

Análisis de accidentabilidad en autopistas de dos carriles de la red federal de cuota en México

Analysis of crash rates on two-lane toll highways in Mexico's federal network

**¹Cynthia Elizabeth García-Díaz, ¹Luis Alberto Morales-Rosales, ^{1*}Antonio Hurtado-Beltrán,
¹José Eleazar Arreygue-Rocha**

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Fco. J. Mujica S/N, Col. Felicitas del Río, C.P.58030, Morelia, Michoacán, México. Correos electrónicos: 1231936g@umich.mx; luis.morales@umich.mx; antonio.hurtado@umich.mx; eleazar.arreygue@umich.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7379-7217>; [https://orcid.org/0000-0001-9080-6910](https://orcid.org/0000-0002-4753-9375); <https://orcid.org/0000-0002-5889-7661>

* Autor para correspondencia

Recibido: 26 de julio del 2023
Aceptado: 12 de enero del 2024
Publicado: 31 de enero del 2024
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2024914565>
e4565

Resumen

A diferencia de lo que ocurre en países desarrollados, donde las autopistas de la red troncal tienen una configuración multicarril, una parte significativa de la red troncal en México está constituida por autopistas de 2 carriles (un carril por sentido). Este artículo presenta un análisis descriptivo de los datos de accidentes reportados en la red de autopistas de 2 carriles de cuota en México, con la finalidad de conocer el estado actual de su fenómeno de accidentabilidad. Se encontró que el índice de accidentabilidad global en las autopistas de 2 carriles de cuota es aproximadamente el doble del observado en la red carretera nacional, revelando una accidentabilidad significativamente mayor. Adicionalmente, se identificaron los tramos carreteros que muestran una tendencia a agravar su fenómeno de accidentabilidad en el futuro próximo. Este estudio proporciona información valiosa a los tomadores de decisiones para mejorar los programas de gestión de la seguridad vial.

Palabras clave: Autopista; Accidente; Seguridad Vial; Índice de Accidentabilidad; Factores; Tasa de Variación

Abstract

Unlike developed countries, where toll freeways typically have multiple lanes, a significant portion of Mexico's trunk highway system comprises two-lane toll highways (one-lane per direction). This article presents a descriptive analysis of traffic accident data reported on the two-lane toll highway system in Mexico to understand its current state of accidents. It was found that the global crash index on two-lane toll highways is approximately double that observed on the national highway network, revealing a higher accident rate on this type of

road. Additionally, highway sections exhibiting a potential worsening trend in accident occurrence in the near future were identified. This study provides valuable information to decision-makers to enhance road safety management programs.

Keywords: Freeways; Crash; Road Safety; Crash Index; Factors; Variation Rate.

Introducción

La red troncal de carreteras en México es una pieza clave de la infraestructura vial del país. Esta red conecta las principales ciudades y centros económicos, facilitando el transporte de mercancías y pasajeros, fomentado al mismo tiempo, la comunicación, el comercio y el turismo. Por ello, es de vital importancia mantener en buen estado y mejorar continuamente esta red de carreteras a fin de que brinden a sus usuarios un traslado seguro y eficiente.

La red carretera federal tiene 15 corredores troncales con una longitud de 19,781 km, de los cuales, 9,174 km son autopistas de cuota (Diario Oficial de la Federación, 2020). La Figura 1 muestra un mapa de los tramos de autopista de cuota que existen en México al año 2023. A diferencia de lo que ocurre en países desarrollados, donde por definición las autopistas y carreteras de la red troncal tienen una configuración geométrica multicarril, una parte significativa de la red troncal de carreteras en México está constituida por autopistas de 2 carriles (un carril por sentido). De acuerdo al "*Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*" de México, las autopistas de 2 carriles de cuota están clasificadas como del tipo ET2, las cuales, presentan un solo cuerpo, con un carril por sentido de circulación, control total de accesos, velocidades en el rango de los 80 a los 110 km/h, anchos de carril de 3.5 m, y acotamientos de 3.0 m (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2018). Sin embargo, varias de las autopistas de 2 carriles de cuota fueron construidas con criterios de diseño anteriores y no satisfacen los requerimientos actuales, lo cual hace necesaria su modernización.



Figura 1. Mapa de las autopistas de cuota de la República Mexicana.
Fuente: Elaboración propia.

Existen diversas razones que explican por qué en México se han construido autopistas de 2 carriles de cuota en lugar de autopistas multicarril. Una de ellas es la limitación presupuestaria que ha padecido el país históricamente, lo cual ha dificultado el financiamiento de grandes proyectos de infraestructura vial, como la construcción de autopistas multicarril (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2018). En este sentido, la construcción de autopistas de 2 carriles ha sido una alternativa más rentable para dotar de infraestructura vial en zonas donde se requiere. Además, la construcción de autopistas de 2 carriles ha permitido una mayor flexibilidad en la inversión de recursos, al poder dirigirlos a la mejora del mantenimiento y seguridad de las autopistas existentes, lo cual ha sido necesario ante el incremento del parque vehicular y el aumento de la demanda de transporte en el país.

A pesar de los beneficios que han aportado las autopistas de 2 carriles de cuota en México, es importante reconocer que estas vías también presentan varios problemas que afectan negativamente el servicio que brindan. Uno de los problemas más importantes son las altas tasas de accidentabilidad que se registran en estas vías (Instituto Mexicano del Transporte, 2022). La falta de carriles de rebase, la ausencia de barreras centrales de contención, las altas velocidades de operación, y la falta de señalización adecuada son algunos de los factores que contribuyen a esta problemática (Comisión Nacional de Seguridad, 2010). Además, la circulación indiscriminada sobre el acotamiento que ocurre en estas autopistas suprime el aporte de seguridad brindado por esta franja y genera una confusión peligrosa en algunos conductores, sobre todo en vías con alta presencia de vehículos pesados. La frecuencia y severidad de estos accidentes carreteros representa un problema alarmante

para los administradores de estas vías porque al ser consideradas autopistas con control total de accesos deberían garantizar altos estándares de seguridad a los usuarios que por ahí transitan.

Este artículo tiene el objetivo principal de realizar un análisis descriptivo de los datos de accidentes reportados en los 27 tramos de autopista de 2 carriles (un carril por sentido) de cuota que existen en México con la finalidad de conocer el estado actual del fenómeno de accidentabilidad en este tipo de vías. En particular, este estudio (1) cuantifica un índice de accidentabilidad en los diferentes tramos evaluados, (2) identifica los factores causantes de los siniestros viales, y, por último, (3) determina una jerarquización de los tramos de autopista con mayor riesgo para los usuarios en el país. En suma, este artículo identifica los tramos de autopistas de 2 carriles (un carril por sentido) más peligrosos de México con la finalidad de sensibilizar a los tomadores de decisiones en el sector público y privado sobre la necesidad de mejorar y modernizar las condiciones de estas autopistas.

