

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



TESIS:

“Propuesta de planificación del mantenimiento de carreteras en países en desarrollo basado en sistemas de gestión de pavimentos: estudio de caso en Baja California, México”.

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
MARCO ANTONIO MONTOYA ALCARAZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALEJANDRO MUNGARAY MOCTEZUMA**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**

Mexicali, Baja California, enero del 2020.

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Director(a) de Tesis: _____

Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma

Co-director de Tesis: _____

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. _____

2. _____

3. _____

Esta investigación está dedicada a mis padres y mi esposa.

Las palabras no bastan para agradecer su amor y apoyo incondicional que me han dado la fuerza necesaria para cumplir mis metas y objetivos.

Muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico brindado y su contribución en mis estudios doctorales.

A mi alma máter la Universidad Autónoma de Baja California especialmente a la Facultad de Ingeniería Mexicali y al Programa Educativo de Ingeniería Civil por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, en un programa reconocido por su calidad internacional.

A mi director de tesis y amigo Dr. Alejandro Mungaray Moctezuma por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación y en mi formación profesional como tutor y mentor. Con gran admiración y respeto agradezco la confianza que ha depositado en mí al permitirme formar parte de un equipo de trabajo y una familia.

Al Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por su apoyo como Co-director de tesis, con su gran disposición, experiencia y conocimiento hizo posible la culminación de este proyecto. Con gran respeto y admiración por su labor como profesionista.

Al Dr. Leonel Gabriel García Gómez, Dr. José Manuel Gutierrez y Dr. Carlos Salazar Briones por su apoyo en la revisión de este proyecto de investigación, así como su apoyo en mi formación profesional. Agradezco su labor, experiencia y compromiso con la investigación científica.

De igual manera al Dr. Daniel Hernández Balbuena así como todos los profesores adscritos a la Facultad de Ingeniería Mexicali y al Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería, por su arduo trabajo en la preparación académica de estudiantes universitarios con calidad internacional.

A mis compañeros y amigos del cuerpo docente del Programa Educativo de Ingeniería Civil que estuvieron apoyándome desde el inicio de mis estudios doctorales hasta la culminación de este proyecto.

Agradezco al personal del Fideicomiso Tramo Carretero Centinela-La Rumorosa (FIARUM) permitir la realización del trabajo de campo correspondiente.

A mis hermanos Sergio y David por su gran ejemplo que han transmitido a sus propias familias. Siempre han sido mi punto escala de referencia y mi soporte. Los admiro mucho y estoy orgulloso de sus éxitos profesionales y personales. Asimismo, a todos los miembros de mi familia y amigos que siempre me acompañaron en este camino.

A mis padres por haberme dado la vida y apoyarme en la culminación de mis metas y objetivos. No existen palabras que puedan expresar mi agradecimiento. Sientan que este logro también es de ustedes por que fueron la fuerza que me permitió obtenerlo. Muchas gracias por todo.

A mi mejor amiga y esposa Namury Jiménez por aceptar ser mi compañera de vida ahora como mi esposa y brindarme tu amor y apoyo incondicional. Haz logrado que sea una mejor versión de mí, aún queda un largo camino por recorrer, pero a tu lado todo saldrá perfecto. Te amo con toda mi vida.

Resumen

El objetivo de esta investigación es desarrollar un procedimiento útil que permita la obtención, análisis, procesamiento y actualización de datos de condiciones de pavimentos, con la visión de generar insumos para la implementación de estrategias sustentables de conservación y mantenimiento de caminos, basadas en sistemas de gestión de pavimentos. La pertinencia de esta propuesta radica en que las agencias administradoras de carreteras de la mayoría de los países en vías de desarrollo cuentan con recursos, personal y datos limitados para planear las intervenciones que se realizan en las redes de caminos. El modelo propuesto deviene de un trabajo que se ha realizado desde 2014 hasta la fecha, en la Autopista Centinela-La Rumorosa, localizada en el estado de Baja California, México. Los resultados integran los datos obtenidos de analizar las condiciones superficiales y estructurales de su pavimento y de la zona de estudio, así como de las condiciones operativas del eje, incluyendo un proceso de georeferenciación para la determinación de puntos críticos en la red y simulación para determinar los efectos de los trabajos de conservación y mantenimiento realizados anualmente. Se concluye que el modelo de planeación propuesto contribuye en la mejora del desempeño de la autopista, ya que permite planificar y administrar la asignación de recursos en la toma de decisiones oportunas sobre conservación y mantenimiento. Lo anterior, permite a las agencias administradoras de caminos de países en desarrollo, brindar un sistema de transporte de calidad a sus usuarios.

Abstract

The objective of this research is to develop a useful procedure that allows the collection, analysis, processing and updating of pavement conditions data, with the vision of generating inputs for the implementation of sustainable strategies for maintenance and rehabilitation of roads, based on pavement management systems. The relevance of this proposal lays in the fact that road management agencies in most of the developing countries have limited resources, staff and data to plan the interventions carried out on road networks. The proposed model comes from a work that has been done since 2014 to date, on the Centinela-La Rumorosa Highway, located in the state of Baja California, Mexico. Results integrate data gathered from analyzing the surface and structural

conditions of its pavement and the study area, as well as the operating conditions of the road, including a georeferencing process in order to determine critical points in the network and simulation to determine the effects of conservation and maintenance work carried out annually. It is concluded that the proposed planning model contributes to the improvement of highway performance, since it allows planning and administering the allocation of resources in making appropriate conservation and maintenance decisions. The foregoing allows road management agencies in developing countries to provide a quality transportation system to their users.

Índice

1. Introducción.	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivo.	4
1.3 Hipótesis.	4
1.4 Justificación.	4
1.5 Metodología general.	5
1.6 Descripción del caso de estudio.....	6
2. Revisión de la literatura.....	11
2.1 Evaluación de las condiciones superficiales y estructurales de pavimentos y su importancia en la gestión y servicio de vialidades.....	11
2.2 La gestión de los pavimentos en la planeación de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación.	12
2.3 Planeación en materia de mantenimiento y rehabilitación para el mejoramiento en el desempeño de las carreteras.....	17
3. Metodologías de análisis.	22
3.1 Descripción específica de la aplicación del modelo al caso de estudio.....	22
3.2 Evaluación de las condiciones del pavimento (2014).....	23
3.3 Plan de Intervenciones 2015-2020.....	36
3.4 Análisis del mejoramiento en el desempeño de la autopista.....	38
4. Resultados de investigación.	41
4.1 M1: Evaluación de las condiciones del pavimento (2014).	41
4.1.1 Levantamiento y georreferenciación de daños.....	41
4.1.2 Condición superficial.	43
4.1.3 Condición estructural.	46
4.2 M2: Plan de intervenciones 2015-2020.	49
4.2.1 Revisión del pavimento existente.....	49
4.2.2 Definición de prioridades de intervención.	51
4.2.3 Trabajos de mantenimiento y rehabilitación para el mejoramiento de las condiciones de la autopista.....	53
4.3 M3: Análisis del mejoramiento de las condiciones de la autopista.	55
4.3.1 Mejoramiento en la seguridad de la autopista.....	55

4.3.2 Mejoramiento del confort de los usuarios.....	58
4.3.2 Prioridades de intervención posteriores a 2020.....	63
Conclusiones.....	65
Referencias.	67

1. Introducción.

La Carretera Federal No. 2 Mexicali-Tijuana fue construida por el Gobierno Federal hace más de 55 años, cumpliendo con una misión muy importante en su momento: comunicar de manera rápida y segura, la Ciudad de Mexicali y el resto del país, con la zona costa del Estado de Baja California. El tramo Centinela – La Rumorosa se ubica en los municipios de Mexicali y Tecate.

Esta carretera presenta cuerpos separados con diferentes trazados y diferentes condiciones topográficas durante su recorrido, tanto en ascenso como en descenso del km 0+000 al 18+000 se encuentra en zona urbana, misma que cuenta con topografía plana y tramos rectos, del km 18+000 al 42+000 se encuentra en una topografía plana y tramos rectos, mientras que del 42+000 al 64+000 se encuentra en una topografía montañosa y con un sistema de curvas considerable. Por otro lado, el tráfico vehicular que circula por ésta carretera es alto, alrededor de 9,000 vehículos diarios circulan por esta carretera y con un alto porcentaje de vehículos pesados, ya que es parte de la única carretera troncal que conecta la ciudad de Tijuana, pasando por Mexicali al resto de Estados de la República Mexicana.

Lo anterior trae consigo impactos económicos positivos y desarrollo regional, que paralelamente y asociado al tránsito diario acumulado, redundan en daños superficiales y estructurales sobre la estructura del pavimento de la autopista. Estos daños se suscitan tanto por la acción de agentes naturales como por efectos de cargas que inciden en las condiciones superficiales y estructurales del pavimento. Sousa y sus colaboradores (1991), señalan distintos factores que favorecen el desgaste o deterioro permanente de los pavimentos entre los que destacan características de los agregados granulares, características del producto asfáltico, condiciones del área de estudio como la temperatura de la zona a construir y características del tráfico. Debido a lo anterior resulta indispensable realizar planeación estratégica para determinar las acciones de conservación y mantenimiento que brinden mayores beneficios a los tomadores de decisiones y usuarios de la autopista.

A pesar de que el tramo se encuentra en constante modernización, con un esfuerzo de planeación importante por parte de su agencia administradora, no ha sido posible que

contar con una estrategia preventiva en materia de conservación y mantenimiento. Esto debido a que sus estructuras de pavimentos ya cumplieron con su ciclo de vida útil en muchos de sus tramos, el cual incluso se aceleró debido a los esfuerzos que genera el tránsito pesado. Es por ello, que a partir de 2014 inició un proyecto que consistió en el análisis de las condiciones superficiales y estructurales del pavimento con la finalidad de facilitar la toma de decisiones, lo que derivó en la elaboración de un programa anual de intervenciones y posteriormente en trabajos de conservación en la autopista durante el periodo de 2014-2019. Asimismo, el análisis de los efectos de dichas intervenciones en el mejoramiento de las condiciones del desempeño del tramo y brindar continuidad a los trabajos de conservación y mantenimiento de la autopista posteriores a 2019.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es desarrollar un procedimiento útil que permita la obtención, análisis, procesamiento y actualización de datos de condiciones de pavimentos, con la visión de obtener insumos para el mejoramiento en la implementación de estrategias sustentables de conservación y mantenimiento, basadas en herramientas de sistemas de gestión de pavimentos.

1.1 Planteamiento del problema.

Las carreteras en México presentan deficiencias en sus condiciones estructurales y superficiales. Generalmente asociado a la asignación insuficiente de recursos en materia de conservación y mantenimiento. Así como deficiencias en la planeación de por parte de los organismos administradores de carreteras. De acuerdo con la SCT, Se estima que el 22% de las carreteras federales presentan malas condiciones (SCT, 2018).

Es importante mencionar que una infraestructura en malas condiciones influye de manera determinante sobre los costos de operación y traslados de personas y mercancía, al igual que en la seguridad y comodidad de los usuarios. Según diversos estudios realizados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), si el estado superficial de un pavimento pasa de un estado “óptimo” a otro calificado de “bueno”, el costo de operación por kilómetro recorrido puede aumentar de un 15% a un 20%. Por otro lado, si el estado superficial llegara a “malo”, este factor de incremento podría ser de 35% ó 40% sobre el costo de operación (Rico et al., 1998).

