



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA EN RUTAS DE
TRANSPORTE POR CARRETERA, QUE INVOLUCRAN INTERRUPCIONES NATURALES Y
HUMANAS”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

M.I RAMÓN ANTONIO FIGUEROA CARRANZA

ASESOR:

DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

CO-ASESORA:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Morelia, Michoacán, agosto de 2022

Resumen

Este trabajo presenta un nuevo enfoque para la evaluación de la resiliencia en rutas de transporte terrestre interrumpidas por causas naturales (lluvias, terremotos) así como por la influencia antrópica (accidentes). De esta forma, al conocer el estado de conservación de los elementos ubicados dentro de una vía, en particular los puentes, se podrá identificar cuáles son los que tienen mayor prioridad para ser atendidos para su conservación, reparación e incluso reposición, relacionando así, el costo de mantenimiento y número de personas beneficiadas. Para probar esta metodología, se propuso un caso de estudio. El enfoque sistemático propuesto se aplica en la ruta de la carretera federal 15, que es una ruta internacional que pasa por siete estados de México y termina en Alberta Canadá. El estudio se limita al estado de Michoacán en México, que corresponde a 426 kilómetros. Este estudio identificó los puentes viales dentro de la vía y analizó su deterioro, el costo de reparación y las personas beneficiadas. Se obtuvieron los escenarios más significativos en cuanto a costo de reparación y personas beneficiadas, identificando qué puentes tienen prioridad para ser atendidos, teniendo una decisión más certera y distribución de los recursos financieros adecuados.

Palabras clave: Resiliencia; Rutas de transporte; carreteras; Desastres naturales; Accidentes.

Abstract

This work presents a new approach for resilience assessment in road transport routes interrupted by natural causes (rain, earthquakes) as well as by human influence (accidents). In this way, by knowing the state of preservation of the elements located within a road, particularly bridges, it will be possible to identify which are those with the highest priority to be attended for their conservation, repair, and even replacement, thus relating the cost of maintenance and the number of people benefited. To test this methodology, a case study was proposed. The proposed systematic approach is applied in the federal highway 15 route, which is an international route that passes through seven states of Mexico, ending in Alberta Canada. The study is limited to the Michoacan state of Mexico, which corresponds to 426 kilometers. This study identified the highway bridges within the road and analyzed their deterioration, the cost of repair, and the benefited people. The most significant scenarios were obtained in terms of repair cost and people benefited, identifying which bridges have priority to be served, having a more accurate decision and distribution of adequate financial resources.

Keywords: Resilience; transportation routes; Road; Natural disasters; Accidents.

Agradecimientos

Se vale llorar...

A mis padres **María de Lourdes Carranza Arteaga y Ramón Figueroa Pérez** por sus enseñanzas infinitas, por su guía, respaldo, motivación, apoyo brindando en cada proyecto por “loco” que sea. Por enseñarme a tener carácter y aún en los momentos no tan buenos encontrar una ventana de esperanza. Por mostrarme el verdadero valor de la honestidad, humildad y trabajo. Los amo

A mi hermana **Itzel Figueroa Carranza** por tu apoyo, por motivarme a ir por aquello que quiero, por los años de enseñanzas y acompañamiento. Por ser una persona admirable, profesional, con carácter, trabajadora. Por ser un gran espejo de crecimiento personal e interno. Te amo hermana.

A mi cuñado **Wenceslao Correa Catalán** por ser un símbolo de fortaleza, fé, vida, trabajo duro. Por traer a nuestra familia una chispa muy especial.

A mi abuela **Secundina Arteaga Ávila**, mi tía **Angelina Carranza Arteaga**, mi tío **Enrique Figueroa Pérez** y mi tía **Irene Tinoco**, que en vida me aportaron grandes cosas y con su partida durante mis estudios de doctorado, me enseñaron que soy fuerte, capaz de recalculer mis días por malos que parezcan, que soy afortunado por la familia tan maravillosa que tengo y a recibir con amor y agradecimiento los momentos que la vida me pone enfrente.

A **Andy** por el apoyo incondicional, impulsarme en cada paso que doy y en cada proyecto que me propongo. Por ser un espejo de amor, crecimiento, motivación, capacidad, fortaleza, decisión, acción, etc. Te amo

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo económico brindado durante el periodo de estudios de doctorado.

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** por ser mi máxima casa de estudios. Puedo decir con certeza que soy “Creo en mi soy Orgullosamente Nicolaita”

Al **Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química** por las facilidades académicas.

Al **Dr. José María Ponce Ortega** por su guía, acompañamiento y aceptar el reto de asesorarme durante mis estudios de Doctorado.

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán** por la guía, el conocimiento brindado durante los años de investigación.

Al **Dr. Wilfrido Martínez Molina** por el apoyo en la gestión de datos, por el liderazgo y los años de apoyo.

Al **Dr. Hugo Luis Chávez, García** por el apoyo brindando durante mis estudios de posgrado y los años de acompañamiento.

Al **Ing. Sergio Espinosa Mares** por proporcionarme los datos necesarios para llevar el caso práctico a la metodología.

A mi mesa sinodal, **Dr. Agustín Jaime Castro Montoya, Dr. Fabricio Nápoles Rivera**, por el aporte de conocimiento durante mi estancia en el Doctorado.

A mis amigos **Salvador, Sergio, Isaac, Arturo, Iván, Ballardo, Roger, Johan**; por las enseñanzas de vida, los consejos, el apoyo incondicional, los años de amistad, por ser la familia que conscientemente elegí. Los amo

A mis amigos **Zalapa, Elizabeth y Maybelin**, por los años de amistad, consejos, aporte de conocimientos, la disposición, el apoyo y por estar. Los amo

Por último quiero **agradecerme a mí**, por enfrentar retos personales y profesionales estos últimos cuatro años. Por perseverar, ser tenaz, levantarme cuando no tenía ánimo de hacerlo, por tomar acción en aquellos momentos de incertidumbre, por confiar en mí cuando el panorama es borroso, por estar dispuesto, por serme fiel, ser honesto conmigo y por no bajar la guardia. Gracias totales.

Índice de contenido

Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Agradecimientos	4
Índice de contenido.....	7
Índice de Figuras	i
Índice de Figuras	ii
Descripción del contenido de la Tesis	iv
1. Introducción	10
Objetivo.....	14
Hipótesis.....	14
2. Marco teórico.....	15
2.1 Resiliencia.....	15
2.1.1 Cuantificación de la Resiliencia	16
2.2 Infraestructura carretera en México.....	21
2.2.1 Clasificación general de la infraestructura carretera en México	24
2.2.2 Red carretero federal	27
2.3 Puentes.....	28
Clasificación de puentes.....	29
2.3.1 Puentes en México	29
2.3.2 Periodo de construcción de puentes en Michoacán.....	33
2.3.3 SIPUMEX.....	35
2.4 Interrupciones presentadas en rutas de transporte	36
2.4.1 Interrupciones humanas y naturales.....	36
2.4.2 Congestionamientos recurrentes	37
2.4.3 Congestionamientos no recurrentes	39
2.4.4 Incidentes / accidentes de tráfico	40
2.4.5 Clima.....	44
3. Planteamiento del problema	51
4. Metodología	52
5. Caso de estudio	54

6. Resultados	61
7. Conclusiones.....	75
8. Bibliografía	76
Apéndice.....	80

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de las curvas de funcionalidad y rendimiento de un sistema interrumpido bajo falla parcial (curva 1– 2–3) y completa (1–2' - 3 '); Se asume que el período de interrupción será mayor en caso de falla total. (Moslehi y Reddy, 2018).....	16
Figura 2. Esquema de las curvas de costos impuestos de un sistema interrumpido bajo (a) falla parcial (curva 1–2–3) y (b) falla completa (1–2' – 3 ') (Moslehi y Reddy, 2018).....	19
Figura 3. Estructura de la red carretera en México 1970-1975.. (IMT, 2004)	22
Figura 4. Fases de la evolución de la infraestructura de transporte terrestre en México, 1873-2011(Rangel, 2015)	23
Figura 5. Distribución de la red nacional por tipo de camino (SCT, 2012)	30
Figura 6. Número de puentes por estado de la República Mexicana (Pt327 IMT, 2013)	30
Figura 7. Distribución de puentes por tipo de material.(IMT,2010)	31
Figura 8. Tendencias en la construcción de puentes en México (Base de datos SIPUMEX 2010, PT385, IMT, García et al, 2013)	32
Figura 9. Mapa de puentes prioritarios para programa de inspección detallada, corrosión por cloruros (Torres et al, 2013)	33
Figura 10. Periodo de construcción de puentes en Michoacán.....	34
Figura 11. Calificación de acuerdo al SIPUMEX de los puentes de Michoacán	34
Figura 12. Cuello de botella provocado por incorporación de carriles laterales a centrales. (drivesmart,2019)	38
Figura 13. Distribución de percances y víctimas, por tipo de colisión en Michoacán (Cuevas et al, 2019)	42
Figura 14. Distribución de causas que contribuyeron a la siniestralidad en el 2018 en Michoacán (Cuevas et al, 2019)	43
Figura 15. Proporción de desastres hidrometereológicos de acuerdo a su tipo (Bravo, 2018)	44
Figura 16. Peores desastres Hidrometereológicos en los últimos 33 años (centro virtual de información del agua, 2017).....	46
Figura 17. Ciclones tropicales simultáneos del Océano Pacífico durante el mes de agosto de 2020	47
Figura 18. Representación esquemática de la metodología propuesta.	52

Figura 19. Límites del sistema para el estudio de caso analizado.	54
Figura 20. Ejemplo de Información de base de datos SIPUMEX	56
Figura 21. Continuación de Información Base de datos SIPUMEX	57
Figura 22. Calificación SIPUMEX obtenida en el análisis a puentes de la Carretera Federal 15	58
Figura 23. Año de Construcción de puentes en la Carretera Federal 15	59
Figura 24. Porcentaje de puentes que han recibido mantenimiento en el caso de estudio. .	59
Figura 25. Curva de Pareto para el estudio de caso analizado.	61
<i>Figura 26. Matriz tridimensional para el escenario E (Costo mínimo).</i>	63
Figura 27. Matriz tridimensional para el escenario F (Gente máxima beneficiada)	64
Figura 28. Matriz tridimensional para el escenario I (Todas las secciones reparadas)	65
Figura 29. Costos impuestos para el escenario E	72
Figura 30. Costos impuestos para el escenario F.....	73
Figura 31. Costos impuestos para el escenario I	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de carreteras de acuerdo con su clasificación normativa. (DGST, 2018).....	26
Tabla 2. Red Federal pavimentada por entidad federativa (SCT, 2020)	28
Tabla 3. Clasificación de puentes según su tamaño ((Eduardo, Mario, & Rafael, 2000) ...	28
Tabla 4. Clasificación de acuerdo al SIPUMEX	35
Tabla 5. Saldos por entidad federativa (Cuevas et al, 2019)	41
Tabla 6. Desglose de causas que contribuyeron a la siniestralidad en el 2018 en Michoacán. (Cuevas, 2019).....	43
Tabla 7. Clasificación de huracanes escala Saffir- Simpson (Conagua, 2016)	45
Tabla 8. Resumen de ciclones tropicales de la temporada 2020 (SMN, 2021).....	46
Tabla 9. Reportes de lluvia máxima en 24 horas (mm) por estado durante el periodo de “Genevieve” (CONAGUA, 2021).....	48

Tabla 10. Reportes de lluvia máxima en 24 horas (mm) por estado durante el periodo de “Hernán” (CONAGUA, 2021)	48
Tabla 11. Ciclones tropicales de la temporada 2020 en el Océano Pacífico (CONAGUA, 2021).....	49
Tabla 12. Ciclones tropicales de la temporada 2020 en el Océano Atlántico (CONAGUA, 2021).....	50
Tabla 13. Parámetros evaluados en los puentes de la carretera federal 15.....	55
Tabla 14.Tabla ejemplo de la Evaluación de puentes Carretera Federal 15 (completa apéndice).....	58
Tabla 15. Área total y personas beneficiadas por sección.....	60
Tabla 16. Valores de la curva de Pareto.	60
Tabla 17.Costes de penalización según nivel de puente.....	66
Tabla 18.Probabilidades de modo de falla durante un período de tiempo.	66
Tabla 19.Costos impuestos para el escenario E.....	67
Tabla 20.Costos impuestos para el escenario F.....	68
Tabla 21.Costos impuestos para el escenario I.....	69
Tabla 22.Relación entre costo y personas beneficiadas para el escenario E	70
Tabla 23. Relación entre costo y personas beneficiadas para el escenario F	70
Tabla 24.Relación entre costo y personas beneficiadas para el escenario I	71
Tabla 25.Índices de resiliencia para el escenario E.....	72
Tabla 26.Índices de resiliencia para el escenario F	73
Tabla 27.Índices de resiliencia para el escenario I.....	74

Descripción del contenido de la Tesis

Esta tesis se encuentra organizada en ocho capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación

Capítulo 1 (**Introducción**) describe y aborda el tema de la tesis. Se parte de lo reportado actualmente sobre el tema y los factores considerados dentro de la investigación.

Capítulo 2 (**Marco teórico**) se presenta un reporte de la revisión bibliográfica realizada sobre los temas principales, así como de los subtemas que son fundamentales para desarrollar conjuntamente el tema de investigación. Se registran datos y porcentajes significativos que nos indican ciertos puntos a considerar durante el desarrollo de la tesis.

Capítulo 3 (**Planteamiento del problema**) presenta de manera breve el porqué es importante abordar este problema presentado.

Capítulo 4 (**Metodología**) propone el uso de la metodología de manera sistemática con la finalidad de minimizar el costo y aumentar el número de usuarios beneficiados.

Capítulo 5 (**Caso de estudio**) Para abordar el problema se propuso implementar la metodología en un caso en específico de estudio. Para ello se recaudó la información necesaria para comprender más la problemática presentada.

Capítulo 6 (**Resultados**) se detallan los resultados obtenidos al aplicar la metodología a diversos escenarios evaluados. Finalmente se analizan y se comenta sobre los casos estudiados.

Capítulo 7 presenta las **Conclusiones** obtenidas después de analizar los resultados. Así como algunas recomendaciones sobre el caso de estudio.

Capítulo 8 muestra la **Bibliografía** consultada durante el desarrollo de la tesis, entre los cuales destacan artículos científicos, libros, publicaciones técnicas y páginas web relacionadas con el tema.

1. Introducción

Las carreteras y todas las vías de comunicación están diseñadas, construidas y planificadas para ofrecer el mejor servicio al usuario. Una de las estructuras de gran importancia en estos caminos es el puente. Un puente se puede definir como una estructura destinada a superar obstáculos naturales, como ríos, valles, mar; y obstáculos artificiales, como vías férreas o carreteras, para unir caminos para viajeros, animales y mercancías (Pérez, 2007).

El diseño de puentes considera factores externos, como el tipo de zona sísmica, el terreno, materiales, tránsito (Persyn et al., 2020), aspectos económicos, etc. Sin embargo, pueden surgir situaciones que interrumpen el paso de un fluido a través de estos puentes. Algunas de estas situaciones aparecen como fenómenos naturales (fuertes lluvias y terremotos) (Chen et al., 2021; Nelson et al., 2020) y accidentes automovilísticos (Afrin y Yodo, 2020) ya sea por altas velocidades, causados por consumo de drogas o embriaguez, fatiga del usuario, por nombrar algunos. De esta manera, se ha considerado el término de resiliencia, que puede ayudar a seleccionar aquellos puentes que requieran mantenimiento o reparación con mayor prioridad, involucrando minimizar los costos (Makarova et al., 2020; Peceny et al., 2020), considerando incrementar la fluidez de las rutas y las personas afectadas que hacen uso de estos puentes (Dui et al., 2021; Hosseini et al., 2020). Por ejemplo, Pan et al. (2021) revisó los avances recientes en el estudio de vulnerabilidad y resiliencia. Las definiciones específicas de resiliencia y vulnerabilidad se dan primero desde la perspectiva de la oferta y la demanda del sistema de transporte.

La resiliencia es un concepto que ha tenido mucha relevancia en los últimos años, este concepto se utilizó por primera vez en el siglo XIX en el área de la ciencia de los materiales como la capacidad de un objeto para resistir cargas sin distorsión permanente (Tredgold, 1818); viene del latín “resilire”, que significa “rebota” (Alexander, 2013). En un principio, la resiliencia solo se evaluaba cualitativamente, pero recientemente algunos trabajos la han evaluado cuantitativamente. Fiksel et al. (2003) presentaron un protocolo de diseño que implica identificar la función y los límites del sistema, establecer requisitos, seleccionar tecnologías apropiadas, desarrollar un diseño de sistema, evaluar el desempeño anticipado y diseñar un medio práctico para el desarrollo del sistema. Dinh et al. (2012) propusieron seis principios y cinco factores que contribuyen a la resiliencia de un proceso. Los principios

incluyen flexibilidad, controlabilidad, detección temprana, minimización de fallas, limitación de efectos, controles/procedimientos administrativos y los principales factores contribuyentes, incluido el diseño, el potencial de detección, el plan de respuesta a emergencias, el factor humano y la gestión de la seguridad.

Por otro lado, la resiliencia es un término que tiene gran relevancia en el área de la ingeniería de sistemas de procesos. Hay trabajos reportados donde se evalúa cualitativamente para análisis de riesgos y problemas de seguridad. Jain et al. (2018) presentaron un enfoque de análisis de peligros que incorpora factores técnicos y sociales dentro de un único método de análisis llamado Análisis de Peligros de Sistemas de Procesos Integrados basado en Resiliencia (RIPSHA), que se basa en aspectos de resiliencia, detección temprana, diseño tolerante a errores, plasticidad y recuperabilidad. Jain et al. (2019) presentó, “*Process Resilience Analysis Framework*” (PRAF) que consiste en una metodología de resiliencia que enfatiza la dinámica, los tipos de amenazas imprevistas e incluso desconocidas, la incertidumbre, la degradación del sistema y las interacciones complejas. Gasser et al. (2019) presentaron una descripción general de las definiciones de resiliencia utilizadas en varias disciplinas científicas, seguida de un análisis en profundidad de la evaluación y cuantificación de la resiliencia para los sistemas energéticos.

Asimismo, se han publicado varios trabajos donde se evalúa cuantitativamente la resiliencia, especialmente en sistemas eléctricos (Aziz et al., 2021; Wu y Wang, 2021). Gong and You (2018) propusieron un marco general para la optimización de la resiliencia que incorpora una medida cuantitativa mejorada de la resiliencia y un conjunto integral de estrategias de mejora de la resiliencia para el diseño y la operación de procesos. Otros enfoques consideraron desastres naturales que pueden causar alguna disrupción en el sistema, por ejemplo, para la red de la cadena de suministro de alimentos (Martínez et al., 2021; Emenike y Falcone, 2020) y sistemas que incorporan la evaluación de la resiliencia en el agua-energía- nexos alimentario (Núñez et al., 2021).

De la misma manera, en la ciencia de la infraestructura / sistemas de ingeniería, la resiliencia se ha definido como la capacidad de soportar aceptablemente los parámetros de degradación y de recuperarse en un tiempo y costos aceptables (Liu et al., 2020; Haines et al., 2008). Venkittaraman y Banerjee (2014) evaluaron la resiliencia sísmica de los puentes viales que

son componentes importantes del sistema de transporte vial. Para mitigar las pérdidas sufridas por el daño del puente durante eventos sísmicos, se seleccionan estrategias de reacondicionamiento de puentes de modo que el reacondicionamiento no solo mejore el rendimiento sísmico del puente, sino que también mejore la resiliencia del sistema que consta de estos puentes (Yan et al., 2020). Zhang et al. (2017) presentaron un marco novedoso basado en la resiliencia para optimizar la programación de las acciones de recuperación posdesastre para las redes de transporte de puentes de carretera. Koc et al. (2020) introdujeron un marco integral de evaluación de la resiliencia para los sistemas de transporte, que está diseñado para lograr un análisis holístico de las interrupciones del transporte.

Justificación

Dada una vía de transporte, ya sea de mayor o menor uso comercial, no pierde su importancia como medio de comunicación para los vecinos de la zona. Sin embargo, considerando que dicha vía se utiliza como medio de conexión comercial o laboral, una falla dentro del sistema podría significar pérdidas económicas importantes.

En este ámbito se han realizado diferentes aportes sobre resiliencia; sin embargo, la mayoría de ellos se enfocan en el tiempo de recuperación de los puentes debido a la ocurrencia de una falla parcial o total (Liu et al., 2020). Por lo tanto, no existe un análisis del costo que esto conlleva. Por tanto, el objetivo de este trabajo es encontrar el costo asociado, que incluye los costos de mantenimiento y reparación de algunos puentes específicos en una determinada región para mejorar la fluidez en la parte de los servicios de transporte. Para solucionar este problema, se propone un abordaje sistemático para analizar el posible estado de deterioro de cada uno de los puentes de la vía; además, el costo de reparación del área deteriorada, posibles interrupciones en el sistema, ser de origen natural o influencia humana. Con lo anterior, se identifica la cantidad de personas beneficiadas, así como poder identificar qué área es la más prioritaria para atender. Esta estrategia propuesta permite distribuir los recursos monetarios de manera más sensata y exitosa. La prioridad se determina según el daño obtenido en el puente y el número de personas afectadas en caso de una interrupción en esa parte. Puede suceder que el puente de mayor prioridad no sea el de mayor "deterioro", sino el de mayor número de personas beneficiándose de su reparación.

Objetivo

Objetivo General

Evaluar de manera sistemática la resiliencia en rutas de transporte carretero que presentan interrupciones naturales y humanas.