Antecedentes

Situación actual de la accidentabilidad en México

Según las estadísticas proporcionadas por el Instituto Nacional de Salud Pública (2018), México se ubica en la séptima posición a nivel global y en el tercer lugar en la región de Latinoamérica en términos de mortalidad derivada de accidentes de tránsito. Con un alarmante promedio de 22 jóvenes fallecidos diariamente, cuyas edades oscilan entre los 15 y 29 años, así como un promedio anual de 24 mil defunciones. Estos siniestros viales representan la principal causa de muerte entre jóvenes de 5 a 29 años y ocupan el quinto puesto en la escala general de la población.

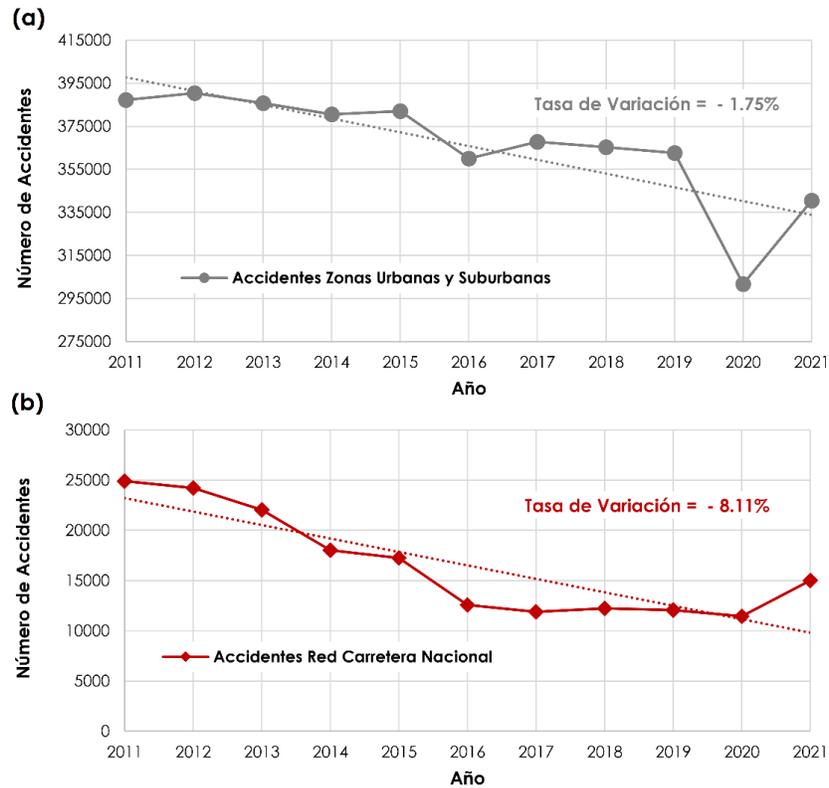


Figura 2. Accidentes registrados en (a) zonas urbanas y suburbanas y (b) red carretera nacional de México durante el periodo 2011-2021. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 muestra los accidentes registrados en las zonas urbanas y suburbanas de México y en su red carretera nacional durante el periodo 2011-2021 basado en los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022b) y el Instituto Mexicano del Transporte (2022), respectivamente. Los datos muestran, en general, una disminución en el número de accidentes tanto en zonas urbanas y suburbanas como en la red carretera nacional, más pronunciada para el caso de la red carretera nacional como lo revela el valor de la tasa de variación. Esta disminución puede ser atribuida a los esfuerzos coordinados de las autoridades de los tres niveles de gobierno (Federal, Estatal, y Municipal) enmarcados en los compromisos adquiridos durante el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020 (Caminos y Puentes Federales, 2021). A pesar de estos esfuerzos y avances, las cifras actuales de accidentes siguen siendo preocupantes, lo que indica que la cuestión de la seguridad vial todavía requiere una considerable atención y solución.

La Tabla 1 concentra los principales índices de hechos de tránsito reportados en la estadística de accidentes de tránsito ocurridos específicamente en la red carretera

nacional durante el periodo 2018-2021 publicados por el Instituto Mexicano del Transporte (2022). Se puede observar un incremento principalmente en el índice de accidentabilidad entre el año 2018 y 2021 de 0.27, así como en el índice de peligrosidad de 0.058. El incremento en la accidentabilidad indica que se requieren de mayores análisis para determinar causas desagregadas acompañadas de estrategias de solución con el fin de disminuir el índice de muertos y heridos que han sido reportados en las carreteras de México durante el periodo ilustrado.

Tabla 1
 Índices nacionales de hechos de tránsito 2018-2021

Año	Accidentalidad ^(a)	Peligrosidad ^(b)	Accidentes mortales ^(c)	Muertos ^(d)	Heridos ^(e)
2018	0.71	0.278	0.001	0.002	0.005
2019	0.77	0.301	0.001	0.002	0.005
2020	0.86	0.310	0.002	0.002	0.005
2021	0.98	0.336	0.002	0.002	0.005

(a) Índice de accidentalidad por cada diez millones de vehículos-kilómetro = Ecuación (1) de esta publicación.

(b) Índice de peligrosidad por millón de vehículos-kilómetro = (No. de accidentes equivalentes x 10⁶) / (veh-km) Donde: Accidentes equivalentes = [No. de accidentes + (No. de heridos x 2) + (No. de muertos x 6)].

(c) índice de accidentes mortales por cien mil vehículos-kilómetro = (No. de accidentes con muertos x 10⁵) / (veh-km)

(d) Índice de muertos por cien mil vehículos-kilómetro = (No. de muertos x 10⁵) / (veh-km)

(e) Índice de heridos por cien mil vehículos-kilómetro = (No. de heridos x 10⁵) / (veh-km)

Fuente: Elaboración propia

Descripción de los tramos carreteros analizados

La red nacional de caminos de México cuenta con una longitud total de 788,323 km de los cuales, 50,798 km son carreteras federales, 103,053 km son carreteras estatales, y 10,923 km son carreteras de cuota (Instituto Mexicano del Transporte, 2022). Dentro de las carreteras de cuota en México, existen 27 autopistas de 2 carriles (un carril por sentido) clasificadas como del tipo ET2 (ver Tabla 2) (Instituto Mexicano del Transporte, 2016). De manera general, las velocidades de operación descritas en km/h oscilan entre los 40, 60, 70, 80, 90, 100 y 110, las cuales son asignadas a cada tramo carretero de acuerdo al diseño geométrico de la vía. Por otra parte, el ancho de vía que presentan estas autopistas ET2 oscila entre 10 y 15 metros, acorde a su diseño geométrico (Instituto Mexicano del Transporte, 2023). Note que los puntos de conexión con otras vías (ej., rampas de entrada/salida, zonas de transición rural-urbano, etc.) generalmente implican modificaciones transitorias en la sección transversal y la velocidad máxima permitida, por ello, las velocidades y anchos de corona pueden diferir de las establecidas para el tipo de camino en estos segmentos.

