte de la isla, en San Juan, capital de Puerto Rico, cruzando la cordillera central y termina en la ciudad de Ponce. Ambas ciudades cuentan con puertos de embarque que reciben y entregan carga comercial. Sus volúmenes de vehículos diarios oscilan entre 165,800 vehículos por día en su origen en una zona urbana con nivel de terreno ondulado a un mínimo de 18,600 vehículos por día en una región rural de montaña. El límite máximo de velocidad en el tramo bajo estudio es de 65 millas por hora y tiene aproximadamente el 8.0% de los camiones pesados.

En la Figura 3 (a) se muestra la rotulación de advertencia con la frase "huella en el paseo" que significa franjas sonoras en las bermas de la carretera y en la Figura 3 (b) se ilustra la carretera con las franjas sonoras en el paseo de la autopista PR-52 que forma parte del Sistema Nacional de Carreteras (NHS) de la Isla. En nuestro proyecto de investigación, las bandas tienen dimensiones de 5.7 pies (1.74 m) de longitud, 1 pies (0.30 m) de ancho y 10.8 pies (3.38 m) entre las franjas.



Figura 3. (a) Rótulo de Advertencia de Franja Sonora en la Berma y (b) Franjas Intermitentes en el paseo de la Autopista PR-52

6.- Desarrollo de los Modelos de Predicción de Choques

Los Modelos de Predicción de Choques o "Safety Performance Functions" (SPF) son modelos estadísticos que se utilizan para predecir los choques en el futuro en una ubicación particular en segmento o intersecciones de carreteras. El primer paso del método empírico

de Bayes es el desarrollo de modelos de predicción de choques. Estos modelos de predicción se desarrollan utilizando un grupo de referencia que son una colección de segmentos no tratados que tienen características similares a los segmentos tratados.

En la Tabla 2 (a) se presenta la distribución de los choques totales para los segmentos de las autopistas PR-22 y PR-52 que son parte del grupo de referencia del estudio. Es pertinente señalar que los choques totales solo incluyen los de carácter fatal o con heridos y no se incluyen los asociados a daño a la propiedad. La selección del segmento para el grupo de referencia fue una combinación de segmentos no tratados en la carretera PR-52 y segmentos no tratados de la carretera PR-22 con características similares. La segmentación se basa en la segmentación utilizada por el Sistema de Monitoreo de Carreteras de la ACT que define para cada segmento de carretera en Puerto Rico basado en los volúmenes diarios promedios. En la Tabla 2 (b) se presentan las principales características de los segmentos seleccionados para el grupo de referencia de las autopistas de peaje utilizando el año 2009 como base.

Tabla 2 (a). Distribución de los Choques Totales de las Carreteras NHS PR-22 y PR-52

Autopista	Longitud (km)	2006		2007		2008		2009		Choques Totales
		Choques Totales	Choques /km-año	Choques Totales	Choques /km-año	Choques Totales	Choques /km-año	Choques Totales	Choques /km-año	
PR-22	0.0-83.7	738	8.82	816	9.75	782	9.34	804	9.60	3,140
PR-52	0.0-108.3	970	8.96	933	8.61	831	7.67	909	8.39	3,643

Tabla 2 (b). Características de los Segmentos del Grupo de Referencia

Características de los Segmentos del Grupo de Referencia	NHS PR-52	NHS PR-22
Número de Carriles	4 a 6 carriles	4 a 6 carriles
Ancho de Carriles	12 pies (3.65 metros)	12 pies (3.65 metros)
Volúmenes Promedios Diarios AADT's (vehículos por día)	70,677	77,438
Promedio de Choques por segmentos (por año)	30	23

La segunda tarea importante es el proceso de limpieza de datos, en la que los registros incompletos fueron eliminados de la base de datos. El proceso de limpieza de datos se realizó para los segmentos totales para ambas autopistas, incluyendo el grupo de referencia. Un total de 491 registros de choques fueron eliminados debido a que carecía de la

localización exacta del accidente o tuvo errores relacionados con la ubicación exacta kilómetro.