De acuerdo con lo anterior, la influencia de las condiciones del pavimento en los costos de operación de los vehículos es significativa. En condiciones óptimas de circulación, que se asocian con una carretera bien conservada y sin problemas de tránsito, el costo de operación es mínimo. Las deficiencias en la superficie, pendientes o grados de curvatura no adecuados, así como la circulación de vehículos no autorizados afectan las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes (SCT, 1998). Por lo tanto, evaluar las condiciones de la estructura de pavimento existente es indispensable para determinar las acciones de conservación y mantenimiento que se requieren para rehabilitar y mejorar el nivel de servicio de un eje vial, reduciendo los costos de operación de los usuarios, es decir mejorar el desempeño de la vía (Thenoux y Gaete, 1995).

En este sentido, la gestión de pavimentos se ha hecho cada vez más importante a medida que los caminos van envejeciendo y deteriorando con el paso del tiempo. Por un lado, estos han sido diseñados y construidos con una vida útil y es requerido intervenirlos para aumentar su ciclo de servicio, por otro lado, los niveles de financiamiento cada vez son más limitados y se requiere de una mejor administración de los recursos para atender un sistema global de movilidad que está centrado, en su mayoría, en la utilización de caminos (Wolters et al., 2011). Los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS), son el conjunto de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a las organizaciones administradoras de caminos en la aplicación sistemática de procesos relacionados con la gestión de pavimentos, particularmente la identificación de alternativas óptimas para la conservación de la red en el corto y mediano plazo, así como la formulación de programas de conservación y mantenimiento, que se traducen en beneficios significativos, tanto desde el punto de vista técnico como económico (Ríos & Martínez, 2009). Sin embargo, la confiabilidad de los resultados de dichos sistemas depende de la calidad y cantidad de datos proporcionados al mismo y la calibración de los modelos a las condiciones locales. Las agencias administradoras de caminos en países en desarrollo cuentan con recursos y personal limitado, por lo que la obtención de dichos insumos implica un esfuerzo y reto mayor.

1.2 Objetivo.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un procedimiento útil que permita la obtención, análisis, procesamiento y actualización de datos de condiciones de pavimentos, con la visión de generar insumos para la implementación de estrategias sustentables de conservación y mantenimiento de caminos, basadas en sistemas de gestión de pavimentos.

Objetivos específicos

- Obtener la mejor selección de estrategias sustentables de acuerdo a las condiciones actuales del pavimento, racionalizando el proceso de administración de la conservación y operación carretera.
- Plantear y evaluar diversas estrategias para la infraestructura, el tránsito y la seguridad.
- Asegurar la calidad de seguridad y servicio en la toma de decisiones de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de carreteras para países en desarrollo.

1.3 Hipótesis.

La planificación del mantenimiento de carreteras contribuye en la mejora del desempeño de la autopista, ya que permite planificar y administrar la asignación de recursos en la toma de decisiones oportunas sobre conservación y mantenimiento. Lo anterior, permite a las agencias administradoras de caminos de países en desarrollo, brindar un sistema de transporte de calidad a sus usuarios.

1.4 Justificación.

La gestión de pavimentos es una disciplina que engloba actividades involucradas en la planeación, diseño, construcción, evaluación y conservación de los pavimentos de una red de caminos (AASHTO, 1993). Estudios previos en este campo han examinado los programas PMS con el objetivo de recomendar tratamientos de mantenimiento de red basados en condiciones generales de la superficie del pavimento, datos de tráfico, condiciones estructurales del tramo y otros indicadores de desempeño (Gerber et al., 2018).

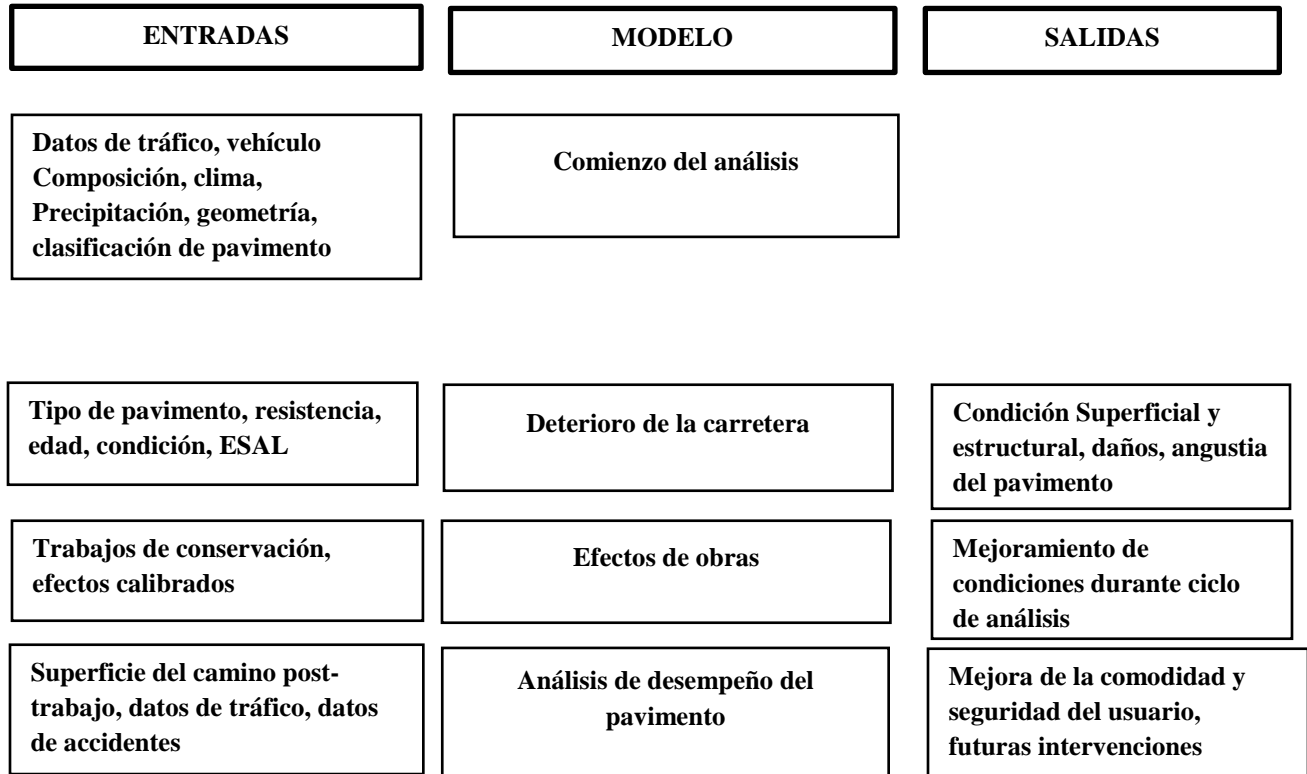
Como se mencionó anteriormente, la planificación e implementación de los planes de mantenimiento vial se traducen en beneficios significativos, tanto desde el punto de vista técnico como económico. En el caso de las agencias administradoras mexicanas no han podido adoptar un enfoque de gestión de pavimentos. Por lo que, los trabajos de conservación y mantenimiento de las carreteras se efectúan de manera más reactiva que proactiva, una vez que se presentan fallas superficiales y estructurales, es decir, que en términos generales es complejo para los administradores de una vía definir una estrategia preventiva.

Debido a lo anterior, a partir del año 2014 se inició un proyecto que busca mejorar la planeación y toma de decisiones en materia de conservación y mantenimiento de un tramo carretero. Este se ubica en un sistema montañoso de Baja California, México. El objetivo de esta investigación es desarrollar un procedimiento útil que permita la obtención, análisis, procesamiento y actualización de datos de condiciones de pavimentos, con la visión de obtener insumos para el mejoramiento en la implementación de estrategias sustentables de conservación y mantenimiento, basadas en sistemas de gestión de pavimentos.

1.5 Metodología general.

Tomando como referencia diversos estudios se propone el presente modelo para la obtención, análisis, procesamiento y actualización de datos de condiciones de pavimentos, con la visión de generar insumos para la implementación de estrategias sustentables de conservación y mantenimiento de caminos, basadas en sistemas de gestión de pavimentos. A continuación, se presenta el modelo propuesto para la planeación de intervenciones de mantenimiento y conservación (Figura 1.1).

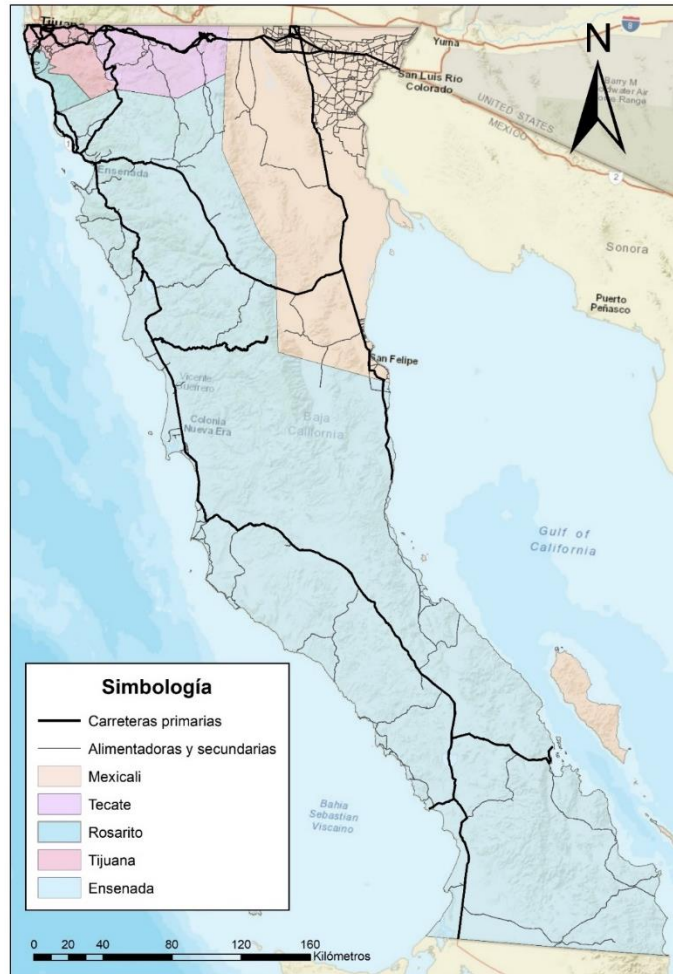
Figura 1.1. Diagrama de flujo de la metodología para la planeación de intervenciones de mantenimiento y conservación



1.6 Descripción del caso de estudio.

El estado de Baja California cuenta con una superficie de 71,446 km² que corresponde al 3.6% de la superficie total del país, hace frontera al norte con el Estado de California y Arizona en Estados Unidos, al sur con el estado de Baja California Sur, al este con el estado de Sonora y al oeste con el Océano Pacífico (INEGI, 2010). El estado de Baja California cuenta con 5 municipios conectados a través de una red carretera que alcanza más de 11 mil kilómetros, entre carreteras de 4 y 2 carriles, caminos revestidos, brechas y terracerías (Figura 1.2). Cabe señalar que el estado físico de la mayoría de estos caminos se consideran en estado bueno y satisfactorio, consolidando una red estatal que permite la intercomunicación entre las localidades de los 5 municipios de la entidad y de estos con el resto del sistema nacional (Mungaray-Moctezuma, 2013).

Figura 1.1 Delimitación municipal y red de carreteras de Baja California.



