

TERCER LUGAR DEL PREMIO NACIONAL DE ADMINISTRACIÓN PÚBLICA 2013

Estrategia de Estadística Bayesiana para la identificación y jerarquización de sitios carreteros a ser considerados en Auditorías de Seguridad Vial para contribuir a reducir lesiones y muertes por accidentes viales: aplicación a la red carretera operada por Caminos y Puentes Federales (CAPUFE).

Andrés Aguayo Rico
Subgerente de Control Administrativo Institucional
Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

INTRODUCCIÓN

La seguridad vial¹ ha ingresado a la agenda de muchos países al tratarse de un problema de salud pública. Cada año mueren en el mundo 1.3 millones de personas en accidentes viales en zonas urbanas, suburbanas y carreteras. En el año 2008, los accidentes viales ocuparon el décimo lugar en causa de muerte a nivel mundial, y se estima que para el año 2030 ocuparán el quinto lugar (Organización Mundial de la Salud, 2009). Además, los costos económicos de los accidentes viales son altos: las lesiones causadas por accidentes viales representan 1.5% del Producto Nacional Bruto (PNB) en países de bajos ingresos y 2% en países desarrollados (Jacobs *et al.*, 2000).

En México, la seguridad vial se ha vuelto un tema preocupante. La accidentalidad tiene un costo económico anual estimado del 1.7%

¹ Aunque no existe un acuerdo general acerca de la definición de la seguridad vial, una definición comúnmente aceptada es “cualquier factor que contribuye a la ocurrencia de accidentes o la severidad de las lesiones” (Elvik, 2008).

del Producto Interno Bruto (PIB)². Cada año mueren alrededor de 16,500 mexicanos en accidentes viales, representando la primera causa de muerte en niños de 5 y 14 años y la segunda causa de muerte entre jóvenes de 15 y 29 años de edad. La Organización Mundial de la Salud ubica a México en el 13° lugar mundial entre los países que concentran el 62% del total de fallecimientos (Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes, 2013).

Al percatarse de estas estadísticas, en México y en el mundo se han desarrollado estrategias para atender esta problemática. En 2010 la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) proclamó el periodo 2011-2020 como el Decenio de Acción para la Seguridad Vial. Basado en el lanzamiento del Decenio, en mayo de 2011 se firmó por las Secretarías de Salud y de Comunicaciones y Transportes, el Acuerdo por el que se da a conocer la Estrategia Nacional en la materia, el cual fue publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 6 de junio de 2011, y cuyo objetivo general es disminuir un 50% los decesos por accidentes viales para el año 2020 en México. El Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (2011) calcula que pueden evitarse 88,000 muertes en México si se implementan acciones al respecto.

El cumplimiento de la meta del Decenio impone grandes retos para el sector carretero mexicano. El Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (2011) estima que, en 2010, el 61% de los decesos ocurrieron en carreteras (federales y estatales). Además, el flujo vehicular que se transporta por la infraestructura carretera tiende a incrementarse como resultado de mayores niveles de motorización ligados al crecimiento poblacional y económico en el país. De acuerdo con datos del INEGI, el índice de motorización (vehículos/1,000 habitantes) ha crecido en México de 169 en el año 2000 a 288 en 2009. En ese mismo periodo

² Las pérdidas se componen de costos directos generados por los accidentes, disminución de productividad por la pérdida de vidas y costos generados por atención médica.

el número de vehículos de motor registrados en circulación en el país creció en 98%. Se considera que al haber una mayor cantidad de vehículos circulando tiende a incrementar la cifra de accidentes (Organización Mundial de la Salud, 2004).

Consciente de la relevancia de los impactos sociales y económicos de los accidentes viales, CAPUFE tiene como uno de sus objetivos principales brindar mayor seguridad vial de su infraestructura operada de alrededor de 3,800 kilómetros de carreteras de cuota. Específicamente, el Organismo ha encaminado sus esfuerzos para el cumplimiento de la meta del Decenio. Para lograr lo anterior, ha desarrollado su propia estimación de la meta en su red operada y calcula que será posible cumplirla si se logran reducciones anuales de alrededor del 6% en decesos por accidentes viales. Así mismo, ha elaborado un programa de trabajo integral con actividades en los cinco Pilares de Atención definidos por la ONU: (i) Gestión de la seguridad vial; (ii) Infraestructura más segura; (iii) Vehículos más seguros; (iv) Usuarios más seguros; y (v) Respuesta tras los accidentes.

El cumplimiento de esta meta es un gran reto. La accidentalidad vial es un problema complejo que difícilmente desaparecerá, ya que es una consecuencia directa de la urbanización, del crecimiento poblacional y del desarrollo carretero. Para la identificación y atención de la accidentalidad vial se han desarrollado diferentes modelos, pero un modelo dio pie a la concepción actual de la seguridad vial: la Matriz de Haddon.

La Matriz de Haddon consiste en una matriz de tres columnas y tres renglones que combina las tres fases en el tiempo de un accidente (pre-accidente, accidente y post-accidente) y tres factores (humano, vehículo y ambiente) que interactúan entre sí. Esta matriz de nueve celdas modela un sistema dinámico, donde cada celda permite oportunidades de mejora en términos de intervenciones que reduzcan el número y la severidad de los accidentes. Este modelo dio inicio a un nuevo enfoque en

la seguridad vial: el enfoque sistémico. Esto implica que todo acercamiento para analizar la accidentalidad vial debe surgir de una comprensión completa del problema, como un sistema integral (ver Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de Haddon

FASE DEL ACCIDENTE	FACTORES		
	AMBIENTE	VEHÍCULO	HUMANO
Pre-accidente	<ul style="list-style-type: none">• Diseño geométrico.• Límites de velocidad.• Peatones.	<ul style="list-style-type: none">• Factibilidad de uso en el camino.• Iluminación.• Frenado.• Manejo.• Velocidad.	<ul style="list-style-type: none">• Información.• Actitudes.• Discapacidad.• Cumplimiento.
Accidente	<ul style="list-style-type: none">• Protección a objetos alrededor del camino.	<ul style="list-style-type: none">• Dispositivos de seguridad.	<ul style="list-style-type: none">• Uso de dispositivos de seguridad.• Discapacidad.
Post-accidente	<ul style="list-style-type: none">• Instalaciones de auxilio.• Congestionamiento.	<ul style="list-style-type: none">• Facilidad en accesos.• Riesgo de incendio.	<ul style="list-style-type: none">• Primeros auxilios.• Acceso a paramédicos.

Fuente: Haddon (1968).

Uno de los principios fundamentales de este enfoque es perdonar a la víctima del accidente, anticipando el riesgo del error humano con una infraestructura vial diseñada para tolerar estos errores y reducir sus consecuencias. Este tipo de infraestructura vial se denomina en la literatura como “vías que perdonan” (Runyan, 1998). Este principio se sustenta al observar que el factor humano es la principal causa de accidentes. De acuerdo con datos del Instituto Mexicano del Transporte (2013), en México en 2010 el factor humano fue citado como la causa del 78.4% de los accidentes carreteros

Debido a que las causas de la accidentalidad pueden estar ligadas a múltiples factores y la necesidad de contar con una infraestructura vial que perdone los errores humanos, son necesarias prácticas que evalúen todos los elementos involucrados en problemáticas

específicas. Una de estas prácticas se refiere a las Auditorías de Seguridad Vial. Una definición comúnmente utilizada es “herramientas preventivas que consisten en inspecciones regulares, sistemáticas y en campo de una infraestructura vial en operación por parte de un grupo de profesionales independientes, que resulte en un informe formal de identificación de problemáticas viales en sitios que requieran atención por una autoridad formal” (Mocsári y Holló, 2006). En específico, se hace un análisis minucioso acerca del riesgo presente y potencial de accidentes en la infraestructura vial para todos los usuarios de la vía. La *Federal Highway Administration* de los Estados Unidos establece que una Auditoría de Seguridad Vial debe ser capaz de responder a las siguientes preguntas: (i) ¿Qué elementos del camino representan una preocupación de seguridad: a qué grado, a cuáles usuarios y bajo qué circunstancias?, y (ii) ¿Qué oportunidades existen para eliminar o mitigar estas preocupaciones identificadas?