La Figura 3 presenta la sección transversal tipo que deben tener las carreteras ET2 de acuerdo a lo especificado en la TABLA III.13.- *Principales Características Geométricas de las Carreteras* del "Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras" de México (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2018).

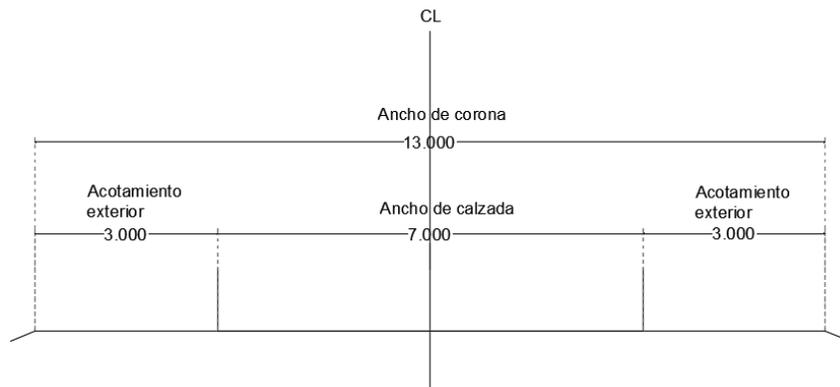


Figura 3. Sección transversal tipo de las carreteras tipo ET2 en México.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, no todas las autopistas dentro de esta lista cumplen con esta configuración geométrica, como es el caso de la carretera La Pera-Cuautla cuya sección transversal puede tener un ancho de corona 10.4 m, más angosto que el especificado para las carreteras tipo ET2 como se mencionó anteriormente. Esto se debe a que algunas de las autopistas identificadas fueron construidas con criterios de diseño anteriores que no corresponden con los criterios actuales.

Materiales y Métodos

En este trabajo se presenta una metodología que contempla un análisis de los datos recopilados en materia de accidentes de tránsito en las 27 autopistas de 2 carriles de cuota identificadas de manera analítica descriptiva. Se plantea la determinación de un índice de accidentabilidad y su tasa de variación con el fin de caracterizar cuantitativamente cada una de las autopistas, identificando aquellas que presentan un problema de salud pública al presentar una mayor tendencia a la generación de accidentes. La Figura 4 muestra las etapas que se han seguido para el desarrollo de esta investigación.

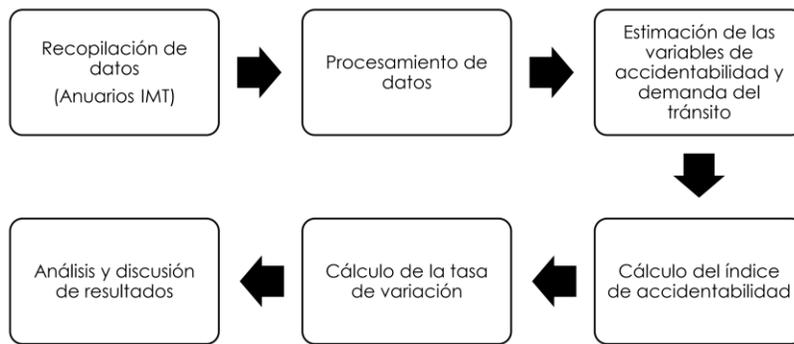


Figura 4. Metodología para el análisis de accidentalidad en autopistas de 2 carriles.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen cada una de las etapas que se realizaron para el cálculo del índice de accidentalidad y la tasa de variación de accidentes en las autopistas analizadas:

1. *Recopilación de datos.* En este paso se recopilaron los parámetros número de accidentes, muertos, lesionados, TDPA y kilometraje de las 27 autopistas de 2 carriles de cuota de México, así como las causas que han propiciado los accidentes. Para ello, se consultaron los “*Anuarios Estadísticos de Accidentes en Carreteras Federales*” desde el año 2011 y hasta el año 2021.
2. *Procesamiento de los datos recopilados.* Se verificaron que no existan datos faltantes en la información de las 27 autopistas para que el análisis descriptivo sea transversal y completo. Posteriormente, se obtuvo el número de accidentes, muertos y lesionados en cada año, durante el periodo 2011-2021, con el fin de calcular un índice de accidentalidad anual para cada autopista y global para la red en su conjunto representativo del periodo de análisis. Así mismo, se determinó el TDPA de cada tramo por año con el fin de obtener los datos de entrada necesarios para el cálculo del índice de accidentalidad en función de la demanda experimentada en vehículos-km durante el periodo de análisis.
3. *Estimación de las variables de accidentalidad y demanda de tránsito.* Se agruparon para cada autopista las características y causas de los accidentes que han tenido lugar en el periodo analizado, con la finalidad de identificar los principales factores detonantes de accidentes de tránsito en estas vías.
4. *Cálculo del índice de accidentalidad (IA).* A partir de los datos preprocesados y agrupados para cada autopista se calculó su índice de accidentalidad por año para el periodo 2011-2021, así como un índice de accidentalidad global. Para

realizar el cálculo del índice de accidentabilidad se empleó la Ecuación (1), publicada por la Federal Highway Administration (2017) de los Estados Unidos.

$$IA = \frac{(A * 10,000,000)}{(TDPA * 365 * N * L)} \quad (1)$$

Donde:

IA: índice de accidentabilidad en número de accidentes por cada 10 millones de vehículos-km.

A: número de accidentes reportados durante el periodo de análisis.

TDPA: tránsito diario promedio anual de ambos sentidos de circulación en vehículos/día.

N: número de años en el periodo analizado, N=1 para el índice anual.

L: longitud del tramo carretero en kilómetros.