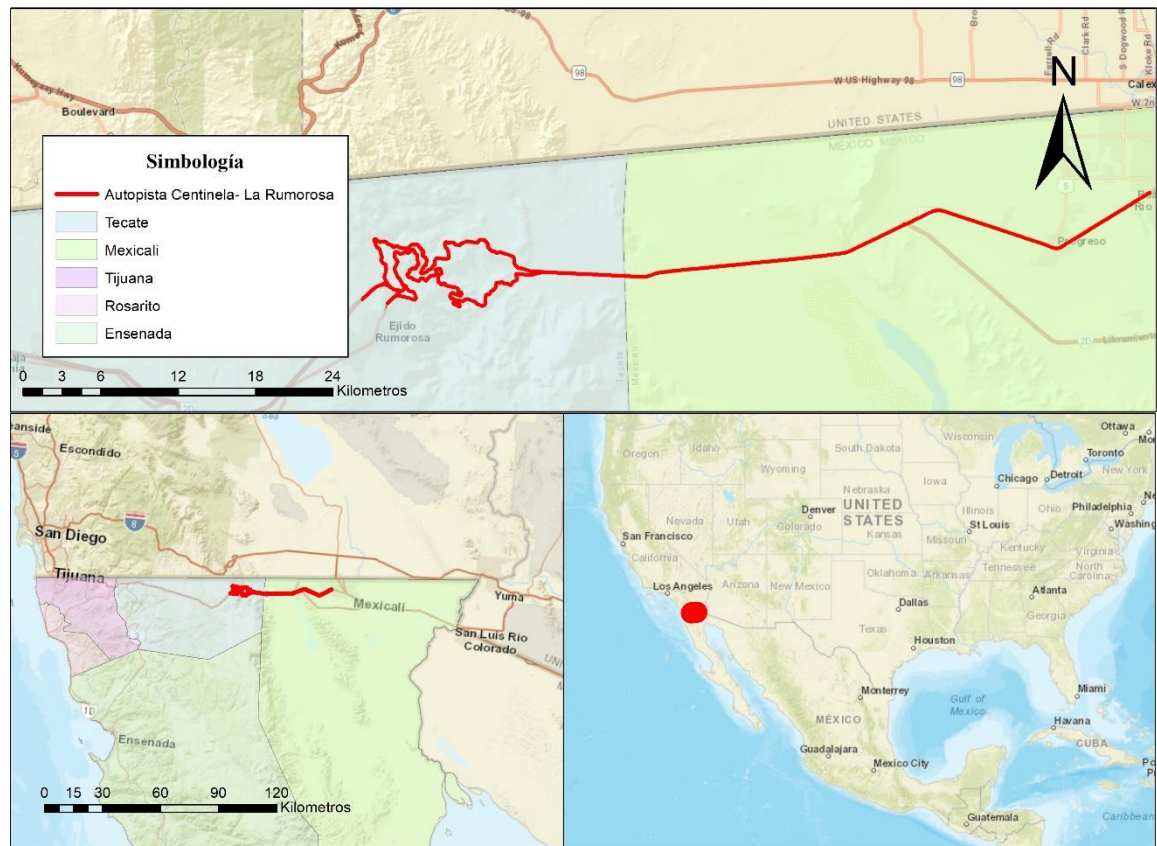
Fuente: Elaboración propia.

La Carretera Federal No. 2 Mexicali-Tijuana fue construida por el Gobierno Federal hace más de 55 años, cumpliendo con una misión muy importante en su momento. Comunicar de manera rápida y segura, la Ciudad de Mexicali y el resto del país, con la zona costa del Estado de Baja California.

La Autopista Centinela – La Rumorosa es administrado por el Fideicomiso de Administración de Fondos de Inversión (FIARUM) se ubica en los municipios de Mexicali y Tecate (Figura 1.3) perteneciente a la Carretera Federal no. 2. Este camino presenta cuerpos separados con diferentes trazos y condiciones topográficas durante su recorrido,

tanto en ascenso como en descenso y un total de 64 kilómetros de longitud. Del cadenamiento 0+000 al 18+000 se considera zona urbana del municipio de Mexicali, misma que cuenta con topografía plana y tramos rectos, del mismo modo lo hace el tramo del 18+000 al 42+000, mientras que del 42+000 al 64+000 se presenta una topografía montañosa y con un sistema de curvas considerable.

Figura 1.3 Ubicación de la Autopista Centinela - La Rumorosa.

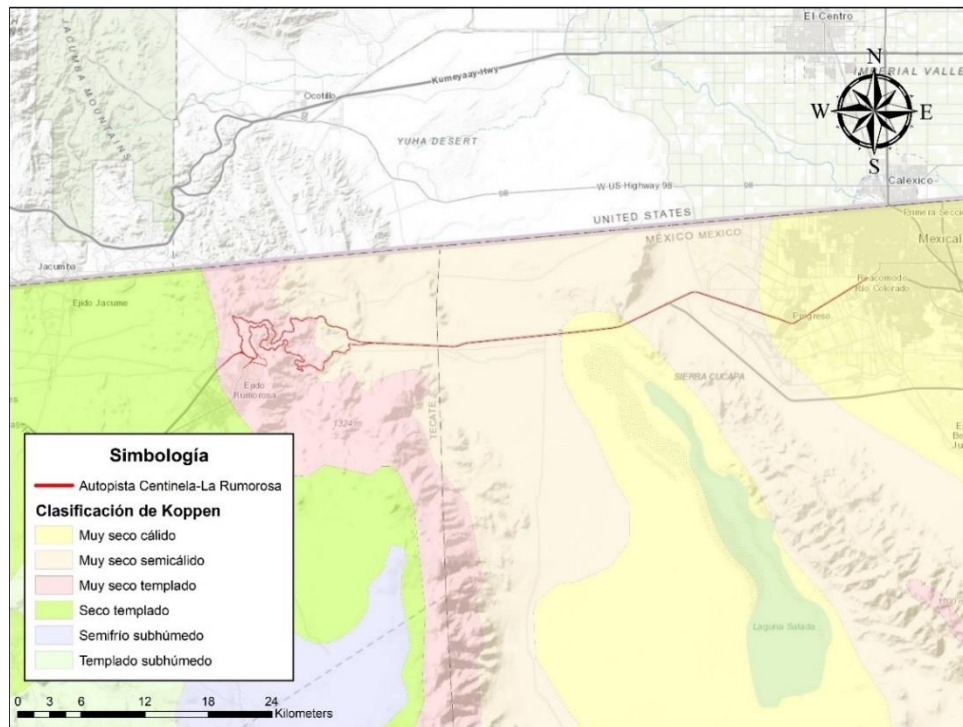


Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto que caracteriza a la autopista es la variabilidad de las condiciones climáticas y del entorno (Figura 1.4). Por un lado, la parte “Este” del eje carretero, que se ubicada en el municipio de Mexicali, presenta un clima muy seco desértico (BWh). Las temperaturas máximas registradas superan los 54 grados centígrados, mientras que las temperaturas mínimas descienden -7 grados centígrados. En la zona central y plana del tramo correspondiente a la Laguna Salada se presenta un clima muy seco semi-cálido

(BWhs). Mientras que en la zona montañosa del tramo que se ubica dentro del municipio de Tecate en el poblado La Rumorosa se presenta un clima Desértico frío (BWks) donde se alcanzan temperaturas mínimas de -10 grados centígrados en invierno y temperaturas máximas de hasta 40.3 grados centígrados en verano. Adicionalmente en dicha zona, en temporada de lluvia se presentan nevadas considerables. (INEGI, 2018; Ruíz Corral et al, 2006).

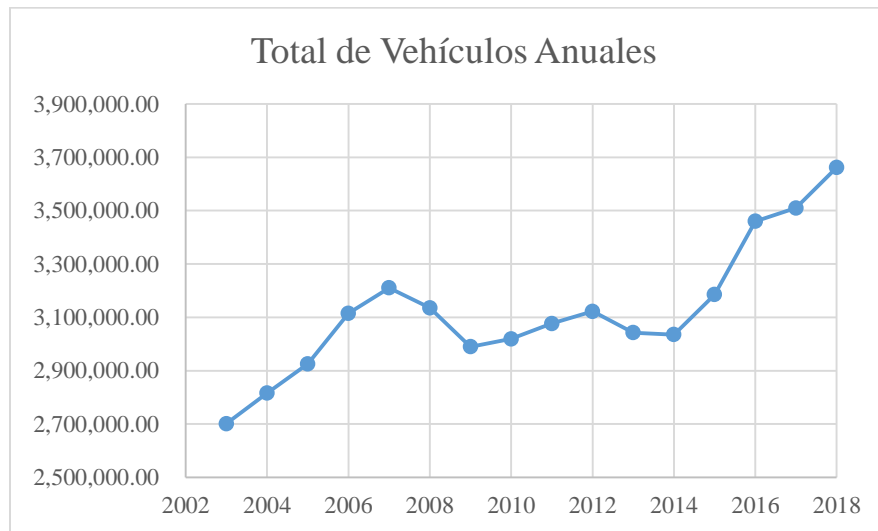
Figura 1.4 Condiciones climáticas del tramo carretero.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el proceso de modernización del tramo carretero responde al aumento de demanda vehicular en los últimos años, que ha pasado de poco más de 835 mil unidades en 1996 a más de 3 millones en 2013, lo que significa que ha aumentado casi 4 veces su dimensión de servicio. Cabe señalar que a partir de 2006 estas cantidades han oscilado entre 3 y 3.2 millones de vehículos. En 2016 se registraron poco más de 3.5 millones de vehículos (Figura 1.5).

Figura 1.5 Aforo anual de la Autopista Centinela- La Rumorosa.



Fuente: Elaboración propia.

Actualmente el tráfico que circula a través de la Autopista ronda cerca de los 9,000 vehículos diarios, cuya composición vehicular se divide en 70% vehículos y 30% camiones de carga, ya que es parte de la única carretera troncal que conecta la ciudad de Tijuana, pasando por Mexicali al resto de Estados de la República Mexicana. A pesar de que el tramo se encuentra en constante modernización, con un esfuerzo de planeación importante por parte de su agencia administradora, no ha sido posible que cuente con una estrategia preventiva en materia de conservación y mantenimiento. Esto debido a que sus estructuras de pavimentos ya cumplieron con su ciclo de vida útil en muchos de sus tramos, el cual incluso se aceleró debido a los esfuerzos que genera el tránsito pesado.

2. Revisión de la literatura.

2.1 Evaluación de las condiciones superficiales y estructurales de pavimentos y su importancia en la gestión y servicio de vialidades.

Evaluar las condiciones de la estructura de pavimento existente es indispensable para determinar las acciones de conservación y mantenimiento que se requieren para rehabilitar y mejorar el nivel de servicio de un eje vial, reduciendo los costos de operación de los usuarios (Thenoux y Gaete, 1995). Debido a que el comportamiento de un pavimento es la medida de la calidad del servicio funcional y estructural que presta durante un periodo determinado. Los usuarios califican la calidad funcional, interesándose principalmente la suavidad de la superficie, la seguridad y el aspecto general de la obra (Pradena, M. 2006).

Las carreteras construidas con pavimentos flexibles están permanentemente expuestas a deterioros superficiales. El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) agrupa los deterioros producidos en vialidades bajo cuatro categorías: desprendimientos, deformaciones, roturas y varios, donde estas últimas comprenden una variedad de orígenes o causas distintas a los deterioros de las tres categorías anteriores (SCT, 1991).

Para la evaluación técnica de las condiciones del pavimento se utilizan diversos indicadores, dentro de los más utilizados se encuentran la Profundidad de Rodera (PR) y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), este último es un indicador que representa de manera directa la condición funcional de un pavimento, y a su vez constituye un indicador complementario para sectorizar la red según su capacidad estructural (Vera et al., 2010). Además, de los trabajos de rehabilitación de la estructura del pavimento existen otras alternativas o soluciones de conservación. Una de ellas y quizá más conveniente para algunos casos es el de colocar una sobrecarpeta asfáltica sobre la estructura existente, o la reposición parcial o total de la carpeta y algunas veces parte de la base mediante el fresado. Los trabajos anteriormente descritos representan grandes ventajas al permitir rehabilitar un pavimento, teniendo como objetivo aumentar la capacidad estructural y generar al mismo tiempo un impacto mínimo sobre el ambiente y sobre sus usuarios (Ibídem). Por otro lado, efectuar una reconstrucción del pavimento, no presenta la misma problemática que la de un

nuevo proyecto de construcción, pero es necesario analizar la capacidad de carga del suelo y las condiciones estructurales del pavimento existente.