Las Auditorías de Seguridad Vial tienen una historia relativamente reciente. En la década de 1980, ingenieros viales en el Reino Unido analizaron que ocurrían accidentes fatales inclusive en los caminos construidos bajo los estándares y normas aplicables. En este análisis notaron que algunas características del camino eran culpables y no se consideraban a todos los usuarios de la vía, especialmente a los peatones. Esto llevó al desarrollo de un nuevo proceso de revisión enfocado a la identificación de problemáticas viales. Tomando como base las revisiones de seguridad realizadas por ingenieros en ferrocarriles, se publicaron las primeras listas de revisión a principios de la década de 1990 en el Reino Unido (NCHRP, 2004).

El concepto de Auditorías de Seguridad Vial fue rápidamente adoptado por otros países. El 78% de 182 países encuestados para el Reporte 2013 del Estado de la Seguridad Vial en el Mundo de la Organización Mundial de la Salud respondió que utiliza Auditorías de Seguridad Vial en algunas de sus vías en operación. Así mismo, el Banco Mundial promueve su uso entre

sus países miembros, financiando tanto su realización como las intervenciones viales que den solución a sitios peligrosos en el sudeste asiático (Banco Mundial, 2013).

La realización de Auditorías de Seguridad Vial es una práctica fundamental en ingeniería de tránsito y tiene gran prestigio internacional. Desde 2010, CAPUFE ha implementado su aplicación en la red carretera que opera y es una de las líneas de acción de sus programas de trabajo. Con base en la experiencia de estos cuatro años de trabajo, se ha observado que el éxito de esta práctica depende de tres aspectos: la identificación de sitios carreteros que requieren análisis y atención, la efectiva realización de Auditorías de Seguridad Vial y el seguimiento de la atención de las problemáticas viales registradas en campo.

La identificación de sitios que requieren análisis y atención permite aprovechar las bondades de las Auditorías de Seguridad Vial, al registrar las problemáticas de sitios que estadísticamente sugieren ser estudiados a detalle en campo. Es importante que esta identificación sea eficiente, ya que los recursos pueden desperdiciarse en sitios incorrectamente identificados, mientras que existen otros sitios que verdaderamente necesitan análisis y atención pero no se identifican y no se atienden (NCHRP, 2001).

Es importante que efectivamente y continuamente se estén realizando Auditorías de Seguridad Vial en la red. En CAPUFE se ha sistematizado esta actividad con la capacitación de funcionarios del Organismo en el Instituto Mexicano del Transporte en un curso en la materia impartido por el reconocido consultor Greg Speier en 2009 y su incorporación al Programa en 2010. A finales de 2012, se contrató de tiempo completo a un Auditor de Seguridad Vial cuya función primordial es la realización de éstas y la identificación de problemáticas viales. En la Gráfica 1 se muestran dos fotografías de una Auditoría de Seguridad Vial realizada en 2012.

Gráfica 1. Realización de Auditorías de Seguridad Vial en la red operada por CAPUFE



Fuente: CAPUFE.

El seguimiento a la atención de las problemáticas viales identificadas debe ser una actividad clave de la autoridad que solicitó la Auditoría. No hacerlo es tanto así como ir enfermo al médico, recibir un diagnóstico, pagar la consulta, y, después de todo esto, no seguir sus indicaciones o discontinuarlas. Por parte de CAPUFE, en este aspecto se han obtenido resultados sobresalientes. La gestión de las problemáticas desde su identificación por parte del Auditor hasta su atención representó un enorme reto, ya que es importante que efectivamente se dé seguimiento y se realicen acciones concretas para atenderlas. En 2010 fue desarrollado el Portal de Seguridad Carretera en CAPUFE (PORSCAR) que consiste en una herramienta informática-organizacional que facilita la atención a problemáticas identificadas mediante Auditorías de Seguridad Vial. Mediante esta herramienta, a julio de 2013, se han atendido el 70% de las problemáticas identificadas. El PORSCAR fue una de las prácticas ganadoras en el Tercer Foro Mesoamericano de Buenas Prácticas en Seguridad Vial en 2012, y posicionó a CAPUFE como una de las Más Innovadoras del Sector Público en México en octubre de 2012, según la revista *Information Week México*, especializada en tecnologías de la información.

A grandes rasgos, a nivel mundial los sitios carreteros a auditar se han seleccionado de acuerdo al alto número y severidad de los

accidentes. Al ordenarse de manera descendente, los peores sitios son seleccionados: aquellos que muestran los mayores niveles o tasas de crecimiento de accidentalidad y severidad, ya sea en términos absolutos o relativos. Sin embargo, estos métodos pueden ofrecer conclusiones erróneas basadas en inusualmente altos o bajos niveles ocasionados por un fenómeno conocido como regresión a la media. De acuerdo con Elvik (1997), éste es un fenómeno estadístico que ocurre cuando números inusualmente grandes o pequeños de accidentes en un año tienden a ser seguidos el siguiente año por cifras más cercanas a la media de accidentes. Esto indica que las variaciones observadas fueron producto de desviaciones aleatorias y naturales. Utilizando un ejemplo sencillo, supongamos que una persona entrega a un grupo grande de personas un examen y selecciona al 5% mejor evaluado. Es posible que este grupo obtenga una menor calificación, en promedio, si se le vuelve a poner el examen. Por otro lado, el 5% peor evaluado podría ser que incremente su calificación si toma de nuevo el examen. En cualquier caso, los extremos de la distribución tienden a regresar a la media debido a una variación natural y aleatoria de los resultados.

Otro enfoque utilizado es el uso de intervalos de confianza³, los cuales se construyen utilizando la media y desviación estándar de la accidentalidad en cada sitio comparado con sitios similares y asumiendo que los accidentes siguen una distribución de probabilidad Poisson⁴. Al determinar de esta manera un valor crítico (la cota superior del intervalo de confianza), se considera que un sitio requiere atención si la accidentalidad en éste es

³ Poniéndolo en el contexto de seguridad vial, un intervalo de confianza estima el rango de valores en los que el “verdadero” número de accidentes de un sitio carretero debe de ubicarse, basado en la accidentalidad en un periodo determinado. El nivel de certeza utilizado generalmente para estimarlo es de 95%, el cual indica que el “verdadero” número de accidentes debe de estar fuera de este rango en cinco ocasiones de cada 100.

⁴ En teoría de probabilidad y estadística, la distribución de probabilidad Poisson es una distribución discreta (es decir, utiliza sólo números enteros) que expresa, a partir de una frecuencia de ocurrencia media, la probabilidad que ocurra un determinado número de eventos durante cierto periodo de tiempo.

mayor al valor crítico. Si la accidentalidad no es mayor, significa que la accidentalidad en ese sitio no es estadísticamente diferente a la de otros sitios, aunque numéricamente parezca lo contrario. Sin embargo, Sung *et al.* (2001) argumentan que los valores críticos que se obtengan pueden ser demasiado bajos y podría ocasionar una mala identificación de sitios, además de no eliminar completamente el problema de regresión a la media.