5. *Cálculo de la tasa de variación.* La tasa de variación se define como la razón de cambio a la que están aumentando (o disminuyendo) los accidentes durante un año o periodo de años determinado. Para conocer la tasa de variación se empleó el método de los mínimos cuadrados a través de la Ecuación (2) (United Nations, 2015), usando como variable predictora el logaritmo natural de los índices de accidentabilidad anuales. Esto permitió conocer en qué proporción se incrementó o disminuyó la accidentalidad en cada autopista y con base en ello establecer en un futuro políticas para disminuirlo.

$$TV = (e^{\beta} - 1) * 100 \quad (2)$$

Donde:

TV: tasa de variación expresada en porcentaje.

β : coeficiente de regresión del logaritmo natural del índice de accidentabilidad (IA) anual calculado a través del método de los mínimos cuadrados.

6. *Análisis y discusión de resultados.* En este punto, se analizan las causas y se presenta una discusión acerca del índice de accidentalidad obtenido, estableciendo un panorama de causas y posibles soluciones a este problema.

Resultados

Índices de accidentalidad

La Tabla 2 muestra un resumen de los datos de accidentes de tránsito extraídos de los “Anuarios Estadísticos de Accidentes en Carreteras Federales” (Instituto Mexicano del Transporte, 2022), en las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas durante el periodo 2011-2021. Los datos se encuentran agregados por año para cada una de las carreteras e incluyen el número total de accidentes reportados (A), el número total de personas fallecidas (M), el número total de personas lesionadas (L), el tránsito diario promedio anual de ambos sentidos de circulación (TDPA), y la longitud del tramo carretero (km). También, se presenta el índice de accidentalidad (IA), calculado a partir de los datos anteriores con la Ecuación (1), con el fin de identificar los tramos carreteros de mayor riesgo para el usuario. Los tramos carreteros se encuentran ordenados en la Tabla 2 de manera descendente en función del valor del índice de accidentalidad medio (IA_m) calculado para el periodo 2011-2021.

La Figura 5 presenta una gráfica de barras donde puede apreciarse la cantidad de accidentes ocurridos en las autopistas de 2 carriles de cuota durante el periodo 2011-2021. El eje vertical indica el número de eventos encontrados en los datos revisados y el eje horizontal los tramos carreteros analizados. La gráfica distingue entre el número total de accidentes (barra roja), número de personas fallecidas (barra negra), y el número de personas lesionadas (barra amarilla). Los tramos carreteros se encuentran ordenados respecto al número total de accidentes de mayor (izquierda) a menor (derecha).

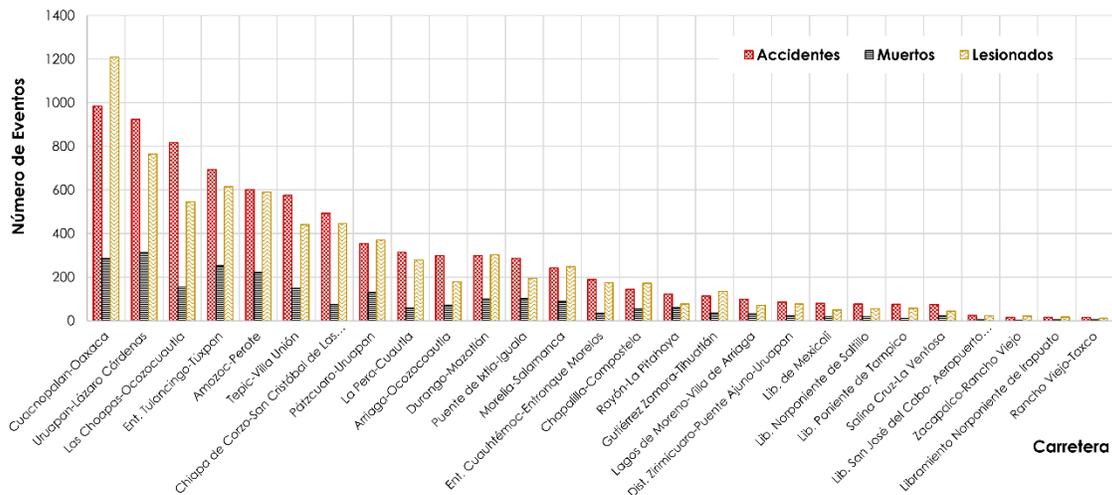


Figura 5. Número total de accidentes, muertos, y lesionados durante el periodo 2011-2021. Fuente: Elaboración propia.

Las 3 autopistas con mayor número de accidentes registrados durante el periodo 2011-2021 son Cuacnopalan-Oaxaca, Uruapan-Lázaro Cárdenas, Las Choapas-Ocozacoautla, con 984, 923, y 816 accidentes, respectivamente. En contraste, los tramos Rancho Viejo-Taxco, Libramiento Norponiente de Irapuato, y Zapacalco-Rancho Viejo tuvieron el menor número de accidentes con 15, 16, y 16, respectivamente. Estos resultados no son sorpresivos dada la longitud presente en cada uno de los tramos, ya que a mayor longitud del tramo carretero se espera un mayor número de accidentes debido a la mayor exposición al riesgo del usuario.

Por otro lado, la relación entre el número de accidentes y el número de personas lesionadas es aproximadamente uno a uno, mientras que la relación entre el número de accidentes y el número de personas fallecidas es aproximadamente de tres a uno. Otro punto interesante es que, de las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas, la autopista Uruapan-Lázaro Cárdenas concentra el mayor número de fallecidos con 312.

La Figura 6 muestra la demanda de tránsito experimentada en cada una de las 27 autopistas analizadas en términos de vehículos-km por año, promediando los registros del periodo 2011-2021. El eje vertical indica el número de vehículos-km por año y el eje horizontal los tramos de autopista analizados. Los tramos de autopista se encuentran ordenados respecto al número de vehículos-km por año de mayor (izquierda) a menor (derecha). Los 3 tramos de autopista con mayor demanda son Tepic-Villa Unión, Cuacnopalan-Oaxaca, y Uruapan-Lázaro Cárdenas con 603, 572, y 432 millones de vehículos-km por año, respectivamente. En contraste, los tramos Rancho Viejo-Taxco, Zapacalco-Rancho Viejo, y Libramiento San José del Cabo-Aeropuerto Los Cabos, tuvieron la menor demanda con 15, 13, y 10 millones de vehículos-km por año, respectivamente. La diferencia de los resultados anteriores revela que la demanda de tránsito en vehículos-km por año puede ser altamente variable cuando se comparan los tramos entre sí.