La estructura de los pavimentos flexibles es un sistema compuesto de diferentes materiales colocados en capas interconectadas y mecánicamente compactadas, cuya tarea principal es absorber las cargas del tránsito vehicular y transmitir las reduciendo así el límite de deformación en la capa de terracería o subyacente. El funcionamiento correcto de los pavimentos depende de las características de resistencia en los materiales que conforman su estructura, ya que estas definen la magnitud de las deformaciones, sin embargo el análisis de la estructura de pavimentos es mucho más complejo si se compara con cualquier otro tipo de estructura de ingeniería, ya que ésta posee un sistema multicapas compuesto de diferentes materiales propensos a cambiar sus propiedades debido a factores externos bajo cargas dinámicas (Garnica et al, 2004).

2.2 La gestión de los pavimentos en la planeación de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha desarrollado y publicado a través del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) un “Sistema de evaluación de pavimentos (SEP)”, los resultados obtenidos representan una herramienta sencilla y práctica para la evaluación de la red carretera federal, permitiendo al evaluador tener elementos para definir y priorizar las acciones de conservación requeridas para garantizar la operatividad del eje vial, en función de las condiciones presupuestarias prevalecientes en ese momento (Orozco et al., 2004). Este sistema de evaluación de pavimentos considera aspectos generales, superficiales y estructurales, apoyados en la medición del Índice de Fricción Internacional (IFI), el IRI, PR, asimismo incorpora acciones de conservación correspondientes a distintos deterioros y provee de costos paramétricos para las mismas (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Aspectos considerados en el dictamen técnico de SCT para la conservación de ejes carreteros, a partir del Sistema de evaluación de pavimentos (SEP).

Aspecto	Descripción
Antecedentes	Descripción de los antecedentes históricos del tramo carretero y sus generalidades.
Entorno geográfico	Descripción del entorno geográfico considerando: localización, clima, topografía, drenaje, etc. del tramo de estudio.
Datos del tránsito	Descripción del volumen de tránsito que circula por el tramo en estudio, su clasificación y tasa de crecimiento.
Inventario de deterioros	Descripción general del tipo y severidad de los deterioros, indicando las causas de los defectos funcionales o estructurales por resolver.
Informe fotográfico georrefenciado	Descripción de lo realizado y observado, indicando el kilometraje y coordenadas geográficas de cada fotografía que representa deterioros o condiciones relevantes.
Análisis de la estructura de pavimento existente	Descripción general de la estructura de pavimento existente, indicando su calidad y posibles causas del problema principal.
IRI y PR	Medición de las condiciones superficiales del eje carretero, a través de estos indicadores de desempeño funcional.
Alternativas de solución	Descripción detallada de las alternativas propuestas para solucionar los problemas existentes, el diseño por fatiga y deformación permanente, el cálculo de la vida útil esperada para cada solución.
Costos de trabajos por ejecutar	Elaboración de catálogo de conceptos, especificaciones generales y particulares, volúmenes de obra y costos de los trabajos a ejecutar por kilómetro, de la alternativa(s) de rehabilitación indicada.

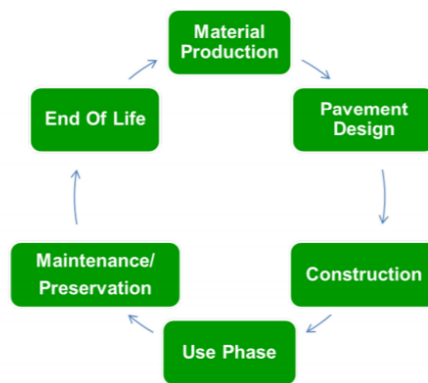
Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2004).

Es importante mencionar que el tiempo transcurrido y las circunstancias de falla constituyen el ciclo de vida del pavimento, durante el cual, las condiciones y características

del mismo se degradan, dando lugar a una curva de comportamiento que refleja propiamente el nivel de servicio proporcionado al usuario, que a su vez trae importantes implicaciones económicas (Vázquez, 2006). Toda obra de conservación, principalmente cuando trate de trabajos de rehabilitación de gran dimensión, produce importantes inconvenientes operacionales y de seguridad en los usuarios, así como de los posibles impactos negativos sobre la actividad productiva. De acuerdo con Sandoval y sus colaboradores (2013), en la actualidad y ante el aumento del comercio de carga es necesario proveer infraestructura vial que ofrezca calidad, seguridad, comodidad y que cumpla con su vida útil de diseño.

Es importante mencionar que la construcción de carreteras consume una gran cantidad de recursos no renovables (Luo et al., 2013) y para abordar este problema, se han desarrollado varios programas de evaluación de la sustentabilidad, como el programa Greenroads (Muench et al., 2011), la Herramienta de Sostenibilidad de Evaluación Voluntaria de Infraestructura (INVEST) de la FHWA, el Programa de Sustentabilidad de la Federación de Carreteras de la Unión Europea (ERF) (Mendoza, 2014) y el Ingeniería Ambiental Calidad Ambiental (CEEQUAL) (Bryce et al., 2017). Estos programas contienen estrategias y herramientas para implementar criterios de sustentabilidad en diferentes etapas del ciclo de vida del pavimento, es decir, producción de materiales, diseño, construcción, fase de operación, mantenimiento y final de la vida útil (Ozer et al., 2016). (Ver figura 2.1).

Figura 2.1 Ciclo del pavimento.



Fuente: Extraído de Ozer et al., 2016.

En este sentido, varios estudios han llevado a cabo conceptos de sustentabilidad del pavimento o sustentabilidad vial para contribuciones que mejoren los aspectos económicos, sociales y ambientales de la carretera. Por ejemplo, Mao et al. (2019), proporciona un método para mejorar la sustentabilidad del rendimiento del pavimento mediante una asignación de flujo de tráfico; Corriere y Rizzo (2012), proporcionan orientación para un enfoque metodológico de sostenibilidad en el diseño de carreteras; Farooq et al. (2019), Yang et al. (2018) y Demasi et al. (2018), analizaron factores que contribuyen a la seguridad vial; en sustentabilidad ambiental, Montgomery et al. (2015) proporcionan una amplia gama de ideas y opciones para mejorar la inclusión de la sostenibilidad ambiental a lo largo del ciclo del proyecto vial.

Sin embargo, la implementación de la sostenibilidad en las estrategias de M&R requiere un mayor control porque impacta en diferentes partes del ciclo del pavimento. En este sentido la gestión de pavimentos (Pavement Management) se ha hecho cada vez más importante a medida que los pavimentos continúan envejeciendo y deteriorándose y los niveles de financiamiento han disminuido debido a la reducción de la inversión o mayor competencia por fondos. El uso de un sistema de gestión de pavimento (PMS) está destinado a proporcionar a los administradores de carreteras un proceso sistemático para generando respuestas a muchas de sus preguntas de manejo de pavimento. La gestión del pavimento se puede definir simplemente como el proceso de mantenimiento de la infraestructura de vial rentable (Wolters et al, 2011).

En la actualidad existen múltiples sistemas que integran modelos basados en herramientas de Gestión de Pavimentos para realizar planeación y administración de pavimentos. Los Sistemas de Gestión son conjunto de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a las organizaciones administradoras de las vías en la aplicación sistemática de procesos relacionados con la gestión de pavimentos, particularmente la identificación de alternativas óptimas para la conservación de la red en el corto y mediano plazos, así como la formulación de programas de conservación y mantenimiento (Ríos & Martínez, 2009). Es importante mencionar que la mayoría de los datos se obtienen mediante estudios de condición del pavimento donde se realiza la recolección de información de las condiciones del pavimento mediante medios automatizados y especializados; mismos que generan una escala o índice de condición. Sin

embargo, el índice utilizado depende directamente de los recursos económicos de la agencia y de su capacidad para obtener e interpretar dichos datos (Attoh-Okine et al., 2013).

Dado que el modelo simula cambios futuros en el sistema de carreteras a partir de las condiciones actuales, la confiabilidad de los resultados depende de dos aspectos principales de acuerdo con Bennet & Patterson (2000). El primero refiere la “entrada de datos”, con una interpretación correcta de los requisitos de entrada de datos, para lograr una calidad de datos apropiada para la confiabilidad deseada de los resultados. El segundo refiere la “calibración de salidas”, con el ajuste de los parámetros del modelo para mejorar el pronóstico, contemplando los cambios e influencias a lo largo del tiempo y bajo diversas intervenciones.

De acuerdo con Yang, et al. (2019) diferentes prácticas en los procesos constructivos, diversificaciones de tráfico y condiciones regionales generan potenciales fuentes de incertidumbre al momento de planear intervenciones de conservación. Por lo tanto, la búsqueda y actualización de los datos se vuelve un aspecto de suma importancia para mantener la confiabilidad de los PMS. En este sentido diversos estudios han realizado calibraciones a los modelos de predicción de HDM-4 para ser utilizados como insumos para PMS; por ejemplo, Bannor, et al. (2015) adaptaron los modelos de fallas estructurales para adaptarse a las condiciones de Marruecos; Jain & Parida (2005) calibraron los modelos de deterioro del pavimento para las condiciones de la red general en la India; y Rodhe et al. (1998) proponen una serie de calibraciones para mejorar la predicción de los modelos de desempeño en Sudáfrica. Asimismo, Pantuso (2018) utilizó dicho modelo para integrar estudios de evaluación de condiciones del pavimento en la implementación de un PMS en Kazakhstan. Por otro lado, diversos estudios como los de Tsunokawa & Ul-Islam (2003) se enfocan en la definición de estrategias óptimas de mantenimiento y conservación; asimismo, Zaabar & Chatti (2010) utilizan sistemas calibrados para predecir costos económicos de los usuarios.

Adicionalmente, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido una herramienta útil en la administración de pavimentos, debido a que permite la integración de distintos datos como son inventario de tramos de la red, condiciones del pavimento, historial de intervenciones, solo por mencionar algunos ejemplos, así como utilizar dicha

información en un PMS (Smadi, 2004). De hecho, los SIG tienen ciertas similitudes con los PMS debido a que cuentan con sistemas para la recolección de procesamiento y presentación de la información. Silva-Balaguera et al. (2018), realizan un estudio que integra múltiples análisis de SGI y PMS, denotando que la combinación de ambos sistemas permite optimizar costos y definir la priorización de las intervenciones; así como también, posibilitan la reducción de tiempos en el procesamiento y actualización de futuros datos en la red vial, al igual que posibilitan el acceso a información histórica y zonificada del camino.

2.3 Planeación en materia de mantenimiento y rehabilitación para el mejoramiento en el desempeño de las carreteras.

Una infraestructura en malas condiciones influye de manera determinante sobre los costos de operación y traslados de personas y mercancía, al igual que en la seguridad y comodidad de los usuarios. Según diversos estudios realizados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), si el estado superficial de un pavimento pasa de un estado “óptimo” a otro calificado de “bueno”, el costo de operación por kilómetro recorrido puede aumentar de un 15% a un 20%. Por otro lado, si el estado superficial llegara a “malo”, este factor de incremento podría ser de 35% ó 40% sobre el costo de operación (Rico et al., 1998).

De acuerdo con lo anterior, la influencia de las condiciones del pavimento en los costos de operación de los vehículos es significativa. En condiciones óptimas de circulación, que se asocian con una carretera bien conservada y sin problemas de tránsito, el costo de operación es mínimo. Las deficiencias en la superficie, pendientes o grados de curvatura no adecuados, así como la circulación de vehículos no autorizados afectan las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes (SCT, 1998).

