

**MODELO DE ANÁLISIS PARA LA**  
**DETERMINACIÓN DE OCURRENCIAS DE**  
**ACCIDENTES DE TRÁNSITO**

**Autor: Milivoj Jordas Cruz Cerda.**

**Febrero 2020.**

## **ABSTRACTO**

En este estudio, se procedió a implementar una metodología de determinación de tramos críticos a accidentes en rutas o caminos usando regresión cuantílica (QR), concluyendo que con este método, se logran resultados coherentes y seguros. Con el modelo estimado correspondiente al percentil 95, fue posible establecer relaciones causales entre la frecuencia de accidentes y características, tales como la longitud de la sección del camino, el ancho de la carretera, el número de carriles, el número de intersecciones, el tráfico diario promedio y el promedio de velocidad. Estos resultados permitieron visibilizar condiciones subestándares en ciertos tramos de las rutas mineras investigadas, las cuales por razones de confidencialidad no fueron señaladas. Sin duda, un modelo QR específicamente desarrollado para la empresa o ente solicitante, permitirá a las autoridades responsables mejorar la seguridad vial, y asignar adecuadamente la inversión en tramos de carreteras propensos a accidentes críticos.

**PALABRAS CLAVES: REGRESIÓN CUANTÍLICA; REGRESIÓN LÍNEAL; CUANTIL; CUARTIL; DECIL; PERCENTIL; SEGURIDAD; SEGURIDAD VIAL.**

## INTRODUCCIÓN

En la industria minera chilena, los accidentes ocasionados por vehículos motorizados están dentro de los 4 accidentes que producen más mortalidades y en compañías mineras, se ha identificado la “Conducción de vehículo liviano” y la “Operación equipo pesado” dentro de sus peligros significativos, ya que están asociados a eventos fatales ocurridos en el pasado.

En concordancia, el accidente vehicular y/o de tránsito, es un problema serio de salud pública global, ya que a nivel mundial, se estima que cerca de 50 millones de personas sufren daño físico y discapacidades producto de estos, con 1,3 millones de muertes (Pérez *et al.*, 2006; OMS, 2014; Cantillo *et al.*, 2015; Erdogan *et al.*, 2015; Guerrero *et al.*, 2015; Mohanty & Gupta, 2015; Guerrero & Santiago, 2016; Issa, 2016; de Wit & Zaneripe, 2016), lo cual se asocia con factores de comportamiento, el nivel de seguridad en los vehículos, las precariedades del ambiente o de la infraestructura urbana, el incremento en el número de vehículos, los cambios en los estilos de vida, el grado de severidad en la penalización de las faltas de tránsito, entre otros (Adura *et al.*, 2004; Amaro & Cardoso, 2008; Angel & Hickman, 2008; Miki *et al.*, 2014; Erdogan *et al.*, 2015; Forman *et al.*, 2015; Mattos *et al.*, 2015; Dias *et al.*, 2016; da Silva *et al.*, 2016), superando a los fallecidos por guerras o epidemias (Wrasse *et al.*, 2014) y generando grandes pérdidas socio-económicas, con un costo anual a nivel latinoamericano por accidentes de tránsito de US\$11.370 millones (Bhalla, 2013) y en el mundo, de sobre US\$500 billones (OMS, 2015;

Moreira *et al.*, 2016) e inmensurables sufrimientos a las víctimas y familiares.

Especialmente en las últimas 6 décadas, se han desarrollado distintos tipos de elementos, sistemas y equipos de protección que aportan a la seguridad en el transporte (i.e. cinturón de seguridad, bolsas de aire<sup>1</sup>, barreras de concreto, componentes diseñados o rediseñados para absorber energías, sensores de diversos tipos, creación de nuevos materiales o aleaciones, etc.) (Alexander, 1960; Pugsley, 1960; Abramowicz & Jones, 1984, 1986; Ohkami *et al.*, 1990; Seitzberger *et al.*, 1997; Ramakrishna, 1998; El-Sobky & Singace, 1999; Gupta & Velmurugan, 1999; Hassen *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2000; Santosa *et al.*, 2000; Chen, 2001; Bouchet *et al.*, 2002; Borvik *et al.*, 2003; Adura *et al.*, 2004; Karagiozova & Alves, 2004; Marsolek & Reimerdes, 2004; Meguid *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2004; Kim & Wierzbicki, 2004; Babbage & Mallick, 2005; Hong *et al.*, 2005; Rossi & Behdinan, 2005; Zhang, 2005; Guden & Kavi, 2006; Hosseini-Tehrani & Nikahd, 2006; Kavi *et al.*, 2006; Taher, 2006; Zhang & Krogöer, 2006; Zhang & Suzuki, 2007; Adachi *et al.*, 2008; Aktaya *et al.*, 2008; Amaro & Cardoso, 2008; Angel & Hickman, 2008; Atahan, 2008; Baguley *et al.*, 2008; Karagiozova & Jones, 2008; Mamalis *et al.*, 2008; Rezaoust *et al.*, 2008; Marzbanrad *et al.*, 2009; Taher *et al.*, 2009; Xua *et al.*, 2009; Xue *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009; Zhang & Huh, 2009; Salehghaffari *et al.*, 2010; Elmarakbi *et al.*, 2011; Ghamarian *et al.*, 2011; Khalkhali *et al.*, 2011; Najafi & Rais-Rohani, 2011; Niknejad *et al.*, 2011; Pawlus *et al.*,

---

<sup>1</sup> El uso combinado del cinturón de seguridad y del air bag, previenen entre el 47 al 52% de las fatalidades para conductores y/o pasajeros de vehículos (Wrasse *et al.*, 2014).

2011; JandaghiShahi & Marzbanrad, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Belingardi *et al.*, 2013; khalkhali *et al.*, 2013; Atahan *et al.*, 2014; Marzbanrad & Keshavarzi, 2014; Wrasse *et al.*, 2014; Bin Mohd. Zain & Mohammed, 2015; Dias *et al.*, 2016; Esmaeili *et al.*, 2017; Rio *et al.*, 2017a, 2017b; Asadinia *et al.*, 2018) y los de tipo administrativos, a través de legislaciones, inspecciones diversas, campañas para concientizar y educar a las personas respecto a la importancia de la seguridad, técnicas, modelos y metodologías, entre otras estrategias (Jang *et al.*, 1997; Tingvall *et al.*, 2010; Rohayu *et al.*, 2012; Guerrero & Amaris, 2014; Erdogan *et al.*, 2015; Mattos *et al.*, 2015; Guerrero & Santiago, 2016; Masoud, 2016; da Silva *et al.*, 2016), todos los cuales tienen como objetivo eliminar o minimizar los negativos efectos de los accidentes.

Para contribuir a la seguridad vial de las rutas, se procede a sugerir una metodología de determinación de tramos críticos a accidentes usando regresión cuantil, metodología con la cual se logran resultados coherentes y seguros.

## MATERIALES Y MÉTODOS

- **ACERCAMIENTO METODOLÓGICO:** La regresión lineal por mínimos cuadrados (Figura N°1), así como muchas de sus adaptaciones, se emplean como método para estimar la media de una variable respuesta condicionada a uno o varios predictores.