Objetivos Particulares

- Conocer las diferentes interrupciones naturales y humanas que se presentan en las rutas de transporte.
- Localizar las zonas claves a lo largo de la ruta de transporte.
- Identificar las zonas de mayor prioridad en relación costo/personas beneficiadas dentro de las rutas de transporte
- Evaluar la resiliencia en las diferentes zonas de una ruta de transporte y definir las de mayor prioridad para la distribución correcta de recursos económicos para su atención.

Hipótesis

Atender el tipo de interrupciones generadas en una ruta de transporte ayudará a identificar las zonas de mayor prioridad para con ello destinar correctamente los recursos económicos, propiciando así que el sistema sea más resiliente ante estos eventos inesperados.

2. Marco teórico

2.1 Resiliencia

El concepto de resiliencia se introdujo por primera vez en el siglo XIX en la física y la ciencia de los materiales como la capacidad de un objeto para resistir cargas sin distorsión permanente (Bozza, 2015). Este concepto luego ha sido adoptado en una variedad de contextos como la medicina, la psicología, así como en Ingeniería. Términos como resiliencia ecológica, resiliencia psicológica, resiliencia ante desastres, resiliencia sísmica, resiliencia familiar, etc. Han sido introducidos. Sin embargo, el alcance de este documento se limita a la resiliencia de sistemas de ingeniería solamente.

Moslehi (2015) menciona que anteriormente se veía a la resiliencia de un sistema como su capacidad de recuperarse una vez que se ha visto comprometida debido a un “choque”. Sin embargo, el concepto ha evolucionado y se ha ampliado en gran medida, ahora incluye un conjunto adicional de características y capacidades. Dichas capacidades se pueden clasificar en tres grupos en relación con la ocurrencia de la interrupción: (1) Fase de "pre-interrupción": involucrar capacidades para anticipar choques y adaptarse a fin de responder adecuadamente. Minimizando los daños iniciales; adaptabilidad y robustez son algunos ejemplos de capacidades previas a la interrupción. (2) "Durante la interrupción" fase: implica la capacidad de minimizar las pérdidas de funcionalidad a través de las capacidades como a prueba de fallas para evitar la propagación de fallas o el ingenio permitiendo la implementación de fuentes alternativas para mantener funcionalidad del sistema. (3) Fase "posterior a la interrupción": involucrar a la capacidad para hacer frente a las consecuencias del fracaso y con la rapidez, es decir, qué tan rápido se puede recuperar el sistema interrumpido. Numerosas definiciones han sido propuestas en la literatura para la resiliencia de los sistemas a incluir estas capacidades en relación con el tipo de interrupción y el tipo de sistema en sí.

En las redes de transmisión y distribución, la capacidad del sistema para prevenir la propagación de fallas es el foco principal de los estudios de resiliencia más que las características de recuperación (Mousavizadeh, 2018). Por lo tanto, se propone una nueva definición de resiliencia de los sistemas de ingeniería que se centra en la funcionalidad del sistema de interés, en lugar de en las características del sistema como: "La resiliencia es la capacidad del sistema para cumplir con la mayor cantidad posible de sus funcionalidades

previstas cuando se interrumpe por interrupciones externas o internas". El término Interrupción, se refiere a la incapacidad del sistema para brindar sus servicios funcionales durante la interrupción y posteriormente.

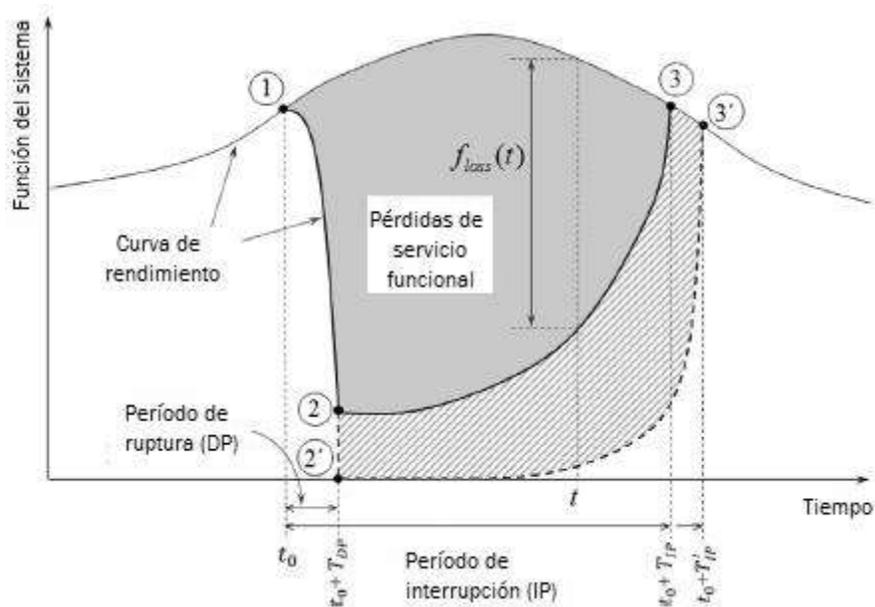


Figura 1. Esquema de las curvas de funcionalidad y rendimiento de un sistema interrumpido bajo falla parcial (curva 1–2–3) y completa (1–2'–3'); Se asume que el período de interrupción será mayor en caso de falla total. (Moslehi y Reddy, 2018)

2.1.1 Cuantificación de la Resiliencia

Moslehi y Reddy (2018) describen la resiliencia con base a la Figura 1, la cual ilustra esquemáticamente el rendimiento de un sistema cuando sufre una interrupción. La curva (1–3) representa el nivel de rendimiento deseado de acuerdo a las demandas proporcionadas por el sistema, mientras que la curva (1–2–3) muestra el rendimiento real del sistema debido a la interrupción. Tomando en cuenta el intervalo de tiempo $t_0 \leq t \leq t_0 + T_{DP}$ como el momento en que se produce la interrupción, recurrente o no recurrente. La curva (1-2) muestra cómo responde el sistema a la interrupción durante este tiempo; la tasa de pérdida de servicios funcionales puede ser más lenta al principio debido a la solidez de los componentes del sistema. La curva (2-3) enseña cómo el sistema vuelve a su estado deseado después de una falla parcial; la curva (2'–3') representa una falla completa en el sistema, la cual puede presentarse dependiendo de las características del sistema y todos los servicios funcionales pueden perderse. El intervalo de tiempo $t_0 \leq t \leq t_0 + T_{IP}$ Representa el período de interrupción

durante el cual el sistema no puede funcionar al nivel deseado. Tenga en cuenta que el período de interrupción puede ser el mismo que el período de ruptura, lo que significa que el sistema puede funcionar al nivel deseado justo después de que se supera la interrupción. En cualquier momento durante el período de interrupción, la diferencia entre el nivel de desempeño deseado y el desempeño real identifica la pérdida de servicio funcional del sistema, indicada por $f_{loss}(t)$. Por lo tanto, el área sombreada en la Fig.1 representa las pérdidas totales del servicio funcional debido a la interrupción.

$$FL = \int_{t_0}^{t_0+T_{IP}} [f_{desired}(t) - f_{actual}(t)]. dt = \int_{t_0}^{t_0+T_{IP}} f_{loss}(t). dt \quad (1)$$

Idealmente, un sistema resiliente cumpliría sus objetivos de desempeño durante todo el período de interrupción. Dos atributos caracterizan este concepto: (a) preparación antes de la interrupción, y (b) agilidad en la recuperación después de la interrupción. Sin embargo, argumentamos que no todos los tipos de interrupciones requieren un período de recuperación después de que pasa la interrupción. Por ejemplo, si el rendimiento de una unidad de fabricación se interrumpe debido a "Falta de materia prima" (interrupción), puede comenzar a prestar su servicio tan pronto como termine la interrupción. En este caso, los periodos de interrupción e interrupción son los mismos y no existe un proceso de recuperación como tal.

Por lo tanto, este análisis cuantifica la resiliencia del sistema diseñado en función del rendimiento del sistema durante el período de interrupción, caracterizado por pérdidas de servicio funcional, en lugar de basarse únicamente en atributos o métricas específicas (como en la mayoría de la literatura publicada). Se puede identificar un número infinito de interrupciones para un sistema en particular y sería imposible analizar la resiliencia del sistema en términos de todas las interrupciones. En cambio, para cualquier sistema con un número determinado de componentes del sistema, podemos identificar un número finito de modos de falla. Independientemente de la causa de las fallas, es decir, las interrupciones, sería de gran valor analizar los efectos de las fallas en el rendimiento del sistema. Por lo tanto, en este estudio nos enfocamos en los efectos de las fallas de los componentes del sistema más que en la causa inherente de la falla. Por lo tanto, un sistema resistente debería poder minimizar las pérdidas en la prestación de sus servicios, para cualquier posible modo de falla y durante todos los períodos temporales operativos. Esto se puede representar como una matriz tridimensional (Moslehi y Reddy, 2019):

Matriz de pérdidas

Servicios funcionales del sistema (k)

Modos de falla (j)

Períodos temporales operativos (i)

$$\begin{matrix}
 & & & \begin{matrix} \rightarrow \\ \text{Modos de falla } (j) \end{matrix} \\
 & & & \left[\begin{array}{ccc} FL_{1,1,K} & \dots & FL_{1,J,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ FL_{i,1,K} & \dots & FL_{i,J,K} \end{array} \right] \\
 \downarrow & & & \\
 \begin{matrix} \text{Períodos} \\ \text{temporales} \\ \text{operativos } (i) \end{matrix} & & & \left[\begin{array}{ccc} FL_{1,1,1} & \dots & FL_{1,J,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ FL_{i,1,1} & \dots & FL_{i,J,1} \end{array} \right] \\
 & & & \dots
 \end{matrix}$$

(2)

Donde las matrices son pérdidas de servicio (cada uno identificado por la Ec. (1) y el área sombreada en la Fig. 1), “ j ” representan varios modos de falla que corresponden a fallas de los componentes del sistema, “ k ” identifica los servicios funcionales del sistema ($1 \leq k$), y “ i ” muestra varios períodos temporales operativos que afectan la resiliencia del sistema. Los períodos temporales operativos pueden representar variaciones temporales en la operación del sistema y están destinados a reflejar los casos extremos, como las demandas máximas en varias estaciones del año. En lo sucesivo, las combinaciones de modos de falla y períodos temporales operativos se denominan escenarios.

Analizar matrices tridimensionales se vuelve inconveniente cuando se trata de un sistema grande, con componentes numerosos y diferentes modos de falla. Por lo que Moslehi y Reddy (2019) sugieren asignar costos de penalización monetaria a las pérdidas de servicios funcionales y, por lo tanto, reducir el orden de la matriz a dos. Es decir, para un escenario dado, se estiman los costos totales impuestos debido a las pérdidas del servicio funcional y las operaciones no óptimas del sistema de la siguiente manera haciendo referencia a la Figura 2.

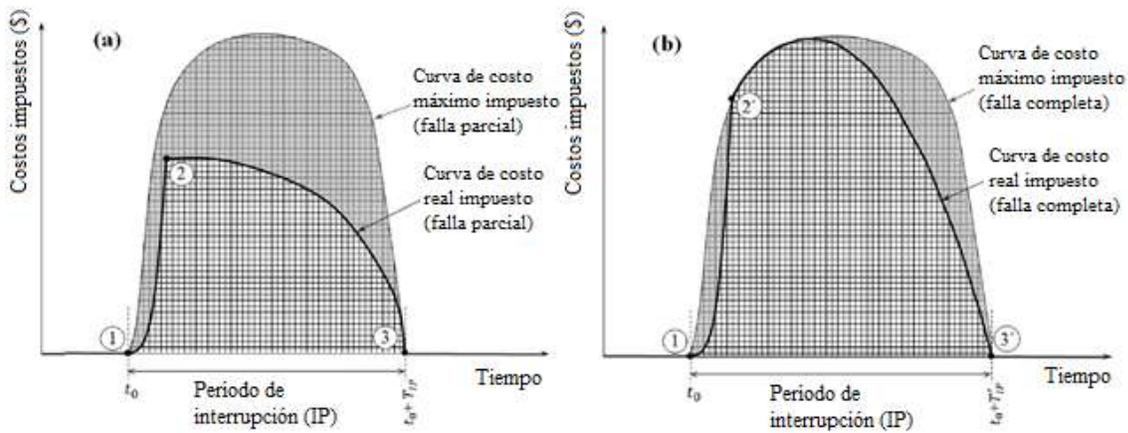


Figura 2. Esquema de las curvas de costos impuestos de un sistema interrumpido bajo (a) falla parcial (curva 1–2–3) y (b) falla completa (1–2'–3') (Moslehi y Reddy, 2018)

$$IC_{i,j}|f_j = [OC_{i,j} + \sum_{K=1}^K (FL_{i,j,k} \times PC_{i,k})] - OC_{i,desired} \quad (3)$$

Donde $IC_{i,j}|f_j$ denota los costos impuestos debido al modo de falla j , $OC_{i,j}$ Son los costos operativos durante el modo de falla j y el período de tiempo i , K es el número total de servicios funcionales del sistema y $PC_{i,k}$ representa los costos de penalización asociados con una unidad de k pérdida de servicio funcional durante el período de tiempo i . $OC_{i,desired}$ Es el costo operativo para que el sistema ininterrumpido funcione de manera óptima durante el período de tiempo i .

Usando la ecuación. (3), la Matriz de Pérdidas tridimensional se puede reducir a una matriz bidimensional denominada “Matriz de Consecuencias” que incluye los costos monetarios impuestos asociados con diferentes escenarios:

$$\text{Matriz de consecuencias} = \begin{bmatrix} IC_{1,1} & \cdots & IC_{1,J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ IC_{I,1} & \cdots & IC_{I,J} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Por lo tanto, la resiliencia del sistema se puede caracterizar por la Matriz de Consecuencias que contiene los costos monetarios totales incurridos para las partes interesadas del sistema (usuarios, propietarios, etc.) en diferentes escenarios. Tales fallas pueden variar desde fallas aleatorias de los componentes del sistema hasta ataques deliberados y errores del personal. En cualquier caso, uno o varios componentes del sistema fallarían por lo que la funcionalidad del sistema se vería comprometida si el sistema no es completamente resistente.

Los costos impuestos se pueden utilizar para desarrollar un índice de resiliencia cuantitativo. Dado que la resiliencia es un atributo positivo, las cifras más altas deberían reflejar un mejor desempeño, mientras que los costos impuestos más altos deberían representar una menor resiliencia para hacer frente a las interrupciones. Por lo tanto, en este análisis, el índice de resiliencia se define pertinente a cada escenario como:

$$Re_{i,j} = \frac{IC_i^{Max} - IC_{i,j}}{IC_i^{Max}} \quad (5)$$

Donde IC_i^{Max} son los costos máximos posibles impuestos en cada escenario, es decir, si se pierden todos los servicios funcionales durante el período temporal operativo i . El índice de resiliencia oscila entre 0 y 1, y corresponde al peor y mejor nivel de resiliencia respectivamente.

La Matriz de resiliencia, que incluye índices de resiliencia para todos los escenarios identificados, se puede representar como:

$$Matriz\ de\ resiliencia = \begin{bmatrix} \frac{IC_1^{Max} - IC_{1,1}}{IC_1^{Max}} & \dots & \frac{IC_1^{Max} - IC_{1,J}}{IC_1^{Max}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{IC_J^{Max} - IC_{J,1}}{IC_J^{Max}} & \dots & \frac{IC_J^{Max} - IC_{J,J}}{IC_J^{Max}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Re_{1,1} & \dots & Re_{1,J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Re_{J,1} & \dots & Re_{J,J} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Considerar que la metodología propuesta por Moslehi y Reddy (2019) es un enfoque basado en el desempeño. Expresar la resiliencia del sistema en términos monetarios permitirá a los planificadores y diseñadores realizar análisis de rentabilidad de varias opciones de mejora de la resiliencia de manera más conveniente.

2.2 Infraestructura carretera en México

En los años inmediatos a la conquista, México continuó dependiendo en parte de las pautas indígenas. Sin embargo, paulatinamente se impuso el modo español de hacer intercambios. Esto se manifestó principalmente en la expansión de las rutas de comercio y en la orientación de la economía hacia el exterior. Ambos factores requerían de una red de caminos que, a la vez que tomara en cuenta la geografía, obedeciera a las nuevas condiciones económicas. Esta nueva red de caminos suplió casi en su totalidad a las rutas precortesianas. Esto se debió a factores tecnológicos, pues las rutas prehispánicas, ante la ausencia de la tecnología que hacía uso de bestias de carga y tiro, poco consideraban aspectos tales como la pendiente de los caminos o lo cerrado de las curvas: aspectos que se debieron tomar en cuenta al construir rutas sobre las cuales transitarían animales cargados y carretas (Jáuregui, 2004).

Conforme se fueron expandiendo los intereses comerciales de los españoles se formalizaron nuevas rutas que soportaban un tráfico comercial de importancia. Así, el camino a Toluca comunicaba a la ciudad de México con Michoacán y con el occidente de la Nueva España. Hacia el Sur, dos caminos, uno hacia Cuernavaca y el otro hacia Cuautla, comunicaban con el Marquesado del Valle en el Sur y con tierra caliente hacia los puertos de Acapulco y Huatulco en el Pacífico. Por otro lado, en los primeros años de la colonia había dos rutas directas a Veracruz: la más importante, que pasaba por Otumba, Apam y Xalapa y la de menor importancia que atravesaba por el valle de Orizaba. Estas rutas suministraban al Valle de México. La mercancía de Europa que provenía de Veracruz, algunos productos ganaderos llegaban desde Apam, Calpulalpan y Toluca, el trigo de Atlixco y Tehuacán, el maíz de Toluca, Tepeaca, Ixtlahuaca y Metepec, el azúcar de Cuernavaca e Izúcar y el índigo desde Michoacán. En cuanto al camino hacia el norte, éste atravesaba un buen trecho de tierras aún no conquistadas hasta llegar a la recién fundada ciudad de Zacatecas, centro de producción argentífera que suministraba a la capital novohispana de plata y ganado (Jáuregui, 2004).

Sin embargo, con el paso de los años y después de muchos cambios debido a las necesidades de movimiento de productos hacia distintos puntos del país, así como el cambio por la firma de independencia la red de caminos se vio incrementada. El registro sistemático de cifras relacionadas con la infraestructura carretera en México coincide con el fin del periodo revolucionario (1910-1924) y el inicio de la institucionalización del Estado mexicano

(Delgado, 2003). En 1924 existían 32,5 mil automóviles registrados en el país y al iniciar la década de 1930 México contaba con 1.426 km de carreteras, de las cuales 541 km eran carreteras pavimentadas, 256 km correspondían a carreteras revestidas y 629 km a caminos de terracería según reportó el INEGI en 2009. Posteriormente, en 1934 la cifra de automóviles se había duplicado. Alcanzando un registro de aproximadamente 74.2 mil vehículos (Flores, 2014). En la década de 1960, el autotransporte superó por primera vez el volumen de carga frente a los ferrocarriles (Mercado et al., 2011), y entre 1970 y 1975 la construcción de carreteras experimentó el mayor auge de su historia, momento en que fueron construidos más de 114 mil km de superficie como se muestra en la Figura 3. En esos cinco años se conformó la estructura básica de la red nacional de carreteras, de manera que la mayor parte del territorio quedó vinculado. Sin embargo, este crecimiento se concentró particularmente en los caminos no pavimentados, es decir, en los caminos que vinculan las zonas rurales del país (Flores, 2014).