Se realizó la calibración del SPF preliminar utilizando una metodología propuesta por Ezra Hauer en la que sugiere que el SPF puede ser construido mediante la adición de las variables en el modelo sea de una en una. Hauer sugieren para iniciar el proceso del desarrollo del modelo se debe comenzar con una variable simple como la longitud del segmento y luego añadir el resto de las variables. Para la calibración de los SPF se utilizó una herramienta de Microsoft Excel llamada la "Herramienta de Solucionar Parámetros" que puede resolver los parámetros de prácticamente cualquier función que se ajuste mejor el modelo. (Hauer, 2014)

Los del SPF se desarrollaron asumiendo una distribución binomial negativa (NBD). En el pasado, los investigadores utilizaban Distribución de Poisson, pero recientemente han demostrado que la distribución binomial negativa ofrece modelos mejor ajustados que la distribución de Poisson. Un parámetro pertinente para el desarrollo del método empírico de Bayes es el parámetro de dispersión binomial negativa (Φ) obtenido a partir de esta regresión.

Los SPF preliminares se realizaron mediante el ajuste de una función de potencia ("Power Function"). En la primera ronda, la longitud del segmento (kilómetros) se utilizó como la variable independiente. Este SPF está representado por la siguiente fórmula, donde $E(\mu)$ se define como choques esperados en el periodo de estudio, X_1 es la longitud del segmento (kilómetros) y β_0 y β_1 son parámetros de regresión.

$$E(\mu) = \beta_0 * X_1^{\beta_1} \quad (1)$$

En la Tabla 3(a) se presentan los valores de los parámetros estimados (β_0 y β_1), el parámetro de dispersión estimado (Φ) y el valor del Índice de Pearson obtenido por la herramienta de solucionar parámetros de Microsoft Excel. El Índice de Pearson puede variar de -1 a 1 y refleja la relación entre dos conjuntos de datos. En este análisis inicial, con un SPF en base a la longitud del segmento, se observó que el índice de Pearson fue bajo para todos los modelos estimados. Para mejorar más este SPF se añadirá una variable adicional conocida como los volúmenes diarios promedios de vehículos por segmento. El segundo SPF que se desarrollo está representado por la siguiente fórmula, donde $E(\mu)$ se define como choques esperados durante el periodo del estudio, X_1 es la longitud del segmento

(kilómetros), X_2 es el volumen diario promedio de vehículos por segmento (vehículos / día) y β_0 , β_1 y β_2 son parámetros estimados de la regresión.

$$E(\mu) = \beta_0 * X_1^{\beta_1} * X_2^{\beta_2} \quad (2)$$

En la Tabla 3(b) se presentan los valores de los parámetros estimados (β_0 , β_1 y β_2), el parámetro de dispersión estimado (Φ) y el valor del Índice de Pearson obtenido por la herramienta de solucionar parámetros de Microsoft Excel. El Índice de Pearson puede variar de -1 a 1 y refleja la relación entre dos conjuntos de datos. En este análisis, en donde se calibró un SPF en base a la longitud del segmento y a los volúmenes vehiculares se observó que el índice de Pearson está más cercano a 1 lo cual nos indica que hay una mejor relación entre los datos de choques observados en relación a los valores de los choques ajustados.

Tabla 3 (a). Parámetros Estimados de los SPF utilizando la Longitud del Segmento como la Variable Independiente para Periodos de 2 a 3 Años

Modelo por cada Severidad	Parámetros Estimados (2 Años)				Parámetros Estimados (3 Años)			
	β_0	β_1	Φ	"Pearson Function Index"	β_0	β_1	Φ	"Pearson Function Index"
Choques Totales (Fatales + Heridos)	22.245	0.737	1.155	0.57	34.279	0.719	1.129	0.56
Choques con Heridos	21.899	0.737	1.144	0.57	21.899	0.737	1.144	0.57

Tabla 3 (b). Parámetros Estimados de los SPF con Longitud del Segmento + Volúmenes Diarios de Vehículos como las Variables Independientes para Periodos de 2 a 3 Años