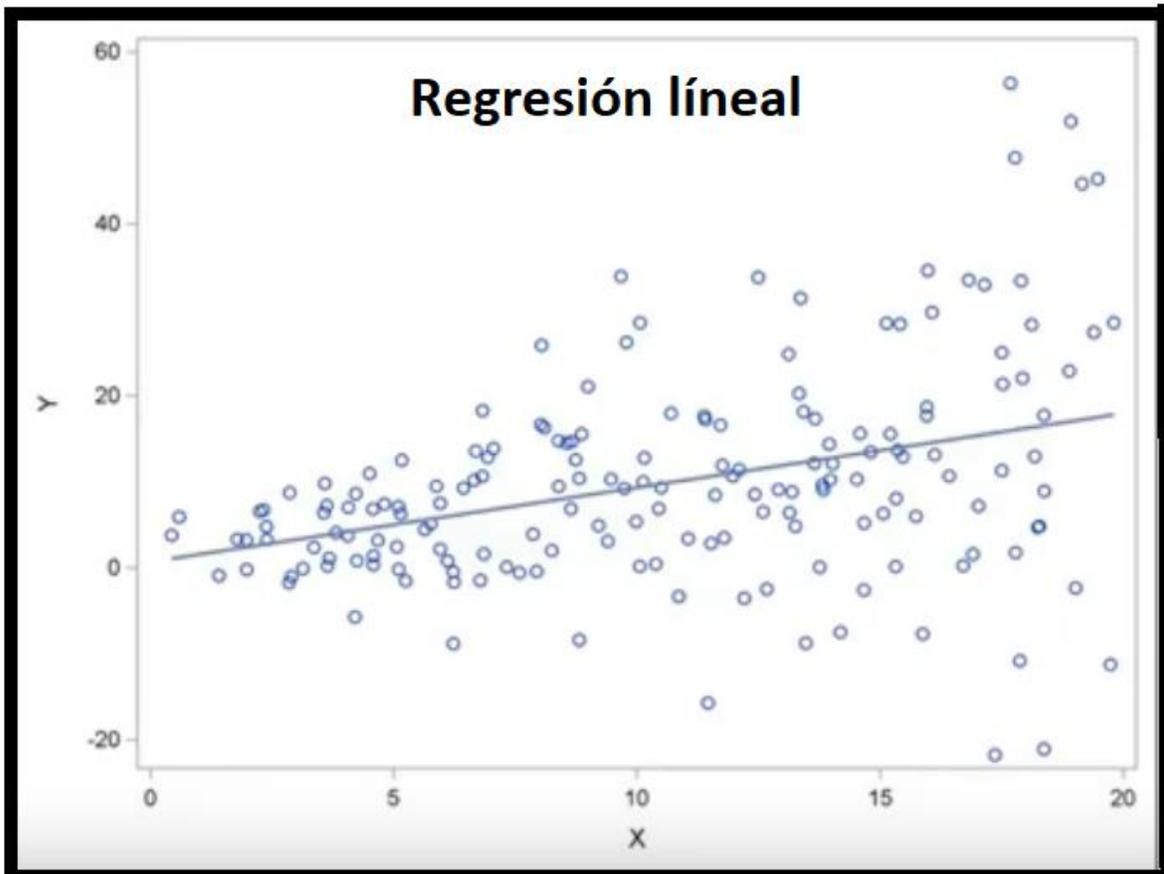


Figura N°1: Ejemplo de recta de los mínimos cuadrados.

Es decir, parte de la premisa de que la media de la variable respuesta depende del valor que tomen otras variables. A su vez, la varianza que establece la variabilidad de la variable aleatoria, y la desviación estándar que

indica cuánto pueden alejarse los valores respecto al promedio (media), buscando las probabilidades de que un evento ocurra (la volatilidad), si bien son medidas de dispersión muy útiles en los análisis estadísticos (Vilchis, 2014), en determinadas situaciones puede ocurrir que la media no sea el parámetro más informativo, o que sea preferible emplear otras medidas de dispersión ante las características de las distribuciones.

A este respecto, la regresión cuantílica permite realizar regresión sobre cualquier parte de la distribución, conociéndose la influencia de los predictores desde el mínimo al máximo rango de la variable respuesta (Figura N°2).

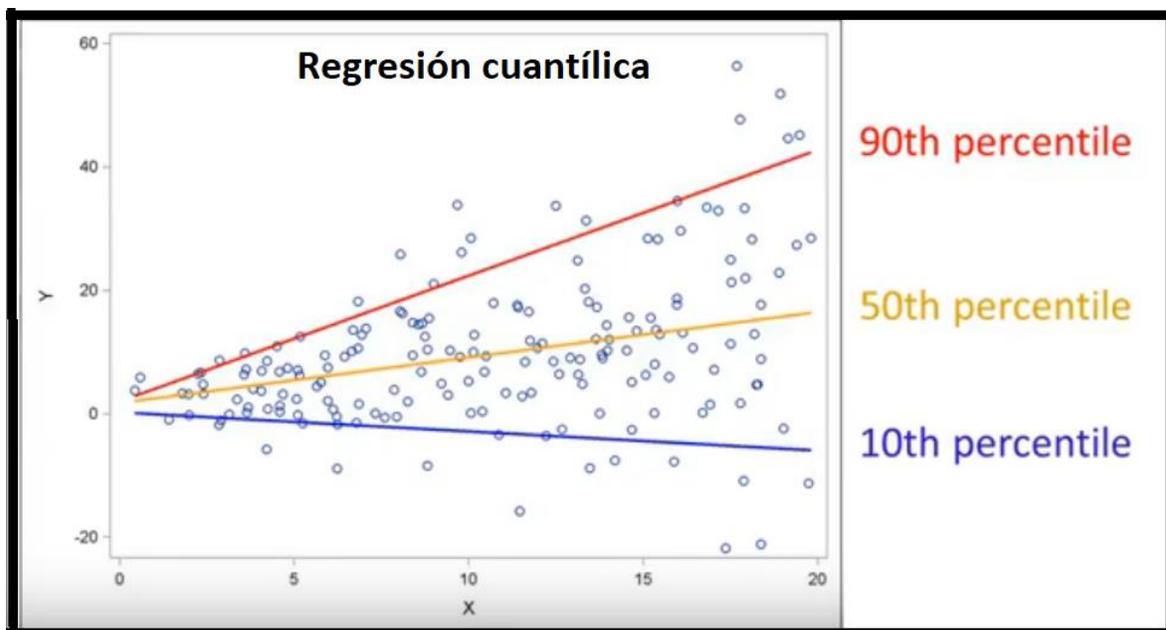


Figura N°2: Ejemplo de regresión cuantílica.

Esto es especialmente útil en modelos de regresión en los que no se cumple la condición de varianza constante, ya que significa que no hay un

único ratio de cambio (pendiente) que represente bien a toda la variable respuesta a la vez (Figura N°3).