Para CAPUFE, la sofisticación en la identificación de sitios para Auditorías de Seguridad Vial representa un área de oportunidad, considerando el alto nivel de confiabilidad y oportunidad de la información con que se cuenta. El Sistema de Atención al Trauma en CAPUFE (SATRAC), operado por la Dirección de Operación de CAPUFE, es un sistema que conforma la base de datos de accidentalidad alimentada por los Técnicos en Urgencias Médicas durante la atención de accidentes aprovechando la presencia del Servicio Médico del Organismo a pie de carretera. Esta base de datos fue también una de las prácticas ganadoras en el Tercer Foro Mesoamericano de Buenas Prácticas en Seguridad Vial en 2012. Como se menciona en publicaciones como el *Harvard Business Review*, el surgimiento de estos grandes bancos de información, denominados coloquialmente como *Big Data*, permite y exige a la vez aplicar métodos estadísticos más sofisticados para problemas de manejo y análisis de la información.

En CAPUFE se desarrolla un programa anual de Auditorías de Seguridad Vial en el que se identifican carreteras y sitios a auditarse basados en las estadísticas de accidentalidad. Sin embargo, la selección de carreteras y sitios se ha basado en las metodologías anteriormente descritas. De 2010 a 2012, la metodología utilizada se basaba en identificar carreteras y sitios con un alto número y severidad de accidentes. Para 2013, se construyeron intervalos de confianza del número y severidad de accidentes, aunque la identificación se realizaba a partir del alto número y severidad de accidentes observados.

En la literatura reciente se han presentado nuevos métodos estadísticos para la identificación de sitios que requieren atención y análisis, y que, además, resuelven el problema de regresión a la media. Estos métodos han sido utilizados y recomendados ampliamente en Estados Unidos y en Europa (NCHRP, 2001; Elvik 2010). Este trabajo propone una estrategia estadística para aplicar tres métodos para la elaboración del programa anual de Auditorías de Seguridad Vial: los modelos de predicción de accidentes, el Método Empírico de Bayes y el indicador de Potencial de Mejora de la Seguridad.

MARCO TEÓRICO

Modelos de predicción de accidentes

La identificación de sitios peligrosos es muy importante para promover la eficiencia: ubicar sitios que verdaderamente requieren atención, priorizarlos y realizar las intervenciones viales necesarias. En el contexto de seguridad vial, un sitio peligroso se define como un sitio que presenta un potencial de accidentes que es significativamente más alto cuando se compara con el potencial de accidentes de otros sitios de características similares (Kusumawati *et al.*, 2010).

Un enfoque destacado en la literatura reciente es seleccionar sitios peligrosos cuando el número de accidentes observados en el sitio es mayor al número esperado de accidentes en sitios con características similares (Elvik y Sorensen, 2007). Para la estimación del número esperado de accidentes, se han desarrollado los modelos de predicción de accidentes. Estos modelos son ecuaciones matemáticas que estiman el número de accidentes (usualmente en un año) en un sitio o carretera en particular, basado en el volumen de tránsito, las características del tránsito, las características de los accidentes ocurridos y las características del diseño.

En la literatura ha existido una discusión acerca de la mejor manera de estimar estos modelos. Anteriormente, se utilizaba el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), asumiendo que los accidentes son variables continuas (es decir, pueden tener decimales) y que siguen una distribución de probabilidad normal. Sin embargo, los accidentes son variables discretas (es decir, sólo pueden ser números enteros) y siguen una distribución de probabilidad diferente, por lo que los modelos de regresión de MCO no son apropiados. Por ello, se ha recomendado el uso de modelos que permitan la estimación de variables discretas.

El modelo más popular para la estimación de modelos con variables discretas es el modelo de regresión Poisson. Como dice su nombre, este modelo asume que la variable discreta a explicar sigue una distribución de probabilidad Poisson, la cual tiene la siguiente forma:

$$P(X = k) = [\lambda^k e^{-\lambda}] / k!$$

donde e es la base del logaritmo natural ($e = 2.71828\dots$), k es el número de accidentes registrados en el sitio⁵ y λ es el parámetro poblacional (entendido como el verdadero número de accidentes en el sitio). No obstante, esta distribución posee una debilidad importante: asume que la media y la varianza⁶ deben ser iguales. Esto no necesariamente ocurrirá en la práctica si la varianza de los accidentes viales es más grande que la media. Este fenómeno es conocido como sobredispersión. Para estos casos, se ha recomendado el uso del modelo de regresión binomial negativa (Vasallo *et al.*, 2009), la cual es una extensión de la distribución Poisson y tiene la siguiente forma:

$$P(X = k) = [\Gamma(k + \alpha^{-1}) / (\Gamma(\alpha^{-1}) k!)] [\alpha^{-1} / (\lambda + \alpha^{-1})]^{\alpha^{-1}} [\lambda / (\lambda + \alpha^{-1})]^k$$

⁵ En Matemáticas, el operador “!” significa factorial, que se define como el producto de todos los números enteros positivos desde 1 hasta n . Por ejemplo, $3!$ es igual a $1 \times 2 \times 3 = 6$.

⁶ La varianza es una medida de dispersión que explica que tan separados se encuentran una serie de valores.

donde $\Gamma(\cdot)$ es una función de probabilidad Gamma y α es el parámetro de sobredispersión. Cuando α es igual a cero, la distribución de probabilidad binomial negativa es la misma que Poisson. Cuando α es significativamente más grande que cero (medido a través del estadístico t y del p-valor), se confirma la sobredispersión de los datos y se debe utilizar un modelo de regresión binomial negativa (Poch y Mannering, 1996).

Enfoque Bayesiano para la estimación del nivel de seguridad

La estimación de modelos de predicción de accidentes no es una metodología suficiente para la identificación de sitios peligrosos. Mollett y Bester (2000) argumentan que los modelos que sólo utilicen accidentes observados presentarán un alto nivel de incertidumbre por las variaciones aleatorias en la accidentalidad y el problema de regresión a la media.

Una solución recomendada es el uso del Método Empírico de Bayes (MEB). Este método estima el número esperado de accidentes en un sitio usando un promedio ponderado de los accidentes registrados en el sitio en un periodo de corto plazo y el número esperado de accidentes en sitios similares (NCHRP, 2001). Así, aumenta la precisión del cálculo del número esperado de accidentes y corrige el problema de regresión a la media (Hauer *et al.*, 2002).

La esencia del MEB se basa en reconocer que el número de accidentes en un sitio en particular no sólo es inherente de éste, sino de sitios similares. Por ejemplo, digamos que el Sr. Pérez es un conductor novato que no ha tenido accidentes en su primer año de conductor. Supongamos que en su ciudad un conductor novato promedio tiene 0.6 accidentes al año. No sería razonable esperar que el Sr. Pérez tenga cero accidentes al año basado sólo en su historial de accidentes. De igual manera, sería raro determinar que tendrá 0.6 accidentes al año, basándonos en la experiencia de conductores similares pero sin tomar en cuenta su historial

de accidentes. Una estimación razonable debe tomar en cuenta ambas partes. Aquí se hace uso de la inferencia bayesiana⁷: para hacer una mejor predicción acerca de la ocurrencia de un evento aleatorio en el futuro (en este caso, número esperado de accidentes del Sr. Pérez), no sólo se utiliza el historial de accidentes del Sr. Pérez, sino que se incorpora también información adicional de gran valor (en este caso, número de accidentes registrados con conductores similares).