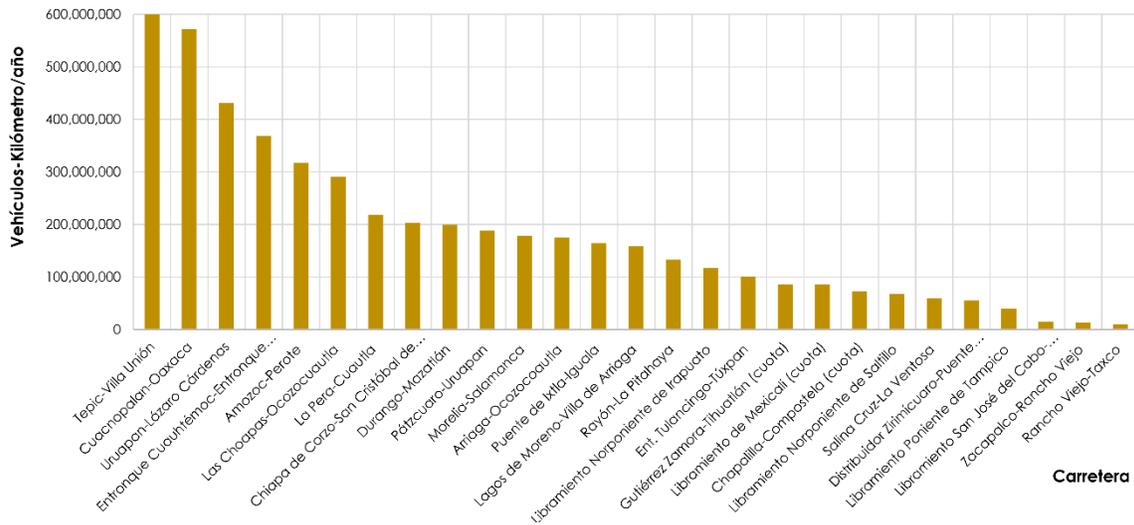


Figura 6. Vehículos-km promedio anual durante el periodo 2011-2021.
 Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 presenta los índices de accidentabilidad calculados para cada una de las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas durante el periodo 2011-2021 a través de diagramas de cajas. El eje vertical representa el índice de accidentabilidad en número de accidentes por cada 10 millones de vehículos-kms y el eje horizontal los tramos de autopista analizados. Las autopistas se encuentran ordenadas respecto al valor medio del índice de accidentabilidad de mayor (izquierda) a menor (derecha). Las 3 autopistas con los mayores índices de accidentabilidad medio son Las Choapas-Ocozocuatla, Chiapa de Corzo-San Cristóbal de Las Casas, y Uruapan-Lázaro Cárdenas, con 2.9, 2.4, y 2.2 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km, respectivamente. En contraste, los tramos Lagos de Moreno-

Villa de Arriaga, Libramiento Norponiente de Saltillo, y Libramiento San José del Cabo-Aeropuerto Los Cabos, presentaron los índices de accidentabilidad medio más bajos con 0.7, 0.4, y 0.3 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km, respectivamente.

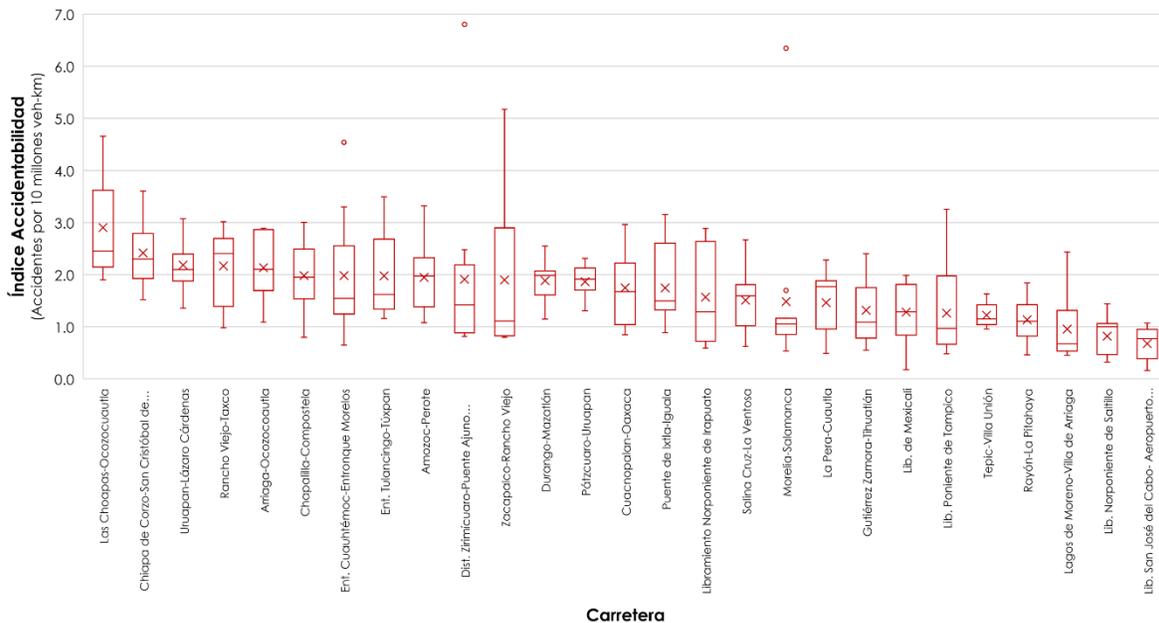


Figura 7. Índice de accidentabilidad en autopistas de 2 carriles de cuota durante el periodo 2011-2021.

Fuente: Elaboración propia

Prevalencia de los factores asociados a la accidentabilidad

Los factores asociados a la accidentabilidad fueron revisados en las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas para identificar el grado de prevalencia que tienen en la ocurrencia de accidentes de tránsito en este tipo de vías. Además, estos resultados fueron comparados con aquellos registrados para la red carretera nacional a fin de examinar las diferencias entre ambos casos. Tanto para el análisis de las autopistas de 2 carriles de cuota, como de la red carretera nacional, se tomaron como base los datos de accidentes de tránsito extraídos de los "Anuarios Estadísticos de Accidentes en Carreteras Federales" (Instituto Mexicano del Transporte, 2022), durante el periodo 2018-2021, ya que en este periodo los anuarios incorporaron información relativa a las causas del accidente a partir de criterios relativamente uniformes tomando en cuenta cinco factores causantes de accidentes: (1) conductor, (2) camino, (3) vehículo, (4) irrupción de semoviente, y (5) agente natural.

La Figura 8 muestra el porcentaje de prevalencia de los cinco factores causantes de accidentes de tránsito a través de dos gráficas de pastel. La gráfica del lado izquierdo representa los resultados de la red carretera nacional, mientras que la gráfica del lado

derecho representa los resultados de las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas en este estudio.