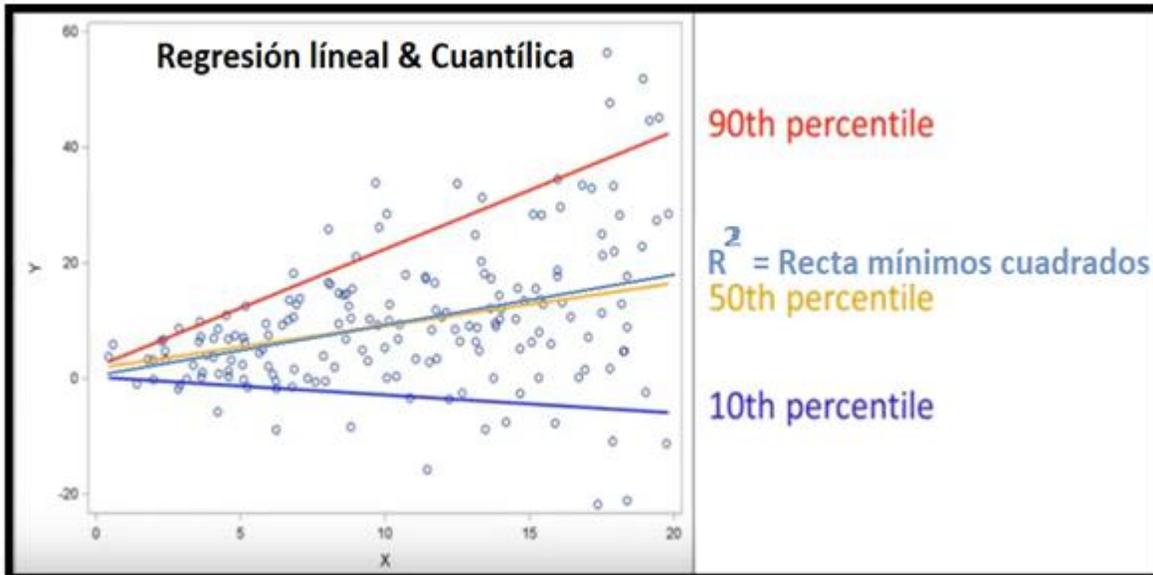


Figura N°3: Superposición entre regresión lineal y cuantílica.

En un ejemplo referente a seguridad minera, se puede analizar el resultado general (promedio) de un grupo de colaboradores, lo cual se puede hacer con una regresión normal (i.e. recta mínimos cuadrados), e incluso con el modelo F. Bird (Figura N°4), sin embargo, si se desea estudiar qué factores serán diferentes o afectarán diferentemente a aquellos trabajadores, se requerirá usar la regresión cuantílica.



Figura N°4: Pirámide de Control de Riesgos de F. Bird y situación al cierre del año 2019 en compañía minera.

La definición de cuantil afirma que dado una  $p \in (0,1)$  correspondiente a una variable al azar,  $X$ , con una función de distribución acumulativa de la forma  $F(x) = P(X \leq x)$ , el cuantil  $p$  es definido por la ecuación (1).

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \inf \{ x : F(x) \geq p \} = \int_0^p f(x) dx \quad (1)$$

El percentil 50 es el mejor conocido y corresponde a la mediana de la distribución, el cual representa el valor de la variable en la posición central en un conjunto de datos ordenados (Koenker & Basset, 1978).

Si hay una muestra al azar y observaciones independientes de una variable  $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ , es posible estimar la distribución de la función que compara el número de observaciones, que son menores o iguales al valor de interés y el número total de observaciones, a través de la distribución empírica de la muestra. El cuantil  $Q(p)$  puede ser resuelto minimizando el

promedio ponderado, cuyos valores son mayores o iguales que  $Q(p)$  y menores que  $Q(p)$ . El problema de la minimización sigue el modelo presentado en la ecuación (2) (Koenker, 2005):

$$\min_{\beta \in R^k} \left[ \sum_{i \in \{ix_i \geq Q(p)\}} p |x_i - Q(p)| + \sum_{i \in \{ix_i < Q(p)\}} (1-p) |x_i - Q(p)| \right] \quad [2]$$

El termino  $Q(p)$  corresponde al cuantil  $p$  y puede ser expresado como una función lineal de los parámetros de interés usando la ecuación (3).

$$Q(p) = \beta X_i + \varepsilon_i \quad [3]$$

Donde  $p$  toma el valor entre 0 y 1, representando los percentiles de interés;  $Q(p)$  es la variable dependiente y corresponde al número esperado de accidentes por percentil  $p$ ;  $\beta$  es un vector de la dimensión  $k$  de los parámetros desconocidos de las covariables  $X_i$ , el cual representa las características específicas de los segmentos estudiados (largo, trafico, volumen, velocidad, entre otros); el subíndice  $i$  corresponde a la identificación de cada uno de los tramos analizados; el término  $\varepsilon_i$  cubre todos los aspectos no considerados en el modelo así como cualquier error de medición. Al minimizar la suma de los residuos ponderados absolutos, los parámetros de la regresión  $\beta$  son estimados resolviendo el problema de optimización presentado en la ecuación (4). Esta expresión puede ser resuelta como un problema de programación lineal, por medio de diversos métodos de optimización (Chen, 2005).

$$\beta(\hat{p}) = \arg \min_{\beta \in R^k} \left[ \sum_{i \in \{ix_i \geq \beta X_i\}} p |x_i - \beta X_i| + \sum_{i \in \{ix_i < \beta X_i\}} (1-p) |x_i - \beta X_i| \right] \quad (4)$$

- **DATOS Y VARIABLES USADAS:** Una base de datos de accidentes acontecidos en una compañía minera u otra entidad, a partir del análisis de los “Reportes Flash Incidentes” puede ser utilizado. Generalmente, estos incluyen datos como nombre de la empresa afectada, número de accidente, gerencia o área involucrada, tipo de incidente, potencial de este, condición climática, datos del accidentado, ubicación exacta del incidente, causa inmediata probable, situación detectada, medida de control inmediata, entre otros.

Concordante a la variable dependiente, esta corresponde al número total de accidentes que ocurren dentro del segmento  $i$ , mientras que la variable explicativa es dividida en 3 grupos: el primero contiene los factores asociados con la geometría y condiciones del camino, el segundo grupo corresponde al volumen de tráfico y el tercer grupo incluye las velocidades. Existen evidencias que soportan el uso de la regresión cuantílica con variables asociadas con la geometría y condiciones del camino, y volumen de tráfico (Qin *et al.*, 2010; Qin & Reyes, 2011; Liu *et al.*, 2013; Washington *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014), y con las velocidades (Hewson, 2008). El resumen estadístico de las variables y sus descripciones de un “estudio guía” se aprecian en la tabla n°1.