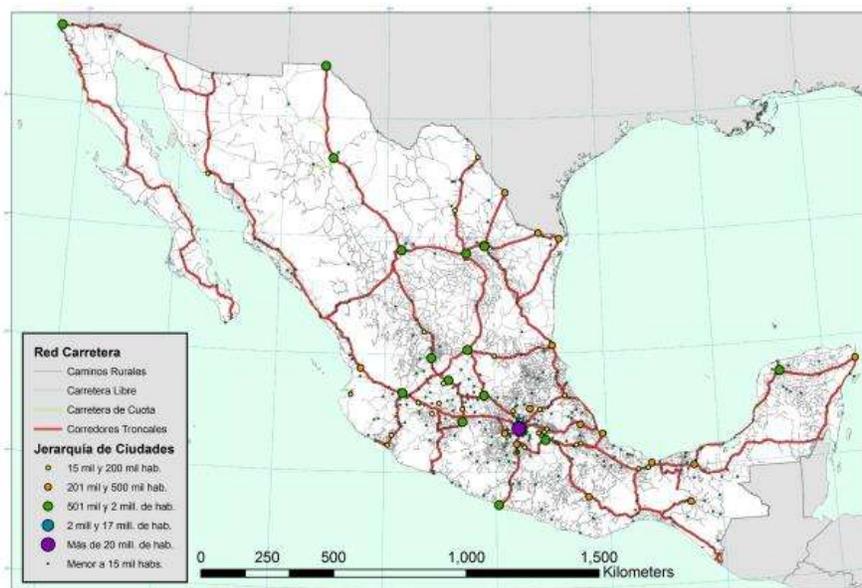


Figura 3. Estructura de la red carretera en México 1970-1975.. (IMT, 2004)

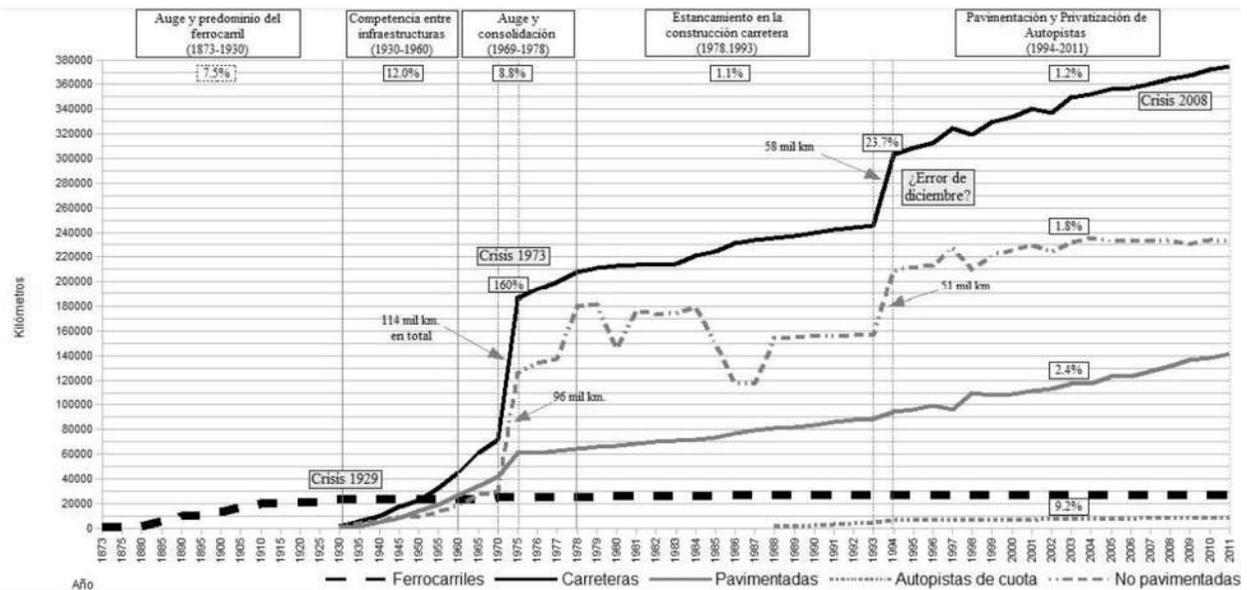


Figura 4. Fases de la evolución de la infraestructura de transporte terrestre en México, 1873-2011(Rangel, 2015)

La red carretera se compone de cuatro tipos de vías: red troncal federal, red de alimentadoras estatales, caminos rurales y brechas mejoradas. La primera corresponde a carreteras que cruzan y comunican a todos los estados de México, por lo que son responsabilidad del gobierno federal. Se puede considerar a ésta la más importante para el tránsito de personas y mercancías, pues permite la comunicación interestatal, conecta las fronteras del país y los puntos turísticos más importantes, así como con las ciudades portuarias más significativas (Ensenada, Mazatlán, Veracruz, Cancún, Progreso). En cuanto a las carreteras alimentadoras estatales, éstas son vías que vinculan las cabeceras municipales dentro de un estado, conectan con la red troncal y están a cargo de la respectiva entidad federativa. Los caminos rurales se integran por carreteras de baja calidad, que conectan comunidades alejadas; mientras que las brechas mejoradas son caminos rústicos de tierra o pedregosos acondicionados por la mano del hombre, de acuerdo con sus necesidades. Estos dos últimos tipos de vías son de jurisdicción local (Medina, 2009).

En el periodo de 1994 a 2007, el crecimiento de la red pavimentada, la más apta para el autotransporte de carga, se dio principalmente en los alimentadores estatales y caminos rurales (18 943 y 8 526 kilómetros, respectivamente), mientras que en la red federal sólo se agregaron 1,832 kilómetros (véase la Figura 4). Cabe mencionar que las carreteras

pavimentadas se componen en su mayor parte de vías de dos carriles (90.9%) y sólo una pequeña porción son carreteras de cuatro o más carriles (9.1 %). En otras palabras, la mayoría de las carreteras no puede absorber grandes flujos de tránsito vehicular. Las carreteras pavimentadas federales de dos carriles que más se han incrementado son las de cuota, con 1 088 kilómetros en el periodo; mientras que las federales libres de cuatro carriles han crecido 1 872 kilómetros. Esto apunta en dos direcciones: por un lado, la iniciativa privada ha concentrado su inversión en este lapso en vías de dos carriles (por concesión). Por el otro, el gobierno federal ha dirigido su inversión a aumentar la capacidad de tránsito de la red troncal (carreteras de cuatro carriles), sin que en ésta se cobre peaje (véase figura 4). En otras palabras, parte importante del crecimiento de la red troncal federal corresponde a vías con baja capacidad y caras por ser de cuota, si se le compara con la evolución de la red federal troncal libre (Medina, 2009).

2.2.1 Clasificación general de la infraestructura carretera en México

De acuerdo con la normativa oficial vigente, los caminos y puentes federales se clasifican según el Apéndice para la Clasificación de los Caminos y Puentes referido en el artículo 6o. del Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal [DOF, 1994]. A su vez, este Reglamento forma parte del fundamento de la NOM-012-SCT-2-2014. Así pues, de acuerdo con dicho Apéndice, los caminos en México se clasifican de la siguiente manera (Cadengo et al., 2020):

- **Carreteras tipo ET:** son aquellas que forman parte de los ejes de transporte que establezca la Secretaría, cuyas características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, así como de otros que por interés general autorice la Secretaría, y que su tránsito se confine a este tipo de caminos.
- **Carreteras tipo A:** por sus características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, excepto aquellos vehículos que por sus dimensiones y peso sólo se permitan en las carreteras tipo ET.

- **Carreteras tipo B:** conforman la red primaria y que atendiendo a sus características geométricas y estructurales prestan un servicio de comunicación interestatal, además de vincular el tránsito.
- **Carreteras tipo C:** red secundaria, son carreteras que atendiendo a sus características prestan servicio dentro del ámbito estatal con longitudes medias, estableciendo conexiones con la red primaria.
- **Carreteras tipo D:** son la Red alimentadora, son carreteras que atendiendo a sus características geométricas y estructurales principalmente prestan servicio dentro del ámbito municipal con longitudes relativamente cortas, estableciendo conexiones con la red secundaria.

Adicionalmente, atendiendo a sus características geométricas, las carreteras se tipifican en: carreteras de cuatro carriles eje de transporte (ET4), carreteras de dos carriles eje de transporte (ET2), carretera de cuatro carriles (A4), carreteras de dos carriles (A2), carretera de cuatro carriles red primaria (B4), carretera de dos carriles red primaria (B), carretera de dos carriles red secundaria (C) y carretera de dos carriles red alimentadora (D).

Por su parte, el Manual de Proyecto Geométrico (DGST, 2018), documento técnico que guía los lineamientos del diseño geométrico de una carretera en México, indica que la clasificación de la infraestructura carretera tiene como objetivo agruparlas de acuerdo a sus características físicas y sus funciones; y es necesaria para la logística entre los ingenieros, administradores y público en general. Este Manual menciona las siguientes clasificaciones:

- **Clasificación administrativa.** Se utiliza para indicar los diferentes niveles de responsabilidades gubernamentales, así como el financiamiento, modernización y conservación de las mismas. Esta clasificación cataloga las carreteras en federal, estatal y rural.
- **Clasificación por nomenclatura.** Identificación alfanumérica de 6 caracteres (3 alfabéticos y 3 numéricos) que se asigna al itinerario entre dos puntos geográficos de largo recorrido, pues se conforma por varias vías que siguen una trayectoria determinada. Los caracteres alfabéticos determinan si es una carretera federal “MEX” o estatal (abreviatura correspondiente al estado), mientras que los caracteres

numéricos se asignan según la orientación general de la ruta (números nones corresponden al sentido norte-sur y números pares al sentido este-oeste).

- **Clasificación según importancia.** Categorización de las carreteras de acuerdo con el servicio regional que proporcionan: red troncal (primaria), red alimentadora (secundaria) y red colectora (terciaria).
- **Clasificación normativa.** Corresponde a la clasificación especificada en el Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal. El Manual (DGST, 2018) considera esta clasificación como “técnica”, pues se respalda en las características geométricas de las carreteras a partir de datos básicos para proyecto geométrico como: el volumen horario de proyecto, el vehículo de proyecto, el nivel de servicio esperado en el horizonte de proyecto, velocidades de proyecto, distancias de visibilidad de parada, distancias de rebase o de encuentro según sea el caso, entre otros. Así pues, esta clasificación es la que se utiliza para proyectar un camino. En la Tabla 1, extraída del Manual (DGST, 2018), se presentan algunas características de las carreteras de acuerdo con esta clasificación.

Carretera tipo	Número de carriles	Control de accesos	Denominación geométrica
ET,A	1 o más por sentido	Total o parcial	Autopista o multicarril
B	1 o más por sentido	Total o Parcia	Carretera de 2 carriles o multicarril
C	1 por sentido	Parcial	Carretera de 2 carriles
D	1 por sentido	Sin control	Camino rural

Tabla 1. Características de carreteras de acuerdo con su clasificación normativa. (DGST, 2018)

- Clasificación de las carreteras según su función. Esta clasificación enlista las siguientes categorías: control total de accesos, control parcial de accesos, camino dividido, camino no dividido, arteria urbana, camino de dos carriles, camino de tres carriles, camino de carriles múltiples, vía rápida y autopista.

Más adelante se muestra en el caso de estudio que la vía seleccionada es un tramo de una carretera federal.

2.2.2 Red carretero federal

En la Tabla 2 se muestra el total de kilómetros pavimentados dentro de la red federal por entidad.

ENTIDAD	Longitud (km)							
	Lineal				Equivalente			
	Total	Corredor	Básica	Secundaria	Total	Corredor	Básica	Secundaria
AGUASCALIENTES	343.89	71.44	101.99	170.46	481.05	161.53	130.92	188.6
BAJA CALIFORNIA	1,687.58	646.76	259.68	781.14	1,908.85	734.52	319.29	855.04
BAJA CALIFORNIA SUR	1,199.60	930.35	140.91	128.34	1,384.14	991.11	264.69	128.34
CAMPECHE	1,244.13	635.19	175.15	433.79	1,422.84	813.9	175.15	433.79
COAHUILA	1,483.67	476.23	582.91	424.53	1,987.90	785.71	649.14	553.05
COLIMA	285.21	48.3	125.83	111.08	361.66	98.9	147.38	115.38
CHIAPAS	2,126.91	381.8	1,320.45	424.66	2,472.82	659.25	1,377.71	435.86
CHIHUAHUA	2,111.42	304	749.83	1,057.59	2,614.77	608	826.83	1,179.94
CIUDAD DE MÉXICO	60.08	0	39.38	20.7	76.82	0	56.12	20.7
DURANGO	1,968.23	94.2	651.77	1,222.26	2,115.06	122.9	701.88	1,290.29
GUANAJUATO	923.48	208.21	89.85	625.42	1,142.96	407.23	103.44	632.29
GUERRERO	1,933.14	0	861.86	1,071.28	2,027.03	0	916.8	1,110.23
HIDALGO	727.3	32.4	262.84	432.06	1,043.96	77.5	465.88	500.58
JALISCO	1,959.80	108.05	997.46	854.29	2,279.37	154.85	1,132.81	991.72
MÉXICO	783.57	48.65	320.56	414.36	1,124.22	114.95	485.81	523.46
MICHOACÁN	2,143.62	228.95	1,145.00	769.67	2,307.87	312.65	1,200.35	794.87
MORELOS	258.04	33	108.2	116.84	360.62	73.59	158.18	128.85
NAYARIT	765.68	111.46	261.32	392.9	818.47	111.46	298.35	408.66
NUEVO LEÓN	1,135.14	352.78	539.52	242.84	1,591.22	728.08	608.11	255.03
OAXACA	2,865.05	461.43	738.43	1,665.19	2,939.50	487.68	744.13	1,707.69
PUEBLA	1,005.96	203.82	420	382.14	1,095.08	257.64	454.5	382.94
QUERÉTARO	487.43	13.92	86.3	387.21	670.69	32.94	196.63	441.12
QUINTANA ROO	678.38	313.9	166.23	198.25	728	353.4	176.35	198.25

SAN LUIS POTOSÍ	1,567.55	618.13	99.06	850.36	2,037.15	946.38	175.78	914.99
SINALOA	820.17	163.9	597.8	58.47	1,134.15	321.4	748.58	64.17
SONORA	1,495.35	393.82	611.5	490.03	1,637.48	453.58	687.13	496.77
TABASCO	594.33	230.83	245.05	118.45	766.47	352.92	281.9	131.65
TAMAULIPAS	2,157.30	757.72	649.58	750	2,396.92	958.32	681.7	756.9
TLAXCALA	560.57	141.95	100.51	318.11	814.71	273.96	155.31	385.44
VERACRUZ	2,372.09	655.65	754.67	961.77	2,599.01	804.95	826.1	967.96
YUCATÁN	1,328.98	150.37	341.85	836.76	1,723.95	411.21	425.9	886.85
ZACATECAS	1,488.05	224.96	791.99	471.1	2,117.87	363.69	1,182.87	571.31
TOTAL	40,561.68	9,042.16	14,337.48	17,182.04	48,182.58	12,974.18	16,755.71	18,452.70

Tabla 2. Red Federal pavimentada por entidad federativa (SCT, 2020)

2.3 Puentes

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) define un puente como estructura con longitud mayor de seis metros, que se construye sobre corrientes o cuerpos de agua.

Un puente se puede definir como una estructura destinada a salvar obstáculos naturales, como ríos, valles, brazos de mar; y obstáculos artificiales, como vías férreas o carreteras, con el fin de unir caminos de viajeros, animales y mercancías (Pérez, 2007).

En función a la longitud de su claro, los puentes se pueden clasificar como se muestra en la Tabla 3.

Clasificación	Claro
Alcantarillas	$L \leq 6 \text{ m}$
Puentes de claro medio	$6 \text{ m} < L \leq 60 \text{ m}$
Puentes de grandes claros	$L > 60 \text{ m}$

Tabla 3. Clasificación de puentes según su tamaño (Eduardo, Mario, & Rafael, 2000)

Clasificación de puentes

Desde los primeros puentes en la historia puestos por la naturaleza de manera accidental y a través del tiempo se han utilizado diferentes tipos de materiales para su construcción, por lo que de acuerdo al tipo de material con el que se construye el puente se puede clasificar como:

- Madera
- Ladrillo
- Hierro
- Acero
- Concreto hidráulico
- Vidrio
- Concreto reforzado
- Concreto y acero
- Concreto Pre-esforzado

Los puentes además pueden clasificarse por su tipología como: (Denison & Stewart, 2014)

- Puentes de Viga
- Puentes de arco
- Puentes en celosía
- Puentes móviles
- Puentes colgantes
- Puentes atirantados

2.3.1 Puentes en México

En México, al igual que en muchos otros países, la red carretera es la infraestructura de transporte más utilizada, dada la flexibilidad que confiere a los movedores de carga, así como su gran extensión, permitiendo los servicios de entrega puerta-a-puerta. La red carretera nacional, que se ha desarrollado a lo largo de varias décadas, comunica casi todas las regiones y comunidades del país. En la Figura 5 se observa la distribución de la Red Nacional de carreteras (SCT, 2012).

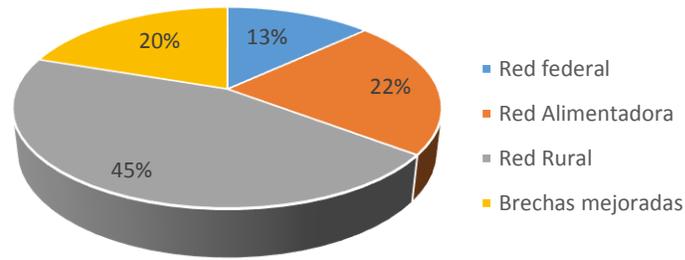


Figura 5. Distribución de la red nacional por tipo de camino (SCT, 2012)

En la publicación técnica 327 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en el 2010 se presentó el número de puentes de la red federal correspondientes a cada estado de la República Mexicana; esta gráfica fue la primera producida con la información del nuevo inventario electrónico de puentes. En la Figura 6 se presenta el número de puentes por estado. Notando así que el estado de Michoacán es el estado con el mayor número de puentes en nuestro país con 463. Esto da el por qué es importante evaluar el estado en el que se encuentran y las medidas de seguridad para evitar su deterioro, en los puentes existentes, así como el mejoramiento en los procesos constructivos para buscar minimizar futuros deterioros como lo es la corrosión.

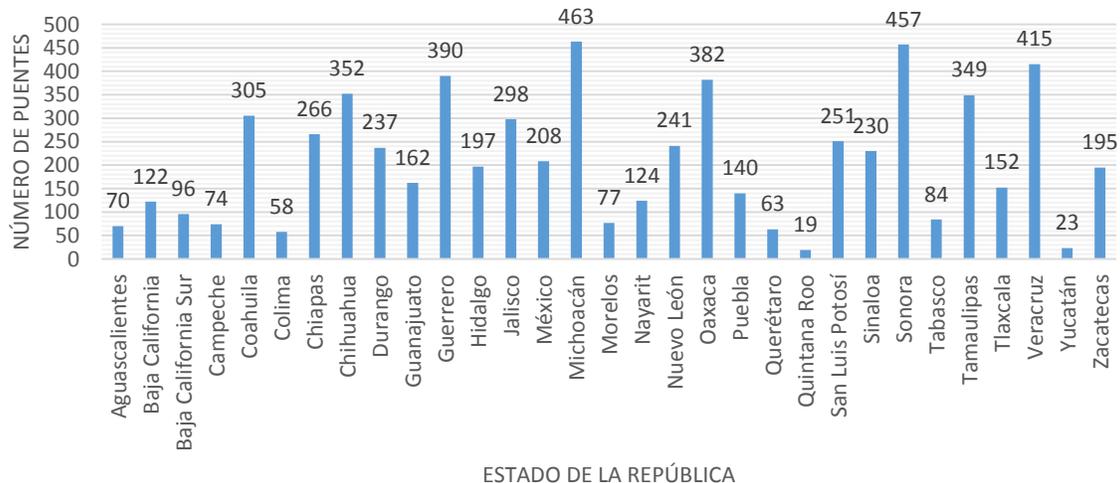


Figura 6. Número de puentes por estado de la República Mexicana (Pt327 IMT, 2013)

Dentro de la red nacional de carreteras existen alrededor de 7469 puentes, en la Figura 7 se muestran el porcentaje correspondiente para cada tipo de material que constituye principalmente los puentes en la red federal libre de peaje.

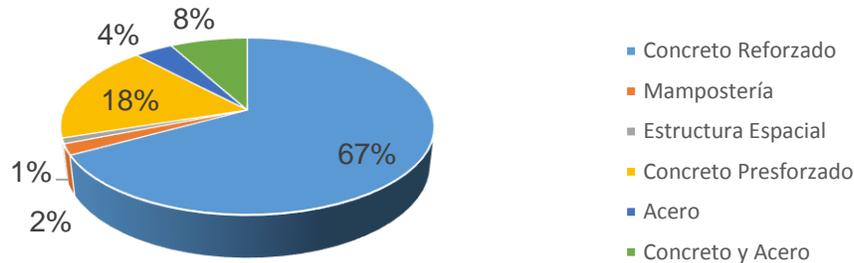


Figura 7. Distribución de puentes por tipo de material. (IMT, 2010)

En cuanto a los puentes de concreto pre-esforzado se refiere en la Figura 7 se puede observar que el 18% de los puentes en México están contruidos por medio de este método. El concreto pre-esforzado ha demostrado ser técnicamente ventajoso y económicamente competitivo tanto para puentes de claros medios donde se emplean elementos pretensados estándar producidos en serie, como para puentes de grandes claros como los atirantados. En la actualidad, prácticamente todos los puentes se construyen con esta técnica y es una de las áreas más exitosas del concreto pre-esforzado.

En México, en los últimos años aumentó la construcción de puentes pre-esforzados. En el caso de puentes y viaductos pequeños en México (con claros menores de 40m) el uso del concreto presforzado ha tenido una tendencia al alza desde hace aproximadamente 30 años, uno de los principales componentes de este tipo de puentes son los torones de acero, por lo que también el uso de éstos va en aumento, mientras que las estructuras de concreto reforzado cada vez son construidas en menor medida. En la Figura 8 se muestra la tendencia de la construcción de puentes en México (García et al., 2013).

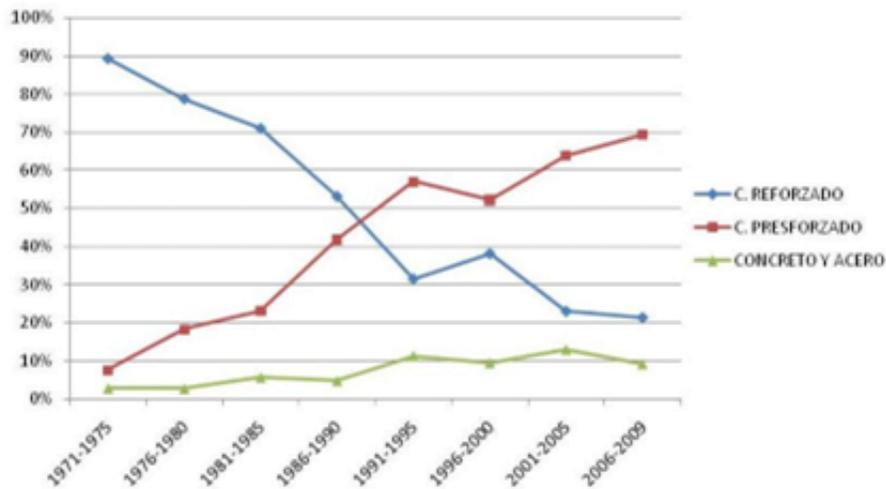


Figura 8. Tendencias en la construcción de puentes en México (Base de datos SIPUMEX 2010, PT385, IMT, García et al, 2013)

En nuestro país existen una gran cantidad de puentes que están trabajando bajo factores ambientales que afectan las estructuras de elementos reforzados, tales como el clima, la posición geográfica y su distancia de los corredores industriales (Torres et al.,2010).