El objetivo del MEB es estimar el número esperado de accidentes a ocurrir en un periodo determinado, utilizando el número observado de accidentes en el sitio y el número esperado de accidentes en sitios similares (estimado por un modelo de predicción de accidentes). Matemáticamente, se define que K es el número observado de accidentes en un sitio y que es una estimación sesgada de λ , que es el número esperado de accidentes en un sitio. Así mismo, se define que la media de la población de referencia (equivalente a un grupo de sitios de una red carretera) sea $E(\lambda)$ ⁸, que se interpreta como asume es el nivel esperado de accidentes de toda la población de referencia y la mejor estimación si no existe registros de accidentes (K no existe), y la varianza de la población es $\text{Var}(\lambda)$. Sin embargo, si existe información disponible (K existe), entonces la mejor estimación del número esperado de accidentes es $E(\lambda|K)$ ⁹. Entonces, el objetivo del MEB es estimar $E(\lambda|K)$.

⁷ Este término hace referencia al Teorema de Bayes. Este teorema expresa cómo la creencia subjetiva de la ocurrencia de un evento aleatorio (como el número de accidentes viales en un sitio en particular) debe cambiar cuando se toma en cuenta información adicional (como el número esperado de accidentes viales en sitios similares).

⁸ La función matemática $E(\lambda)$ representa el valor esperado de la variable aleatoria λ . Intuitivamente, el valor esperado es el valor que uno “esperaría” encontrar si un proceso aleatorio se repite un número infinito de veces y se toma el promedio de los valores obtenidos. En este caso, $E(\lambda)$ sería el número esperado de accidentes considerando todos los números esperados de accidentes de todos los sitios de una red carretera.

⁹ La función matemática $E(\lambda|K)$ representa el valor esperado de λ dado que conocemos K .

Para calcular $E(\lambda|K)$, utilizaremos un promedio ponderado utilizando $E(\lambda)$ y K siguiendo el concepto de inferencia bayesiana, de tal manera que $E(\lambda|K) = \rho E(\lambda) + (1 - \rho) K$, donde ρ toma valores entre cero y uno. El peso ρ se obtiene utilizando la siguiente fórmula: $\rho = \gamma / [\gamma + E(\lambda)]$, donde $\gamma = (1 / \alpha)$, el inverso del parámetro de sobredispersión α . Por ello, la fortaleza del MEB depende de la estimación del peso ρ , que refleja la confiabilidad del registro de accidentes para determinar K , y del modelo de predicción de accidentes para estimar $E(\lambda)$ (Elvik, 2004).

Identificación y jerarquización de sitios peligrosos

Una vez calculado los valores de $E(\lambda)$ y $E(\lambda|K)$, se procede a la identificación de sitios peligrosos utilizando un concepto estadístico llamado prueba de hipótesis¹⁰. De acuerdo con Kusumawati *et al.* (2010), para identificar un sitio peligroso se deberá rechazar la siguiente hipótesis: este sitio no tiene un potencial de accidentes mayor que otros sitios similares dentro de la población de referencia. Estadísticamente, la hipótesis se rechaza si obtenemos que la probabilidad de que la hipótesis sea falsa es mayor o igual que un nivel de confianza ψ considerado como normal para sitios similares, es decir $P[E(\lambda|K) > E(\lambda)] \geq \psi$. Estableciendo un nivel de confianza de 90%¹¹, si $P([E(\lambda|K) > E(\lambda)] \geq 0.90)$ entonces el sitio es peligroso.

Después de identificar los sitios peligrosos, el siguiente paso es jerarquizarlos en orden de importancia. La intuición es que una vez que se identificaron los sitios peligrosos, hay que determinar cuáles son los más peligrosos para asignarles mayor prioridad.

¹⁰ Una prueba de hipótesis es el uso de la Estadística para determinar la probabilidad de que una hipótesis dada sea verdadera. El proceso usual consiste en establecer una hipótesis nula, identificar una prueba estadística para evaluar la hipótesis nula (por ejemplo: estadístico t, Ji-cuadrada, etc.), calcular el valor de la prueba estadística (asumiendo que la hipótesis nula es verdadera) y compararlo contra un nivel de confianza. Si el valor de la prueba es mayor que el nivel de confianza, la hipótesis nula se rechaza.

¹¹ En la literatura generalmente se establece un nivel de confianza de 95%. Sin embargo, con la finalidad de contar con un mayor número de sitios, se decidió utilizar un nivel de 90%.

La jerarquización es recomendada en la evaluación de redes carreteras en lugar de intersecciones o tramos carreteros solamente (Pendleton, 1996). Un criterio recomendado es el Potencial de Mejora de la Seguridad (PMS), el cual indica la diferencia entre el nivel actual de seguridad vial en un sitio contra el nivel esperado de seguridad vial para sitios con características similares. Entre mayor nivel de PMS tenga un sitio, mayor será la necesidad de atención. Utilizando la terminología anterior, la fórmula es: $PMS = E(\lambda|K) - E(\lambda)$. Este indicador es relevante porque permite identificar la variación sistemática del tránsito y los factores locales del camino como causa de accidentes, considerando además la naturaleza estocástica de la accidentalidad (Persaud *et al.*, 1999). Es importante aclarar que todos los sitios peligrosos tendrán un valor de PMS mayor que cero, pero no todos los sitios con PMS mayor que cero son peligrosos, ya que depende si fue identificado o no de esta manera previamente.

METODOLOGÍA

En este apartado se hará el ejercicio de elaborar una propuesta para el programa de Auditorías de Seguridad Vial considerando información del año anterior (2012)¹². A continuación se hará una descripción de los datos, la estimación de modelos de predicción de accidentes, la identificación de sitios peligrosos, su jerarquización y la elaboración del programa.

Datos

Para este ejercicio, se utilizaron dos importantes fuentes de información: accidentalidad y tránsito vehicular. Es importante aclarar que los sitios analizados son aquellos que forman parte de la red carretera operada por CAPUFE a julio de 2013. Es decir, aquellas carreteras con las que se cuenta con información de accidentalidad y tránsito vehicular pero ya no son operados por CAPUFE a esta fecha no fueron considerados.

¹² Con respecto al periodo de tiempo, en general se utilizan de tres a cinco años. Sin embargo, el MEB incrementa la precisión de las estimaciones cuando se tiene información limitada a uno o dos años, por lo que no representa una preocupación (Hauer *et al.*, 2002).

Para construir la base de datos de accidentalidad, se tomó la información extraída del SATRAC. Entre las variables en esta base de datos se encuentran: fecha y hora del accidente; número de lesionados y decesos; ubicación del accidente (carretera, kilómetro y sentido); tipo de accidente; número de vehículos involucrados; condiciones del clima; y condiciones del camino.

En cuanto a información del tránsito vehicular, ésta fue proporcionada por la Coordinación de Desarrollo, Análisis Estadístico y Política Tarifaria de CAPUFE, a partir de información de la Dirección de Operación. La información anual presenta el número de vehículos que cruzaron las casetas de cobro ubicadas en las carreteras de cuota, así como los tipos de vehículos (ver Tabla 2). Es importante mencionar que el tránsito registrado en cada carretera contempla ambos sentidos, por lo que no se puede distinguir el número de vehículos por sentido.

Tabla 2. Volumen y características del tránsito en la red carretera de CAPUFE (2012)¹³

No.	CARRETERA	TDPA	PORCENTAJE DE AUTOBUSES COMO PARTE DEL TRÁNSITO TOTAL DE LA CARRETERA	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS COMO PARTE DEL TRÁNSITO TOTAL DE LA CARRETERA
1	Acatzingo-Ciudad Mendoza	15,445.42	6%	44%
2	Acayucan-Cosoleacaque	12,231.60	7%	40%
3	Apto. Los Cabos-San José	2,624.67	1%	0%
4	Agua Dulce-Cárdenas	8,300.18	5%	33%
5	Cadereyta-Reynosa	5,117.23	6%	23%
6	Chamapa-Lechería	93,479.48	1%	7%
7	Chamotón-Campeche	6,545.92	4%	22%
8	Chapalilla-Compostela	4,484.19	9%	13%
9	Ciudad Mendoza-Córdoba	35,870.31	5%	23%
10	Ciudad Obregón-Guaymas	4,913.39	11%	41%
11	Córdoba-Veracruz	27,938.95	6%	27%
12	Cosoleacaque-Nuevo Teapa	14,883.52	4%	41%

¹³ La definición de estas variables se ofrecerá en la Tabla 3.