Modelo por cada Severidad	Parámetros Estimados (2 Años)					Parámetros Estimados (3 Años)				
	β_0	β_1	β_2	Φ	"Pearson Function Index"	β_0	β_1	β_2	Φ	"Pearson Function Index"
Choques Totales (Fatales + Heridos)	0.00042	0.847	0.963	2.576	0.85	0.00160	0.781	0.889	2.254	0.85
Choques con Heridos	0.00037	0.855	0.974	2.554	0.85	0.00169	0.780	0.883	2.185	0.85

Con el fin de evaluar el efecto de las variables independientes tales como los volúmenes vehiculares y la longitud de los segmento en los choques esperados, se realizó un análisis de sensibilidad. El período de estudio para este análisis fue de 2 años. La figura 5 muestra los resultados del análisis de sensibilidad variando la longitud del segmento de 0.5 kilómetros a 5.0 kilómetros y variando los volúmenes vehiculares de 25,000 a 75,000 vpd que es representativo a la exposición del tráfico en segmentos rurales en la autopista donde se instalaron las franjas resonantes. En base a este análisis, los SPF generan un buen ajuste en términos de aumentar el número de choques esperados con un aumento en la exposición de tráfico y longitud del segmento.

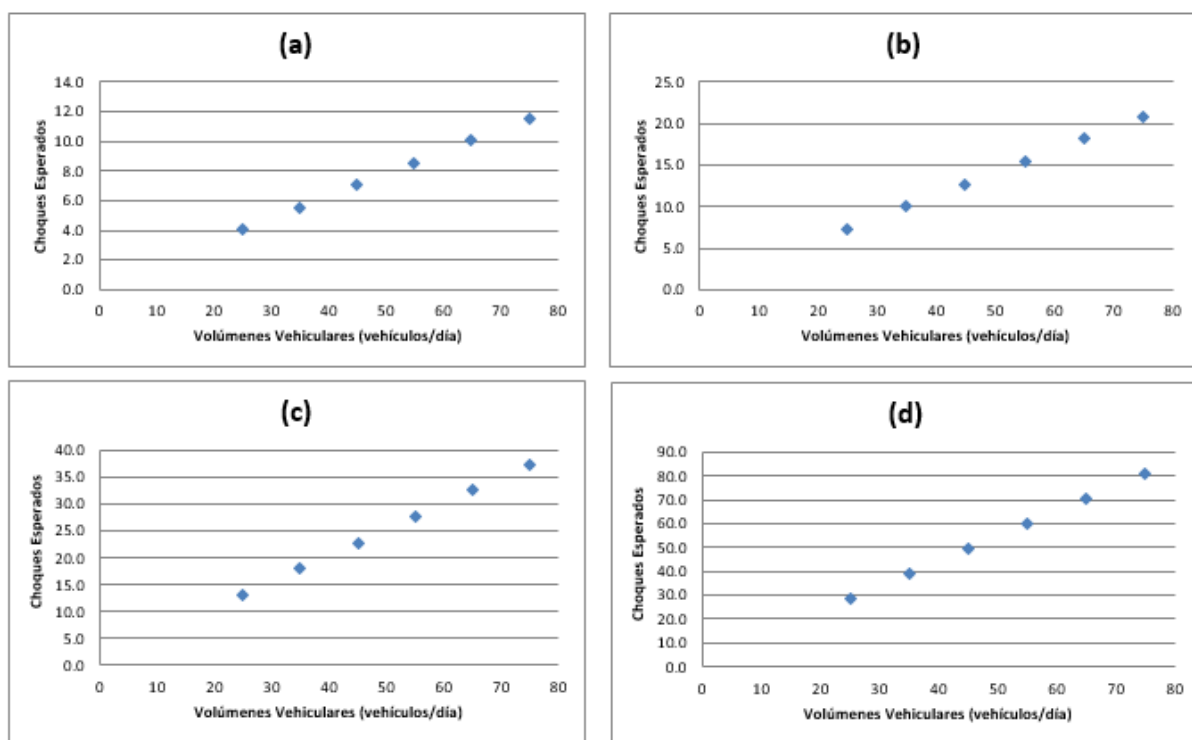


Figura 5. Análisis de sensibilidad del efecto de los volúmenes vehiculares (X_2) y la longitud del segmento (X_1) en los choques esperados por un periodo de dos años en segmentos de autopistas (a) 0.5 kilómetros; (b) 1.0 kilómetros; (c) 2.0 kilómetros ; (d) 5.0 kilómetros