En la Figura 9 se puede observar los puentes de prioridad de corrosión por cloruros presentada en la publicación técnica 327 del IMT en base a una inspección de corrosión. Se puede observar que los puentes de prioridad alta están localizados en la zona costera, es ahí en donde los elementos están sometidos a una mayor agresión por agentes corrosivos en el ambiente.

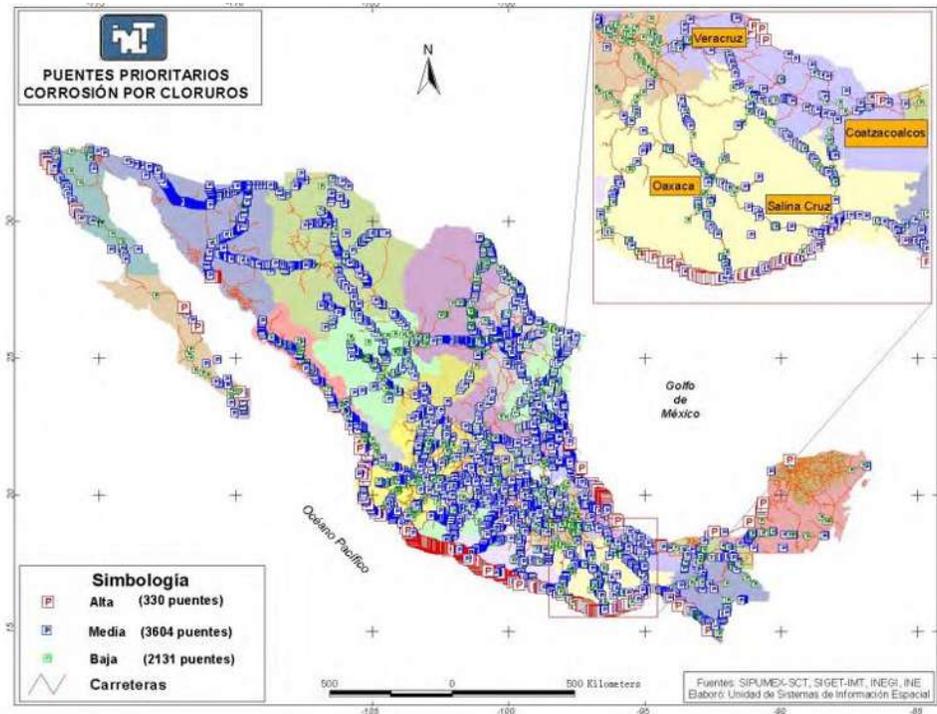


Figura 9. Mapa de puentes prioritarios para programa de inspección detallada, corrosión por cloruros (Torres et al, 2013)

2.3.2 Periodo de construcción de puentes en Michoacán

Hablando de nuestro estado, la construcción de puentes comenzó en los años 30 y con el paso de los años fue creciendo la implementación de puentes, en las décadas de los 70s y 90s se presenta un número importante en la construcción de puentes, sin embargo, han transcurrido ya 30, 50 años, lo que genera el degrado de las estructuras. En la Figura 10 se presenta el periodo de construcción de los puentes existentes en Michoacán.

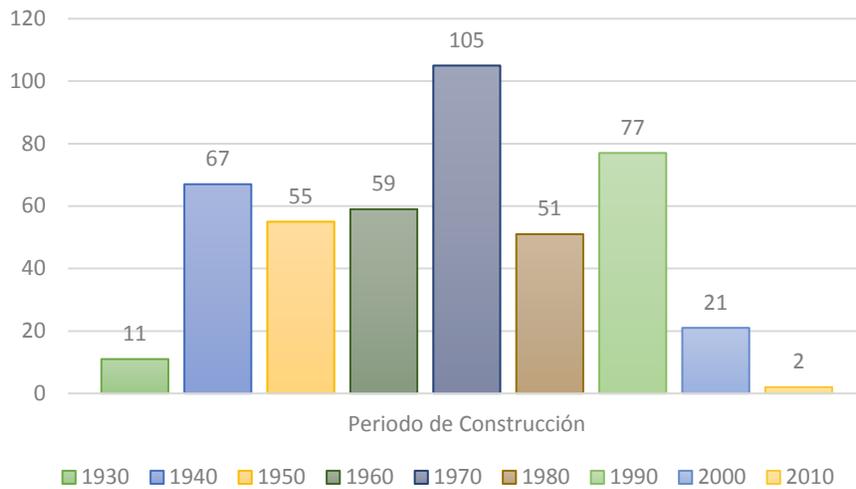


Figura 10. Periodo de construcción de puentes en Michoacán

Con base a lo presentado en la Figura 10 se observa que en los años de 1970 y 1990 se tuvo una cantidad importante de construcción de puentes por lo que en la Figura 11 se presenta la evaluación SIPUMEX para los puentes del estado de Michoacán.

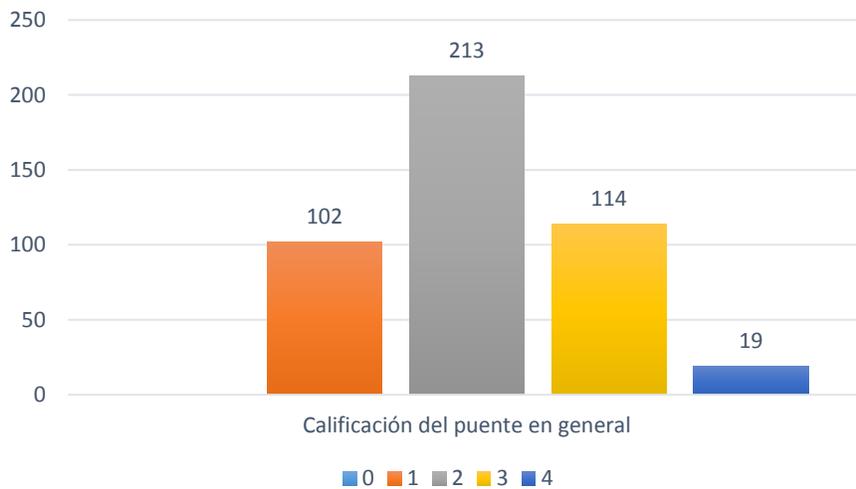


Figura 11. Calificación de acuerdo al SIPUMEX de los puentes de Michoacán

Se puede observar que la mayoría están en una evaluación SIPUMEX de 2 y 1, sin embargo, se debe tener una evaluación constante para garantizar que los puentes sigan trabajando de acuerdo a como fueron proyectados.

2.3.3 SIPUMEX

En 1993, la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la SCT instrumentó un sistema de administración de puentes denominado Sistema Integral de Puentes Mexicanos (SIPUMEX). Esta base de datos contempla, entre lo más importante desde el punto de vista estructural, las características geométricas, ubicación con coordenadas geográficas, material y tipo de estructura, fecha de construcción, etc. Además, posee la información de las reparaciones realizadas, así como una calificación de 0 a 5 que define el estado que guarda el puente desde el punto de vista estructural.

El sistema SIPUMEX (sistema de puentes mexicano) consiste en un programa de cómputo, el cual administra toda una serie de datos recopilados en el campo como: dimensiones, tipo de estructura, materiales de construcción, tipo de superficie de desgaste, tipo de apoyos, cargas de diseño y obstáculos que cruza el puente etc. Una vez analizados los datos que arroja el sistema se determina si un puente requiere una determinada reparación. Sin embargo, en dicho programa no se ven reflejados los daños por corrosión. En la Tabla 4 se presentan los criterios de evaluación del SIPUMEX.

Clasificación	Descripción
0	Sin daño o daño insignificante.
1	Daño pequeño, pero no es necesario reparación (Excepto mantenimiento menor)
2	Algún daño, reparación necesaria cuando presente la ocasión. El componente funciona como se diseñó.
3	Daño significativo, reparación necesaria muy pronto.
4	Daño grave, reparación necesaria muy pronto.
5	Daño extremo, fallo total o riesgo de falla total del componente.

Tabla 4. Clasificación de acuerdo al SIPUMEX

2.4 Interrupciones presentadas en rutas de transporte

2.4.1 Interrupciones humanas y naturales

Dentro de un sistema carretero lo mejor sería que trabaje de una manera óptima, siendo esta la inexistente interrupción del mismo. Sin embargo, la realidad es otra. Existen distintos factores que pueden interrumpir una ruta de transporte, y estas pueden ser de origen humano o natural. Si bien al tener un diseño óptimo, un uso adecuado, actividades de mantenimiento necesarias, mantenimiento de unidades, etc. Esto teóricamente disminuye la probabilidad de ocurrencia de una interrupción de origen humano. No obstante, la incertidumbre de ocurrencia siempre se hace presente.

Por otro lado, las interrupciones de origen natural al no ser predeciblemente exactas pueden sorprender en cualquier momento. El territorio mexicano se encuentra afectado por la interacción de cinco placas tectónicas. En los límites entre placas, donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto de la otra, generándose grandes esfuerzos en el material que las constituye. Si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca, o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada (Gutiérrez et al, 2006).

Además, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) durante la temporada de ciclones tropicales del año 2020, en la Región Administrativa IV de la Organización Meteorológica Mundial, a la que pertenece México, indica que se generaron 52 ciclones tropicales, 21 en el Océano Pacífico Oriental y 31 en el Océano Atlántico (SMN, 2020).

Ya sea por interrupción natural o humana al ser interrumpido el sistema puede traer grandes afectaciones en cuestiones económicas. Trayendo con ello congestiones en el tráfico. La congestión del tráfico es un fenómeno global extenso que resulta de la alta densidad de población, el crecimiento de los vehículos de motor, su infraestructura y la proliferación de servicios de transporte compartido y de entrega (Reed- Kidd, 2019). Desde la perspectiva del tiempo de demora en el viaje, la congestión ocurre cuando el flujo normal del tráfico es interrumpido por una alta densidad de vehículos, lo que resulta en un exceso de tiempo de viaje.

El envejecimiento de la infraestructura de transporte físico, como las condiciones de carreteras o los puentes suelen ser considerados una de las causas inherentes de la congestión del tráfico. Sin embargo, la congestión también es en parte responsable de acelerar la degradación física de infraestructura de transporte y, en consecuencia, para reducir el rendimiento de la red de transporte. Aunque se han desarrollado varias estrategias de recuperación para mejorar el rendimiento de la red dañada, la mayoría de estas estrategias no son suficientes o incluso podrían no ser aplicables en condiciones de tráfico por carretera congestionado (Tanzina y Nita, 2020).

Para garantizar un sistema de transporte sostenible y resiliente, son necesarias acciones de mitigación multidisciplinarias para combatir las congestiones del tráfico. Durante muchos años, se han llevado a cabo múltiples intentos por parte del gobierno, los responsables políticos, los investigadores y los profesionales del sector público y privado para minimizar las pérdidas debidas a la congestión. Se observa que la supervisión adecuada del estado del tráfico es el primer paso para construir un sistema de gestión de control de tráfico eficaz.

Al hacerlo, los niveles de congestión se pueden cuantificar rápidamente y se pueden iniciar acciones preventivas antes del pico de las horas de congestión. La medición de la congestión probable también puede ser beneficiosa al planificar la gestión del tráfico durante eventos especiales.

La congestión en áreas urbanas o metropolitanas puede ocurrir debido a diversas razones, como exceso de demanda, señalización, incidentes, zonas de trabajo, relacionadas con el clima o eventos especiales. Dependiendo de varias causas fundamentales, en general, las congestiones del tráfico se pueden clasificar en dos categorías: (1) congestiones recurrentes y (2) congestiones no recurrentes (Falcocchio, 2015).

2.4.2 Congestion recurrentes

Las razones comunes de la congestión recurrente son:

- **Cuellos de botella y capacidad:** la causa más común de congestión se debe a bloqueos, como se muestra en la Figura 12. Los cuellos de botella generalmente ocurren durante las horas de flujo pico, donde la cantidad de carriles que convergen en una carretera, puente o túnel supera el número de carriles que tienen estas

instalaciones. (Laval y Daganzo, 2006). También puede ocurrir cuando la demanda excede la capacidad de una carretera. La capacidad de cualquier camino indica la cantidad máxima de tráfico que se puede manejar. La capacidad se puede determinar por la cantidad y el ancho de los carriles, la longitud de fusión en los intercambios y la alineación de las carreteras.



Figura 12. Cuello de botella provocado por incorporación de carriles laterales a centrales. (drivesmart,2019)

- **Infraestructura insuficiente:** la infraestructura insuficiente es una de las razones más importantes de la congestión, especialmente en áreas densamente pobladas. Debido a la mayor tasa de población, el número de vehículos también aumenta con ella. Cuando el número existente de infraestructura no ocupa este creciente número de coches, se produce una congestión (Wang et al, 2013).
- **Variación en el flujo de tráfico:** la variabilidad en las demandas de tráfico diarias da como resultado volúmenes más altos en algunos días en comparación con otros. Cuando estas demandas variables no coinciden con la capacidad fija, puede producirse un retraso (Falcocchio y Levinson, 2015).
- **Controladores de tráfico inadecuados:** las señales o los diseños de controladores de tráfico mal sincronizados, como semáforos, señales de alto, reducciones de velocidad o cruces de ferrocarril, pueden interrumpir el flujo de tráfico regular, lo que provoca congestión y fluctuaciones en el tiempo de viaje (Falcocchio y Levinson, 2015).

2.4.3 Congestion no recurrentes

Las congestiones no recurrentes generalmente ocurrieron debido a eventos impredecibles, como incidentes de tráfico, zonas de trabajo, clima u otras circunstancias particulares. Puede iniciar una nueva congestión en los períodos de menor actividad, así como también puede aumentar el retraso debido a la congestión recurrente. Algunos ejemplos comunes de congestión no recurrente son:

- **Incidentes / accidentes de tráfico:** la forma más común de incidentes son choques vehiculares, averías y escombros en los carriles de circulación. Estos eventos interrumpen el flujo normal del tráfico, generalmente al bloquear los carriles de circulación, lo que resulta en una reducción adicional de la capacidad (Robinson et al, 2018).
- **Zonas de trabajo:** Las zonas de trabajo se refieren a las actividades de construcción en la carretera mediante la realización de cambios físicos en el entorno de la carretera. Estos cambios conducen a una reducción en el número o ancho de carriles de circulación, "cambios" de carril, desvíos de carril, reducción o eliminación de arcenes y cierres temporales de carreteras.
- **Clima:** los cambios en las condiciones ambientales o el clima pueden afectar el flujo del tráfico y el comportamiento del conductor. Estos también pueden modificar los sistemas de control de tráfico, como las señales y los cruces ferroviarios, así como las condiciones de la carretera. Además, tanto la velocidad como el volumen del vehículo pueden verse afectados por ráfagas de viento, fuertes lluvias o nieve (en las zonas donde este tipo de precipitación se presenta).
- **Otros eventos especiales:** demanda variaciones del flujo de tráfico sobre un evento en particular que generalmente difieren del patrón de flujo habitual. Estos eventos incluyen eventos deportivos (día del juego), conciertos u otros eventos sociales. Un aumento repentino en la demanda de tráfico durante ocasiones especiales puede abrumar el sistema y crear congestión. (Tanzina y Nita, 2020)

2.4.4 Incidentes / accidentes de tráfico

Respecto a los incidentes/accidentes de tráfico, Cuevas et al. (2019) presentaron el anuario estadístico de accidentes en carreteras federales en México. Presentando en él la tabla XX la cual contiene la distribución de los saldos de percances por entidad federativa y el total nacional. Los valores reportados como total registrado corresponden a los saldos del archivo de las bases de datos de Hechos de tránsito (SG-PF, 2018) entregado por la PF una vez realizados los procesos de revisión y depuración. En la Tabla 5 se muestra el desglose del número de colisiones, percances con víctimas, número de personas fallecidas (registradas en el lugar del accidente) y lesionadas, daños materiales, número de vehículos involucrados; los daños materiales se transfirieron a dólares estadounidenses considerando una paridad de 19.23727 pesos por dólar accidentes (Banxico, 2019).

En los saldos absolutos destacan Veracruz (1,222), Guanajuato (671) y Nuevo León (621), que agrupan 2,514 colisiones que dejaron un saldo de 527 fallecidos y 1,829 lesionados. Un indicador que refleja la severidad de las colisiones es la relación entre el número víctimas (muertos y lesionados) y el número de percances con víctimas; en este rubro sobresalen, Nayarit, Estado de México y Michoacán.

Entidad	Colisiones	Colisiones con víctimas	Muertos en el sitio	Lesionados	Daños materiales (miles de dólares)	Nº de vehículos siniestrados
AGS.	212	129	39	195	778.68	373
B.C.	477	193	112	241	1,545.92	766
B.C.S.	196	108	59	149	613.26	285
CAMP.	193	59	48	80	778.92	283
COAH.	237	121	76	155	1,061.40	370
COL.	139	94	50	135	522.16	219
CHIS.	587	174	100	283	2,202.65	907
CHIH.	315	191	108	331	1,374.34	450
CDMX	76	43	27	76	415.11	164
DGO.	191	126	71	219	993.02	279
GTO.	671	364	167	555	3,498.75	1,210
GRO.	459	202	123	349	2,408.81	726
HGO.	427	143	57	231	2,246.00	720
JAL.	510	231	147	361	2,769.22	864
EDO.MEX	608	312	224	540	3,719.10	1,061
MICH.	464	167	111	297	2,790.62	690

MOR.	178	59	40	81	618.36	357
NAY.	275	115	88	219	1,812.89	454
N.L.	621	283	130	462	4,711.31	1,001
OAX.	279	113	59	195	1,029.41	487
PUE.	480	219	141	335	2,550.28	846
QRO.	381	108	48	135	2,116.42	722
Q.ROO	214	97	47	183	879.96	348
S.L.P.	460	251	146	364	2,273.27	770
SIN.	285	161	69	257	1,617.62	455
SON.	217	150	77	272	1,601.37	330
TAB.	556	95	55	151	1,756.29	842
TAMPS.	381	235	147	345	1,972.04	602
TLAX.	285	118	49	205	1,339.93	536
VER.	1,222	521	230	812	6,257.96	1,948
YUC.	179	95	48	144	703.84	284
ZAC.	462	240	101	404	2,045.60	696
Nacional	12,237	5,517	2,994	8,761	61,004.51	20,045

Tabla 5. Saldos por entidad federativa (Cuevas et al, 2019)

La Tabla A1 localizada en el apéndice muestra longitud, número de colisiones, fallecidos, lesionados y daños Materiales (en miles de dólares) de 2018, para cada ruta, así como sus índices de accidentalidad, mortalidad y morbilidad por cada 100 millones de veh-km. (indicador vehículo-kilómetro (veh-km) para la red carretera, el cual representa por un lado, la intensidad de uso de los vehículos en la infraestructura carretera). En la tabla mencionada las rutas están ordenadas conforme a su correspondiente número de ruta, apareciendo, en primera instancia, las de jurisdicción federal y después las estatales.

La Figura 13 muestra los saldos, por tipo de colisión, número de eventos, muertos y lesionados, del estado de Michoacán. Las cifras nacionales reflejan que la salida del camino sigue siendo el principal tipo de colisión, con el 23.3%, y el que concentra la mayor cantidad de muertos 22.8% y 21.5% de los lesionados. Las colisiones que involucran a usuarios vulnerables (atropellamiento, caída de pasajero, choque contra bicicleta, choque o caída de motocicleta) ocupan la quinta posición y, en algunas entidades como Colima y la CDMX, se mantiene como el de mayor frecuencia. Las gráficas de cada entidad se presentan jerarquizadas por el número de siniestros.

Como dato adicional se registraron 77 colisiones contra semoviente, de las cuales 33 fueron con víctimas dejando un saldo de 10 fallecidos en el lugar y 39 lesionados.

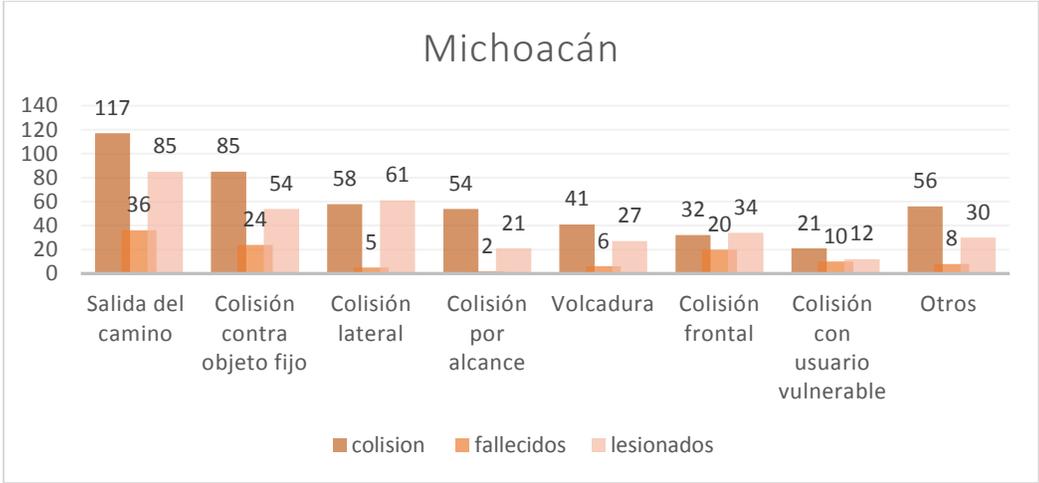


Figura 13. Distribución de percances y víctimas, por tipo de colisión en Michoacán (Cuevas et al, 2019)

Como en años anteriores, la base de datos desglosa varias causas asociadas con un mismo evento; es decir, adquiere un carácter multicausal; para 2018 se tiene registro de 15,848 circunstancias contribuyentes a 11,613 percances (ya que para 624 colisiones no se tiene información sobre los agentes desencadenantes).