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Min.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Promedio</b>	<b>SD</b>
<b>Geometría y condiciones del camino</b>					
RL	Largo de la sección del camino (Mtrs).	355,85	4.084	1.249	968
RW	Ancho del camino (Mtrs).	5,5	7,5	6,23	0,75
TD	Variables ficticias que equivalen a 1 si la sección de la carretera es para tráfico de una vía y 0 de lo contrario.	0	1	0,27	-
NL	Número de carriles	2	4	2,13	0,52
NI	Número de intersecciones	6	35	17,13	8,04
NP	Número de peatones o animales en la vía.	0	2	0,60	0,83
RP	Variables ficticias que equivalen a 1 si el camino es rígido y 0 de lo contrario.	0	1	0,20	-
FP	Variables ficticias que equivalen a 1 si el camino es flexible y 0 de lo contrario.	0	1	0,53	-
RF	Variables ficticias que toman el valor de 1 si la carretera es primaria y 0 en	0	1	0,067	-

	caso contrario				
<b>Volumen de tráfico</b>					
ADT	Promedio diario de tráfico	5.970	55.868	18.130,33	12.000
<b>Velocidades</b>					
P50	Percentil 50 (promedio de velocidad en KM/Hr)	24,82	56,60	30,97	7,81
<b>Accidentes</b>					
N/A	Número total de accidentes en la sección del camino	0	238	11,73	39,08

Tabla N°1: Resumen estadístico de las variables y sus descripciones.

## RESULTADOS

- **ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO:** Después de evaluar una variedad de modelos combinando las variables para diferentes cuantiles en el software, los coeficientes estimados se muestran en la tabla n°2, que corresponde al percentil 95. Además, el error estándar (SE) y el intervalo de confianza (CI) para el percentil 95 y el valor  $t$  como medida estadística se muestran para las variables que componen el modelo

PARÁMETRO	COEFICIENTE	SE	$t$	$p >  t $	95% CI	
Interceptor	-24.133	15.217	-1.586	0.1514	-59.224	10.958
RL	0.051	0.002	33.720	0.0000	0.047	0.054
RW	30.425	1.524	19.970	0.0000	26.912	33.939
NL	-86.148	3.53	-24.403	0.0000	-94.289	-78.007
NI	-0.405	0.119	-3.412	0.0092	-0.679	-0.131
ADT	0.007	0.0001	48.527	0.0000	0.007	0.008
P50	-2.104	0.133	-15.843	0.0000	-2.41	-1.798

Tabla N°2: Modelo de regresión cuantílica del percentil 95.

Para este modelo, todas las variables fueron significativas con excepción del interceptor, resultando el valor  $t$  (como valor absoluto) mayor o igual que 1,96, lo que indica que el coeficiente es significativamente diferente de cero para el nivel de confianza de 95%.

Entre los grupos de variables asociadas con la geometría y condiciones del camino, RL obtuvo la mayor significancia estadística con un  $t$  igual a 33,72. Un comportamiento similar mostró la variable ancho de la vía (RW).

El parámetro asociado con el volumen del tráfico (ADT) tuvo la mayor significancia entre las variables que conformaron el modelo, mientras que las variables NL y NI fueron negativas en la estimación, especialmente NL.

Adicionalmente, la significancia estadística del estimador P50 para el modelo de ocurrencia de accidentes es evidente. Sin embargo, el parámetro negativo indica que un incremento en el promedio de velocidad en la sección de estudio, resultará en un decrecimiento de accidentes.

- **DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS SECCIONES DEL CAMINO A LOS ACCIDENTES Y UN RANKING DE RIESGO:**

El criterio para determinar si la sección del camino es susceptible a accidentes, se basa en la proposición de Qin et al. (2010), la que consiste de una comparación entre los valores de los accidentes observados y los valores de los modelos de accidentes. Las secciones son clasificadas como propensas a accidentes, si el número de accidentes observados fue mayor que el número de accidentes modelados. El número de accidentes modelados, es obtenido del modelo de frecuencia de accidentes analizados usando regresión cuantil para cada  $i$  de la sección del camino. Posteriormente, se puede elaborar un ranking de riesgos por secciones de la ruta.

## DISCUSIÓN

Cuando el parámetro RL crece, indica un incremento en el número de accidentes, lo cual es consistente con otros estudios (Wang *et al.*, 2011; Rangel *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2014), mientras que con la variable ancho de la vía, cuando hay mayor interacción entre vehículos, se eleva la probabilidad de incidentes, lo que es concordante con Noland & Oh (2004) y Chang (2005). A este respecto, en el sector comprendido entre la curva número X y X, se aprecian variaciones de diversos metros (4 a 5(mtrs) aproximadamente)<sup>2</sup> en el ancho de la vía (Figura N°5).



Figura N°5: Variaciones de diversos metros el sector comprendido entre la curva número X y X (enmarcados en círculo rojo y azul).

<sup>2</sup> Observación visual estimada desde el interior de vehículo liviano en movimiento.

Los resultados de la variable ADT, corrobora la hipótesis que el incremento en las tasas de motorización tienen un alto impacto sobre la ocurrencia de los accidentes, lo cual ha sido ampliamente analizado en otros estudios (Qin *et al.*, 2010; Qin & Reyes, 2011; Wu *et al.*, 2014). Hábilmente, las compañías mineras han dosificado el flujo vehicular, lo que se aprecia generalmente en sus “Reglamentos de Tránsito”.

El resultado especialmente negativo de NL, sugiere que la adición de un carril a secciones con mayor frecuencia de accidentes, resultará en una mejora en términos de seguridad vial, decreciendo el número de accidentes. A este respecto, se aprecia en la figura n°6 un tramo de 1 km aproximadamente entre el km x y x, en donde además de existir diversas intersecciones, hay una variación importante en el ancho y número de carriles, especialmente en el sector del “puente”.



Figura N°6: Sector con diversas intersecciones y variaciones importantes en el número de carriles y ancho de la vía entre el km x y x.

Dado el alto número de infraestructuras (i.e. oficinas, plantas, etc.) en dicho sector (Figura N°6), determinar su variable ADT sería sugerente.

Así también, un tramo crítico en relación a la variable RW se aprecia en la figura n°7, ubicado entre el km x y el km x, sector de curvas.



Figura N°7: Imagen satelital del tramo de la ruta 1 con condición subestándar.

Acá la variación es  $\leq 1$ (Mtr), pero se pierden 1 a 2(Mtrs) aproximadamente por la vegetación silvestre aparentemente no protegida que existe en la vía (Figura N°8 y 9), condición subestándar que se contrapone con el resto de la ruta, en donde se pueden apreciar claramente los pretilos de tierra (Figura N°10), junto con ello, los animales que puedan estar prontos a ingresar al sector de caminos.



Figura N°8: Vista de condición subestándar de borde de camino entre km x y x.



Figura N°9: Vista de condición subestándar de borde de camino entre km x y x.



Figura N°10: Vista de condición adecuada de borde de camino en ruta.

El efecto negativo sobre la frecuencia de los accidentes asociados con la variable NI, puede deberse al hecho de que en países como Chile, los choferes conducen en el lado derecho (i.e. el volante está a la izquierda), así es que los conductores usualmente no se detienen en el carril exterior (derecho) para hacer un giro, que involucre un cambio de dirección en las intersecciones, por lo que tal situación no implica un riesgo de colisión con vehículos que se aproximan. El efecto opuesto fue reportado en Malasia por Hosseinpour et al. (2014), en donde los conductores manejan en el carril izquierdo, lo que causa que los choferes frecuentemente se detengan en el carril exterior (i.e. el carril está muy cerca del tráfico que se aproxima), al intentar girar en un carril de entrada en la dirección opuesta, por lo tanto, es más probable estar envuelto en una colisión con un vehículo viniendo desde el carril contrario. Para minimizar el riesgo de incidente al cruzar hacia la vía contraria, en las compañías mineras se han diseñado caminos alternativos para visualizar de mejor manera los vehículo que se aproximan, y esperar el momento adecuado de cruzar (Figura N°6).