7.-Conclusiones

Este trabajo investigativo resume el desarrollo de SPF o modelos de predicción de choques para un grupo de referencia de segmentos de autopista que combina datos históricos de choques otros datos proporcionados por el Sistema de Monitoreo de Carreteras provisto por el Departamento de Transportación y Obras Públicas de Puerto Rico. En adicción, se

realizó un análisis de sensibilidad para evaluar los efectos de variables independientes evaluadas. Los resultados de este estudio mostraron lo siguiente:

- La herramienta de solucionar parámetros de Microsoft Excel puede ser útil en las etapas preliminares de desarrollo de SPF añadiendo variables independientes de manera escalonada.
- La herramienta de solucionar parámetros de Microsoft Excel es una herramienta muy flexible y potente, ya que permite al investigador calibrar diferentes funciones matemáticas.
- En el primer modelo, en base a la longitud del segmento, se observó que el índice de Pearson era bajo, por lo tanto, la estimado del número esperado de choques utilizando sólo longitud de segmento como una variable independiente no era factible.
- En el segundo modelo, en base a la longitud del segmento y a los volúmenes vehiculares diarios, el índice de Pearson se acerca a 1, y refleja que hay una mejor relación entre los dos conjuntos de datos (valores observado versus valores ajustados) para estimar el número esperado de choques en el período de estudio.
- El análisis de sensibilidad es una poderosa herramienta para evaluar el ajuste de los modelos de predicción o SPF con dos variables independientes.
- Con base en el análisis de sensibilidad, el SPF generado demuestra un buen ajuste en términos de aumentar el número de choques que se espera con un aumento en la exposición de tráfico y la longitud del segmento.

Esta ponencia solo refleja una porción de un estudio más amplio donde se generarán otros modelos de predicción con variables independientes adicionales para posteriormente aplicar el método empírico Bayes para generar los Factores de Modificación de Choques asociado con las franjas resonantes no continuas en autopistas con peajes.

8.- Agradecimientos

Los autores agradecen a la División de Auditoría de Seguridad Vial de la ACT de Puerto Rico por su asistencia en proporcionar las bases de datos para el desarrollo de las modelos de predicción de choques. Además, agradecemos el apoyo brindado por el personal del Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación en el Recinto Universitario de Mayagüez por su ayuda para el desarrollo de esta ponencia.

9.- Referencias Bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2010). "Highway Safety Manual". Volumen 1, pp. 4-84.

Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico (ACT). (2012). Guías de Diseño para Huellas en Carreteras #409. San Juan, pp.1-2.

Comisión para la Seguridad en el Tránsito. (2013). Obtenido de: <http://www.comisionparalaseguridadeneltransito.com/> - Acceso 18/Nov/2013.

Departamento de Transportación y Obras Públicas de Puerto Rico (DTOP). (2014). "Plan Estratégico de Seguridad Vial en Puerto Rico 2014-2018". San Juan, Puerto Rico pp. 38-39

Federal Highway Administration (FHWA). (2010). A Guide to Developing Quality Crash Modification Factors. US Department of Transportation (USDOT). Washington, DC. pp. 1-62.

Federal Highway Administration (FHWA). (2013). Información de Franjas o Huellas Resonantes. Obtenido de: <http://safety.fhwa.dot.gov/provencountermeasures/> - Acceso 25/Nov/2013

Federal Highway Administration (FHWA). (2013). Highway Statistics 2012 – Office of Highway Policy Information. Washington, DC.

Hauer, E. (2014). The Art of Regression Modeling in Road Safety. University of Toronto. Canada. pp. 1-199.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2009). Guidance for the Design and Application of Shoulder and Centerline Rumble Strip. Washington, DC, pp. 1-135.

National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (2013). Fatality Analysis Reporting System (FARS). Obtenido de: www.fars.nhtsa.dot.gov, acceso 30/Julio/2014

World Health Organization. (2013). Global Status Report on Road Safety. Switzerland, pp.1-5.