La Figura 13 muestra los resultados del análisis de las causas dentro del estado de Michoacán; la gráfica muestra el desglose de aquellas más frecuentes, en cuanto al conductor, y agrupa las cifras para el resto de los factores, no obstante, en el desglose de cada uno aparece en un listado adyacente (Tabla 6).

A nivel nacional reportado respecto al factor humano, se registraron 10,951 causas, prevaleciendo la imprudencia o intención en 2,616 eventos; el camino como segundo lugar, con 2,335, seguido por los agentes naturales y el vehículo con 1,405 y 1,157 causas, respectivamente.

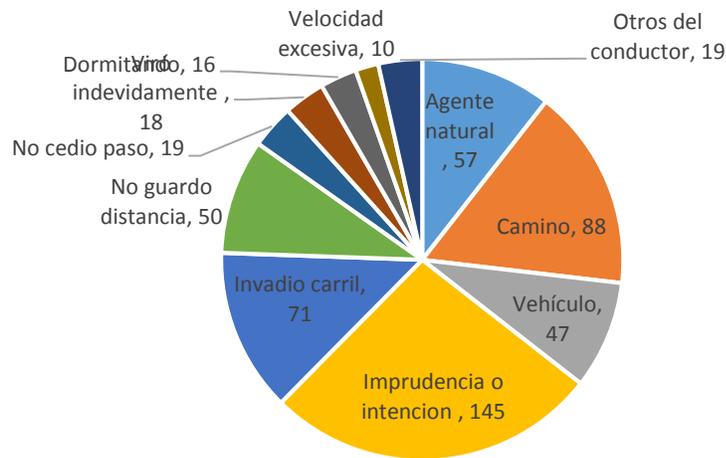


Figura 14. Distribución de causas que contribuyeron a la siniestralidad en el 2018 en Michoacán (Cuevas et al, 2019)

Causa		Total
Agente natural	Lluvia	38
	Otro agente Natural	15
	Humo	3
	Niebla	1
Camino	Mojado	40
	Resbaloso	24
	Objetos en él	13
	Irrupción de ganado	4
	Desperfecto	3
	Falta de señales	2
	Otro	2
Vehículo	Neumático	16
	Frenos	11
	Malas condiciones mecánicas	10
	Malas condiciones electromecánicas	3
	Ejes	2
	Motor	2
	Vehículo con exceso de dimensiones	1
	Dirección	1
	Suspensión	1
Otros del Conductor	Rebasó indebidamente	10
	Mal estacionado	6
	Deslumbramiento	2
	Bajo efecto de drogas	1

Tabla 6. Desglose de causas que contribuyeron a la siniestralidad en el 2018 en Michoacán. (Cuevas, 2019)

2.4.5 Clima

2.4.5.1 Fenómenos hidrometeorológicos

Existen varios tipos de afectaciones por fenómenos hidrometeorológicos, entre ellos sequía, temperatura extrema, inundaciones, desplazamiento de tierras, tormenta. La Figura 15 muestra la distribución aproximada asociada a dichos fenómenos.

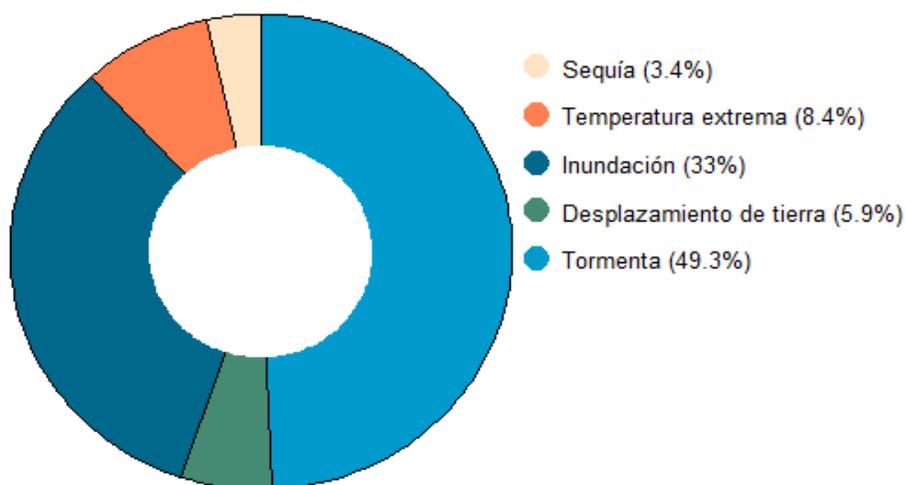


Figura 15. Proporción de desastres hidrometeorológicos de acuerdo a su tipo (Bravo, 2018)

Los ciclones tropicales son fenómenos naturales que generan la mayor parte del transporte de humedad del mar hacia el interior del territorio nacional. En diversas regiones del país, las lluvias ciclónicas representan la mayor parte de la precipitación pluvial anual. Los ciclones se clasifican de acuerdo con la velocidad de los vientos máximos sostenidos. Cuando los vientos son menores de 62 km/h se designan como depresiones tropicales (DT), cuando la velocidad se ubica dentro del rango de 63 km/h a 118 km/h se denominan tormentas tropicales (TT), y finalmente cuando es igual o mayor de 119 km/h se les conoce como huracanes (véase la Tabla 7). En este caso el área nubosa cubre una extensión entre los 500 y 900 km de diámetro, produciendo lluvias intensas. El ojo del huracán alcanza normalmente un diámetro que varía entre 24 y 40 km, sin embargo, puede llegar hasta cerca de 100 km. Los huracanes se clasifican por medio de la escala Saffir-Simpson (CONAGUA, 2016).

Categoría	Vientos máximos (km/h)	Marea de tormenta que normalmente ocasiona (m)	Características de los posibles daños materiales e inundaciones
H1	De 119 a 153	1.2 a 1.8	Árboles pequeños caídos; algunas inundaciones en carreteras costeras en sus zonas más bajas.
H2	De 154 a 177	1.8 a 2.5	Adicionalmente: Tejados, puertas y ventanas dañados; desprendimiento de árboles.
H3	De 178 a 208	2.5 a 4.0	Adicionalmente: Grietas en pequeñas construcciones; inundaciones en terrenos bajos y planos
H4	De 209 a 251	4.0 a 5.5	Adicionalmente: Desprendimiento de techos en viviendas; erosiones importantes en playas y cauces de ríos y arroyos. Daños inminentes en los servicios de agua potable y saneamiento.
H5	> 252	> 5.5	Adicionalmente: Daño muy severo y extenso en ventanas y puertas. Falla total de techos en muchas residencias y edificios industriales

Tabla 7. Clasificación de huracanes escala Saffir- Simpson (Conagua, 2016)

Por su ubicación geográfica México se ve vulnerable año con año ante fenómenos hidrometeorológicos, aproximadamente 25 huracanes al año afectan nuestro territorio.

En los últimos 60 años se han incrementado al doble los desastres hidrometeorológicos relacionados con el agua. La Figura 16 muestra los peores desastres hidrometeorológicos que afectaron el territorio mexicano en los últimos años, evaluados en los daños generados por su alto costo en millones de dólares, así como los decesos cuantificados. Sin embargo, se observa que no todos los sucesos plasmados en la figura han sido en años consecutivos, lo cual no quiere decir que en esos años no haya habido un evento significativo.

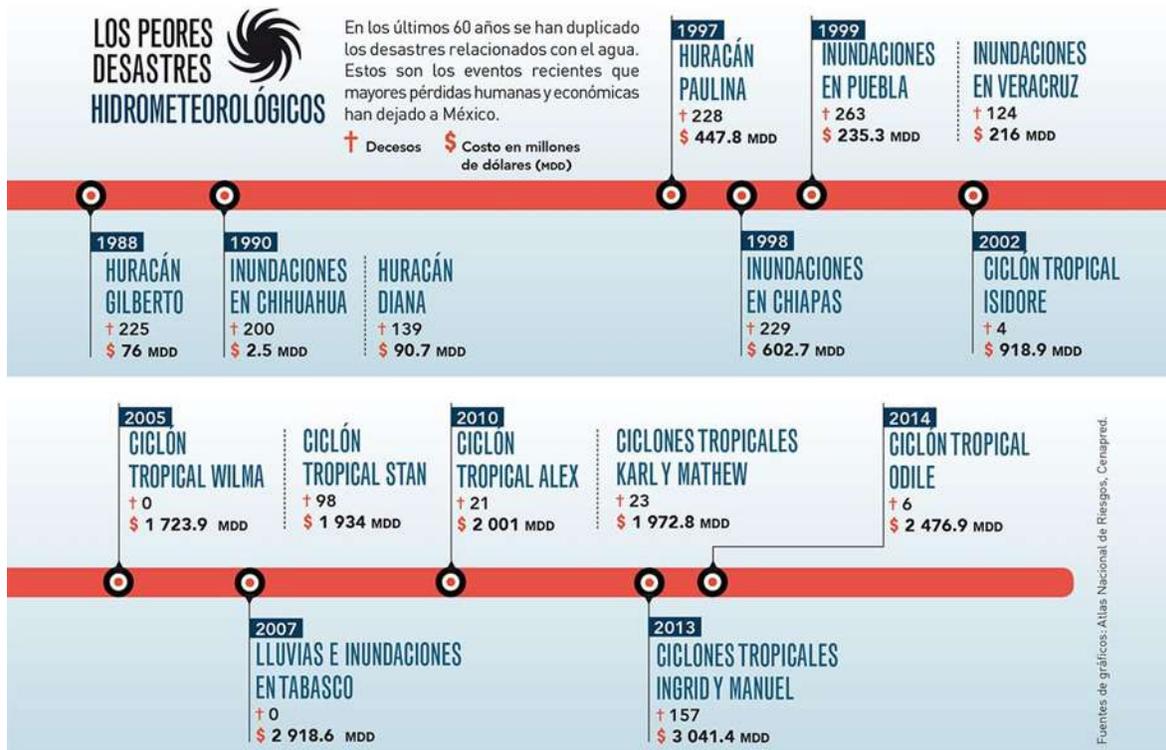


Figura 16. Peores desastres Hidrometeorológicos en los últimos 33 años (centro virtual de información del agua, 2017)

Durante la temporada de ciclones tropicales del año 2020, en la Región Administrativa IV de la Organización Meteorológica Mundial, a la que pertenece México, se generaron 52 ciclones tropicales, 21 en el Océano Pacífico Oriental y 31 en el Océano Atlántico.

Cuenca	Ciclones T	CTP	DT	TT	H	Hf	Hi
Océano Pacífico	21	0	4	13	4	1	3
Océano Atlántico	31	0	1	16	14	7	7
Total	52	0	5	29	18	8	10

Tabla 8. Resumen de ciclones tropicales de la temporada 2020 (SMN, 2021)

- CTP: Ciclón tropical potencial
- DT: Depresión tropical
- TT: Tormenta tropical
- TS: Tormenta subtropical
- TE: Tormenta extratropical
- Hf: Huracán fuerte
- Hi: Huracán intenso (categoría 3,4 o 5)

Del total de ciclones tropicales en el Océano Pacífico durante la temporada 2020 que fue de 21, incluidas las depresiones tropicales, 4 alcanzaron fuerza de huracán, 13 fueron tormentas tropicales y cuatro fueron depresiones tropicales; de los huracanes, tres fueron intensos, dado que alcanzaron categoría 4 en la escala Saffir-Simpson, ellos son en orden de aparición, “Douglas”, en julio, “Genevieve” en agosto y “Marie” en septiembre-octubre, todos con vientos máximos sostenidos de 215 km/h (Bravo, 2021).

En México, durante la temporada de ciclones tropicales 2020 en el Océano Pacífico, tres ciclones tocaron tierra o se acercaron a menos de 100 km de la costa o bien, se acercaron o ingresaron por alguna de sus fronteras; en orden cronológico fueron la tormenta tropical “Amanda”, el huracán “Genevieve” y la tormenta tropical “Hernan”. (Bravo, 2021)



Figura 17. Ciclones tropicales simultáneos del Océano Pacífico durante el mes de agosto de 2020

“Genevieve y Hernan” tuvieron influencia en el estado de Michoacán. El primero tuvo su máximo acercamiento fue el día 20 de agosto en la madrugada cuando se ubicó a 65 km al suroeste de Cabo San Lucas, B. C. S., con vientos máximos sostenidos de 130 km/h y rachas de 155 km/h como huracán de categoría 1 en la escala de huracanes Saffir-Simpson; “Hernan” aproximadamente a las 14:00 horas (tiempo del centro de México), tocó tierra como depresión tropical con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h a

4 km al sur-sureste de la localidad Los Frailes y a 11 km al sur de Cabo Pulmo, en la costa oriental del municipio Los Cabos, B. C. S.

Estados	16 Septiembre	17 Septiembre	18 Septiembre	19 Septiembre	20 Septiembre
Baja California Sur	-	-	-	280.0	29.2
Sinaloa	-	67.5	106.2	53.1	6.5
Nayarit	-	74.0	7.7	11.3	59.2
Jalisco	-	15.8	53.0	14.0	-
Colima	-	28.5	36.8	-	-
Michoacán	-	37.0	32.0	-	-
Guerrero	71.5	136.0	31.6	-	-
Oaxaca	64.1	70.8	-	-	-

Tabla 9. Reportes de lluvia máxima en 24 horas (mm) por estado durante el periodo de "Genevieve" (CONAGUA, 2021)

Estados	26 agosto	27 agosto	28 agosto	29 agosto
Guerrero	334.6	107.2	90.5	38.5
Michoacán	156.7	90.0	42.8	34.0
Colima	114.0	290.3	52.2	40.0
Jalisco	112.2	229.5	42.0	
Nayarit	258.6	-	36.5	30.8
Sinaloa	-	41.5	63.6	-
Sonora	-	-	31.0	44.8
Baja California Sur	-	-	-	29.0

Tabla 10. Reportes de lluvia máxima en 24 horas (mm) por estado durante el periodo de "Hernán" (CONAGUA, 2021)

Las Tabla 11 y 12 muestran los ciclones tropicales presenciados en el Pacífico y Atlántico, así como su periodo y categoría

No.	NOMBRE	ETAPA O CATEGORÍA	PERIODO	VIENTOS MÁXIMOS (Km)	
				SOSTENIDOS	RACHAS
1	DEPRESIÓN TROPICAL 1-E	DT	25-26 ABR	55	75
2	AMANDA (*) (+)	TT	30-31 MAY	65	85
3	BORIS	TT	24-27 JUN	65	85
4	DEPRESIÓN TROPICAL 4-E	DT	29-30 JUN	55	75
5	CRISTINA	TT	6- 12 JUL	110	130
6	DEPRESIÓN TROPICAL 6-E	DT	13-14 JUL	55	75
7	SIN NOMBRE (antes DT 7-E). (&)	TT (&)	19-21 JUL	65	85
8	DOUGLAS	H4	20-29 JUL	215	260
9	ELIDA	H2	8-12 AGO	155	195
10	DEPRESIÓN TROPICAL 10-E	TT	13-16 AGO	55	75
11	FAUSTO	TT	15-17 AGO	65	85
12	GENEVIEVE (*)	H4	16-19 AGO	215	260
13	HERNAN (*)	TT	26-28 AGO	75	95
14	ISELLE	TT	26-30 AGO	95	110

15	JULIO	TT	5-7 SEP	75	95
16	KARINA	TT	12-16 SEP	95	110
17	LOWELL	TT	20-25 SEP	85	100
18	MARIE	H4	29 SEP-6 OCT	215	260
19	NORBERT	TT	5-10 y 13-15 OCT	85	100
20	ODALYS	TT	3-4 NOV	65	85
21	POLO	TT	17-19 NOV	75	95

Tabla 11. Ciclones tropicales de la temporada 2020 en el Océano Pacífico (CONAGUA, 2021)

Nomenclatura de la Tabla 11.

CTP: CICLÓN TROPICAL POTENCIAL

DT: DEPRESIÓN TROPICAL TT: TORMENTA TROPICAL

TS: TORMENTA SUBTROPICAL TE: TORMENTA EXTRATROPICAL

H (1-5): HURACÁN Y CATEGORÍA EN LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON.

Hf: HURACÁN FUERTE

Hi: HURACÁN INTENSO

(*) Ciclones tropicales del Océano Pacífico Nororiental cuyo centro tocó tierra en México o se acercó a menos de 100 kilómetros de la costa.

(+) Ciclones tropicales del Océano Pacífico con impacto directo en algún otro país de la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial.

(#) Ciclones tropicales que cruzaron el meridiano de 140°W en el Pacífico Nororiental y salieron de la zona de responsabilidad de la región IV de la OMM.

(&) En el análisis de datos posterior a la temporada de ciclones tropicales 2020, el Centro Nacional de Huracanes en Miami, Florida, E.U.A., concluyó que la Depresión Tropical 10-E, alcanzó vientos máximos sostenidos de 65 km/h por lo que se le consideró como una tormenta tropical sin nombre (ver reseña de la tormenta tropical sin nombre, antes DT 7-E).

No.	NOMBRE	ETAPA O CATEGORÍA	PERIODO	VIENTOS MÁXIMOS (Km)	
				SOSTENIDOS	RACHAS
1	ARTHUR	TT	16-19 MAY	95	110
2	BERTHA (+)	TT	27-28 MAY	85	100
3	CRISTOBAL (*) (+)	TT	1-10 JUN	95	110
4	DOLLY	TT	22-24 JUN	75	95
5	EDOUARD	TT	4-6 JUL	65	85
6	FAY (+)	TT	9-11 JUL	95	110
7	GONZALO (+)	TT	21-25 JUL	100	120
8	HANNA (*) (+)	H1	22-26 JUL	150	185
9	ISAIAS (+)	H1	28 JUL-5 AGO	130	155

10	DEPRESIÓN TROPICAL 10	DT	31 JUL-1º AGO	55	75
11	JOSEPHINE	TT	11-16 AGO	75	95
12	KYLE	TT	14-16 AGO	85	100
13	LAURA (+)	H4	19-28 AGO	240	295
14	MARCO (+)	H1	20-25 AGO	120	150
15	OMAR	TT	31 AGO-5 SEP	65	85
16	NANA (*) (+)	H1	1-3 SEP	120	150
17	PAULETTE	H2	6-16 SEP	165	205
18	RENE	TT	7-14 SEP	85	100
19	SALLY (+)	H2	11-17 SEP	155	195
20	TEDDY	H4	12-20 SEP	220	270
21	VICKY	TT	14-17 SEP	85	100
22	BETA (*) (+)	TT	17-22 SEP	95	110
23	WILFRED	TT	18-20 SEP	65	85
24	ALPHA (+)	TST	18- SEP	85	100
25	GAMMA (*)	H1 (&)	2-6 OCT	120	150
26	DELTA (*) (+)	H4	4-10 OCT	230	275
27	ÉPSILON	H3	19-25 OCT	185	220
28	ZETA (*) (+)	H3 (&)	24-29 OCT	185	215
29	ETA (+)	H4	31 OCT-13 NOV	240	295
30	THETA	TT	9-15 NOV	110	140
31	IOTA (+)	H5	13-18 NOV	260	315

Tabla 12. Ciclones tropicales de la temporada 2020 en el Océano Atlántico (CONAGUA, 2021)

(*) Ciclones tropicales del Océano Atlántico cuyo centro tocó tierra o se acercó a menos de 100 km de la costa de México.

(+) Ciclones tropicales del Océano Atlántico con impacto directo en Estados Unidos u otro país de la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial.

(&) De acuerdo con el análisis posttemporada del Centro Nacional de Huracanes de Miami, Florida, E. U. A., “Gamma” alcanzó intensidad de huracán muy cerca de la costa de Quintana Roo con vientos máximos sostenidos de 120 km/h, fuerza con la que tocó tierra a 5 km al sur de Tulum, Q. Roo. Asimismo, el huracán “Zeta” alcanzó intensidad de huracán categoría 3 en la escala de huracanes Saffir-Simpson frente a la costa norte del Golfo de México, con vientos máximos sostenidos de 185 km/h, fuerza con la que tocó tierra en la costa sureste de Luisiana, E. U. A.

3. Planteamiento del problema

Dada una vía de transporte, ya sea de mayor o menor uso comercial, no pierde su importancia como medio de comunicación para los vecinos de la zona. Sin embargo, considerando que dicha vía se utiliza como medio de conexión comercial o laboral, una falla dentro del sistema podría significar pérdidas económicas importantes.

En ocasiones, el desconocimiento sobre el estado de conservación de la vía y cómo distribuir adecuadamente los recursos económicos para satisfacer las necesidades de los elementos ubicados dentro de la vía de comunicación, así como desconocer las áreas prioritarias, puede influir para tomar decisiones de mantenimiento incorrectas.

Con lo anterior, se necesita un enfoque sistemático para identificar las áreas de mayor prioridad a partir del estudio de la resiliencia del sistema. Determinando, de esta forma, las partes de los puentes de mayor prioridad para su reparación y mantenimiento considerando la distribución del tráfico asociado y los recursos distribuidos a lo largo de esta ruta.