No.	CARRETERA	TDPA	PORCENTAJE DE AUTOBUSES COMO PARTE DEL TRÁNSITO TOTAL DE LA CARRETERA	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS COMO PARTE DEL TRÁNSITO TOTAL DE LA CARRETERA
13	Cuacnopalan-Oaxaca	23,156.25	7%	20%
14	Cuauhtémoc-Osiris	6,569.13	8%	34%
15	Cuernavaca-Acapulco	70,475.79	6%	7%
16	Durango-Mazatlán	3,406.08	4%	19%
17	Estación Don-Ciudad Obregón	10,944.79	10%	39%
18	Gómez Palacio-Corralitos	5,108.55	16%	46%
19	Gutiérrez Zamora-Tehuacán	3,807.20	2%	33%
20	Hermosillo-Nogales	15,292.37	5%	28%
21	La Carbonera-Puerto México	12,959.30	5%	59%
22	La Cuchilla-Torreón	3,898.44	8%	43%
23	La Pera-Cuautla	24,052.63	4%	7%
24	La Rumorosa-Tecate	6,308.93	7%	15%
25	La Tinaja-Acayucan	10,385.84	8%	40%
26	Las Choapas-Ocozacoautla	10,539.11	6%	37%
27	Lib. de Guaymas	5,682.24	6%	32%
28	Lib. Noreste de Querétaro	12,895.89	3%	59%
29	Lib. Oriente de Saltillo	11,414.11	5%	63%
30	Lib. Poniente de Tampico	7,677.30	0%	35%
31	Lib. Tulancingo-Nuevo Necaxa	16,703.51	5%	20%
32	Matamoros-Reynosa	4,132.26	2%	18%
33	México-Cuernavaca	35,618.36	6%	7%
34	México-Puebla	120,043.84	6%	15%
35	México-Querétaro	106,765.68	5%	33%
36	México-Tizayuca	102,359.90	5%	7%
37	Monterrey-Nuevo Laredo	11,094.78	6%	52%
38	Poza Rica-Tuxpan	3,102.08	17%	9%
39	Puebla-Acatzingo	41,022.82	7%	22%
40	Puente de Ixtla-Iguala	4,688.00	6%	24%
41	Querétaro-Irapuato	55,449.22	4%	33%
42	Rancho Viejo-Taxco	2,458.13	6%	4%
43	Salina Cruz-La Ventosa	2,826.09	2%	20%
44	Saltillo-El Porvenir	3,979.15	9%	39%
45	Tijuana-Ensenada	29,814.12	2%	7%
46	Zacapalco-Rancho Viejo	1,505.75	6%	6%

Fuente: CAPUFE.

Esta información se consolidó para construir sitios de un rango de dos kilómetros en toda la red carretera de CAPUFE, resultando en una población de referencia de 1,165 sitios en 46 carreteras. A diferencia de los puntos negros que tienen un rango de 500 metros, se optó por un rango mayor ya que se sugieren rangos de dos a 10 kilómetros para el estudio de redes carreteras (Elvik y Sorensen, 2007). De acuerdo con la opinión de expertos en la materia, sitios con este rango ofrecen suficiente información para la inspección de problemáticas en campo.

Estimación del modelo de predicción de accidentes

Tomando como referencia la forma básica de casi todos los modelos modernos de predicción de accidentes, el modelo a estimar tiene la siguiente forma:

$$E(\lambda) = \mu \cdot Q^\beta \cdot e^{\sum[\phi_i X_i]}$$

donde $E(\lambda)$ es la estimación del número esperado de accidentes en un sitio (variable dependiente), Q es el volumen de tránsito, X_i son el conjunto de variables explicativas que reflejan los factores de riesgo en el camino, y (μ, β, ϕ_i) son los coeficientes del modelo.

Este modelo se estimó utilizando dos variables dependientes por separado. Por un lado, se utilizó el número de accidentes con decesos y, por otro, el número de accidentes con lesionados. En la literatura esto se conoce como estimación de modelos multivariantes porque manejan diferentes variables dependientes. Esto permite tener una mejor estimación de la peligrosidad de los sitios según su severidad, además de que se recomienda que los PMS se calculen usando el tipo de severidad del accidente (NCHRP, 2001). Así mismo, Elvik y Sorensen (2007) recomiendan el uso del número de accidentes en vez del número de víctimas, ya que las víctimas pueden ser resultado de parámetros no relacionados con el diseño y las condiciones del camino, como el número de pasajeros del vehículo, uso del cinturón de seguridad, edad de los usuarios accidentados, condiciones del vehículo, etc. Por ello, el uso del número de víctimas puede ofrecer resultados sesgados.

Adicionalmente, las variables explicativas deben estar relacionadas directamente con el tránsito y las condiciones del camino que influyan significativamente con el número de accidentes. Se recomienda que se incluyan el mayor número posible de variables, ya que pueden excluirse del modelo las que no son estadísticamente significativas, lo cual se detallará más adelante. Utilizando las sugerencias de Elvik y Sorensen (2007), Vassallo *et al.* (2009), y Kusumawati *et al.* (2010), se utilizaron las variables explicativas indicadas en la Tabla 3, las cuales reflejan características del camino ajenas al control de CAPUFE.

Para la estimación del modelo multivariante, se estimó un modelo de regresión de binomial negativa con el paquete econométrico Stata 12. Como se detalló en el marco teórico, si el parámetro de sobredispersión es igual a cero, es igual a correr un modelo de regresión Poisson. De lo contrario, la sobredispersión ocasiona que esta estimación sea ineficiente ya que los errores estándar serán sesgados y conducirá a una selección errónea de variables explicativas.

Para la selección de variables explicativas, se utilizó un procedimiento estadístico en el que se corre el modelo con todas las variables explicativas y se elimina progresivamente, una a una, la variable que es estadísticamente menos significativa. Este procedimiento es altamente utilizado en minería de datos y es conocido como eliminación hacia atrás¹⁴. Para este procedimiento se consideró un nivel de significancia del 0.05 y se concluye hasta que todas las variables explicativas del modelo son estadísticamente significativas. Es decir, el p-valor de cada una de

¹⁴ Este término es conocido en inglés como *backward elimination*. Para esto, se utiliza nuevamente el concepto de prueba de hipótesis. En cambio, en este caso no se calcula el valor de una prueba estadística sino una versión análoga, el p-valor: la probabilidad de que el valor de la prueba estadística sea tan extrema como la mostrada, asumiendo que la hipótesis nula es verdadera. Entre menor sea el p-valor, más fuerte será la evidencia contra la hipótesis nula. Así mismo, en lugar de utilizar un nivel de confianza, el p-valor se compara contra un nivel de significancia (para ejemplificarlo, si se dice que “un evento ocurre en cada 5 casos de 100”, se dice que el nivel de significancia es 0.05). Si el p-valor es menor que el nivel de significancia, la hipótesis nula se rechaza.

ellas es menor o igual a 0.05. En las Tablas 4 y 5 se despliegan los coeficientes estimados y su p-valor de los modelos de predicción de accidentes con decesos y con lesionados.