El hecho de que un incremento en el promedio de velocidad en la sección estudiada, resulte en un decrecimiento de accidentes, si bien no es un resultado común, es coincidente con Navon (2003) y Rangel et al. (2013). Una de las causas posibles de este resultado es que la desviación estándar (SD) del promedio de velocidad del tramo de camino analizado es muy baja, por lo cual el rango de velocidad para aquella sección es también baja. En este caso de estudio, el valor de la SD para la variable P50 es 7,81(Km/Hr), lo que está relacionado con evidencia indicada por Rangel et al. (2013), en donde se exhibe una SD para el parámetro de velocidad de 13,83(Km/hr).

Considerando que el resto de las variables que se muestran en la tabla n°1 no se tuvieron en cuenta en el modelo que se muestra en la tabla n°2, ya que el “estudio guía” argumentó que en su caso no tuvieron significación estadística, acá en la rutas mineras existe para la variable NP un alto número de ocurrencias (Figura N°11), por lo que sin duda en un modelo específico a desarrollar puede tener una importancia significativa.



Figura N°11: Animales en ruta minera.

Interesante sería elaborar un ranking de riesgos por secciones de la ruta minera y/o en toda la red de caminos rurales de las compañías o entes solicitantes, basado en el criterio de Qin et al. (2010), en donde el índice es ordenado desde la mayor y la menor cantidad de diferencia. Este ranking sirve como una herramienta de toma de decisión para las autoridades pertinentes, cuyo objetivo es mejorar la seguridad vial de las diversas rutas, estableciendo

prioridades de inversión para las secciones más riesgosas, tanto como implementar medidas preventivas o correctivas, que permitan la maximización de los beneficios asociados con la seguridad vial.

Investigaciones más complejas y completas pueden incorporar otras variables dentro de la base de datos, asociadas con el estado físico y/o mental de los conductores (i.e. uso de alcohol/drogas, edad, fatiga, etc.), condiciones climáticas, características de los vehículos involucrados y severidad del accidente, en orden a desarrollar modelos que permitan un mejor entendimiento de los diversos factores y sus efectos, información ya contenida virtuosamente en los “Reportes Flash Incidentes” de las compañías mineras.

Respecto al estado físico y/o mental de los trabajadores, la “Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud” (CIF), ha determinado que el funcionamiento de un individuo en una situación específica, se entiende como una interacción compleja y dinámica entre la condición de salud y los factores contextuales (i.e. factores ambientales y personales), tal como se aprecia en la figura n°12.

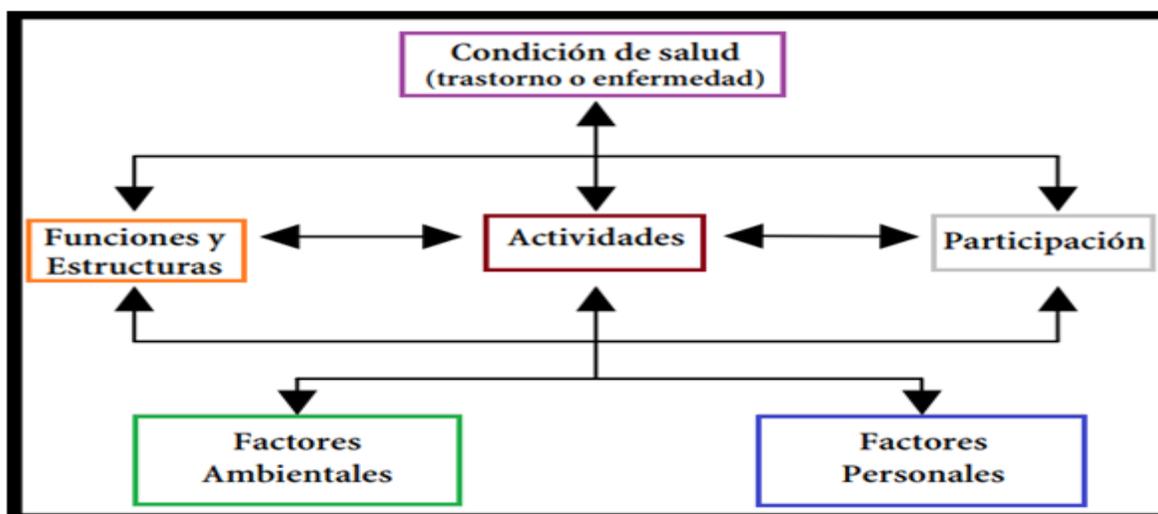


Figura N°12: Interacción entre la condición de salud, las actividades y los factores contextuales (CIF, 2001).

Es sabido que dentro de los factores ambientales que inciden en la integración laboral de las personas en situación de discapacidad intelectual (PeSDI), la barrera que tiene una mayor carga ambiental, es la de tipo actitudinal, la cual predispone a comportarnos de determinada forma. Por esto, es esencial trabajar sobre ella para producir un cambio importante en las mentalidades no solo en PeSDI, sino también en los actores sociales que los rodean, tales como sus familiares directos, vecinos, amigos cercanos y/o el personal médico, para así efectivamente conseguir la integración y la normalización en sus vidas. Cualquiera que sea la estrategia que se utilice y los agentes que se convoquen para ello, lo cierto es que se debe hacer un trabajo serio respecto a las barreras identificadas, para poder realizar un proceso de inclusión laboral exitoso, donde el ambiente sea un facilitador que genere efectos positivos, cambios deseables y desarrollos que los potencien en pro de la inclusión y de una vida con sentido (Zapata & Galarza, 2013).

Curiosamente, en análisis estadísticos de 10 años o más, se detectó que las personas  $\geq 60$  años, tenían mayor riesgo de accidentes automovilísticos que aquellos de menor edad (Angel & Hickman, 2008; Segura *et al.*, 2017), con un incremento en la edad de 10 años en el ser humano, resultando en un 2% de probabilidad de incremento de lesión y un 6% de probabilidad de muerte (Wang & Kockelman, 2005).

Finalmente, se expone que la “Pirámide de Control de Riesgos” desarrollada por Frank Bird en el año 1969, «método aún muy usado en el análisis de accidentes mineros, y que es una representación gráfica de la proporcionalidad, que existe entre los incidentes (eventos que no generan pérdida) y los accidentes con daños para la salud del trabajador, en donde por cada accidente grave con lesión incapacitante permanente, se presentan 10

accidentes serios con lesiones que dan pérdida de días, 30 accidentes leves sin pérdida de días y 600 incidentes», es un tipo de regresión lineal, que no permite determinar qué efectos difieren a lo largo de una distribución determinada. A saber, la primera regresión lineal documentada, que fue el método de los mínimos cuadrados, se publicó por Legendre en el año 1805, a su vez, el concepto de regresión cuantílica fue introducido por Koenker & Basset en el año 1978, y dado el avance computacional existente en la actualidad, se sugiere este método de análisis de accidentes de tránsito como un complemento al existente. Además, se propone explorar la evaluación de modelos multivariados, como el modelo binomial negativo de efecto aleatorio, la distribución de Poisson truncada, el modelo binomial negativo truncado, la regresión de Poisson inflada a cero, el binomio negativo inflado a cero, la probabilidad empírica bayesiana y el método bayesiano completo, entre otros, lo que puede ser productivo en términos de seguridad en determinados casos.