4. Metodología

Se propone una metodología para evaluar la resiliencia en la reparación y mantenimiento de puentes a través de una ruta por la que pasan cada día un gran número de coches y servicios de transporte. En este enfoque, se consideran los pasos indicados en la Figura 18.

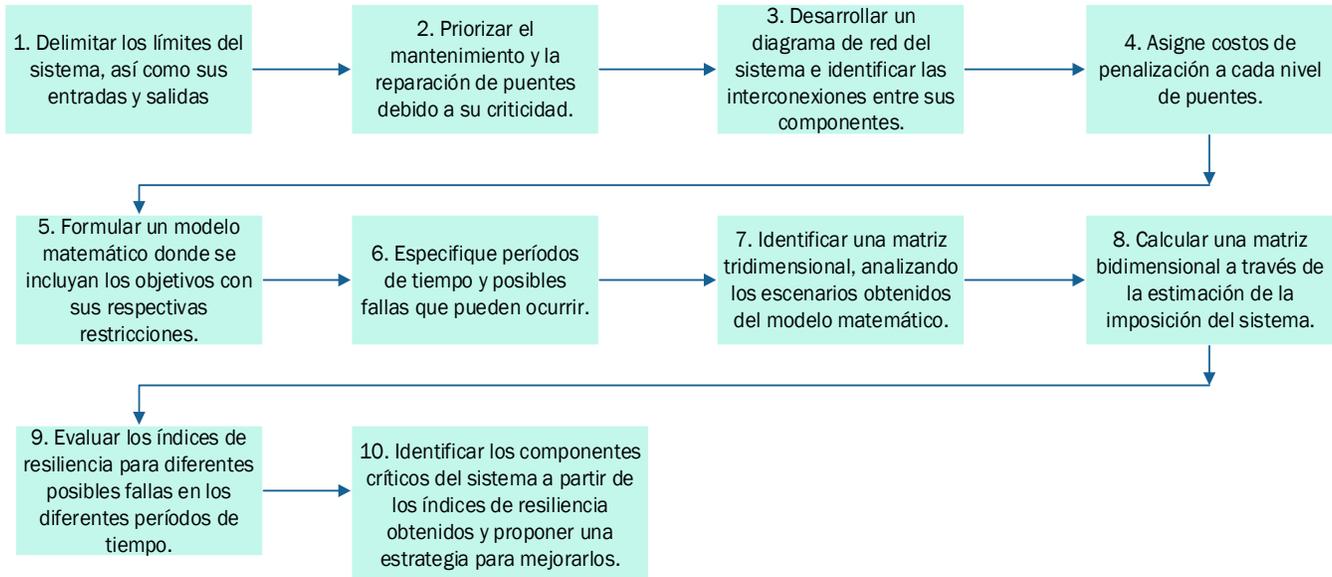


Figura 18. Representación esquemática de la metodología propuesta.

El objetivo es minimizar el costo total de reparación de puentes considerando las personas beneficiadas. Se propone un índice de resiliencia que considera los costos de reparación del puente, así como las personas beneficiadas por el mismo:

$$Re_{ft} = \frac{\left(\frac{ImpCost^{Max}}{BP^{Max}}\right) - \left(\frac{ImpCost_{ft}}{BP}\right)}{\left(\frac{ImpCost^{Max}}{BP^{Max}}\right) - \left(\frac{ImpCost^{Min}}{BP^{Min}}\right)} \quad (7)$$

Para reducir los términos en la ecuación. (7), la relación entre el costo impuesto (ImpCost) y las personas beneficiadas (BP) se consideró como un índice (Index).

$$Re_{ft} = \frac{Index^{Max} - Index_{ft}}{Index^{Max} - Index^{Min}} \quad (8)$$

El costo impuesto relacionado con cada posible falla en cada período se calcula de la siguiente manera:

$$ImpCost_{f,t} = \sum_s RepairCost_s AreaBridge_s \quad (9)$$

Donde, Tabla 16 es el costo de reparación del puente, el cual depende del nivel de deterioro que este tenga con base en la clasificación dada por SIPUMEX (Sistema Integral de Puentes Mexicanos) (Torres et al., 2010), y es el área total a reparar para cada nivel de puentes.

5. Caso de estudio

Se consideró un caso de estudio, que analiza los puentes existentes en la Carretera Federal 15 que cruza el estado de Michoacán, ubicado en el centro-oeste de México (Figura 19). SIPUMEX es una base de datos que contiene el inventario de puentes en las carreteras federales libres de peaje en México. Éste propone una escala de deterioro, que va del nivel cero al cinco, dependiendo del daño en cada puente. 0, sin daños; 1, pequeño daño, no es necesario repararlo; 2, algún daño, reparación necesaria, cuando surja la ocasión; 3, daño significativo, reparación necesaria pronto; 4, daños graves, reparación necesaria muy pronto; 5, daño extremo, riesgo de falla total. En el tramo analizado de dicha carretera existen 83 puentes, de los cuales 31 corresponden al nivel 2, 32 al nivel 3 y 20 al nivel 4 en la escala de deterioro propuesta por SIPUMEX. La vía está dividida en 8 tramos, en la Tabla 15 se muestran los tramos, así como el tráfico medio diario por tramo (TDPA) y el número de puentes por el nivel de deterioro en cada uno de los tramos.

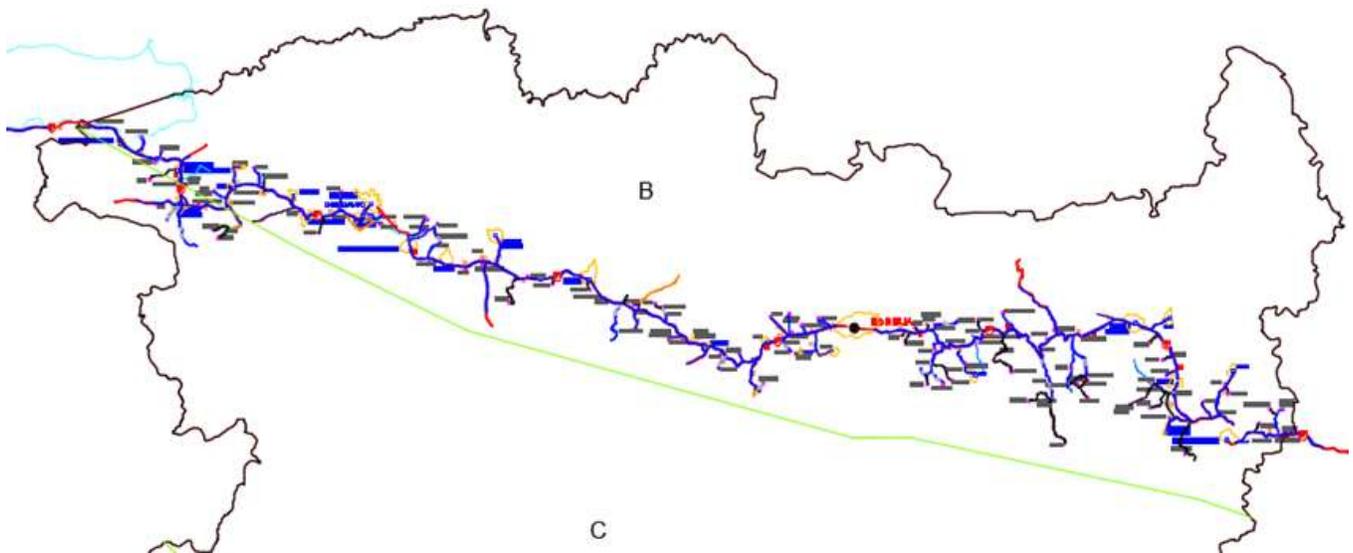


Figura 19. Límites del sistema para el estudio de caso analizado.

Parámetro	Y_i	categoría	W_i
Año de construcción	1	>1993	0.1154
	2	1985-1993	
	3	1977-1985	
	4	1959-1977	
	5	<1959	
Irregularidad en la subestructura	1	ninguna	0.1154
	3	altura pilas \neq 1.5 a 2 veces	
	5	altura pilas \neq 5 veces	
Irregularidad en la superestructura	1	esviaje $<10^\circ$	0.1154
	2	esviaje $10^\circ \leq \alpha < 30^\circ$	
	3	esviaje $30^\circ \leq \alpha < 45^\circ$	
	5	esviaje $> 45^\circ$	
Cimentación	1	Roca	0.1154
	3	Arcilla	
	5	Granular	
Importancia del puente	1	camino D	0.0962
	2	camino C	
	3	camino B	
	5	camino A	
Peligrosidad sísmica	1	zona A	0.1346
	2	zona B	
	3	zona C	
	5	zona D	
Junta de expansión	1	claros <1	0.0192
	2	claros entre 2 y 3	
	3	claros entre 4 y 5	
	5	claros > 5	
Estribos	1	aleros integrados, de concreto	0.0384
	2	aleros integrados, de mampostería	
	3	pilotes con cabezal, concreto	
	4	pilotes con cabezal, mampostería	
	5	tipo flotante (de mampostería o cimentados sobre terraplén)	
Pilas	1	pila sólida, concreto	0.0769
	2	pila sólida, mampostería	
	3	columna sola con cabezal	
	4	columna sola	
	5	otros	
Apoyos	1	apoyo deslizantes	0.0769
	2	neopreno	
	4	apoyo rodado	
	5	placa de acero	
Trabes	1	vano único	0.0769
	2	vigas monolítica	
	3	vigas continuas	
	4	vigas simplemente soportadas	
	5	vanos múltiples	
Estado de conservación	1	mantenimiento < 5 años	0.0577
	3	mantenimiento > 5 años	
	5	sin mantenimiento	

Tabla 13. Parámetros evaluados en los puentes de la carretera federal 15

Teóricamente cada dos años debe de tenerse una actualización sobre el estado del puente, o dependiendo de los resultados es que se recomienda una fecha próxima para su evaluación,

MICHOACAN/SCT	SIPUMEX	Fecha	Hoja
	Reporte de inspección principal	119.11.1	1
Puente: 15-002-00.0-0-23.0 PSV Zacapu			
Estado.....: Michoacán			
Carretera.....: Morelia - Guadalajara (Ruta 15)			
Kilometraje.....: 79.400			
Tramo.....: Comanja - Carapan			
Año de construcción.....: 2007			
Año de la última reconstrucción.....: 0			
Paso Superior / Inferior.....: S			
Dir. de knt. de la car.princip.....: 0			
Requisitos de inspección.....: 9 Otro			
Numero de secciones de inspección.....: 1			
Colección de datos: Fecha.....: 2013.09.27			
Iniciales.....: JRR			
Posición geográfica:			
Latitud: 019 gra 48.76 min Longitud: 101 gra 47.76 min Altitud: 2005 m			
Geometría: Número de claros.....: 1			
Longitud de claro mín... (m): 20.0			
Longitud de claro máx... (m): 20.0			
Longitud total..... (m): 21.3			
Ancho total..... (m): 15.1			
Ancho del camellón..... (m): 0.0			
Ancho de la banq. iz.... (m): 0.0			
Ancho de la banq. de.... (m): 0.0			
Ancho de la calzada.... (m): 13.5			
Ancho entre bordillos... (m): 14.5			
Ancho del acceso..... (m): 14.3			
Area..... (m2): 321			
Puente en curva..... (S/N): N			
Esviajamiento..... (gra): 0			
Superestructura, tipo principal:			
Diseño tipo.....: S			
Diseño de la sección transversal.....: 14 Losa/Viga, 4 ó más vigas			
Diseño de la elevación.....: 10 Simpl. apoyado, secc. const.			
Material.....: 31 Concr. presforz., prefabricado			
Superestructura, tipo secundario:			
Diseño tipo.....: N			
Diseño de la sección transversal.....: 91 No aplicable			
Diseño de la elevación.....: 91 No aplicable			
Material.....: 91 No aplicable			

Figura 20. Ejemplo de Información de base de datos SIPUMEX

MICHOACAN/SCT	SIPUMEX	Fecha	Hoja
Reporte de inspección principal		119.11.1	2
Puente: 15-002-00.0-0-23.0 PSV Zacapu			
Subestructura:			
Estribos: Tipo	10	Estribo con aleros integrados	
Material.....	50	Tierra armada	
Tipo de cimentación.....	10	Cimentación directa	
Pilas....: Tipo.....	91	No aplicable	
Material.....	91	No aplicable	
Tipo de cimentación.....	91	No aplicable	
Detalles:			
Tipo de parapeto.....	21	Concreto sólido, pasam. acero	
Parapeto inclinado.....	N		
Tipo de superficie de desgaste.....	10	Asfalto	
Tipo de juntas de expansión.....	51	Junta de cartón asfaltado	
Tipo de apoyos fijos sobre soportes..:	30	Placas de neopreno	
Tipo de apoyos móviles sobre soport.:	30	Placas de neopreno	
Tipo de apoyos fijos en trabes.....:	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en trabes.....:	91	No aplicable	
Carga de diseño.....:	T3-S2-R4		
Cl. de distrib. de carga..:	2	Distribución en 1 dirección	
Obstáculo que cruza:			
Tipo de paso.....:	12	Otra carretera (no SCT)	
Ident. de la carretera..:		Kmt...:	
Nombre de la carretera..:			
Espacio libre:			
Sobre el puente.....(m):	I:	IM:	DM: D:
Bajo el puente.....(m):	I: 4.80	IM: 4.50	DM: 4.50 D: 5.00
Propietario.....:	300	MUNICIPIO	
Cooperador.....:	15	MICHOACAN	
Resp. de la inspec.....:	15	MICHOACAN	
Proyectista.....:	0	DESCONOCIDO	
Observaciones:			
Puente construido por el Municipio de Zacapu. El Municipio nombro al puente Paso a Desnivel Lic. Javier García Cervantes.			
Superestructura con 6 trabes de concreto presforsado. Red Básica.			

Figura 21. Continuación de Información Base de datos SIPUMEX

Al evaluar los datos incluidos en el inventario de puentes proporcionado por la SCT (Figuras 20 y 21), se obtuvo una calificación teórica del estado de cada puente ubicado en la Carretera Federal 15. La Tabla 14 ejemplifica la evaluación realizada.

Puente	Carretera	Tramo	Tipo de camino	Kilometraje	Año de Construcción	Año de últ. reconstrucción	Posición Geográfica		Calf. SIPUMEX T.
			A,B,C,D,E				Latitud	Longitud	
PIV LAS DIETAS	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	A	71.100	2005	0	19°26.35'	100°11.38'	2
PSV EL SALTO	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	A	75.400	2005	0	19°26.57'	100°13.22'	3
PIV entr. ZITACUARO	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	85.900	2005	0	19°27.05'	100°17.1'	2
Peatonal Tec Zitacuaro	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Tuxpán	B	91.150	2007	0	19°26.90'	100°20.50'	2
Peatonal central I	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Tuxpán(Lib. Zita)	B	0.100	2007	0	19°26.80'	100°20.40'	2
Peatonal central II	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Tuxpán(Lib. Zita)	B	1.100	2007	0	19°26.70'	100°20.30'	2
Peatonal Zitacuaro	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	97.979	1997	0	19°26.70'	100°20.20'	2
San Juan el viejo	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	99.660	1938	2011	19°27.51'	100°20.67'	3
Peatonal San Felipe	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	105.000	2012	0	19°14.49'	100°32.57'	2
San Felipe	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	105.600	1938	1994	19°16'	101°56.00'	4
Peatonal el Malacate	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	120.750	2014	0	19°32.46'	100°28.51'	2
Peatonal Tuxpan I	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	122.200	2007	0	19°34.22'	100°27.91'	2
Peatonal Tuxpan II	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	123.500	2007	0	19°34.22'	100°27.93'	2
Tuxpan	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	124.600	1938	2010	19°34.22'	100°27.97'	3
Turundeo	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	132.220	1938	2008	19°38.14'	100°28.84'	3
San Lorenzo	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	136.245	1938	1980	19°39.59'	100°32.22'	4
Peatonal Cd. Hidalgo I	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	141.000	2009	0	19°41.75'	100°35.10'	2
La Arena	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	141.680	1938	2004	19°41.08'	100°32.73'	3
Peatonal Cd. Hidalgo II	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	144.800	2006	0	19°41.50'	100°34.30'	2
Arroyo Zarco	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	148.700	1938	2006	19°41.86'	100°36.51'	3
Ramal San Lucas	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	150.560	1938	1978	19°41.36'	100°37.51'	4
Cruz de Caminos	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	157.050	1938	1978	19°39.84'	100°40.95'	4
La Venta	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-Entr.Huajúbaro	B	159.440	1938	1978	19°40.11'	100°42.13'	4
Arroyo Largo	Toluca - Morelia	Entr.Huajúbaro-Morelia	B	170.150	1940	0	19°39.05'	100°45.94'	4
Parque Nacional Morelos	Toluca - Morelia	Entr.Huajúbaro-Morelia	B	220.420	1940	1979	19°40.02'	101°00.37'	4
Irapeo	Toluca - Morelia	Entr.Huajúbaro-Morelia	B	226.700	1940	2001	19°41.22'	101°2.55'	3
PIV tres Marias	Toluca - Morelia	Entr.Huajúbaro-Morelia	B	237.750	2004	0	19°41.24'	101°2.58'	3

Tabla 14.Tabla ejemplo de la Evaluación de puentes Carretera Federal 15 (completa apéndice)

Las calificaciones teóricas obtenidas se concentran en 2 (algún daño, reparación necesaria cuando presente la ocasión), 3 (Daño significativo, reparación necesaria muy pronto) y 4 (Daño extremo, fallo total o riesgo de falla total del componente).



Figura 22. Calificación SIPUMEX obtenida en el análisis a puentes de la Carretera Federal 15

De acuerdo con la Figura 22 se tiene que el 39% de los puentes evaluados obtuvieron una calificación teórica de 4, por lo que se tendría que considerar un pronto mantenimiento y necesario. Analizando los datos del inventario de puentes se obtiene la Figura 23, en ella se muestra que el 40% son puentes construidos antes de 1959.

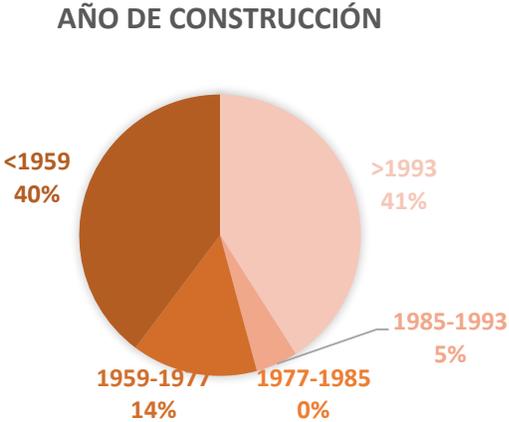


Figura 23. Año de Construcción de puentes en la Carretera Federal 15

Algunos de ellos datan de 1938,1940 y 1945. Hasta ochenta y dos años desde su construcción siguen en servicio hoy en día, algunos de ellos han tenido alguna reconstrucción o modificación de acuerdo a las necesidades y modernización de la zona en la que se encuentran. Llama la atención que, de ochenta y tres puentes evaluados, el 48% no registran una reconstrucción o “mantenimiento” en el inventario de puentes proporcionado por la SCT como se muestra en la Figura 24. El 39% ha tenido un mantenimiento, pero este se registra antes del año 2000 y solo el 13% tiene un mantenimiento “reciente” posterior al año 2000.



Figura 24. Porcentaje de puentes que han recibido mantenimiento en el caso de estudio.

Sección	TDPA	Superficie de puentes reparados según clasificación SIPUMEX (m2)		
		2	3	4
Lím. Mex./Mich.-Entr. Huajúbaro	28,618	14,931	7,465	6,221
Entr. Huajúbaro-Morelia	891	0	446	446
Morelia-Quiroga	30,418	21,293	3,042	6,084
Quiroga-Comanja	4,571	0	2,286	2,286
Comanja-Carapan	13,040	8,693	4,347	0
Carapan-Zamora	45,314	6,473	25,894	12,947
Zamora-Jiquilpan	24,906	0	11,321	13,585
Jiquilpan-Lím.Mich./Jal.	24,215	3,725	20,490	0

Tabla 15. Área total y personas beneficiadas por sección

Escenario	Sección	Gente beneficiada	Costo (\$US)
A	Lím. Mex./Mich.-Entr. Huajumbaro	28,618	86,786,861
B	Entr. Huajumbaro-Morelia	891	11,606,343
C	Morelia-Quiroga	30,418	44,836,849
D	Quiroga-Comanja	4,571	5,869,114
E	Comanja-Carapan	13,040	5,580,310
F	Carapan-Zamora	45,314	20,429,128
G	Zamora-Jiquilpan	24,906	61,016,866
H	Jiquilpan-Lim.Mich./Jal.	24,215	44,533,671
I	TODOS	171,973	280,659,143

Tabla 16. Valores de la curva de Pareto.

6. Resultados

Para resolver el problema abordado, se construyó la curva de Pareto de la Figura 25, donde cada escenario representa daño a un tramo de la Carretera Federal. Cada escenario representa el costo total de reparar esa sección en comparación con las personas que se beneficiarían de ella. La Tabla 16 muestra que el escenario I (no en la curva de Pareto, resumen de todos los escenarios), donde se reparan todos los puentes de todos los tramos, tiene un costo de \$ US 280.659.143 y se benefician 171.973 personas. Por otro lado, al analizar los tramos individualmente, se observa que el escenario E (Comanja-Carapan) es el que representa un menor costo de reparación \$ US 5.580.310 y 13.040 personas obtienen un beneficio, mientras que el escenario F (Carapan-Zamora) es aquél donde se beneficia a un mayor número de personas (45,314) por \$ US 20,429,128.