Tabla 3. Variables explicativas para la elaboración de los modelos de predicción de accidentes

VARIABLE EXPLICATIVA	CLAVE	TIPO	COMENTARIOS
Tránsito diario promedio anual	TDPA	Cuantitativa	Se obtiene sumando el tránsito diario del sitio (en número de vehículos) en el periodo de estudio y se divide entre 365.
Camino directo	CD	Cualitativa	1: El sitio se ubica en un CD (carretera con dos carriles de circulación, uno en cada sentido). 0: El sitio no se ubica en un CD.
Porcentaje de autobuses	Porc_autobuses	Cuantitativa	Porcentaje de autobuses como parte del tráfico total que han transitado por el sitio en el periodo de estudio.
Porcentaje de vehículos pesados	Porc_camiones	Cuantitativa	Porcentaje de vehículos pesados como parte del tráfico total que han transitado por el sitio en el periodo de estudio.
Lluvia	Lluvia	Cuantitativa	Número de accidentes en el sitio con la presencia de lluvia.
Neblina	Neblina	Cuantitativa	Número de accidentes en el sitio con la presencia de neblina.
Nieve	Nieve	Cuantitativa	Número de accidentes en el sitio con la presencia de nieve en el camino.
Hielo	Hielo	Cuantitativa	Número de accidentes en el sitio con la presencia de hielo en el camino..
Mojado	Mojado	Cuantitativa	Número de accidentes con víctimas en el sitio con el camino mojado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Modelo de predicción de accidentes con decesos

VARIABLE EXPLICATIVA	COEFICIENTE	P-VALOR
Constante (μ)	-4.128186	0.000
Ln(TDPA)	0.3184388	0.000
Mojado	0.0347799	0.010
Neblina	0.3624715	0.001
Parámetro de sobredispersión (α)	0.4514109	0.000

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 5. Modelo de predicción de accidentes con lesionados

VARIABLE EXPLICATIVA	COEFICIENTE	P-VALOR
Constante (μ)	-2.876172	0.000
Ln(TDPA)	0.3919652	0.000
Mojado	0.1149314	0.000
Neblina	0.1794751	0.002
CD	-0.107902	0.006
Parámetro de sobredispersión (α)	0.218507	0.000

Fuente: Cálculos propios.

En ambos modelos se observa que el parámetro de sobredispersión es estadísticamente diferente de cero, ya que el p-valor es menor que 0.05 y rechaza la hipótesis nula que el parámetro es igual a cero. Esto indica que un modelo de regresión binomial negativa es una elección apropiada. En cuanto a la selección de variables explicativas, se observa que en ambos modelos el TDPA, la presencia de neblina y de pavimento mojado son variables estadísticamente significativas. Llama la atención que el porcentaje de vehículos pesados no fue una variable significativa en ningún modelo, ya que ha sido una variable considerada en modelos en otros países (Vasallo *et al.*, 2009).

Identificación de sitios peligrosos¹⁵

Recordemos que sólo el uso de modelos de predicción de accidentes no es suficiente y es necesario el uso del MEB para tener mayor precisión en la identificación de sitios peligrosos. Este procedimiento se realiza utilizando el criterio de que existe una probabilidad significativa de que un sitio tiene un potencial de accidentes mayores que otros sitios similares de la población de referencia. En este caso, el potencial de accidentes es representado por $E(\lambda|K)$, obtenido a partir del MEB para accidentes con decesos y accidentes con lesionados. Por otro lado, lo que se considera como un potencial de accidentes que es normal para

¹⁵ En el resto del ejercicio se codifican los nombres de las carreteras.

sitios similares en la población de referencia es representado por $E(\lambda)$, obtenido como el valor de la variable dependiente estimada del modelo de predicción de accidentes de las Tablas 4 y 5.

El criterio para la identificación de un sitio peligroso es que $P[E(\lambda|K) > E(\lambda)] \geq 0.90$. Para el cálculo de las probabilidades, se desarrolló la programación computacional en Stata 12 utilizando las estimaciones de cada modelo de predicción de accidentes. Por consiguiente, se identificaron 60 sitios peligrosos para el caso de accidentes con decesos (ver Tabla 6) y 31 sitios peligrosos para el caso de accidentes con lesionados (ver Tabla 7).

Tabla 6. Lista de sitios peligrosos para el caso de accidentes con decesos¹⁶

No.	CARRETERA	Km	K	$E(\lambda)$	$E(\lambda K)$	$P[E(\lambda K) > E(\lambda)]$
1	E5	167	2	0.348	0.572	0.942
2	E5	179	2	0.386	0.625	0.931
3	E5	249	2	0.348	0.572	0.942
4	A5	1	2	0.323	0.536	0.948
5	A5	7	1	0.480	0.573	0.903
6	C5	71	2	0.306	0.511	0.953
7	F1	275	2	0.455	0.718	0.911
8	F1	277	3	0.471	0.914	0.906
9	F1	287	1	0.487	0.580	0.901
10	F1	289	1	0.471	0.563	0.906
11	A3	3	2	0.435	0.691	0.917
12	A3	9	1	0.482	0.575	0.902

¹⁶ Para explicar esta tabla, se hará un ejemplo con el sitio 1. Un sitio con las características de tránsito y de accidentalidad del sitio 1, calculado por el modelo de predicción de accidentes, se estima que tendría 0.348 accidentes con decesos al año. Sin embargo, se estima que el sitio 1 tendría 0.572 accidentes con decesos al año, dado su registro de accidentes con decesos (2) y aislando el efecto de la variación aleatoria de la accidentalidad y del problema de regresión a la media. Entonces, dado que se calcula que este sitio presenta un potencial de accidentalidad mayor al potencial esperado de otros sitios similares con una probabilidad de 94.2%, se identifica que es un sitio peligroso.

No.	CARRETERA	Km	K	$E(\lambda)$	$E(\lambda K)$	$P[E(\lambda K) > E(\lambda)]$
13	A3	19	1	0.420	0.512	0.921
14	A3	23	2	0.450	0.712	0.912
15	A3	27	2	0.435	0.691	0.917
16	A3	29	1	0.435	0.527	0.917
17	A3	91	1	0.420	0.512	0.921
18	I4	1	3	0.395	0.789	0.928
19	I4	15	2	0.356	0.583	0.939
20	I4	27	2	0.343	0.566	0.943
21	I4	29	2	0.368	0.601	0.936
22	I4	31	2	0.356	0.583	0.939
23	F2	29	2	0.409	0.657	0.924
24	F2	75	2	0.409	0.657	0.924
25	F2	93	1	0.439	0.532	0.915
26	F2	163	1	0.409	0.502	0.924
27	F2	189	2	0.395	0.638	0.928
28	F2	239	1	0.409	0.502	0.924
29	G4	139	2	0.311	0.520	0.951
30	G4	161	2	0.463	0.729	0.908
31	H2	59	2	0.346	0.570	0.942
32	H2	193	2	0.359	0.587	0.939
33	B4	231	2	0.329	0.545	0.947
34	D4	13	1	0.429	0.522	0.918
35	D4	23	1	0.414	0.507	0.923
36	D4	25	1	0.414	0.507	0.923
37	D4	29	1	0.414	0.507	0.923
38	D4	31	2	0.400	0.645	0.927
39	A4	11	3	0.317	0.653	0.950
40	D1	147	2	0.330	0.546	0.946
41	D1	157	2	0.406	0.653	0.925
42	D2	47	1	0.454	0.546	0.911
43	E2	23	4	0.823	1.683	0.925
44	E2	119	4	0.716	1.518	0.943
45	E2	121	4	0.716	1.518	0.943
46	E2	123	4	0.741	1.558	0.939
47	H5	89	2	0.369	0.602	0.936
48	H5	129	3	0.474	0.920	0.905
49	H5	135	2	0.474	0.743	0.905