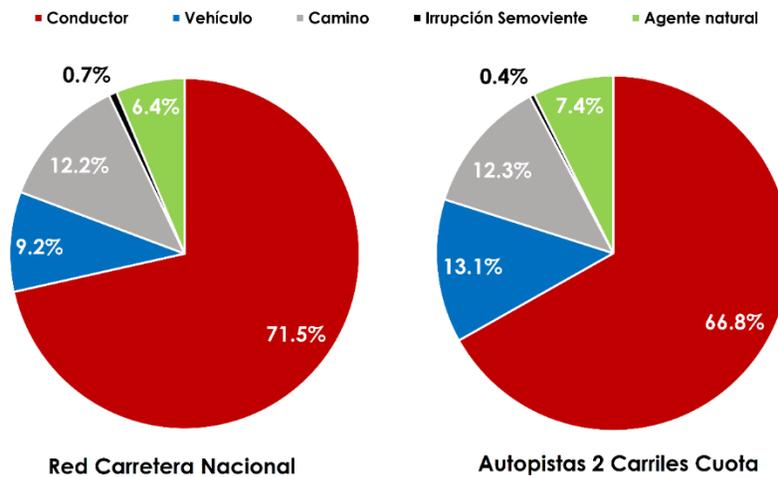


Figura 8. Factores asociados a la accidentabilidad en la red carretera nacional (izquierda) y las autopistas de 2 carriles de cuota (derecha). Fuente: Elaboración propia.

De los cinco factores asociados a la accidentabilidad analizados en este estudio, el conductor aparece como la causa principal de accidentes de tránsito en ambos casos, aunque su prevalencia es 6.7% inferior en el caso de las autopistas de 2 carriles de cuota comparado con la de la red carretera nacional. Curiosamente, el camino representa la segunda causa con el 12.2% del total de accidentes registrados en la red carretera nacional y la tercera causa con un porcentaje ligeramente mayor del 12.3%, en las autopistas de 2 carriles de cuota. Otra diferencia significativa al comparar ambos casos se observa en el factor vehículo, donde la prevalencia para las autopistas de 2 carriles de cuota (13.1%) supera en un 42.4% el valor encontrado para la red carretera nacional (9.2%). La irrupción de semoviente es el factor con menos prevalencia; sin embargo, el valor encontrado en las autopistas de 2 carriles de cuota es casi la mitad de aquel en la red carretera nacional.

Tasas de variación de la accidentabilidad

Las tasas de variación de los índices de accidentabilidad fueron obtenidas para medir la tendencia del riesgo que tienen los usuarios de sufrir un accidente de tránsito en cada uno de los tramos carreteros evaluados a partir de su evolución histórica. El propósito es identificar las autopistas de 2 carriles de cuota que muestran una mayor tendencia a incrementar sus índices de accidentabilidad en el futuro próximo para que los tomadores

de decisiones, tanto en el sector público como el privado, cuenten con mayor información para priorizar sus estrategias de gestión de la seguridad vial.

La Figura 9 presenta la tasa de variación del índice de accidentabilidad calculada para cada una de las 27 autopistas de 2 carriles de cuota a partir de su evolución histórica durante el periodo 2011-2021. El eje vertical representa la tasa de variación del índice de accidentabilidad en porcentaje y el eje horizontal los tramos carreteros analizados. Si la tasa de variación es negativa denota una tendencia a la baja en la accidentabilidad, por el contrario, si la tasa de variación es positiva denota una tendencia de aumento en la accidentabilidad. Los tramos carreteros se encuentran ordenados respecto a la tasa de variación del índice de accidentabilidad de mayor (izquierda) a menor (derecha).

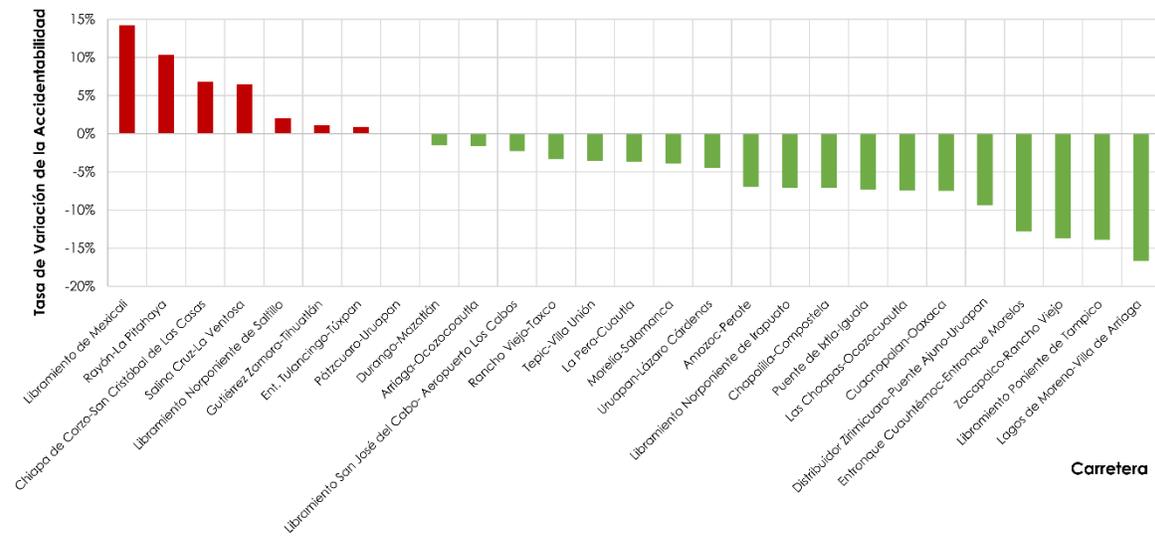


Figura 9. Tasa de variación del índice de accidentabilidad durante el periodo 2011-2021. Fuente: Elaboración propia

Las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas muestran una tendencia general hacia una disminución en la accidentabilidad, con una tasa de variación media ponderada de -4.34%. Esta tendencia se refleja en 19 de estas autopistas, donde se observan tasas de variación negativas, variando entre -1.5% y -16.7%. Por otro lado, 8 autopistas exhiben una tendencia opuesta, con tasas de variación positivas que oscilan entre +0.02% y +14.2%. Entre estas, destacan el Libramiento de Mexicali, Rayón-La Pitahaya, Chiapa de Corzo-San Cristóbal de Las Casas, y Salina Cruz-La Ventosa.