Posteriormente, se analizó la resiliencia de los escenarios mencionados mediante las ecuaciones 7-9. Se especificaron doce periodos de tiempo, cada uno correspondiente a un mes del año, y estos fueron identificados como posibles fallas, que requirieron mantenimiento previo, accidentes automovilísticos, y por un fenómeno natural (lluvia intensa, terremoto, etc.).

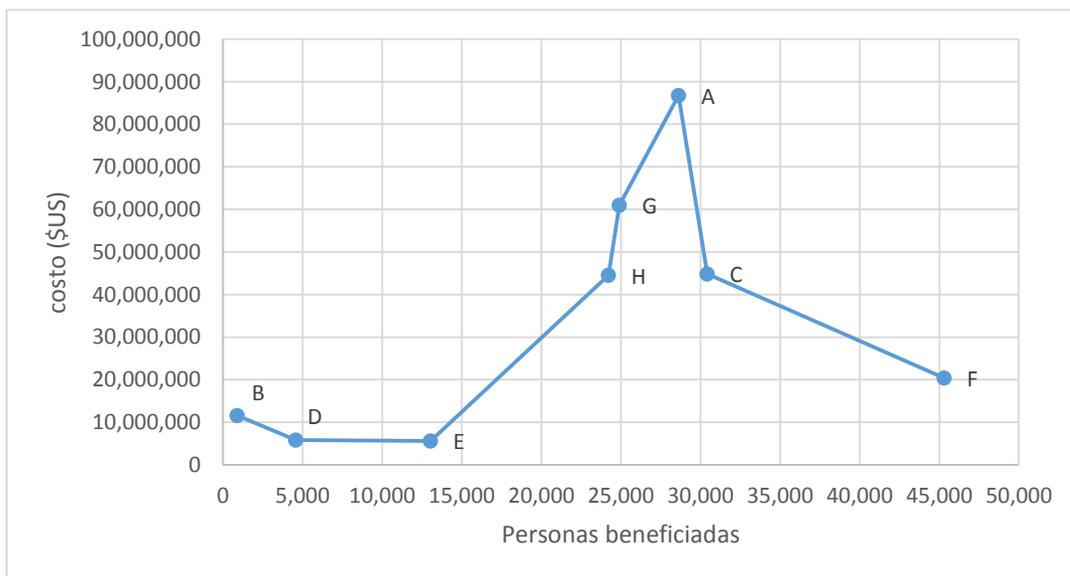


Figura 25. Curva de Pareto para el estudio de caso analizado.

Posteriormente, se identificó la matriz tridimensional (Figura 26, Figura 27 y Figura 28) para cada uno de los escenarios seleccionados, donde se consideran los períodos de tiempo, posibles fallas y el área de puentes existentes según su nivel de deterioro. Utilizando los costos de penalización (Tabla 17) y la probabilidad (Tabla 18) de cada posible falla (Cuevas-Colunga et al., 2019), se calculó una matriz bidimensional para estimar los costos impuestos para cada modo de falla y cada período de tiempo (Tablas 19 a 21). Las Figuras 29, 30 y 31 muestran los costos impuestos para los escenarios seleccionados de forma gráfica. Se puede notar un mayor costo en caso de accidente automovilístico diferente al resto de modos de falla, esto se debe a la mayor incidencia que presenta este tipo de falla.

Según Cuevas-Colunga et al. (2019), en la ruta estudiada, el 73% de los accidentes viales son causados por daños al vehículo o descuidos del conductor (imprudencia, invasión de carril, no mantener distancia, no ceder, exceso de velocidad, entre otros). El 16% se debe a la falta de reparación de carreteras y el 11% a agentes naturales (lluvia, niebla, humo). Asimismo, la mayor cantidad de accidentes se reportan entre febrero y mayo, aquellos en los que existe una mayor presencia de los agentes naturales mencionados.

Una vez calculados los costos impuestos, se dividió cada uno de ellos en función de las personas que se beneficiarían de la reparación de los respectivos puentes en cada tramo (Tablas 22 a 24).

Nivel 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nivel 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nivel 3	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Nivel 2	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366
	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366
	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366	366
Nivel 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nivel 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
	Período de tiempo												
													Agentes Naturales
													Daño previo
													Accidente autom.

Figura 26. Matriz tridimensional para el escenario E (Costo mínimo).

Nivel 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nivel 4	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
Nivel 3	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697
	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697
	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697	697
Nivel 2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Nivel 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nivel 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
	Período de tiempo												
													Agentes Naturales
													Daño previo
													Accidente autom.

Figura 27. Matriz tridimensional para el escenario F (Gente máxima beneficiada)

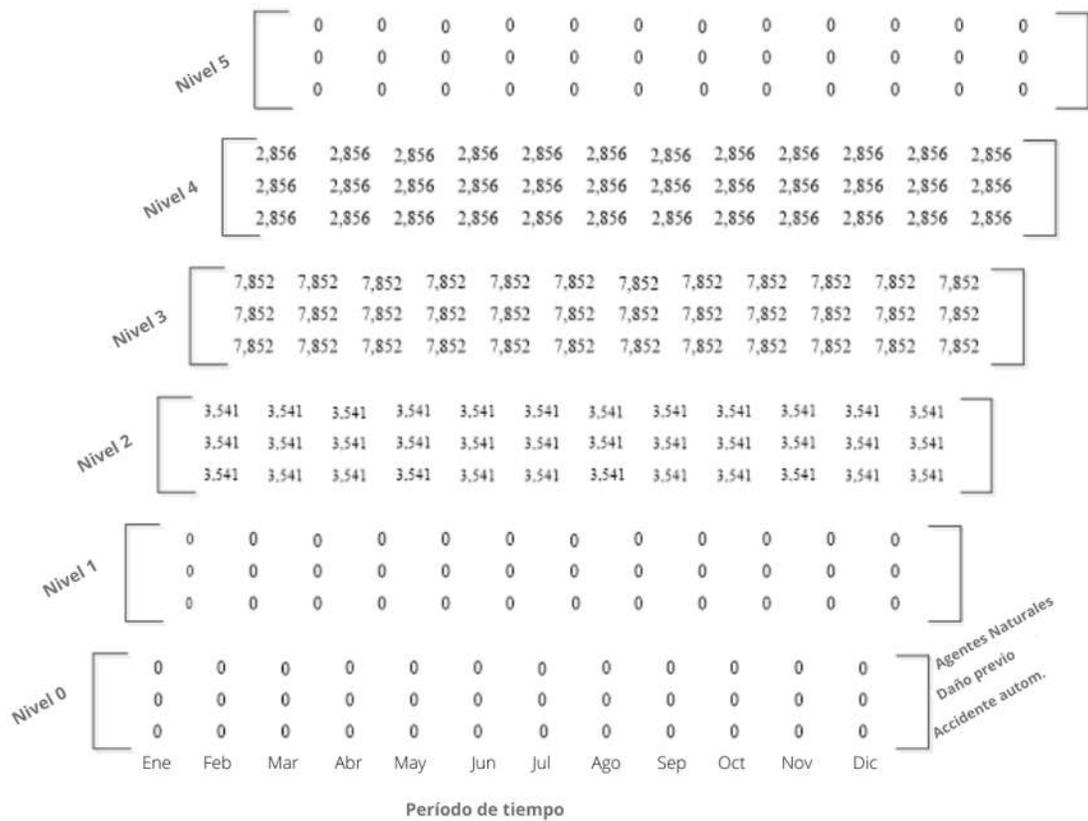


Figura 28. Matriz tridimensional para el escenario I (Todas las secciones reparadas)

Nivel del Puente	Costo de penalización (\$US/m²)
0	0
1	8,963
2	12,614
3	19,965
4	29,827
5	900,012

Tabla 17. Costes de penalización según nivel de puente

Modo de falla	Probabilidad (%)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	0.69	1.00	1.05	0.98	0.98	0.91	0.94	0.94	0.50	0.84	0.94	0.82
Daño previo	1.05	1.54	1.61	1.51	1.51	1.40	1.44	1.44	0.77	1.30	1.44	1.26
Accidente autom.	4.73	6.93	7.25	6.78	6.78	6.30	6.46	6.46	3.47	5.83	6.46	5.67

Tabla 18. Probabilidades de modo de falla durante un período de tiempo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Agentes Naturales	38,271	56,075	58,619	54,833	54,833	50,988
Daño previo	58,814	86,176	90,085	84,267	84,267	78,359
Accidente autom	263,961	386,762	404,305	378,194	378,194	351,676
	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	52,290	52,290	28,038	47,144	52,290	45,842
Daño previo	80,358	80,358	43,088	72,450	80,358	70,450
Accidente autom	360,651	360,651	193,381	325,157	360,651	316,182

Tabla 19. Costos impuestos para el escenario E

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Agentes Naturales	140,107	205,288	214,600	200,741	200,741	186,665
Daño previo	215,315	315,485	329,795	308,497	308,497	286,865
Accidente autom	966,342	1,415,908	1,480,131	1,384,543	1,384,543	1,287,460
	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	191,429	191,429	102,644	172,589	191,429	167,825
Daño previo	294,187	294,187	157,743	265,234	294,187	257,913
Accidente autom	1,320,319	1,320,319	707,954	1,190,378	1,320,319	1,157,519

Tabla 20. Costos impuestos para el escenario F

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Agentes Naturales	1,924,817	2,820,288	2,948,212	2,757,813	2,757,813	2,564,439
Daño previo	2,958,044	4,334,197	4,530,790	4,238,186	4,238,186	3,941,010
Accidente autom	13,275,786	19,452,002	20,334,319	19,021,104	19,021,104	17,687,369
	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	2,629,888	2,629,888	1,410,144	2,371,065	2,629,888	2,305,615
Daño previo	4,041,593	4,041,593	2,167,098	3,643,834	4,041,593	3,543,252
Accidente autom	18,138,787	18,138,787	9,726,001	16,353,635	18,138,787	15,902,217

Tabla 21. Costos impuestos para el escenario I.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	2.93	4.30	4.50	4.21	4.21	3.91	4.01	4.01	2.15	3.62	4.01	3.52
Daño previo	4.51	6.61	6.91	6.46	6.46	6.01	6.16	6.16	3.30	5.56	6.16	5.40
Accidente autom	20.24	29.66	31.00	29.00	29.00	26.97	27.66	27.66	14.83	24.94	27.66	24.25

Tabla 22. Relación entre costo y personas beneficiadas para el escenario E

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	3.09	4.53	4.74	4.43	4.43	4.12	4.22	4.22	2.27	3.81	4.22	3.70
Daño previo	4.75	6.96	7.28	6.81	6.81	6.33	6.49	6.49	3.48	5.85	6.49	5.69
Accidente autom	21.33	31.25	32.66	30.55	30.55	28.41	29.14	29.14	15.62	26.27	29.14	25.54

Tabla 23. Relación entre costo y personas beneficiadas para el escenario F

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	11.19	16.40	17.14	16.04	16.04	14.91	15.29	15.29	8.20	13.79	15.29	13.41
Daño previo	17.20	25.20	26.35	24.64	24.64	22.92	23.50	23.50	12.60	21.19	23.50	20.60
Accidente autom	77.20	113.11	118.24	110.61	110.61	102.85	105.47	105.47	56.56	95.09	105.47	92.47

Tabla 24. Relación entre costo y personas beneficiadas para el escenario I

Así como en las Figuras 29, 30 y 31, y en las Tablas 22, 23 y 24, se muestra que la relación entre costos y beneficios a las personas es mayor en caso de accidente automovilístico que en los otros modos de falla, ya que si la reparación de un puente se presenta en un lugar donde la incidencia de un accidente automovilístico es mayor, cuanto mayor es el número de personas beneficiadas, mediante la reparación de esos tramos y buscando reducir el número de accidentes. Finalmente, se identifica la relación máxima para calcular la resiliencia en cada uno de los puntos (Tablas 25 a 27) según la Ecuación 8. El cálculo de la resiliencia permite identificar aquellos aspectos a los que se debe dar más importancia. En el caso del escenario E (costo mínimo), se puede observar que de febrero a mayo existen menores índices de resiliencia, por lo que es importante tomar medidas preventivas y reparar los daños ocasionados en estas fechas para reducir costos de reparación y accidentes.

Del mismo modo, para el escenario F (máximo de personas beneficiadas), los índices de resiliencia más bajos se encuentran ante un posible deterioro por un accidente automovilístico. Valores notablemente similares se presentan a lo largo del año, excepto enero y septiembre, por lo que si queremos incrementar el número de personas beneficiadas que hacen uso de puentes, es recomendable realizar las reparaciones necesarias durante todo el año.

Por otro lado, en el escenario I, aquel en el que se reparan todos los puentes de todos los tramos, podemos observar en caso de accidente automovilístico, valores de resiliencia

extremadamente bajos, por lo que la relación entre el costo de reparación y las personas beneficiadas por él no es particularmente buena.

Sin embargo, para ambos escenarios E y F, se presentan buenos índices de resiliencia, lo que significa que la relación costo-beneficio es buena para considerar la reparación de todos los puentes en estos dos tramos.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	0.975	0.964	0.962	0.964	0.964	0.967	0.966	0.966	0.982	0.969	0.966	0.970
Daño previo	0.962	0.944	0.942	0.945	0.945	0.949	0.948	0.948	0.972	0.953	0.948	0.954
Accidente autom	0.829	0.749	0.738	0.755	0.755	0.772	0.766	0.766	0.875	0.789	0.766	0.795

Tabla 25. Índices de resiliencia para el escenario E

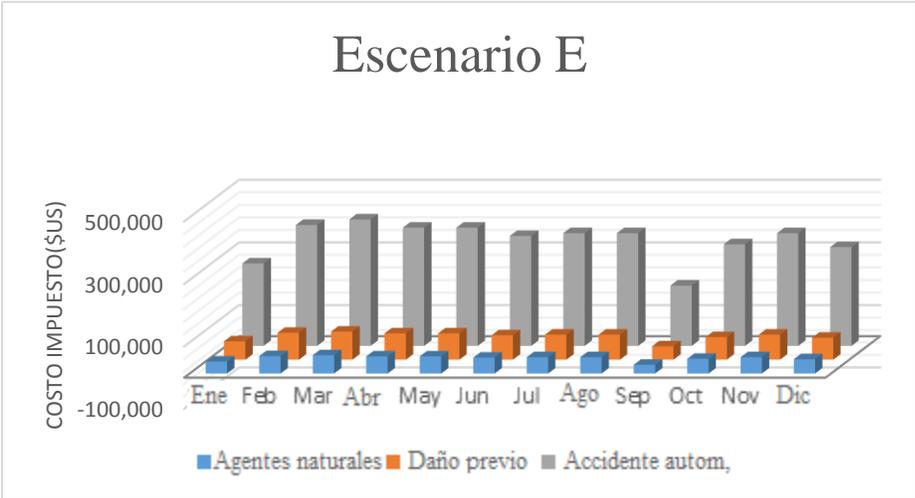


Figura 29. Costos impuestos para el escenario E

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	0.974	0.962	0.960	0.963	0.963	0.965	0.964	0.964	0.981	0.968	0.964	0.969
Daño previo	0.960	0.941	0.938	0.942	0.942	0.946	0.945	0.945	0.971	0.950	0.945	0.952
Accidente autom	0.820	0.736	0.724	0.742	0.742	0.760	0.754	0.754	0.868	0.778	0.754	0.784

Tabla 26. Índices de resiliencia para el escenario F

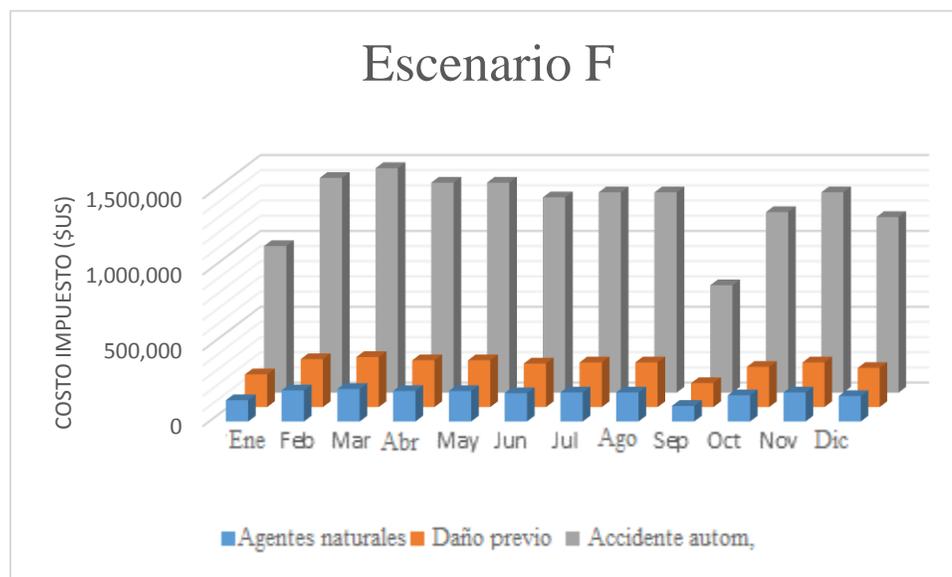


Figura 30. Costos impuestos para el escenario F

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Agentes Naturales	0.905	0.861	0.855	0.864	0.864	0.874	0.871	0.871	0.931	0.883	0.871	0.887
Daño previo	0.855	0.787	0.777	0.792	0.792	0.806	0.801	0.801	0.893	0.821	0.801	0.826
Accidente autom	0.347	0.043	0.000	0.065	0.065	0.130	0.108	0.108	0.522	0.196	0.108	0.218

Tabla 27. Índices de resiliencia para el escenario I

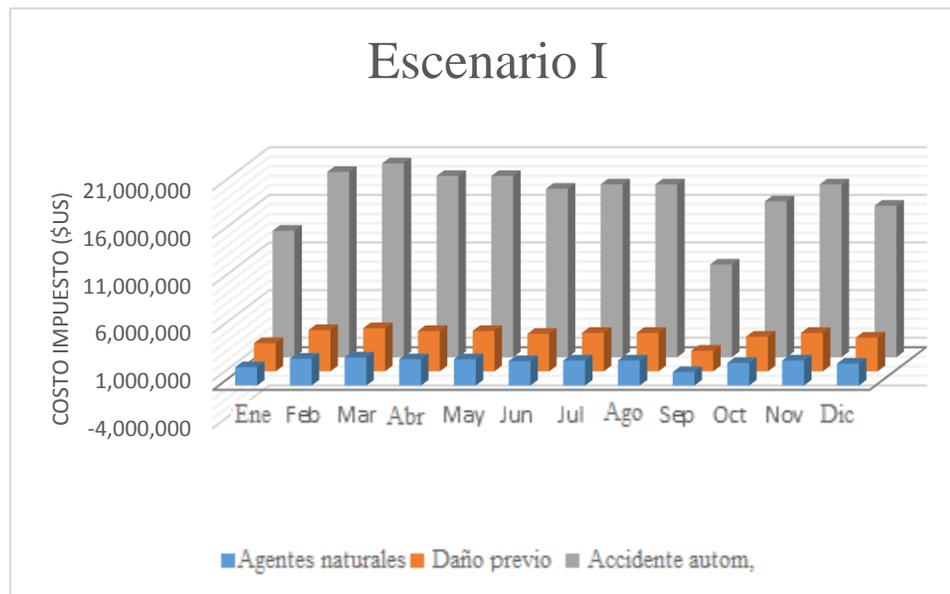


Figura 31. Costos impuestos para el escenario I

7. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una metodología para un nuevo enfoque de evaluación de la resiliencia en las rutas de transporte por carretera. Se ha analizado una ruta específica como caso de estudio para probar esta metodología. Se analizó una ruta de carretera federal, denominada "corredor comercial", que atraviesa siete estados de México, llega a Estados Unidos y termina en Canadá. Sin embargo, solo se tomó en cuenta el tramo correspondiente a Michoacán. El tramo de la carretera se dividió en ocho tramos de los cuales se evaluaron todos los puentes ubicados en cada tramo correspondiente. De esta forma, se estimó qué puentes según su estado de conservación y la cantidad de personas beneficiadas eran prioritarios para su atención.

En los tres escenarios estudiados; El escenario E (Comanja-Carapan), que representa un costo mínimo, se identificó como aquel donde los índices de resiliencia son menores de febrero a mayo. Esto significa que, en ese período, el sistema podría verse afectado al ser interrumpido por los daños ocasionados. Por ello, se recomienda llevar a cabo medidas preventivas para atender los daños ocasionados en ese período para reducir los costos de reparación y disminuir los accidentes.

Asimismo, en el escenario F (Carapan-Zamora), identificado como el que más beneficia a las personas, se observan índices de resiliencia bajos en términos de deterioro por accidentes. Los valores son notablemente similares durante todo el año, excepto en enero y septiembre. Por tanto, es necesario realizar reparaciones durante todo el año para reducir la siniestralidad vial.

En referencia al escenario I, que es aquel en el que se reparan todos los puentes de la carretera federal 15, presenta índices de resiliencia extremadamente bajos en caso de accidentes. Por lo tanto, la relación entre el costo de reparación y las personas beneficiadas no es particularmente buena.

Sin embargo, los escenarios E y F presentan buenos índices de resiliencia, lo que indica que el costo-beneficio es bueno, por lo que se puede sugerir reparar todos los puentes en estos dos tramos.