En México, los presupuestos para construcción y mantenimiento de infraestructura vial se negocian y asignan anualmente. Adicionalmente la planificación se limita normalmente a los periodos de administraciones gubernamentales en un marco de recursos limitados. Por lo que es de vital importancia la planificación eficiente del recurso destinado a infraestructura vial desde el punto de vista del nivel de servicio que otorga al usuario y la capacidad de resistir las solicitudes de cargas durante un periodo de su vida útil.

Por otro lado, las causas de los accidentes de tráfico son un tema de análisis estadístico y se utilizan para determinar las medidas preventivas requeridas. Además del exceso de velocidad, las causas más comunes de accidentes de tráfico incluyen colisiones con otros usuarios de la carretera, chocando con obstrucciones estacionarias (vehículos estacionados, árboles al costado del camino, postes de servicios públicos, barreras de seguridad, etc.), defectos superficiales de la carretera, y otro grupo de causas está relacionado con problemas técnicos relacionados con el vehículo (Dudziak, Lewandowski y Sledzinski, 2017).

Otro aspecto importante que considerar en la planeación es el aspecto de la seguridad vial, misma que se relaciona directamente con número de accidentes ocurridos en un tramo carretero. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, los accidentes viales matan a 1.25 millones de personas anualmente, poco menos de 3,400 accidentes mortales por día y entre 30 y 50 millones sufren lesiones no mortales al año. Sin embargo, las lesiones por tráfico no se distribuyen en todo el mundo, ya que casi el 90% de todas las víctimas del tráfico ocurren en países de bajos y medianos ingresos (Wegman, 2016).

Este problema mundial, aunque es severo, tiene soluciones directas que pueden implementarse a priori mediante intervenciones efectivas como planificación urbana y de transporte, diseño de carreteras más seguras, auditorías de seguridad vial independientes para nuevos proyectos de construcción y establecimiento y aplicación de leyes internacionalmente armonizadas (OMS, 2012; Amorim, et al., 2017). Tal como es el caso en países europeos, en donde la identificación y el tratamiento de zonas críticas mediante la mejora del diseño de carreteras y la regulación del tráfico, redujeron aproximadamente un 22% el número de accidentes (Elvik & Vaa, 2004).

En general, no puede afirmarse que las características superficiales deficientes sean por sí mismas la causa directa de accidentes, sino que más bien suelen contribuir a empeorar las consecuencias en aquellas situaciones donde se ha producido un conflicto; por ejemplo, un frenazo repentino o un cambio brusco de la dirección del vehículo (Leal et al, 2004). En muchas ocasiones la causa principal es atribuida al factor humano. Sin embargo, las mejoras de las características de la infraestructura que influyen en la seguridad de la circulación vial tienen una gran eficacia. Asimismo, hay que tener en cuenta que, aunque

no se puedan evitar algunos accidentes, mediante intervenciones preventivas, pero existe un considerable potencial de reducción de la gravedad de estos (Pérez, 2007).

En México, los accidentes de tránsito permanecen entre las diez principales causas de muerte de los mexicanos. Cifras de la Secretaría de Salud revelan que en 2015, fallecieron poco más de 16 mil personas por este motivo. Se estima una tasa de 13.3 muertos por cada 100 mil habitantes, cifra solo un 0.1% menor a la registrada en 2014. De acuerdo con el documento “La seguridad vial en la Región de las Américas” (OPS, 2016), México ocupa la posición número 23, de 31 países que conforman esta región. De acuerdo con el Programa de Acción Específico de Seguridad Vial 2013-2018 (2014), las muertes y discapacidades por lesiones por accidentes viales son un creciente problema de salud pública en México. Por lo tanto, la vigilancia y monitoreo de la seguridad vial es imprescindible para contar con información clave en el diseño de intervenciones y la toma oportuna de decisiones.

Por otro lado, el principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodaje que depende de la regularidad o rugosidad superficial del pavimento. Lo anterior debido a que el conductor que circula por primera vez o en repetidas ocasiones sobre una vialidad, experimenta la sensación de seguridad o inseguridad dependiendo de lo que ve y del grado de dificultad para controlar el vehículo. La AASTHO (American Association of state highway officials) desarrolló una prueba en 1959 en la que estableció la serviciabilidad a partir del promedio de las evaluaciones de los usuarios que participaron en el estudio (Fernández, 2017; Montoya, 2007). De acuerdo con la AASTHO (1993), la valoración de este parámetro define el concepto de Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, por sus siglas en inglés). El PSI califica a la superficie del pavimento de acuerdo con una escala de valores de 0 a 5. Asimismo, el Servicio de Vivienda y Urbanización (SERVIU), presenta una escala y descripción para la valoración del (PSI). Que brinda un mayor entendimiento del estado de la vialidad construida de pavimento flexible de acuerdo a la clasificación del índice (Ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Escala y calificación de la serviciabilidad para pavimentos flexibles.

Calificación		Descripción
Verbal	Numérica	
Muy Buena	5.0 a 4.0	Solo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección, normalmente se clasificarían como muy buenos.
Buena	4.0 a 3.0	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los “Muy Buenos”, entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria.
Regular	3.0 a 2.0	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en los pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamiento, parches y agrietamiento.
Mala	2.0 a 1.0	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto en donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y ahuellamiento, y ocurre en un 50 % o más de la superficie.
Muy Mala	1.0 a 0.0	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.

Fuente: Extraído de SERVIU METROPOLITANO, 1998.

De acuerdo con Castañeda (2017), la serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario es decir a través de su comportamiento funcional. Asimismo, se relaciona con los deterioros físicos que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc., que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura del pavimento.

El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

1. Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del público usuario.
2. El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
3. La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
4. Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
5. El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

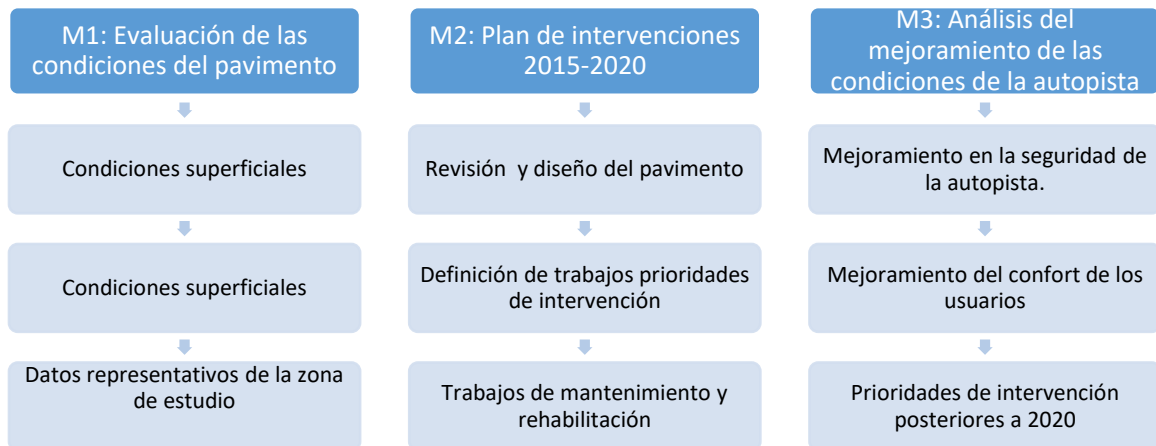
Por lo anterior es pertinente utilizar el índice de serviciabilidad en la medición del servicio que reciben los usuarios de una carretera. Ya que brinda una valoración de la percepción del usuario en materia de seguridad y confort. Asimismo, como se mencionó anteriormente el PSI va íntimamente ligado a la rugosidad del pavimento.

3. Metodologías de análisis.

3.1 Descripción específica de la aplicación del modelo al caso de estudio.

La metodología integra los datos de las condiciones superficiales y estructurales obtenidas en 2014, principalmente los deterioros superficiales, rugosidad, rodera y textura. Así como las medidas de rendimiento estructural, es decir, estratigrafía, datos de vida remanente y fatiga. Los datos representativos de las condiciones de la zona de estudio, en un proceso de simulación con la finalidad de determinar los efectos de los trabajos de conservación y mantenimiento realizados a la fecha, que apoyen la toma de decisiones futura que garantice un mejor desempeño para los usuarios de la autopista. A continuación, se presenta la estructura del modelo utilizado en la presente (Figura 3.1).

Figura 3.1 Metodología de Análisis Específico para el caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Se establece que los primeros datos de entrada deben reflejar las condiciones superficiales y estructurales del pavimento. El análisis superficial refiere una evaluación de fallas superficiales mediante un levantamiento de deterioros, así como la medición de dos indicadores de desempeño, que son el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y la Profundidad de Rodera (PR). Por su parte, el análisis estructural refiere evaluar la

estructura del pavimento, contemplando la medición de espesores, calidad de los materiales que la conforman y capacidad de carga. Asimismo, se realiza una evaluación integral del pavimento existente con el fin de predecir su vida útil, desde un punto de vista de sus capacidades deformativas y de fatiga. Este análisis considera las condiciones climatológicas de la zona de estudio y el tráfico proyectado, lo que derivó en la elaboración de un programa anual de intervenciones y con ello la implementación de trabajos de conservación en la autopista en el periodo de 2014-2019. Adicionalmente, con el fin de integrar dichos datos a un PMS se simula el efecto de los trabajos realizados a la fecha.

3.2 Evaluación de las condiciones del pavimento (2014).

En primera instancia se requiere conocer las condiciones del pavimento superficial y estructural de la Autopista Centinela-La Rumorosa. Por lo tanto, se realizó un levantamiento en campo de las diferentes fallas en la carpeta asfáltica de la autopista. Dichas fallas fueron clasificadas conforme al “Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas” (SCT, 1991). Posteriormente se determina una categoría para los distintos tipos de daños superficiales del pavimento de acuerdo con su grado de severidad, según el “Libro de evaluación y rehabilitación de pavimento flexible” de la SCT (Tabla 3.1).












Tabla 3.1 Niveles de severidad de fallas en superficie de rodamiento

Severidad	Valor
Muy ligera	1
Ligera	2
Moderada	3
Severa	4
Muy severa	5

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2004.

Para la ubicación espacial de las fallas se utiliza el software Arcmap 10.3, un Sistema de Información Geográfica que expresa de manera gráfica (mapas) la situación actual del fenómeno de estudio permite incorporar datos para cada elemento georreferenciado, es decir cada punto, línea o polígono posee información, descripción y archivos adjuntos que son útiles para ejercicios de análisis (Figura 3.2).

Figura 3.2 Simbología para georreferenciación de las fallas

Simbología de los tipos de fallas en pavimentos flexibles			
	Kilometro		Piel de Cocodrilo
	Calavereo		Pulimiento
	Deformación Longitudinal		Rodera
	Desplazamiento		Sondeo
	Grieta Longitudinal		Inicio del Slurry
	Grieta Transversal		Fin del Slurry
	Grieta tipo Mapa		Intervención realizada 2016

Fuente: Elaboración propia, basado SCT (2004).

Asimismo, con el fin de obtener los factores que impactan negativamente sobre los niveles de servicio, seguridad y costo al usuario, se midió el desempeño del pavimento, a través del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Profundidad de Rodera (PR), ambos son parte fundamental de la evaluación técnica. El primero proporciona información útil sobre las condiciones del estado actual del pavimento, específicamente en la regularidad superficial. Además de proponer un umbral de alerta con respecto a la escala del IRI, permitiendo conocer cuáles son los sub-tramos que en ese momento requieren reparación o ser intervenidos posteriormente. El segundo son deformaciones plásticas en la superficie de rodamiento de un pavimento asfáltico, presentándose longitudinalmente sobre el área de rodado de los neumáticos, principalmente de vehículos pesados. La aparición de roderas en la superficie de rodamiento, aparte de afectar la funcionalidad del pavimento representa un problema para quienes circulan sobre la carretera, presentándose problemas como la acumulación de agua sobre las roderas y por ello el deslizamiento de los neumáticos de los vehículos, entre otras.