Discusión

Como puede apreciarse en la Figura 10, existe una fuerte correlación entre el número de accidentes y los vehículos-km reportados en las carreteras analizadas durante el periodo

2011-2021 como lo revela el coeficiente de determinación R^2 con valor de 0.80, que en este caso puede interpretarse como el cuadrado del coeficiente de correlación Pearson. Lo anterior, sugiere que la cantidad de vehículos-km es adecuada para medir la exposición al riesgo que tienen los automovilistas de sufrir un accidente de tránsito en las autopistas de 2 carriles de cuota.

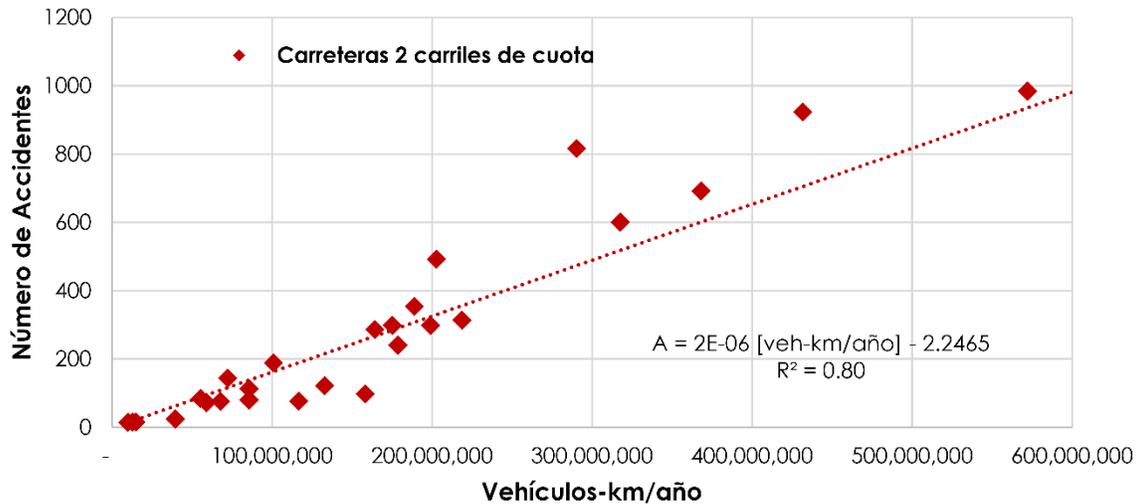


Figura 10. Relación entre el número de accidentes y la exposición al riesgo en vehículos-km durante el periodo 2011-2021
Fuente: Elaboración propia.

La exposición al riesgo es una medida en la que los usuarios de la vía están expuestos o vulnerables a la posibilidad de sufrir un accidente. Es importante notar que el índice de accidentabilidad calculado en este estudio a través de la Ecuación (1) considera una exposición al riesgo precisamente en términos de la cantidad de vehículos-km reportadas para cada uno de los tramos carreteros analizados, por lo cual, los valores del índice de accidentabilidad aquí presentados pueden ser considerados una buena referencia para contrastar mejor el fenómeno de accidentabilidad ocurrido entre las distintas autopistas analizadas.

Curiosamente, no se encontró correlación entre los índices de accidentabilidad y la demanda en vehículos-km o en TDPA, lo que indica que el fenómeno de accidentabilidad está poco relacionado con la demanda de tránsito experimentada en los tramos carreteros analizados y pudiera estar más relacionada con otros factores tales como las características y estado físico de la vía, factores atribuibles al usuario, fallas del vehículo, condiciones ambientales, entre otros. Por ejemplo, los tramos Uruapan-Lázaro Cárdenas y Tepic-Villa Unión se encuentran entre los de mayor longitud de la muestra analizada, 214.7 km y 268.0 km, respectivamente, con una demanda de tránsito similar (ligeramente mayor para Tepic-

Villa Unión), sin olvidar que su sección transversal y geometría también es similar. Sin embargo, el índice de accidentabilidad del tramo Uruapan-Lázaro Cárdenas es de los más altos (2.4), mientras que el índice de accidentabilidad del tramo Tepic-Villa Unión es de los más bajos (1.3). Lo anterior, es congruente con los resultados obtenidos de prevalencia de los factores causantes de accidentes de tránsito donde el conductor aparece como el mayor causante de accidentes en este tipo de carreteras.

Por otro lado, el índice de accidentabilidad global (media ponderada respecto a los vehículos-km) representativo de las 27 autopistas analizadas es de 1.8 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km, con una desviación estándar media de 0.7 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km. Es importante notar que este valor es aproximadamente el doble del observado en la red carretera nacional (ver Tabla 1), revelando un problema de accidentabilidad significativamente más agravado en las autopistas de 2 carriles de cuota. Además, la variabilidad observada en el índice de accidentabilidad medio indica que la autopista con el índice más alto es aproximadamente 10 veces mayor que el mostrado por la autopista con el índice más bajo, revelando una alta disparidad en el fenómeno de accidentabilidad entre las autopistas analizadas.

La necesidad de mejorar la infraestructura carretera para brindar mayor seguridad a los usuarios se evidencia en la prevalencia de los factores causantes de accidentes. Se sospecha que la diferencia observada en la prevalencia del factor vehículo podría estar sesgada debido a una posible influencia por parte de los concesionarios en los reportes de accidentes levantados por la autoridad, lo cual requiere una exploración más detallada y quizás, una revisión de los mecanismos de reporte de accidentes. Además, la infraestructura de control de accesos en las autopistas de cuota disminuye la posibilidad de irrupción de un animal en la calzada, lo que explica parcialmente los resultados encontrados en este estudio, subrayando la importancia de mantener y mejorar continuamente las medidas de seguridad vial, adaptándolas a las características únicas de cada tramo de autopista para garantizar la protección óptima de los usuarios.

La distribución de la demanda vehicular entre las autopistas con tasas de variación negativas y positivas es notable, con un 81.2% de la demanda concentrada en las autopistas con tendencias a la baja en accidentabilidad, y el 18.8% restante en las que presentan aumento. El caso de la autopista Chiapa de Corzo-San Cristóbal de Las Casas es particularmente preocupante, dada su alta tasa de variación e índice de accidentabilidad de 2.7 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km, lo que la convierte en el tramo carretero de mayor riesgo para el usuario en el futuro próximo. En contraste, los tramos con

las tasas de variación más bajas, como Entronque Cuauhtémoc-Entronque Morelos y Zacapalco-Rancho Viejo, aunque experimentan una menor proporción de la demanda total, pueden ofrecer indicios valiosos sobre los factores que contribuyen a una menor accidentabilidad, los cuales deben ser analizados para informar estrategias de mejora en la seguridad vial en otras autopistas.