8. Bibliografía

1. Afrin, T., Yodo, N. (2020). A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability*, 12(11), 4660.
2. Alexander, D.E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: An etymological journey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2707–2716.
3. Aziz, T., Lin, Waseem, M., Liu, S. (2021). Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(3), e12704.
4. Cedengo, M., Casanova, W., Mendoza, A. (2020) Clasificación de las carreteras según su riesgo de siniestralidad vial considerando la interacción de sus elementos físicos, geométricos y operacionales. *Publicación Técnica No. 607*. ISSN 0188-7297
5. Chen, X., Su, W., Kavousi-Fard, A., Skowronska, A.G, Mourelatos, ZP, Hu, Z. (2021). Resilient microgrid system design for disaster impact mitigation. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 6(1-2), 56-72.
6. Cuevas-Colunga et al., 2019. Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales 2018. Documento técnico número 77. Sanfandila Qro. 2019
7. Dinh, L.T., Pasman, H., Gao, X., Mannan, M.S. (2012). Resilience engineering of industrial processes: principles and contributing factors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(2), 233-241.
8. Dui, H., Zheng, X., Wu, S. (2021). Resilience analysis of maritime transportation systems based on importance measures. *Reliability Engineering and System Safety*, 209, 107461.
9. Emenike, S.N., Falcone, G. (2020). A review on energy supply chain resilience through optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110088.
10. Falocchio, J.C.; (2015) *Levinson, H.S. Road Traffic Congestion: A Concise Guide; Springer: Berlin/Heidelberg. Germany; Volume 7.*
11. Fiksel, J. (2003). Designing resilient, sustainable systems. *Environmental Science and Technology*, 37(23), 5330-5339.

12. Flores J.A (2014). Infraestructura carretera: construcción, financiamiento y resistencia en México y América Latina. *Revista Transporte y Territorio*, núm. 13, julio-diciembre, 2015, 122-148. ISSN 1852-7175
13. Gasser, P., Lustenberger, P., Cinelli, M., Kim, W., Spada, M., Burgherr, P., Hirschberg, S., Stojadinovic, B., Sun, T.Y. (2019). A review on resilience assessment of energy systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-27.
14. Gong, J., You, F. (2018). Resilient design and operations of process systems: Nonlinear adaptive robust optimization model and algorithm for resilience analysis and enhancement. *Computers and Chemical Engineering*, 116, 231-252.
15. Haimes, Y.Y., Crowther, K., Horowitz, B.M. (2008). Homeland security preparedness: Balancing protection with resilience in emergent systems. *Systems Engineering*, 11(4), 287–308.
16. Hosseini, S.A., Pons, O., de la Fuente, A. (2020). A sustainability-based model for dealing with the uncertainties of post-disaster temporary housing. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(5), 330-348.
17. Jain, P., Diangelakis, N.A., Pistikopoulos, E.N., Mannan, M.S. (2019). Process resilience based upset events prediction analysis: Application to a batch reactor. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62, 103957.
18. Jain, P., Rogers, W.J., Pasman, H.J., Keim, K.K., Mannan, M.S. (2018). A resilience-based integrated process systems hazard analysis (RIPSHA) approach: Part I plant system layer. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 92-105.
19. Jain, P., Rogers, W.J., Pasman, H.J., Mannan, M.S. (2018). A resilience-based integrated process systems hazard analysis (RIPSHA) approach: Part II management system layer. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 115-124.
20. Jáuregui, L., & Mora, J. M. L. (2004) *LA HISTORIA DE LOS TRANSPORTES EN MÉXICO. Los transportes: siglos XVI al XX*, México, Océano/UNAM, 2004, 159 pp., (Historia económica de México, 13). ISBN: 970-651-841-X.
21. Koc, E., Cetiner, B., Rose, A., Soibelman, L., Taciroglu, E., Wei, D. (2020). CRAFT: Comprehensive resilience assessment framework for transportation systems in urban areas. *Advanced Engineering Informatics*, 46, 101159.

22. Laval, J.A.; Daganzo, C.F. (2006) *Lane-changing in traffic streams*. *Transp. Res. Part B Methodol.* 251–264.
23. Liu, Y., McNeil, S., Hackl, J., Adey, B.T. (2020). Prioritizing transportation network recovery using a resilience measure. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-12.
24. Makarova, I., Buyvol, P., Magdin, K., Pashkevich, A., Boyko, A., Shubenkova, K. (2020). Usage of microscopic simulation to estimate the environmental impact of road transport. *Transportation Research Procedia*, 44, 86-93.
25. Martínez-Guido, S.I., Núñez-López, J.M., Ponce-Ortega, J.M. (2021). Involving resilience in synthesizing food networks in low-income communities. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. 5, 139-157.
26. Nelson, K., Gillespie-Marthaler, L., Baroud, H., Abkowitz, M., Kosson, D. (2020). An integrated and dynamic framework for assessing sustainable resilience in complex adaptive systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(5), 311-329.
27. Núñez-López, J.M., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M. (2021). Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 259-273.
28. Pan, S., Yan, H., He, J., He, Z. (2021). Vulnerability and resilience of transportation systems: A recent literature review. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 126235.
29. Peceny, L., Mesko, P., Kampf, R., Gasparík, J. (2020). Optimisation in transport and logistic processes. *Transportation Research Procedia*, 44, 15-22.
30. Persyn, D., Díaz-Lanchas, J., Barbero, J. (2020). Estimating road transport costs between and within European Union regions. *Transport Policy*. Torres-Acosta, A., del Valle-Moreno, A., Martinez-Madrid, M., Perez-Quiroz, J.T., Backhoof-Polhs, M. (2010). National evaluation plan of federal bridges, free of toll damaged by corrosion (2000-2005). A quantification of results, projects and collaborations. *Technical Publication No.327*, 12.
31. Rangel, J. A. F. (2015). Infraestructura carretera: construcción, financiamiento y resistencia en México y América Latina. *Revista Transporte y Territorio*, (13), 122-148.
32. Reed, T.; Kidd, J. *Global Traffic Scorecard; INRIX Research*: Altrincham, UK, 2019

33. Robinson, R.M.; Collins, A.J.; Jordan, C.A.; Foytik, P.; Khattak, A.J. (2018) *Modeling the impact of traffic incidents during hurricane evacuations using a large scale microsimulation*. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 31,1159–1165.
34. Secretaria de Comunicaciones y Transporte. (2020). Dirección general de Planeación y evaluación. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/longitud-red-federal/>
35. Tredgold, T. (1818). On the transverse strength and resilience of timber. *The Philosophical Magazine*, 51:239, 214–216,
36. Venkittaraman, A., Banerjee, S. (2014). Enhancing resilience of highway bridges through seismic retrofit. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(8), 1173-1191.
37. Wang, Y.; Zhu, X.; Li, L.; Wu, B. (2013) *Reasons and countermeasures of traffic congestion under urban land redevelopment*. *Procedia Soc. Behav. Sci.*, 96, 2164–2172.
38. Wu, J., Wang, P. (2021). Risk-averse optimization for resilience enhancement of complex engineering systems under uncertainties. *Reliability Engineering and System Safety*, 107836.
39. Yan, M., Shahidehpour, M., Paaso, A., Zhang, L., Alabdulwahab, A., Abusorrah, A. (2020). Distribution system resilience in ice storms by optimal routing of mobile devices on congested roads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(2), 1314-1328.
40. Zhang, W., Wang, N., Nicholson, C. (2017). Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(11), 1404-1413.

Apéndice

N° de ruta	Nombre de la ruta	Longitud (Km)	Colisiones	Colisiones con víctimas	Muertos en el sitio	Lesionados	Daños materiales (miles de dólares)	Índice de accidentalidad	Índice de mortalidad	Índice de morbilidad
MEX-001	Tijuana- Los Cabos	1,722	267	132	75	172	740.2	9.2	2.6	5.9
MEX-001D	Tijuana- Cabo San Lucas (cuota)	151	39	15	8	16	78.4	5.4	1.1	2.2
MEX-002	Playa Lauro Villar - Tijuana	1,697	251	114	66	178	1,069.10	8.1	2.1	5.8
MEX-002D	Playa Lauro Villar - Tijuana (cuota)	348	138	44	24	80	797.6	15	2.6	8.7
MEX-003	Tecate - El Chinero	295	35	26	20	38	68.1	13.6	7.8	14.7
N° de ruta	Nombre de la ruta	Longitud (Km)	Colisiones	Colisiones con víctimas	Muertos en el sitio	Lesionados	Daños materiales (miles de dólares)	Índice de accidentalidad	Índice de mortalidad	Índice de morbilidad
MEX-005	Mexicali - Laguna de Chapala	334	71	38	17	42	148.1	17.1	4.1	10.1
MEX-008	Sonoyta - Puerto Peñasco	93	3	3	1	4	9.9	4.6	1.5	6.1
MEX-009	Cadereyta - Allende	9	6	3	7	32	7.8	2.6	6.1	
MEX-010	El Sueco - Janos	246	13	4	4	4	34.1	3.9	1.2	1.2
MEX-010D	Macro Libramiento de Guadalajara	111	13	7	3	8	195.7	22	5.1	13.5
MEX-011	La Paz - Pichilingue	9	6	2	0	2	47.6	72.1	0	24
MEX-014	Hermosillo - Moctezuma	283	79	28	13	47	327.5	7.2	1.2	4.3
MEX-014D	Morelia - Uruapan (cuota)	108	62	20	7	49	314.8	21.5	2.4	17
MEX-015	México - Nogales	1,915	373	218	113	346	1,621.00	4.2	1.3	3.9
MEX-015D	México - Nogales (cuota)	1,624	471	234	150	404	4,252.90	7.4	2.3	6.3
MEX-016	Hermosillo - Ojinaga	807	39	24	14	42	144.2	7	2.5	7.5
MEX-016D	Hermosillo - Ojinaga (cuota)	90	15	9	6	20	45.5	4.1	1.6	5.5
MEX-017	Agua Prieta - Moctezuma	194	2	2	0	2	1.6	1.2	0	1.2

MEX-259	Ent. Díaz Ordaz - Ent. Sabancuy	57	2	1	1	1	3.4	6.2	3.1	3.1
MEX-261	Campeche - Progreso	263	25	4	3	1	63.6	4.7	0.6	0.2
MEX-281	Mérida - Celestún	131	9	4	1	3	28	4.3	0.5	1.4
MEX-293	Lázaro Cárdenas - Polyuc	100	1	1	1	0	4.4	1.6	1.6	0
MEX-295	Fco. Carrillo Puerto - Río Lagartos	269	25	20	8	27	53.6	12.2	3.9	13.2
MEX-305D	El Cedral - Playa del Carmen	54	2	0	0	0	1.8	6.1	0	0
MEX-307	Chetumal - Puerto Juárez	777	142	70	28	141	698.4	6.5	1.3	6.4
MEX-000	Otras vialidades federales de la Ciudad de México	9	4	1	3	17.4	-	-	-	
AGS-158	Libramiento Surpte. de Ags.	21.5	3	1	0	1	19.2	9.5	0	3.2
CHS-SN	Otras vialidades de Chiapas	14.2	2	0	0	0	2.7	7	0	0
COA-057D	Nueva Rosita - Allende (cuota)	53	1	1	2	0	2.6	1.5	3	0
Nº de ruta	Nombre de la ruta	Longitud (Km)	Colisiones	Colisiones con víctimas	Muertos en el sitio	Lesionados	Daños materiales (miles de dólares)	Índice de accidentalidad	Índice de mortalidad	Índice de morbilidad
NLE-040D	Anillo Periférico Mty. (cuota)	69.5	31	14	8	15	119.4	11.1	2.9	5.4
NLE-259	Lib. de Sabinas Hidalgo	9.3	2	0	0	0	5.2	14.3	0	0
OAX-SN	Ramal a Presa Cerro de Oro	18	2	1	0	1	0.9	23	0	11.5
PUE-SN	Ramal a Aeropuerto de Puebla	10.5	6	3	1	13	16.9	18.9	3.2	41
QUR-SN	Cancún - Punta Nizuc	97.1	9	3	2	1	41.3	6.5	1.5	0.7
SIN-001D	Culiacán - Las Brisas (cuota)	125.7	30	8	3	6	107.9	8.5	0.9	1.7
SIN-280	Ramal a Apto. de Culiacán	1.5	1	1	0	2	3.2	13.6	0	27.3
TAM-047	Ramal a Puente Internacional Nuevo Progreso	15	1	0	0	0	3.1	7.5	0	0
TAM-057	Ramal a El Mezquital	62.5	4	4	4	0	7.4	14.7	14.7	0
VER-SN	Santa Fe - San Julián	29.5	4	1	1	0	18.2	6.2	1.6	0
TOTAL			12,237	5,517	2,994	8,761	61,004.50			

Tabla A1. Saldo registrado por ruta (Cuevas et al, 2019)

Puente	Carretera	Tramo	Tipo de camino	km	Año de Construcción	Año de últ. reconstrucción	Posición Geográfica		Calif. SIPUMEX T.
			A,B,C,D,E				Latitud	Longitud	
PIV LAS DIETAS	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	A	71.100	2005	0	19°26.35'	100° 11.38'	2
PSV EL SALTO	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	A	75.400	2005	0	19°26.57'	100°13.22'	3
PIV entr. ZITACUARO	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	85.900	2005	0	19°27.05'	100°17.1'	2
Peatonal Tec Zitacuaro	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Tuxpán	B	91.150	2007	0	19°26.90'	100°20.50'	2
Peatonal central I	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Tuxpán(Lib. Zita)	B	0.100	2007	0	19°26.80'	100°20.40'	2
Peatonal central II	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Tuxpán(Lib. Zita)	B	1.100	2007	0	19°26.70'	100°20.30'	2
Peatonal Zitacuaro	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-	B	97.979	1997	0	19°26.70'	100°20.20'	2

		Entr. Huajúmbaro							
San Juan el viejo	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	99.660	1938	2011	19°27.51'	100°20.67'	3
Peatonal San Felipe	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	105.000	2012	0	19°14.49'	100°32.57'	2
San Felipe	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	105.600	1938	1994	19°16'	101°56.00'	4
Peatonal el Malacate	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	120.750	2014	0	19°32.46'	100°28.51'	2
Peatonal Tuxpan I	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	122.200	2007	0	19°34.22'	100°27.91'	2
Peatonal Tuxpan II	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	123.500	2007	0	19°34.22'	100°27.93'	2
Tuxpan	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	124.600	1938	2010	19°34.22'	100°27.97'	3
Turundeo	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-	B	132.220	1938	2008	19°38.14'	100°28.84'	3

		Entr. Huajúmbaro							
San Lorenzo	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	136.245	1938	1980	19°39.59'	100°32.22'	4
Peatonal Cd. Hidalgo I	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	141.000	2009	0	19°41.75'	100°35.10'	2
La Arena	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	141.680	1938	2004	19°41.08'	100°32.73'	3
Peatonal Cd. Hidalgo II	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	144.800	2006	0	19°41.50'	100°34.30'	2
Arroyo Zarco	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	148.700	1938	2006	19°41.86'	100°36.51'	3
Ramal San Lucas	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	150.560	1938	1978	19°41.36'	100°37.51'	4
Cruz de Caminos	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.- Entr. Huajúmbaro	B	157.050	1938	1978	19°39.84'	100°40.95'	4
La Venta	Toluca - Morelia	Lím. Mex./Mich.-	B	159.440	1938	1978	19°40.11'	100°42.13'	4

		Entr. Huajúbaro							
Arroyo Largo	Toluca - Morelia	Entr. Huajúbaro- Morelia	B	170.150	1940	0	19°39.05'	100°45.94'	4
Parque Nacional Morelos	Toluca - Morelia	Entr. Huajúbaro- Morelia	B	220.420	1940	1979	19°40.02'	101°00.37'	4
Irapeo	Toluca - Morelia	Entr. Huajúbaro- Morelia	B	226.700	1940	2001	19°41.22'	101°2.55'	3
PIV tres Marias	Toluca - Morelia	Entr. Huajúbaro- Morelia	B	237.750	2004	0	19°41.24'	101°2.58'	3
Peatonal el Dorado	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	2.000	2010	0	19°40.28'	101°13.14'	2
Peatonal Manantiales	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	3.000	2011	0	19°42.08'	101°14.28'	2
PSV Manantiales	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	3.600	2013	0	19°42.02'	101°14.35'	2
Peatonal Itzicuaro	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	4.000	2000	2004	19°41.50'	101°13.20'	3
Peatonal Artillero	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	4.360	2004	0	19°40.90'	101°13.70'	3
Peatonal Sec. Tec. 82	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	4.600	2004	0	19°40.70'	101°14.00'	3
Peatonal Prim. Jesús Díaz	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	5.300	2004	0	19°40.35'	101°14.10'	3
Peatonal La concha	Morelia- Guadalajara	Morelia- Quiroga	B	5.700	2004	0	19°39.40'	101°15.20'	3

Peatonal Villas de la Esperanza	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	6.700	2004	0	19°38.20'	101°16.10	3
Peatonal Col. El Pedregal	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	7.800	2004	0	19°36.10'	101°18.20	3
Peatonal Prim. Revolución	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	9.900	2004	0	19°34.30'	101°19.10'	3
Peatonal Villa Magna	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	12.400	2011	0	19°41.00'	101°19.40'	2
Peatonal La Maestranza	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	12.700	2011	0	19°41.00'	101°19.51'	2
Peatonal Tacicuaro	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	15.700	2017	0	19°40.42'	101°21.17'	3
PIV. Capula Autop	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	17.300	2015	0	19°40.25'	101°22.18'	3
Capula	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	19.700	1940	1984	19°39.98'	101°23.48'	4
Iratzio I	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	23.380	1940	1984	19°38.67'	101°24.60'	4
Iratzio II	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	23.755	1940	1984	19°38.56'	101°24.62'	4
Atzimbo I	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	34.495	1940	2008	19°38.48'	101°29.22'	3
Atzimbo II	Morelia-Guadalajara	Morelia-Quiroga	B	35.140	1940	1984	19°38.75'	101°28.45'	4
Santa Fé	Morelia-Guadalajara	Quiroga-Comanja	B	42.409	1940	1987	19°40.15'	101°32.91'	4
Chupícuaro	Morelia-Guadalajara	Quiroga-Comanja	B	46.500	1940	1993	19°40.84'	101°34.57'	3
Peatonal Tirindaro	Morelia-Guadalajara	Comanja-Carapan	B	71.600	1998	0	19°46.20'	101°44.60'	2

PIV. FNM Naranja	Morelia-Guadalajara	Comanja-Carapan	B	73.800	1940	2008	19°46.39'	101°45.90'	3
PSV. Zacapu	Morelia-Guadalajara	Comanja-Carapan	B	79.400	2007	0	19°48.76'	101°47.76'	2
Chilchota	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	118.350	1949	1987	19°50.99'	102°6.89'	4
Pejo	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	127.050	1940	2000	19°51.42'	102°11.15'	3
Tangancícuaro	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	130.900	1940	1990	19°53.40'	102°12.08'	4
Las Adjuntas	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	132.600	1940	1994	19°54.55'	102°12.24'	3
Peatonal Canindo	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	138.980	2013	0	20°19.10'	102°18.20'	3
El Duero Der.	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	147.322	1993	0	19°58.40'	102°17.70'	3
El Duero Izq.	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	147.322	1993	0	19°58.40'	102°17.70'	3
Jacona	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	148.650	1945	0	19°57.80'	102°18.16'	4
Orandino	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	152.657	1945	0	19°57.62'	102°20.45'	4
La Joyita	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	153.399	1945	0	19°57.62'	102°20.45'	4
Santiago Tangamandapio	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	164.500	1940	1997	19°57.52'	102°25.85'	3
PSV. FNM Est. Moreno	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	175.450	1940	1990	20°00.08'	102°30.15'	4
Villamar	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	183.600	1940	0	19°59.50'	102°33.40'	4

Jaripo	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	191.600	1940	1994	19°58.76'	102°36.82'	3
El Totolan	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	198.880	1940	0	19°59.65'	102°42.50'	4
Peatonal Sahuayo I	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	5.300	1998	0	20°3.42'	102°42.98'	3
Peatonal Sahuayo III	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	7.800	1998	0	20°3.42'	102°42.98'	3
La ladrillera	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	8.150	1965	2005	20°4.45'	102°43.01'	3
Cojumatlán I	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	23.800	1965	1984	20°6.82'	102°50.36'	3
Cojumatlan II	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	25.500	1965	1984	20°7.62'	102°51.56'	3
Cojumatlan III	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	25.600	1965	1984	20°7.70'	102°51.18'	3
Sta. Martha	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	26.600	1965	0	20°8.11'	102°51.46'	3
El callejón	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	32.900	1965	0	20°9.50'	102°53.93'	3
Palo Alto I	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	34.500	1965	0	20°9.59'	102°54.81'	3
Palo Alto II	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	34.700	1965	0	20°9.65'	102°54.99'	3
Palo Alto III	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	35.441	1965	0	20°9.70'	102°55.20'	3
Palo Alto IV	Morelia-Guadalajara	Jiquilpan-Lím. Mich. /Jal.	B	35.727	1965	0	20°9.68'	102°55.00'	3
Puente Madero	Morelia-Guadalajara	Libramiento Quiroga	B	1.200	1963	0	19°48.00'	102°10.00'	3
Chaparaco	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	6.800	1990	0	20°0.17'	102°14.28'	3

Vallado del Rey	Morelia-Guadalajara	Carapan-Zamora	C	9.009	1987	0	20°0.80'	102°14.73'	3
Libramiento Jiquilpan	Morelia-Guadalajara	Zamora-Jiquilpan	B	0.980	1970	2016	19°59.70'	102°42.60'	3

Tabla A2. Tabla de la Evaluación de puentes Carretera Federal 15.