## CONCLUSION

El método QR es capaz de proveer una más específica selección discriminatoria de las partes del camino, identificando secciones clasificadas como falsas negativas o falsos positivos, las cuales obstaculizan una inversión más eficiente de los fondos asignados a la seguridad vial, confirmando que esta aproximación metodológica, contribuye y es pertinente a los estudios relativos específicamente, en la identificación de tramos del camino susceptibles a accidentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abramowicz, W., Jones, N., 1984. Dynamic axial crushing of square tubes. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 2(2). Pág. 179-208.
- Abramowicz, W., Jones, N., 1986. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 4(4). Pág. 243-270.
- Adachi, T., Tomiyama, A., Araki, W., Yamaji, A., 2008. Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 35(2). Pág. 65-79.
- Adura, F.E., Da Costa, J.H., Sabbag, A.F., 2004. Uso do cinto de segurança durante a gravidez. *Rev. Assoc. Med. Bras.*. Vol.50(1). Pág. 1-20.
- Aktaya, I., Kröplin, B.H., Toksoy, A.K., Güden, M., 2008. Finite element and coupled finite element/smooth particle hydrodynamics modeling of the quasi-static crushing of empty and foam-filled single, bitubular and constraint hexagonal- and square-packed aluminum tubes. *International Materials and Desing*. Vol. 29(5). Pág. 952-962.
- Alexander, J.M., 1960. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Quart. J. Mechs. and Applied Math.*. Vol. 13. Pág. 10-15.
- Amaro, M.A.M., Cardoso, R.M. de Sousa, 2008. Survival after motor vehicle crash: impact of clinical and prehospital variables. *Rev. Saúde Pública*. Vol. 42(4). 8 páginas.

- Angel, A., Hickman, M., 2008. Analysis of the factors affecting the severity of two-vehicle crashes. *Ingeniería y desarrollo*. Universidad del Norte. Vol. 24. Pág. 176-194.
- Asadinia, N., Khalkhalia, A., Javad, M.S., 2018. Sensitivity analysis and optimization for occupant safety in automotive frontal crash test. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 15(7). 15 págs..
- Atahan, A.O., 2008. Development of a heavy containment level bridge rail for Istanbul. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 15(6). 14 páginas.
- Atahan, A.O., Yucel, A.O., Erdem, M., 2014. Crash testing and evaluation of a new generation L1 containment level guardrail. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 38. Pág. 25 – 37.
- Babbage J.M., Mallick, P.K., 2005. Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum-composite hybrid tubes. *Compos. Struct.*, Vol.70. Pág. 177-184.
- Baguley, P., Roy, R., Watson, J., 2008. Cost of physical vehicle crash testing. Collaborative product and service life cycle management for a sustainable world: Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, 18-22 August 2008, Belfast, Northern Ireland, UK.
- Belingardi, G., Boria, S., Obradovic, J., 2013. Energy absorbing sacrificial structures made of composite materials for vehicle crash design. *Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures*. Vol. 192. Pág. 577 – 609.

- Bhalla, K., 2013. The Cost of road injuries in Latin America. Washington D.C., USA: Inter-American Development Bank.
- Bin Mohd. Zain, M.F., Mohammed, H.J., 2015. Concrete road barriers subjected to impact loads: An overview. Latin American Journal of Solids and Structures. Vol. 12. Pág. 1824-1858.
- Borvik T, Hopperstad, O.S., Reyes, A., Langseth, M., Solomos, G., Dyngeland, T., 2003. Empty and foam-filled circular aluminium tubes subjected to axial and oblique quasi-static loading. Int. J. Crashworthines. Vol. 8. Pág. 481-494.
- Bouchet, J., Jacqueline, E., Hamelin, P., 2002. Dynamic axial crushing of combined composite aluminum tube, the role of both reinforcement and surface treatments. International Journal Composite Structures. Vol. 56. Pág. 87-96.
- Cantillo, V., Garcés, P., Márquez, L., 2015. Factores que influyen en la ocurrencia de accidentes de tránsito en vías urbanas: Un enfoque combinado GIS-Bayesiano empírico. DYNA 83. Vol. 195. Pág. 21-28.
- Chang, L., 2005. Analysis of freeway accident frequencies: negative binomial regression versus artificial neural network. Safety Science. Vol. 43(8). Pág. 541-557.
- Chen, W., 2001. Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles. International Journal of Solids and Structures. Vol. 38. Pág. 7919-7944.

Cheng, W., Washington, S., 2005. Experimental evaluation of hotspot identification methods. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 37(5). Pág. 870-881.

CIF, 2001. Clasificación internacional del funcionamiento, de la discapacidad y de la salud. En: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43360/9241545445\\_spa.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43360/9241545445_spa.pdf?sequence=1)

Dias, A. de M., Iturrioz, I., Walber, M., Goedel, F., 2016. Numerical analysis of an intercity bus structure: a simple unifilar model proposal to assess frontal and semifrontal crash scenarios. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 13. Pág. 1616-1640.

Elmarakbi, A., Fielding, N., Hadaviniad, H., 2011. Finite element simulation of axial crush of thin-walled tubes with different cross-sections: vehicle/pole impact applications. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*. Vol. 3(3). Pág. 154-160.

El-Sobky, H., Singace, A.A., 1999. Profiled polymer pipes as re-usable energy absorption elements. *International Journal Mechanical Science*. Vol. 44. Pág. 1385-1400.

Erdogan, S., İlçi, V., Soysal, O.M., Korkmaz, A., 2015. A model suggestion for the determination of the traffic accident hotspots on the Turkish highway road network: A pilot study. *Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba*. Vol. 21(1). Pág. 169-188.

- Esmaeili, S.M., Pirmohammad, S., Esmaeili, S.M., 2017. Crashworthiness analysis of s-shaped structures under axial impact loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 14. Pág. 743-764.
- Forman, J.L., Lopez-Valdes, F.J., Duprey, S., Bose, D., del Pozo de Dios, E., Subit, D., Gillispie, T., Crandall, J.R., Segui-Gomez, M., 2015. The tolerance of the human body to automobile collision impact – a systematic review of injury biomechanics research, 1990–2009. *Accident Analysis & Prevention*. Vol. 80. Pág. 7-17.
- Ghamarian, H., Zarei, R., Abadi, T., 2011. Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes. *Thin Wall Struct.*. Vol. 49. Pág. 1312-1319.
- Guerrero, T.E.B., Amarís, G.E.C., 2014. Application of Bayesian techniques for the identification of accident-prone road sections. *DYNA*. Vol. 81(187). Pág. 209-214.
- Guerrero, T.E.B., Espinel, Y.B., Palacio, D.S., 2015. Effects of the attributes associated with roadway geometry, traffic volumes, and speeds on the incidence of accidents in a mid-sized city. *Ing. Unv.*. Vol. 19(2). Pág. 351-367.
- Güden, M., Kavi, H., 2006. Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes. *International Journal Thin-Walled Structures*. Vol. 44(7). Pág. 739-750.