El equipo que normalmente se utiliza para determinar la **PR**, es un sistema láser montado en un automóvil capaz de detectar y caracterizar la deformación de la sección transversal en la amplitud del ancho del carril, de tal forma que se pueda identificar tanto la

profundidad como el ancho de las roderas, y la máxima profundidad de rodera de cada sección. El láser del equipo abarca una amplitud de 4 m y con una capacidad de lectura de hasta 30 muestras por segundo a una velocidad de operación de hasta 100 km/hr (SCT, 2014). Al igual que el **IRI**, el indicador de **PR** se determina a cada kilómetro de longitud, pero se tiene como límite 5mm de deformación promedio a través del mismo (5mm/km). En la red básica los umbrales aceptación para el IRI y PR en autopistas se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Criterio para regularidad y profundidad de rodera en autopistas.

Índice de rugosidad internacional (IRI)		Profundidad de rodera (PR)	
Valor	Criterio	Valor (mm)	Criterio
0- 2.81	Bueno	0 – 5	Bueno
	Regular	5.1 – 8	Aceptable
Mayor a 2.81	No aceptable	Mayor a 8	No aceptable

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el programa HDM-4 cuenta con criterios establecidos por ASHTOO para medir la condición superficial del pavimento. Por lo tanto, los datos obtenidos así como la información de deterioros se clasifican de acuerdo a dichos criterios (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Criterios para clasificación de las condiciones del pavimento de acuerdo al grado de deterioro.

Grade of deterioration	Cracking (%)	aggregate shedding (%)	N° potholes per km	Edge break (m² per km)	average depth of ruts (mm)	Roughness (m per km)
New	0	0	0	0	0	0
Good	0	1	0	0	2	2
Fair	5	10	0	10	5	4
Poor	15	20	5	100	15	6
Bad	25	30	50	300	25	8

Fuente: Elaboración propia con datos del programa HDM-4

Las características estructurales de las capas que conforman el pavimento y sus propiedades físicas y mecánicas se obtienen mediante sondeos y pruebas de laboratorio, de acuerdo con la normativa nacional de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés son:

- **ASTM C-136/00**, Sieve analysis of fine and coarse aggregates
- **ASTM D1883/07e2**, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils
- **ASTM D3665/12**, Standard practice for random sampling of construction materials
- **SCT-M-MMP-1-01/03**, Muestreo de materiales para terracerías
- **SCT-M-MMP-1-03/03**, Secado, disgregado y cuarteo de muestras
- **SCT-M-MMP-1-04/03**, Contenido de agua
- **SCT-M-MMP-1-06/03**, Granulometría de materiales compactables para terracerías
- **SCT-M-MMP-1-07/07**, Límites de consistencia
- **SCT-M-MMP-1-08/03**, Masas volumétricas y coeficientes de variación volumétrica
- **SCT-M-MMP-1-09/06**, Compactación AASHTO
- **SCT-M-MMP-1-11/13**, Valor soporte de california (CBR) y expansión en laboratorio
- **SCT-M-MMP-4-04-004/02**, Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas
- **SCT-M-MMP-4-04-005/08**, Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas
- **SCT-M-MMP-4-04-006/02**, Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas

Las pruebas que se efectúan en las muestras de capas extraídas son para obtener el Valor Relativo de Soporte (VRS), límites de consistencia, granulometrías, pesos volumétricos, entre otros.

Se realizaron un total de 61 sondeos a lo largo del tramo de estudio. En lo que respecta al sub-tramo Mexicali – Centinela, del km. 0+000 al km. 18+000, se efectuaron 9

sondeos en el cuerpo ascendente “A” y 9 sondeos en el cuerpo descendente “B”. Lo que respecta al sub-tramo Centinela – La Rumorosa, del km. 18+000 al km. 64+000, se efectuaron 21 sondeos en el cuerpo ascendente “A” y 22 en el cuerpo descendente “B”, sumando un total de 43 sondeos en la autopista. Es importante mencionar que los sondeos se realizaron solamente en el carril de baja velocidad debido a que dicho carril es el que presente mayor deterioro. Asimismo, por las condiciones de la autopista no fue posible cerrar ambos carriles de circulación. En las tablas 3.5 y 3.6 se muestran las ubicaciones de los 43 sondeos en el tramo carretero analizado.

Tabla 3.5 Ubicaciones de sondeos en ambos cuerpos del tramo del 0+000 al 18+000

Ubicación de sondeos en el cuerpo “A”		Ubicación de sondeos en el cuerpo “B”	
Número de sondeo	Cadenamiento	Número de sondeo	Cadenamiento
1	0+100	24	17+150
2	2+400	25	16+200
3	3+670	26	14+050
4	4+320	27	12+500
5	7+950	28	10+120
6	10+100	29	9+700
7	12+050	30	5+650
8	16+100	31	4+900
9	17+400	32	0+021

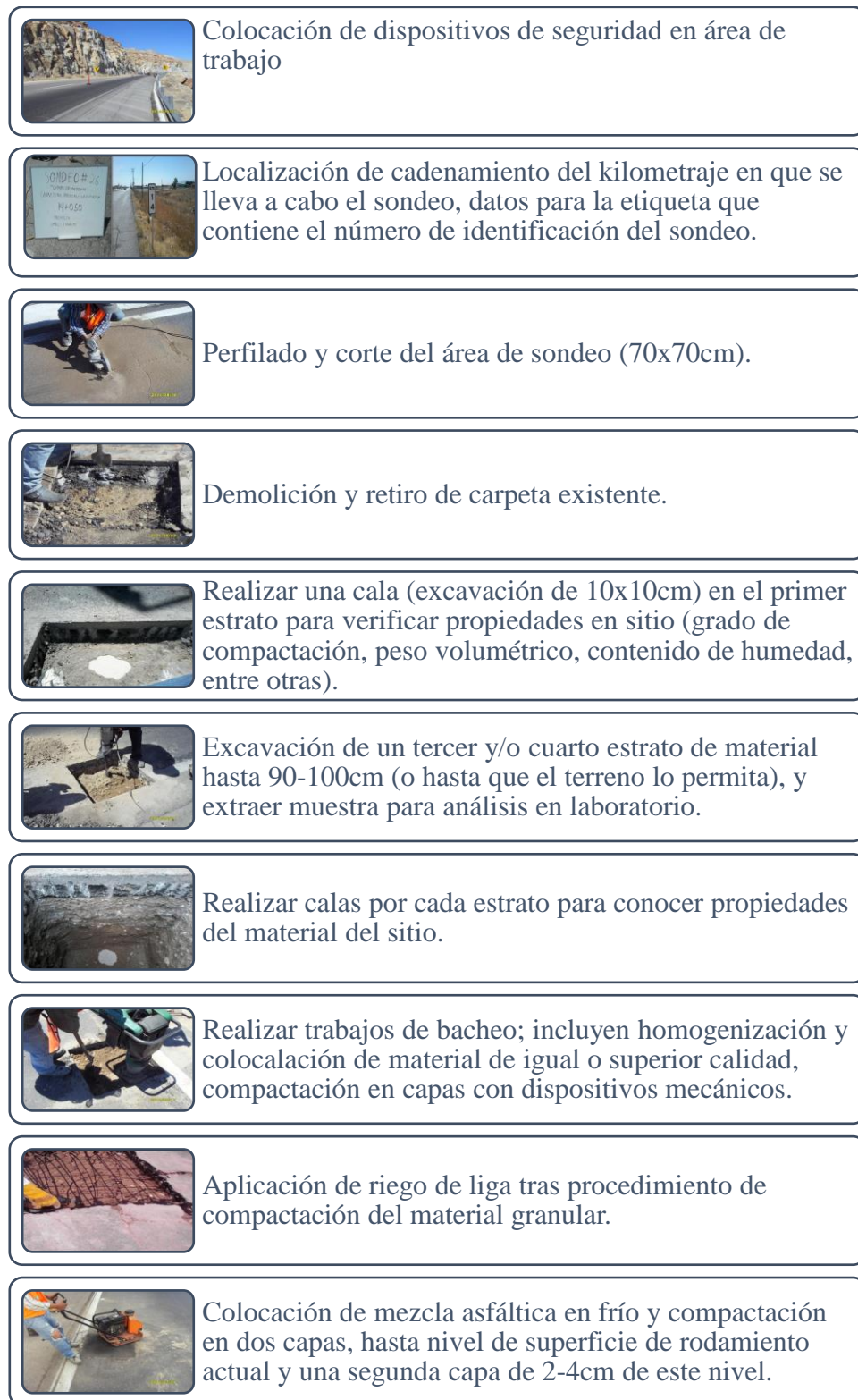
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.6 Ubicaciones de sondeos en ambos cuerpos del tramo del km. 18+000 al km. 64+000

Ubicación de sondeos en el cuerpo "A"		Ubicación de sondeos en el cuerpo "B"	
Numero de sondeo	Cadenamiento	Numero de sondeo	Cadenamiento
10	18+400	22	18+200
11	20+850	21	20+350
12	22+350	20	24+050
13	24+400	19	26+400
14	27+450	18	27+800
15	29+100	17	28+850
16	31+500	16	31+750
17	33+500	15	33+700
18	35+200	14	35+400
19	37+100	13	36+650
20	38+300	12	38+800
21	41+000	11	42+500
22	45+990	10	45+600
24	47+100	9	46+980
25	49+100	8	49+000
26	52+800	7	50+400
23	55+000	6	54+850
27	58+050	5	54+780
28	58+940	4	57+000
29	60+100	3	60+000
30	61+000	2	60+920
		1	63+700

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.3. Procedimiento utilizado para la obtención de muestras



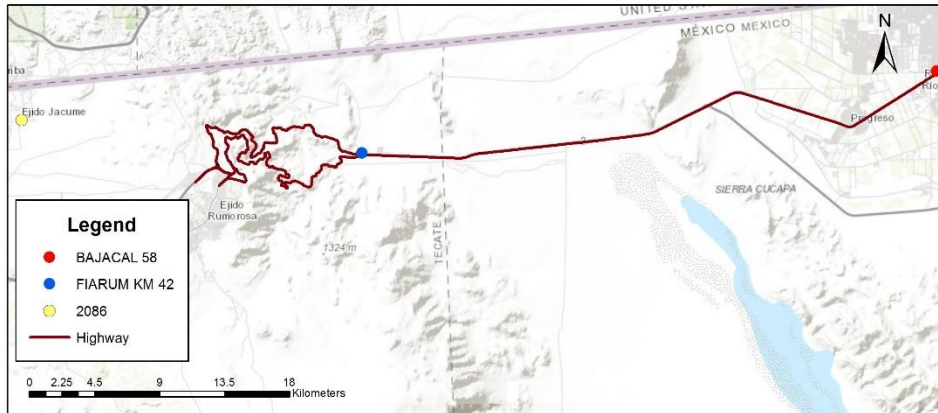
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las pruebas de laboratorio permitieron en primera obtener el perfil stratigráfico y en segundo, aportaran información para la revisión del diseño de pavimento existente. Como parte de los trabajos de evaluación del pavimento existente se hace una estrategia de revisión por subtramos, con el propósito de identificar las particularidades de la carretera y con ello definir las zonas más dañadas que necesitan oportunamente algún trabajo de conservación. La meta final de esta etapa de evaluación recae en la obtención de la vida previsible del pavimento, ya sea que se fatigue la carpeta o deforme alguna o todas las capas que la conforman. Para calcular el valor de la vida previsible, ya sea en ejes equivalentes o traducidos en años, es necesario considerar una serie de datos como son: tipo de camino, tránsito del proyecto, capas, espesores, valores relativos de soporte críticos, modulo elástico o de rigidez y relación de poisson (Corro et al., 1999). El cálculo de dichos valores se realiza mediante el uso del software Dispav-5 versión 3.0, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (2014). A continuación, se presentan las consideraciones utilizadas para el cálculo de dichos valores de resistencia. El proceso de revisión de diseño del pavimento incluye la verificación de: a) condiciones climatológicas de la zona de estudio b) datos viales y c) evaluación del pavimento existente.

a) Condiciones climatológicas del caso de estudio

El factor climatológico es un aspecto que se debe tomar en consideración para el diseño y evaluación de los pavimentos, ya que afectan de manera directa el comportamiento del mismo. Las condiciones climatológicas modifican la rigidez, debido a las propiedades termoplásticas del material que constituye las capas asfálticas de los pavimentos flexibles (Valdés, 2012). Es importante mencionar que la autopista presenta gran variabilidad en sus condiciones climatológicas. Por lo tanto, para el análisis de los datos climatológicos se utilizan datos de temperaturas obtenidas de tres estaciones climatológicas; dos de ellas proporcionadas por FIARUM, el caso de FIARUM KM-42 y BAJACAL58; así como una estación obtenida de la red de estaciones climatológicas de CONAGUA, nombrada estación 2086. Los datos de ubicación de las estaciones quedan establecidos en la Figura 3.4

Figure 3.4 Ubicación de estaciones climatológicas.