No.	CARRETERA	Km	K	$E(\lambda)$	$E(\lambda K)$	$P[E(\lambda K) > E(\lambda)]$
50	H5	143	2	0.474	0.743	0.905
51	H5	159	2	0.474	0.743	0.905
52	F3	29	2	0.429	0.683	0.919
53	F3	31	1	0.429	0.521	0.919
54	F3	33	1	0.429	0.521	0.919
55	F3	41	1	0.444	0.537	0.914
56	F3	43	1	0.444	0.537	0.914
57	F3	45	1	0.429	0.521	0.919
58	F3	53	1	0.444	0.537	0.914
59	F3	65	1	0.444	0.537	0.914
60	F3	93	1	0.429	0.521	0.919

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 7. Lista de sitios peligrosos para el caso de accidentes con lesionados

No.	CARRETERA	Km	K	$E(\lambda)$	$E(\lambda K)$	$P[E(\lambda K) > E(\lambda)]$
1	E5	235	12	3.720	7.432	0.914
2	C5	71	9	2.437	4.718	0.927
3	F1	289	11	3.856	7.123	0.903
4	D2	59	13	4.313	8.528	0.944
5	D2	79	17	4.839	11.089	0.964
6	E2	17	19	6.191	13.555	0.967
7	E2	19	34	9.804	26.299	0.990
8	E2	21	37	12.337	30.327	0.984
9	E2	23	40	10.998	31.478	0.994
10	E2	25	17	6.191	12.406	0.933
11	E2	27	26	5.518	16.715	0.995
12	E2	29	20	5.518	13.435	0.972
13	E2	31	28	6.191	18.730	0.995
14	E2	33	22	6.945	16.020	0.972
15	E2	97	18	7.790	14.222	0.915
16	E2	117	13	5.518	9.608	0.911
17	E2	119	25	6.945	17.828	0.986
18	E2	127	16	6.191	11.831	0.933
19	E1	79	17	7.441	13.359	0.904

No.	CARRETERA	Km	K	E(λ)	E(λK)	P[E(λK) > E(λ)]
20	E1	81	17	7.441	13.359	0.904
21	E1	83	22	10.504	18.511	0.922
22	E1	147	16	5.913	11.599	0.944
23	H4	25	15	5.184	10.398	0.928
24	I1	255	17	5.867	12.121	0.946
25	I1	261	13	2.085	5.502	0.979
26	D3	25	8	1.305	2.791	0.936
27	E4	131	16	4.064	9.678	0.973
28	E4	133	17	4.064	10.148	0.973
29	I5	29	11	1.452	3.751	0.967
30	F3	31	11	3.197	6.406	0.909
31	F3	33	10	3.197	5.995	0.909

Fuente: Cálculos propios.

Jerarquización de sitios peligrosos

Después de identificar los sitios peligrosos, hay que determinar cuáles son los más peligrosos utilizando el criterio PMS. Sin embargo, se utiliza un diferente nivel de PMS para accidentes con decesos que con accidentes con lesionados. Dado que estadísticamente ocurren más lesionados que decesos en los accidentes, el PMS de los sitios con lesionados será mucho mayor y no es directamente comparable con los decesos. Para poder lograr esta comparación, se recomienda ponderar los PMS de acuerdo con el nivel de severidad de los accidentes y, posteriormente, se pueden ordenar de manera descendente, recordando que entre mayor nivel de PMS tenga un sitio, mayor será la necesidad de atención (NCHRP, 2001).

Para esta estandarización, se elaboró un número índice para la jerarquización de sitios peligrosos, donde se ordenan de manera descendente los sitios identificados según su PMS. En el caso de accidentes con lesionados, el sitio con el mayor PMS tendrá el valor de 100. En cambio, dada la importancia del cumplimiento de la meta del Decenio, se le asignará el valor de 200 al sitio con el mayor PMS para el caso de accidentes con decesos. De esta

manera, se le da una mayor prioridad a la atención de sitios con accidentes con decesos.

Posteriormente, siguiendo la recomendación del NCHRP (2001), se hace la suma de los índices ponderados de los sitios peligrosos identificados. Después de hacer la combinación de sitios peligrosos por accidentes con decesos y lesionados, se cuenta con un total de 84 sitios peligrosos.

Elaboración de la propuesta para el programa de Auditorías de Seguridad Vial

Con base en los sitios peligrosos identificados y jerarquizados, se puede elaborar una propuesta para el programa de Auditorías de Seguridad Vial. Por cuestiones de logística, el programa toma como base carreteras a auditar y se hace una jerarquización de éstas en base a la suma de los índices utilizados. Entonces, la propuesta comprendería 84 sitios en 23 carreteras. En la Tabla 8 se muestra esta propuesta, indicando en el kilometraje de cada carretera y si éste fue seleccionado en base a su accidentalidad con decesos, lesionados o ambos.

Tabla 8. Propuesta de Programa Anual de Auditorías de Seguridad Vial 2013

No.	CARRETERA	SUMA DE ÍNDICES	KILOMETRAJE
1	E2	1428	17, 19, 21, 23 , 25, 27, 29, 31, 33, 97, 117, 119 , 121*, 123*, 127
2	E4	348.3	129*, 133, 131, 135*, 143*, 159*
3	I4	303.1	1*, 15*, 27*, 29*, 31*
4	A3	266.2	3*, 9*, 19*, 23*, 27*, 29*, 91*
5	F3	261	29*, 31 , 33 , 41*, 43*, 45*, 53*, 65*, 93*
6	F2	236.2	29*, 75*, 93*, 163*, 189*, 239*
7	F1	223.2	275*, 277*, 287*, 289

No.	CARRETERA	SUMA DE ÍNDICES	KILOMETRAJE
8	E5	178	167*, 179*, 235, 249*
9	D4	142.8	13*, 23*, 25*, 29*, 31*
10	E1	124.7	79, 81, 83, 147
11	G4	110.2	139*, 161*
12	D1	107.7	147*, 157*
13	H2	105.1	59*, 193*
14	A4	78.1	11*
15	A5	71.1	1*, 7*
16	C5	58.9	71
17	H5	54.13	89*
18	D2	52.1	47*, 79
19	B4	50.19	231*
20	I1	47.22	255, 261
21	H4	25.46	25
22	I5	11.23	29
23	D3	7.25	25

Negritas: Decesos y lesionados; *Asterisco:* Sólo decesos; *Itálicas:* Sólo lesionados.

Fuente: Cálculos propios.

CONCLUSIONES

La implementación de esta estrategia puede representar una oportunidad de mejora para CAPUFE y verse reflejado en un gran impacto social e institucional: contribuir al cumplimiento de la meta del Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020 y brindar mayor seguridad vial a los usuarios. El diseño del programa anual de Auditorías de Seguridad Vial empleando las mejores prácticas estadísticas en la literatura de seguridad vial puede aportar a posicionar a CAPUFE como un operador de autopistas de vanguardia a nivel nacional e internacional.

Además, esta estrategia puede permitir a CAPUFE ser más eficiente. La selección y jerarquización de sitios carreteros a auditar mediante sofisticados métodos estadísticos incrementarán la eficiencia en la localización, análisis y atención de sitios que requieren consideración prioritaria. Así mismo, se lograría una asignación

más eficiente de recursos económicos y humanos, especialmente en un tiempo de austeridad y de entrega de resultados.