Conclusiones

En este estudio se exploró el fenómeno de accidentabilidad en 27 autopistas de 2 carriles de cuota de la red carretera de México. El propósito fue identificar los tramos de autopista de mayor riesgo para el usuario a través de una jerarquización basada en la evolución histórica de la accidentabilidad ocurrida en cada uno de los tramos.

El índice de accidentabilidad medio calculado en este estudio mostró una alta variabilidad entre las 27 autopistas de 2 carriles de cuota analizadas, a pesar de que éstas comparten una sección transversal similar dada su clasificación técnica (ET2). Esta variabilidad permitió establecer una jerarquización de las autopistas identificando aquellas con mayor riesgo para el usuario. Es importante notar que se encontró una fuerte correlación entre la cantidad de vehículos-km por año y el número de accidentes registrados en cada autopista, sugiriendo que el índice de accidentabilidad, que está en función de ambas variables, resulta adecuado para comparar el fenómeno de accidentabilidad entre las autopistas analizadas. Otro hallazgo relevante es que el índice de accidentabilidad global obtenido en este estudio para las autopistas de 2 carriles de cuota (1.8 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km) fue aproximadamente el doble del reportado para la red carretera nacional (0.9 accidentes por cada 10 millones de vehículos-km), lo cual es evidencia de los niveles de riesgo particularmente altos que experimentan los usuarios en las autopistas de 2 carriles de cuota.

Por otro lado, la tasa de variación del índice de accidentabilidad reveló que, en general, la red de autopistas de 2 carriles de cuota ha venido presentando una tendencia a la baja en el fenómeno de accidentabilidad con una tasa de variación media ponderada negativa de -4.34%. Sin embargo, existen 8 autopistas con tasas de variación positivas, 4 de ellas con tasas particularmente altas en el rango de +6.5% a +14.2%, indicativas de una mayor tendencia a la accidentabilidad en el futuro próximo. Estos tramos deben ser atendidos de manera prioritaria por las autoridades correspondientes a fin de reducir al mínimo posible la pérdida de vidas humanas y materiales.

Con relación a los factores causantes de accidentes, las autopistas de 2 carriles de cuota presentaron niveles de prevalencia similares en los 5 factores considerados (e.g., conductor,

vehículo, camino, irrupción de semoviente, y agente natural) al compararse con aquellos de la red carretera nacional. Entre los factores de mayor influencia, la diferencia más grande se observó en el factor vehículo que mostró una prevalencia 42.4% más alta en las autopistas de 2 carriles de cuota que en la red carretera nacional, con una consecuente compensación en la prevalencia del factor conductor. Sin embargo, los criterios que se han utilizado para medir la incidencia de los factores causantes de accidentes de tránsito en la red carretera nacional han sufrido varias modificaciones en la última década, por lo cual, es aún prematuro considerarlos una referencia confiable para examinar este aspecto de la accidentabilidad.

En suma, este estudio proporciona información valiosa a los tomadores de decisiones del sector público y privado para mejorar los programas de gestión de la seguridad vial en la red nacional de autopistas de 2 carriles de cuota, al identificar las autopistas de mayor riesgo para el usuario. Los tramos identificados deben ser atendidos de manera prioritaria a través de auditorías de seguridad vial o procedimientos equivalentes y la implementación de contramedidas que ayuden a disminuir la ocurrencia de accidentes de tránsito en estos tramos. En este sentido, es muy importante identificar las principales causas que están detonando los accidentes de tránsito en cada caso particular a fin de proponer las alternativas de solución que sean más viables y eficientes. Entre las alternativas de solución disponibles pueden citarse las rectificaciones de trazo, la mejora del señalamiento vial, las ampliaciones de cuerpo a varios carriles, y las configuraciones no convencionales como las carreteras 2+1.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por proveer los recursos tecnológicos usados en esta investigación. El contenido de este artículo refleja el punto de vista de los autores, quienes asumen la plena responsabilidad por la información presentada y no implican necesariamente la postura oficial de ninguna institución, grupo o agencia.

Referencias

- Caminos y Puentes Federales. (2021). *Decenio de acción para la seguridad vial*. Recuperado de <https://www.gob.mx/capufe/es/articulos/decenio-de-accion-para-la-seguridad-vial-265479>

- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2018). *Retos del financiamiento de infraestructura en México*. Recuperado de <https://www.cefp.gob.mx/transp/CEFP-70-41-C-Estudio0015-260718.pdf>
- Comisión Nacional de Seguridad. (2010). *Accidentes y sus factores*. Recuperado de http://www.cns.gob.mx/portalWebApp/appmanager/portal/desk?_nfpb=true&_pageLabel=portals_portal_page_m2p1p2&content_id=830068&folderNode=830052&folderNode1=810277
- Instituto Mexicano del Transporte. (2016). *Evaluación del beneficio en seguridad vial al modificar una carretera de cuota de dos carriles a una configuración 2+ 1 con barrera central de cables*. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt465.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2020). *Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596042&fecha=02/07/2020#gsc.tab=0
- Federal Highway Administration. (2017). UNIT 4. Solving Safety Problems. *Road Safety Fundamentals* (pp. 3-54). North Carolina, U.S.A. Recuperado de <https://rspcb.safety.fhwa.dot.gov/RSF/Unit4.aspx>
- Instituto Nacional de Estrategia y Geografía. (2022a). *Estadísticas a Propósito del Día Mundial en Recuerdo de las Víctimas de Accidentes de Tránsito*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2022/EAP_VICACC T22.pdf
- Instituto Nacional de Estrategia y Geografía (2022b). *Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas (Accidentes)*. Banco de indicadores. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?p=7&ag=00#tabMCcollapse-Indicadores>
- Instituto Nacional de Salud Pública. (2018). *México, séptimo lugar mundial en siniestros viales*. Recuperado de <https://www.insp.mx/avisos/4761-seguridad-vial-accidentes-transito.html#sup4>
- Instituto Mexicano del Transporte. (2022). *Anuarios Estadísticos de Accidentes en Carreteras Federales 2011-2021*. Recuperado de

<https://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/autotransporte-federal/estadistica-de-accidentes-en-carreteras-federales/>

- Instituto Mexicano del Transporte. (2023). *Red Nacional de Caminos 2022*. Recuperado de <http://rnc.imt.mx/>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018*. México. Recuperado de <http://sct.gob.mx/normatecaNew/manual-de-proyecto-geometrico-de-carreteras/>
- United Nations. (2015). Average growth rate: Computation methods. *Statistics Division (Issue No.07)*. Recuperado de <https://repository.unescap.org/bitstream/handle/20.500.12870/935/ESCAP-2015-PB-Average-growth-rate-computation-methods-n7.pdf?sequence=1&isAllowed=y>