- Gupta, N.K., Velmurugan, R., 1999. Axial compression of empty and foam filled composite conical shells. *J. Compos. Mater.*. Vol. 33. Pág. 567-591.
- Hanssen, A.C, Langseth, M., Hopperstad, O.S., 2000. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int. J. Impact. Eng.*, Vol. 24. Pág. 475-507.
- Hewson, P., 2008. Quantile regression provides a fuller analysis of speed data. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 40(2). Pág. 502-510.
- Hong, H.W., Fan, Z.J., Yu, G., Wang, Q.Ch., Tobota, A., 2005. Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 42. Pág. 2575-2600.
- Hosseinpour, M., Shukri, A., Farhan, A., 2014. Exploring the effects of roadway characteristics on the frequency and severity of head-on crashes. Case studies from Malaysian Federal roads. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 62. Pág. 209-222.
- Hosseini-Tehrani, P., Nikahd, M., 2006. Two materials S-frame representation for improving crashworthiness and lightening. *Thin-Walled Structures* Vol. 44. Pág. 407–14.
- Issa, Y., 2016. Effect of driver's personal characteristics on traffic accidents in Tabuk city in Saudi Arabia. *Journal of Transport Literature*. Vol. 10(3) Pág. 25-29.
- JandaghiShahi, V., Marzbanrad, J., 2012. Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made

aluminum tubes. *International of Thin-Walled Structures*. Vol. 60. Pág. 24-37.

Jang, R., Sun, C., Mizutani, E., 1997. *Neuro-fuzzy and soft computation*. Prentice Hall, New Jersey.

Karagiozova, D., Alves, M., 2004. Transition from progressive buckling to global bending of circular shells under axial impact-Part I, experimental and numerical observations. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 41(5-6). Pág. 1565-1580.

Karagiozova, D., Jones, N., 2008. On the mechanics of the global bending collapse of circular tubes under dynamic axial load-dynamic buckling transition. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 35(5). Pág. 397-424.

Kavi, A., Toksoy, K., Guden, M., 2006. Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient. *Mater. Design*. Vol. 27. Pág. 263-269.

Khalkhali, A., Darvizeh, A., Masoumi, A., Nariman-Zadeh, N., 2011. Experimental and numerical investigation into the quasi-static crushing behaviour of the S-shape square tube. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 27. Pág. 585–596.

Khalkhali, A., Hossinali, A.S.V., Kabir, M.M., 2013. Closed-form solution for peak crushing force of the S-rails. *International Journal of Automotive Technology*. Vol. 3. Pág. 446–456.

- Kim, H.S., Wierzbicki, T., 2004. Closed-form solution for crushing response of three-dimensional thin-walled S frames with rectangular section. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 30. Pág. 87–112.
- Koenker, R., 2005. *Quantile regression*, 1st ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2005.
- Koenker, R., Basset, G., 1978. Regression quantiles. *Econometrica*. Vol. 46(1). Pág. 33-50.
- Li, Q.M., Mines, R.A.W., Birch, R.S., 2000. The crush behaviour of Rohacell-51WF structural foam. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 37. Pág. 6321-6341.
- Liu, X., Saat, M., Qin, X., Barkan, C., 2013. Analysis of U.S. freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression. *Accident Analysis and Prevention*. Vol(59). Pág. 87– 93.
- Marsolek, J., Reimerdes, H.G., 2004. Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 30. Pág. 1209 –1223.
- Marzbanrad, J., Keshavarzi, A., 2014. A numerical and experimental study on the crash behavior of the extruded aluminum crash box with elastic support. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 11. Pág. 1329-1348.
- Masoud, A.R., 2016. Determination of the main influencing factors on road fatalities using an integrated neuro-fuzzy algorithm. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 14. Pág. 36-51.

- Mattos, L.M.P., Dias, E.G., Mingoti, S.A., da Silva, D.A.C., de Lima, A.A.F., Teixeira, W.C., 2015. Urban road traffic deaths: data linkage and identification of high-risk population sub-groups. *Cad. Saúde Pública*. Págs. S92-S106.
- Meguid S.A., Attia, M.S., Monfort, A., 2004. On the crush behaviour of ultralight foam-filled structures. *Mater. Design..* Vol. 25. Pág. 183-189.
- Miki, N., Martimbianco, A.L.C., Hira, L.T., Lahoz, G.L., Fernandes, H.J.A., Reis, F.B., 2014. Profile of trauma victims of motorcycle accidents treated at hospital São Paulo. *Acta Ortop. Bras..* Vol. 22(4). Pág. 219-222.
- Mohanty, M., Gupta, A., 2015. Factors affecting road crash modeling. *Journal of Transport Literature*. Vol. 9(2). Pág. 15-19.
- Moreira, C.A., Alves, C.B., Constantino, P., 2016. Analysis of factors associated with traffic accidents of cyclists attended in Brazilian state capitals. En: DOI: 10.1590/1413-812320152112.24152016
- Najafi, A., Rais-Rohani, M., 2011. Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes. *International Journal Thin-Walled Structures*. Vol. 49(1). Pág. 1-12.
- Navon, D., 2003. The paradox of driving speed: two adverse effects on highway accident rate. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 35(3). Pág. 361-367.
- Niknejad, G.H., Liaghat, H.M., Naeini, A.H., 2011. Theoretical and experimental studies of the instantaneous folding force of the

polyurethane foam-filled square honeycombs. *Mater. Design.* Vol. 32. Pág. 69-75.

Noland, R., Oh, L., 2004. The effect of infrastructure and demographic change on traffic-related fatalities and crashes: a case study of Illinois county-level data. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 36(4). Pág. 525-532.

Ohkami, Y., Takada, K., Motomura, K., Shimamura, M., Tomizawa H., Usuda M., 1990. Collapse of thin-walled curved beam with closed-hat section-part 1: study on collapse characteristics. *SAE Technical Paper*. 10, 900460.

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2014. Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013. [Online]. Washigton: OMS, Bloomberg Philanthropies. [date of reference July 25th of 2014]. Disponible en: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/83798/1/WHO\\_NMH\\_VIP\\_13.0\\_1\\_spa.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/83798/1/WHO_NMH_VIP_13.0_1_spa.pdf)

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015. Global status report on road safety 2015. Ginebra.

Pawlus, W., Karimi, H.R., Robbersmyr, K.G., 2011. Mathematical modeling of a vehicle crash test based on elasto-plastic unloading scenarios of spring-mass models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 55. Pág. 369–378.