Por otro lado, la factibilidad de implementación de esta estrategia es muy alta, ya que los elementos necesarios están listos:

- La información es altamente confiable y oportuna: CAPUFE cuenta con una excelente base de datos de accidentalidad y tránsito vehicular. Para la elaboración del programa anual de Auditorías de Seguridad Vial 2014, se contará con la información necesaria;
- La implementación es expedita: incorporando la nueva información, la metodología estadística se puede replicar con la programación computacional en Stata 12 utilizada en este trabajo, y
- Las Auditorías de Seguridad Vial ya son parte integral del programa de trabajo de cada año: CAPUFE ya cuenta con funcionarios que realizan Auditorías de Seguridad Vial y un sistema informático de gestión que da seguimiento a la atención de las problemáticas identificadas en campo.

Sin embargo, es importante señalar que existen pasos adicionales que complementarían gradualmente esta propuesta:

- Los modelos de predicción de accidentes pueden ser más precisos si se incluyen variables explicativas relacionadas con las características físicas de los sitios carreteros, tales como el número y clasificación de curvas horizontales y verticales; número de carriles; presencia de sitios urbanos, intersecciones y entronques; calidad de la superficie de rodamiento (ejemplo: Índice internacional de Rugosidad); entre otros, y
- La ventana del periodo de análisis de accidentalidad y tránsito vehicular podría ampliarse varios años previos, en lugar de uno solo. De esta manera, se tendría más precisión en la identificación de sitios que requieren análisis y atención.

Así mismo, esta estrategia no implica que sea completa y exhaustiva. Es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La realización de Auditorías de Seguridad Vial en los sitios identificados podría estar sujeto a disponibilidad de recursos y a la atención de otros sitios no identificados por esta estrategia pero que son de alta prioridad considerando otros criterios. Por ejemplo, accidentes graves que ocurran durante el año;
- Los sitios identificados consideran la accidentalidad en ambos sentidos de la carretera. Previo a realizar Auditorías de Seguridad Vial en los sitios identificados, se deberá analizar puntualmente la accidentalidad en ambos sentidos del sitio para determinar cuál es el sentido que requiere atención (aunque podrían ser ambos), y
- Esta propuesta debe complementarse con revisiones de campo y sugerencias realizadas por las Unidades Regionales de CAPUFE acerca de sitios y carreteras que consideran deben incluirse en el programa. Estas sugerencias pueden surgir de preocupaciones de **seguridad vial observadas en recorridos de rutina y/o especiales.**

REFERENCIAS

1. Banco Mundial. “Road Safety: A Development Challenge for South Asia”. Publicación en línea: <http://go.worldbank.org/CJ7J1F9LB0> [con acceso el 28 de julio de 2013].
2. Bliss, T. (2004) “Implementing the Recommendations of the World Report on Road Traffic Injury Prevention”, *Transport Note No. TN-1*. Banco Mundial: Washington, D.C.
3. Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (2011), “Situación de la Seguridad Vial en México”. México, D.F.
4. Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (2013), “Tercer Informe sobre la Situación de la Seguridad Vial, México 2013”. México, D.F.
5. Elvik, R. (1997), “Evaluations of Road Accident Blackspot Treatment: A Case of the Iron Law of Evaluation Studies?” *Accident Analysis & Prevention*, 29(2), 191-199.
6. Elvik, R. (2004), “Traffic Safety”, Capítulo 16 del libro *Handbook of Transportation Engineering*. Ed. McGraw Hill. Nueva York, NY.
7. Elvik, R. y Sorensen, M. (2007), “Black Spot Management and Safety Analysis of Road Networks – Best Practice Guidelines and Implementation Steps” *Institute of Transport Economics Report 919/2007*. Oslo, Noruega.
8. Elvik, R. (2008), “Dimensions of Road Safety Problems and their Measurement” *Accident Analysis & Prevention*, 40 (3), 1200-1210.
9. Elvik, R. (2010), “Assessment and Applicability of Road Safety Management Evaluation Tools: Current Practice and State-of-the-Art in Europe”, *Institute of Transport Economics Report 1113/2010*. Oslo, Noruega.
10. Federal Highway Administration. “Road Safety Audits (RSA)”. Publicación en línea: <http://safety.fhwa.dot.gov/rsa/> [con acceso el 28 de julio de 2013].
11. Haddon, W. (1968), “The Changing Approach to the Epidemiology, Prevention, and Amelioration of Trauma: The Transition to Approaches Etiologically Rather than

- Descriptively”, *American Journal of Public Health*, 58, 1431-1438.
12. Hauer, E. *et al.* (2002), “Estimating Safety by the Empirical Bayes Method: A Tutorial”, *Transportation Research Board*, 1784, 126-131.
 13. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. “Vehículos de Motor Registrados en Circulación”. Publicación en línea: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/registros/economicas/vehiculos/default.aspx> [con acceso el 26 de julio de 2013].
 14. Instituto Mexicano del Transporte (2012), “Manual Estadístico del Sector Transporte 2012”, Sanfandila, Querétaro.
 15. Instituto Mexicano del Transporte (2013), “Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales (2010)”, Sanfandila, Querétaro.
 16. Jacobs, G.; Aeron-Thomas, A. y Astrop, A. (2000), “Estimating Global Road Fatalities”, *Transport Research Laboratory Report*, No. 445.
 17. Kusumawati, A. y Wong, Y.D. (2010), “The Application of Empirical Bayes Approach for Identifying and Ranking Hazardous Junctions Case Study: Singapore Signalized Junctions”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, 2062-77.
 18. McAfee, A. y Brynjolfsson, E. “Big Data: The Management Revolution”. *Harvard Business Review*, octubre 2012.
 19. Mocsári, T., Holló, P. (2006), “Common Understanding on Road Safety Inspections”. Reporte del Paquete de Trabajo, No. 5 del *Road Infrastructure Safety Protection – Core-Research and Development for Road Safety in Europe (RIPCARD)*.
 20. Mollett, C.J. y Besterm C.J. (2000), “An Introductory Guideline for the Use of Bayesian Statistical Methods in the Analysis of Road Traffic Accident Data”, *South African Transport Conference*. Pretoria, Sudáfrica.

21. National Cooperative Highway Research Program (2001), “Statistical Methods in Highway Safety Analysis, Synthesis 295”. Washington, D.C.
22. National Cooperative Highway Research Program (2004), “Road Safety Audits: A Synthesis of Highway Practice, Synthesis 336”. Washington, D.C.
23. Organización Mundial de la Salud (2004), “World Report on Road Traffic Injury Prevention”. Ginebra, Suiza.
24. Organización Mundial de la Salud (2009), “Informe sobre la Situación Mundial de la Seguridad Vial”, Ginebra, Suiza.
25. Organización Mundial de la Salud (2013), “Global Status Report on Road Safety 2013”, Ginebra, Suiza.
26. Pendleton, O. (1996), “Evaluation of Accident Analysis Methodology”, *Federal Highway Administration Report*, FHWA-RD-96-039. Washington, D.C.
27. Persaud, B.; Lyon, C. y Nguyen, T. (1999), “Empirical Bayes Procedure for Ranking Sites for Safety Investigation by Potential for Safety Improvement”. *Transportation Research Record* 1665, *Transportation Research Board*, 7-12.
28. Poch, M. y Mannering, F.L. (1996), “Negative Binomial Analysis of Intersection-Accident Frequencies”, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 122.2, 105-113.
29. Runyan, C. (1998), “Using the Haddon Matrix: Introducing the Third Dimension”. *Injury Prevention*, 4, 302-307.
30. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020”, *Diario Oficial de la Federación*, 6 de mayo de 2011. México, D.F.
31. Vasallo, J. M. *et al.* (2009), “Do PPP contracts improve road safety?” *European Investment Bank University Research Sponsorship Programme*. Luxemburgo, Luxemburgo.