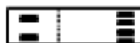












b) *Datos viales*

La clasificación de vehículos en México es en tres categorías vehículos ligeros, pesados y especiales, los cuales se describen a continuación, así mismo la Figura 3.4 presenta de forma esquemática la clasificación de estos vehículos, basada en la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 relativa al peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.

- **Vehículos ligeros:** son los vehículos que tienen dos ejes o cuatro ruedas.
- **Vehículos pesados:** son los vehículos destinados al transporte de carga o pasajeros, de dos o más ejes y seis o más ruedas.
- **Vehículos especiales:** son aquellos que eventualmente transitan el camino como camiones y remolques especiales para el transporte de maquinaria pesada o productos voluptuosos y maquinaria agrícola y/o de construcción.

Figura 3.5 Clasificación general de vehículos en México.

Tipo de Vehículo		Número de ejes	Esquemas		Símbolo
			Perfil	Planta	
Ligeros	Automóvil	2			A2
	Camionetas				A'2
Pesados	Autobuses	2			B2
		3			B3
	Camiones	2			C2
		3			C3
					T2-S1
		5			T3-S2
		6			T3-S3
		9			T3-S2-R4
Especiales	Camiones y/o Remolques	Variables			
	Maquinaria agrícola				
	Bicicletas				
	Otros				

Fuente: NOM-012-SCT-2-2008

Como parte del proceso de revisión del pavimento existente, se deben considerar los datos viales presentados por la SCT y en algunos casos por la dependencia administradora del tramo. La información se emite anualmente a manera de reporte, pudiendo visualizar los subtramos con mayor y menor composición vehicular y TDPA, entre otras características. Es importante calcular las tasas de crecimiento vehicular con el fin de proyectar la vida previsible del pavimento de manera más certera. Para la elaboración de este documento el nivel de tránsito vehicular es definido en ejes equivalentes, el cual representa la unidad de daño pronosticada inducida por repeticiones de un eje sencillo de 8.2 toneladas con una presión de inflado de 5.8 kg/cm² en un periodo de tiempo (AASHTO, 1993; FHWA, 1995). Como menciona Patrick Lavin (2014), los ejes equivalentes son clave en la estimación de la vida útil y diseño de un pavimento asfáltico. Los efectos del tráfico sobre las condiciones del pavimento pueden estimarse mediante la

Tránsito Diaria Promedio Anual (TDPA) y el cálculo de los ejes equivalentes correspondiente al tráfico que circuló por la vialidad del 2014 al 2018 mediante la siguiente ecuación:

$$\Sigma L = (TD) \times (CD) \times \sum_{i=1}^P C_i (w_i \Sigma C_{dm} + (1 - w_i) \Sigma C_{dv}) \quad (1)$$

Donde ΣL es suma de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, esperados al final del proyecto, TD corresponde al tránsito de diseño, Cdm es el coeficiente de daño de vehículos cargados, Cdv corresponde al coeficiente de daño de vehículos vacíos, CD es el coeficiente de distribución por carril en decimales, Ci es el coeficiente de distribución direccional por cada tipo de vehículo (i), wi es la proporción de vehículos cargados por cada tipo de vehículo (i).

De la publicación de Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos 2014 y 2012, se obtuvieron las tasas de crecimiento anual y clasificación vehicular como a continuación se describen.

Tabla 3.7 Datos viales utilizados en el cuerpo A

CUERPO “A”		
TRAMO CARRETERO	Datos Viales SCT actualizados al 15 de julio del 2014	Tasa de Crecimiento %
Km 0+000 al km 8+000	6522	2.5
Km 15+000 al km 18+000	3691	1.9
Km 18+000 al km 64+000	6058	1.48

Fuente: Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2014(actualizados al 15 de julio) y 2011 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Tabla 3.8 Datos viales utilizados en el cuerpo B

CUERPO “B “		
TRAMO CARRETERO	Datos Viales SCT actualizados al 15 de julio del 2014	Tasa de Crecimiento %
Km 64+000 al km 18+000	6434	1.48
Km 18+000 al km 15+000	3691	1.9
Km 15+000 al km 0+000	6255	2.5

Fuente: Datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos año 2014(actualizados al 15 de julio) y 2011 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

En la Figura 3.6. Se muestran los aforos, clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio, información proporcionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Figura 3.6 clasificación vehicular y TDPA del tramo de estudio.

19 CARR: Mexicali - Tijuana				CLAVE: 02082				RUTA: MEX-002D-MEX				AÑO: 2013								
LUGAR	ESTACION				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO												COORDENADAS			
	KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D	LATITUD	LONGITUD
Mexicali	0.00																			
Colonia Progreso	7.80	3	1	6522	1.0	75.6	3.7	6.7	3.4	6.3	1.3	1.2	0.8	76.6	3.7	19.7	0.069	0.503	32.586223	-115.600051
Colonia Progreso	7.80	3	2	6434	0.9	72.6	4.4	7.6	3.6	7.2	1.5	1.3	0.9	73.5	4.4	22.1	0.074	0.503	32.586222	-115.600069
Laguna Salada	25.00	1	1	4970	1.5	68.3	4.7	8.7	2.1	10.6	1.4	1.8	0.9	69.8	4.7	25.5	0.059	0.513	32.576399	-115.743602
Laguna Salada	25.00	1	2	5243	0.8	66.7	5.0	8.9	2.4	11.7	1.5	2.1	0.9	67.5	5.0	27.5	0.060	0.513	32.576508	-115.743590
La Rumorosa	67.60	1	1	2755	0.8	72.0	1.1	6.3	2.5	12.8	2.3	1.2	1.0	72.8	1.1	26.1	0.112	0.502	32.544508	-116.047799
La Rumorosa	67.60	1	2	2781	0.9	68.2	1.2	6.6	2.9	15.1	2.5	1.5	1.1	69.1	1.2	29.7	0.102	0.502	32.544442	-116.047642
T. Der. Estación de Microondas	69.62	3	0	3223	1.0	68.6	2.1	7.3	1.7	12.9	3.1	2.2	1.1	69.6	2.1	28.3	0.077	0.512	32.510049	-116.090930
Agua Hechicera	87.00	1	0	3114	1.2	66.3	1.2	8.2	1.5	16.2	2.6	1.8	1.0	67.5	1.2	31.3	0.072	0.507	32.494628	-116.219866
El Encinal	112.15	1	0	4938	0.7	70.1	2.0	9.9	1.6	11.5	2.0	1.0	1.2	70.8	2.0	27.2	0.116	0.510	32.560160	-116.443979
Tecate	132.00	1	1	6445	1.1	75.9	1.9	8.1	0.5	10.9	0.9	0.4	0.3	77.0	1.9	21.1	0.082	0.505	32.565685	-116.583889
Tecate	132.00	1	2	6324	0.8	74.0	2.0	9.2	0.6	11.7	1.0	0.4	0.3	74.8	2.0	23.2	0.087	0.505	32.565689	-116.583892
Tecate	132.00	3	1	10928	1.3	80.3	2.0	9.0	1.6	3.7	0.2	0.8	1.1	81.6	2.0	16.4	0.069	0.501	32.554473	-116.663116
Tecate	132.00	3	2	10981	1.0	78.2	2.4	10.2	1.8	4.1	0.2	0.9	1.2	79.2	2.4	18.4	0.067	0.501	32.554445	-116.663152

13 CARR: El Centinela - La Rumorosa (Cuota)				CLAVE: 02011				RUTA: MEX-002D				AÑO: 2013								
LUGAR	ESTACION				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO												COORDENADAS			
	KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D	LATITUD	LONGITUD
Ent. El Centinela	20.30																			
Laguna Salada	25.00	1	1	1088	0.8	79.1	2.4	12.5	0.8	2.6	0.6	0.9	0.3	79.9	2.4	17.7	0.098	0.518	32.576518	-115.743869
Laguna Salada	25.00	1	2	1012	0.6	77.5	2.7	14.0	0.9	2.8	0.5	0.7	0.3	78.1	2.7	19.2	0.112	0.518	32.576518	-115.743870
La Rumorosa	67.60	1	1	2454	0.7	78.5	0.8	10.7	1.0	5.2	1.5	0.6	1.0	79.2	0.8	20.0	0.117	0.503	32.544657	-116.047572
La Rumorosa	67.60	1	2	2486	0.9	75.3	0.8	12.7	1.1	5.6	1.8	0.7	1.1	76.2	0.8	23.0	0.153	0.503	32.544656	-116.047572

13 CARR: El Centinela - La Rumorosa (Cuota)				CLAVE: 02011				RUTA: MEX-002D				AÑO: 2013								
LUGAR	ESTACION				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO												COORDENADAS			
	KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D	LATITUD	LONGITUD
Ent. El Centinela	20.30																			
Laguna Salada	25.00	1	1	1088	0.8	79.1	2.4	12.5	0.8	2.6	0.6	0.9	0.3	79.9	2.4	17.7	0.098	0.518	32.576518	-115.743869
Laguna Salada	25.00	1	2	1012	0.6	77.5	2.7	14.0	0.9	2.8	0.5	0.7	0.3	78.1	2.7	19.2	0.112	0.518	32.576518	-115.743870
La Rumorosa	67.60	1	1	2454	0.7	78.5	0.8	10.7	1.0	5.2	1.5	0.6	1.0	79.2	0.8	20.0	0.117	0.503	32.544657	-116.047572
La Rumorosa	67.60	1	2	2486	0.9	75.3	0.8	12.7	1.1	5.6	1.8	0.7	1.1	76.2	0.8	23.0	0.153	0.503	32.544656	-116.047572