- Pérez, C., Cirera, E., Borrell, C., Plasència, A., 2006. Fallecidos a 30 días por lesiones producidas en accidente de tráfico en España. *Gac. Sanit.* Vol. 20(2). Pág. 108-115.
- Pugsley, S.A., 1960. The crumpling of tubular structures under impact conditions. London. *Proceeding of locomotive engineering.* The Aluminum Development Association. Pág. 33-41.
- Qin, X., Ng, M., Reyes, P., 2010. Identifying crash-prone locations with quantile regression. *Accident Analysis and Prevention.* Vol. 42(6). Pág. 1531-1537.
- Qin, X., Reyes, P., 2011. Conditional quantile analysis for crash count data. *Journal of Transportation Engineering.* Vol. 137(9). Pág. 601-607.
- Ramakrishna, S., Hamada, H., 1998. Energy absorption characteristics of crash worthy structural composite materials. *Key Engineering Materials.* Vol. 141. Pág. 585–620.
- Rangel, T., Vassallo, J., Herraiz, I., 2013. The influence of economic incentives linked to road safety indicators on accidents: The case of toll concessions in Spain. *Accident Analysis and Prevention.* Vol. 59. Pág. 529-536.
- Reyes, A., Hopperstad, O.S., Langseth, M., 2004. Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *Int. J. Solids Struct.* Vol. 41. Pág. 1645-1675.
- Rezadoust A. M, M. Esfandeh, S.A. Sabet, 2008. Crush behavior of conical composite shells: Effect of cone angle and diameter/wall thickness ratio. *Polym-Plast. Technol.* Vol. 47. Pág. 147-151.

- Rio, A.P., Jun, S.B., Jin, H.C., Hoon, J.B., Myung, D.B., Min, J.S., 2017a. The effectiveness of thin-walled hull structures against collision impact. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 14. Pág. 1345-1360.
- Rio, A.P., Myung, D.B., Hyung, J.C., Min, J.S., 2017b. Analysis of structural crashworthiness and estimating safety limit accounting for ship collisions on strait territory. *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol. 14. Pág. 1594-1613.
- Rohayu, S., Sharifah Allyana, S. M., Jamilah, M.M., Wong, S.V., 2012. Predicting Malaysian road fatalities for year 2020.
- Rossi, A., Behdinan, K., 2005. Numerical simulation of the axial collapse of thin-walled polygonal section tubes. *International Journal Thin-Walled Structures*. Vol. 43(10). Pág. 1646-1661.
- Salehghaffari, S., Tajdari, M., Panahi, M., Mokhtarnezhad, F., 2010. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading. *International Journal of Thin-Walled Structures*. Vol. 48(6). Pág. 379-390.
- Santosa S.P, Wierzbicki, T., Hanssen, A.G., Langseth, M., 2000. Experimental and numerical studies of foam-filled sections. *Int. J. Impact. Eng.*. Vol. 24. Pág. 509-534.
- Segura, A.M.C., Cardona, D.A., Berberí, D.Y.F., Agudelo, A.M., 2017. Mortality in traffic accidents with older adults in Colombia. *Revista de Saúde Pública*. Vol. 51. 7 páginas.

- Seitzberger, F.G., Rammerstorfer, H.P., Degischer, R., Gradinger., 1997. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. Acta Mech.. Vol. 125. Pág. 93-105.
- da Silva M.B., Ferraz, E.T., de Oliveira, M.R.L., de Freitas, T.A.M., Silva, S.M., 2016. Traffic accident and homicide mortality in Curitiba, Paraná, Brazil, 1996-2011. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília. Vol. 25(1). 9 páginas.
- Taher, R., Zahari, S., Ataollahi, F., Mustapha, S., 2009. A double-cell foam-filled composite block for efficient energy absorption under axial compression, Compos. Struct.. Vol.89. Pág. 399-407.
- Taher, S.T., Mahdi, E., Mokhtar, A.S., Magid, D.L., Ahmadun, F.R., Arora, P.R., 2006. A new composite energy absorbing system for aircraft and helicopter. Composite Structures. Vol. 75. Pág. 14–23.
- Tingvall, C., Stigson, H., Eriksson, L., Johansson, R., Krafft, M., Lie, A., 2010. The properties of safety performance indicators in target setting, projections and safety design of the road transport system. Accident Analysis & Prevention. Vol. 42(2). Pág. 372-376.
- Vilchis, M.A..R., 2014. Cuartiles, deciles y percentiles. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 13 Págs..
- Wang, C., Quddus, M., Ison, S., 2011. Predicting accident frequency at their severity levels and its application in site ranking using a two-stage mixed multivariate model. Accident Analysis and Prevention. Vol. 43(6). Pág. 1979-1990.

- Wang, X., Kockelman, K., 2005. Use of heteroscedastic ordered logit model to study severity of occupant injury: Distinguishing effects of vehicle weight and type. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N° 1908, TRB, National Research Council, Washington, D.C.. Pág. 195-204.
- Washington, S., Haqueeb, M., Oh, J., Lee, D., 2014. Applying quantile regression for modeling equivalent property damage only crashes to identify accident blackspots. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 66. Pág. 136– 146.
- de Wit, P.A.J.M., Zaneripe, C. de Souza., 2016. Improving accident statistics and expanding the role of traffic psychologists in Brazil. *Psicologia: Ciência e Profissão* Out/Dez. Vol. 36(4). Pág. 816-830.
- Wrasse, A.C., Etcheverry, L.P., Marranghello, G.F., da Rocha, F.S., 2014. Investigando o impulso em crash tests utilizando vídeo-análise. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Vol. 36(1). 6 Págs..
- Wu, H., Gao, L., Zhang, Z., 2014. Analysis of crash data using quantile regression for counts. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 140(4).
- Xua, X.S., Ma, J.Q., Limb, C.W., Chua, H.J., 2009. Dynamic local and global buckling of cylindrical shells under axial impact. *Engineering Structure*. Vol. 31. Pág. 1132-1140.
- Xue, P., Qiao, C.F., Yu, T.X., 2009. Crashworthiness study of a keel beam structure. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 52. Pág. 672–679.

Zapata, M.P.A., Galarza, A.M.I., 2013. Caracterización de una población en situación de discapacidad intelectual, desde los dominios de la salud y los dominios relacionados con la salud, con miras a un proceso de inclusión laboral. Revista de la Facultad de Medicina. Vol 61(2). Pág. 145-153. En:

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-00112013000200006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-00112013000200006)

Zarei, H.R., Krogöer, M., 2006. Multi-objective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes. International Journal of Thin-Walled Structures. Vol. 44(3). Pág. 301-308.

Zhang, A., Suzuki, K., 2007. A study on the effect of stiffeners on quasi-static crushing of stiffened square tube with non-linear finite element method. International Journal Impact Engineering. Vol. 34(3). Pág. 544-550.

Zhang, C., 2005. Study of crash behavior of a 3-D S-shape space frame using finite element method. M.S. Thesis, Tufts University, Medford.

Zhang, X., Huh, H., 2009. Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression. International Journal of Thin-Walled Structures. Vol. 47(12). Pág. 1469-1477.

Zhang, X., Tian, Q.D., Yu, T.X., 2009. Axial crushing of circular tubes with buckling initiators. International Journal of Thin-Walled Structures. Vol. 47(6-7). Pág. 788-797.

Zhang, Y., Sun, G., Li, G., Luo, Z., Li, Q., 2012. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria. International Journal Materials and Design. Vol. 38. Pág. 99-109.