L U G A R	E S T A C I O N				C L A S I F I C A C I O N V E H I C U L A R E N P O R C I E N T O													C O O R D E N A D A S			
	KM	TE	SC	TOPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D	LATITUD	LONGITUD	
Mexicali	0.00																				
Colonia Progreso	7.80	3	1	6133	0.8	75.9	4.2	6.5	3.1	6.9	1.5	0.3	0.8	76.7	4.2	19.1	0.077	0.506	32.583734	-115.591131	
Colonia Progreso	7.80	3	2	5997	0.6	73.8	4.8	7.2	3.3	7.4	1.6	0.3	1.0	74.4	4.8	20.8	0.071	0.506	32.583703	-115.591122	
Laguna Salada	25.00	1	1	4746	0.5	72.7	3.5	5.2	2.2	11.5	1.4	1.6	1.4	73.2	3.5	23.3	0.075	0.514	32.577326	-115.735635	
Laguna Salada	25.00	1	2	5023	0.4	70.6	3.7	5.5	2.2	13.0	1.5	1.7	1.4	71.0	3.7	25.3	0.096	0.514	32.577326	-115.735635	
La Rumorosa	67.60	1	1	2254	0.6	69.9	2.0	7.7	2.1	13.7	1.9	1.4	0.7	70.5	2.0	27.5	0.115	0.517	32.551063	-116.043097	
La Rumorosa	67.60	1	2	2107	6.1	61.5	2.3	8.8	2.2	14.8	2.2	1.4	0.7	67.6	2.3	30.1	0.086	0.517	32.551063	-116.043097	
T. Der. Estación de Microondas	69.62	3	0	3148	0.8	68.0	2.4	7.0	1.9	14.6	2.7	1.6	1.0	68.8	2.4	28.8	0.075	0.509	32.512806	-116.084721	
Agua Hechicera	87.00	1	0	3008	1.0	64.1	2.7	7.6	2.1	16.7	2.8	1.8	1.2	65.1	2.7	32.2	0.073	0.513	32.495910	-116.221339	
El Encinal	112.15	1	0	4606	0.7	68.9	2.5	7.1	1.4	15.0	2.1	1.4	0.9	69.6	2.5	27.9	0.077	0.507	32.557764	-116.439588	
Tecate	132.00	1	1	6052	0.7	83.4	2.7	4.6	1.1	5.6	0.6	0.5	0.8	84.1	2.7	13.2	0.082	0.517	32.564117	-116.580733	
Tecate	132.00	1	2	5652	0.6	81.6	2.8	5.4	1.3	6.5	0.5	0.5	0.8	82.2	2.8	15.0	0.085	0.517	32.564117	-116.580732	
Tecate	132.00	3	1	10052	0.4	84.9	2.5	4.4	1.2	4.8	0.6	0.4	0.8	85.3	2.5	12.2	0.072	0.508	32.553701	-116.663931	
Tecate	132.00	3	2	9742	1.2	82.1	2.8	5.1	1.2	5.6	0.7	0.4	0.9	83.3	2.8	13.9	0.074	0.508	32.553701	-116.663931	
Presa Abelardo L. Rodríguez	165.00	3	0	38132	1.0	86.1	2.4	4.1	1.0	2.2	1.1	0.6	1.5	87.1	2.4	10.5	0.068	0.502	32.451989	-116.910271	
Tijuana	182.60																				

Fuente: Datos viales 2014, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2014b.

c) Evaluación del pavimento existente

Por último, como parte de los trabajos de evaluación del pavimento existente, se hace una estrategia de revisión por subtramos, con el propósito de identificar que zonas en la carretera están más dañadas y ocupan oportunamente algún trabajo de conservación. La meta final de esta etapa de evaluación recae en la obtención de la vida previsible del pavimento, ya sea que se fatigue la carpeta o deforme alguna o todas las capas de la estructura del mismo.

3.3 Plan de Intervenciones 2015-2020.

El plan de intervenciones enmarca el planteamiento estratégico previo a la realización de los trabajos de conservación y mantenimiento, permitiendo definir y planear las distintas intervenciones sobre el tramo de estudio en un periodo de tiempo. Es importante mencionar, que los tramos que presentan deterioros severos requieren atención inmediata,

ya que al seguir progresando terminan colapsando gran parte de la estructura del pavimento.

El objetivo del mismo es definir las intervenciones de conservación más adecuadas y pertinentes de acuerdo al tipo de falla superficial y estructural que se presente en el tramo y a su vida útil previsible desde un punto de vista superficial y estructural (deformación y fatiga).

a) Selección de las intervenciones

Una vez identificados y clasificados los deterioros presentes en el tramo se procede a definir las intervenciones de conservación y mantenimiento aplicables a cada deterioro. Se recomienda clasificar los trabajos de intervención según su clasificación, rutinaria, periódica o reconstrucción, así como los procedimientos que deben utilizarse. A continuación, se presentan los trabajos que se realizan en cada una de las clasificaciones anteriormente mencionadas según la Guía de Procedimientos y Técnicas de Conservación (SCT, 2014).

Rutinaria: se realizan las labores que tienen como fin conservar en buenas condiciones la superficie de rodadura, las zonas laterales, las obras de drenaje y subdrenaje, el cercado, los cortes, terraplenes y todos los elementos del camino dentro de la franja del derecho de vía. Entre los principales trabajos de conservación de esta categoría se encuentra bacheo, relleno de grietas, renivelaciones aisladas, riegos de sello aislados, riegos asfálticos de protección, retiro de obstáculos, rastreos y/o recargues en caminos revestidos o en terracerías.

Periódica: Se denomina conservación periódica a todas las obras de rehabilitación que en forma periódica o eventual son necesarias para que en un camino ofrezca las condiciones adecuadas de servicio. Entre los principales trabajos de conservación de esta categoría se encuentra, recuperación de pavimentos, renivelación, tratamientos superficiales, bacheo profundo, reconstrucción de terraplenes, rehabilitación de bases, reconstrucción de carpetas, riegos de sello, restitución de señalamiento horizontal y obras de prevención de derrumbes.

Reconstrucción: Esta actividad es la más completa y costosa, debido a que rehabilita parcial o totalmente la estructura de los pavimentos, comprendiendo la recuperación de una parte de la estructura, previo tratamiento de estabilización con adición de pétreos, productos asfálticos, cemento Portland u otros aditivos, tratamiento de la capa descubierta, tendido de la parte recuperada y de la carpeta asfáltica, restitución o reparación de obras menores de drenaje dañadas, instalación de sistemas de subdrenaje y otros.

Se georreferenciaron las intervenciones por año con el fin de generar un informe digital mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual permite realizar un análisis complejo de la realidad espacial.

3.4 Análisis del mejoramiento en el desempeño de la autopista.

Los resultados en el mejoramiento de las condiciones de desempeño de la autopista se reflejan en distintos indicadores de operatividad. En el presente documento se toma en cuenta el aumento en el uso de la autopista, reducción de la cantidad de accidentes y el mejoramiento de la seguridad y confort del usuario, mediante el índice de serviciabilidad. A continuación, se presentan los análisis utilizados para medir dichos indicadores.

c) Análisis del mejoramiento de la seguridad en la autopista.

De acuerdo con Rivera y Méndoza (2009) es posible medir la efectividad de las intervenciones en materia de seguridad a través del análisis de los accidentes principalmente mediante la jerarquización de las medidas realizadas sobre su efectividad en diferentes criterios como pueden ser: reducción de accidentes, disminución de muertes, disminución en costos materiales, etc. Por lo tanto, para medir la incidencia en el mejoramiento del desempeño, se realiza un análisis de los accidentes en el tramo carretero y se analizan cambios en la tendencia a partir de las intervenciones realizadas en el tramo. Dicha tendencia se analiza comparando el uso de la autopista a través de los vehículos usuarios de la autopista con los accidentes ocurridos por año.

e) Análisis del mejoramiento del confort de los usuarios.

Para medir el efecto de los trabajos ejecutados en el desempeño del pavimento se realiza una simulación de los trabajos propuestos y su impacto en la seguridad y confort de los usuarios. A partir del Índice de Seveciabilidad Presente (PSI), concepto definido por la AASTHO (1994) (American Association of State Highway Officials) para evaluar la condición funcional del pavimento de acuerdo a la percepción del usuario. Dicho índice es calculado mediante su relación con el IRI propuesta por Al-Omari y Darter (1994) para pavimentos asfálticos mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{PSI = 5 * e^{-0.24+IRI}} \quad (2)$$

La simulación de los trabajos en el tramo fue realizado con el Sistema de Gestión de Infraestructuras HDM-4 Versión 1.03, utilizando el módulo de Work Effects (WE), mismo que incluye relaciones para la modelización del deterioro de la carretera y los efectos de los trabajos en el mejoramiento de las condiciones del pavimento. La calibración del modelo de predicción se realiza mediante estudios de campo y literatura existente relacionada a los impactos de las estrategias de mantenimiento y rehabilitación (Cole et al., 2016), las condiciones de la zona de estudio y el cálculo de los ejes equivalentes reales utilizando la ecuación (1) por año del 2014 al 2018.

Una vez obtenido el valor se determinó el porcentaje de los tramos que mejoraron sus condiciones de servicio en la autopista de acuerdo con la siguiente escala (Tabla 3.9).

Tabla 3.9 Escala de clasificación para el nivel de servicio (AASHTO).

PSI	Calificación
5 – 4	Muy buena
4 – 3	Buena
3 – 2	Regular
2 – 1	Mala
1 – 0	Muy mala

Fuente: Elaboración propia.

Dicho efecto se calculó en diferentes escenarios y etapas del periodo de análisis es decir al inicio del periodo de análisis en 2014, al final del periodo en 2020 en un escenario

si no se hubieran realizado las intervenciones. Asimismo, en el momento que toma efecto la primera intervención sobre el nivel del servicio y por último, al finalizar el periodo de estudio una vez realizada la intervención. Dicha información se plasma en un larguillo en el que se aprecian los efectos de las intervenciones en el confort de los usuarios.

4. Resultados de investigación.

Una vez descrita la metodología de análisis específico (MAE) se procederá a describir los resultados de investigación.

4.1 M1: Evaluación de las condiciones del pavimento (2014).

4.1.1 Levantamiento y georreferenciación de daños.

El levantamiento de deterioros en campo permitió caracterizar el tipo falla predominante por kilómetro, a continuación, se resumen estos resultados que entregan la condición superficial existente del eje vial bajo estudio.

El sub-tramo Mexicali – Centinela que comprende del km. 0+000 al km.18+000 (en ambos cuerpos) es el más afectado de la autopista, este sub-tramo presenta la mayor cantidad y severidad de deterioros. En lo que respecta al cuerpo ascendente “A”, predominan las grietas tipo mapa, grietas tipo piel de cocodrilo, grietas tipo transversal y grietas tipo longitudinal.

Figura 4.1 Deterioros presentes en el cuerpo ascendente “A” del km 0+000 al 18+000.



Fuente: Elaboración propia.

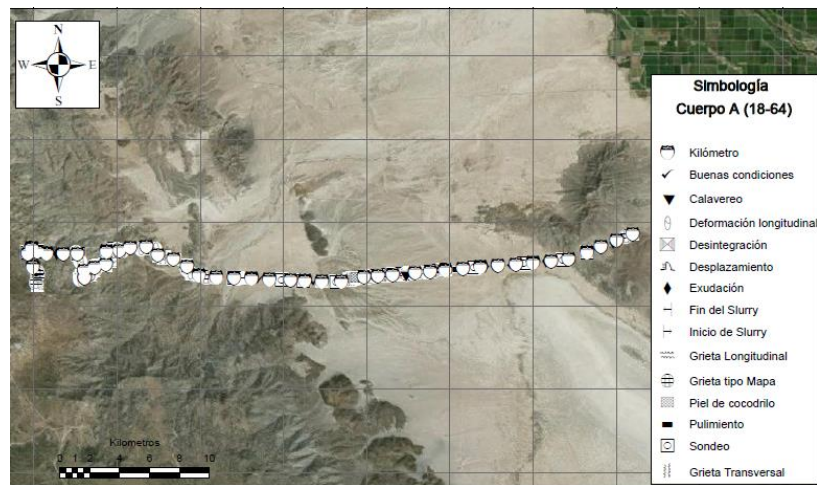
En lo que respecta al cuerpo descendente “B”, las fallas predominantes en este sub-tramo son grietas tipo transversal, grietas tipo mapa y deformación longitudinal.

Figura 4.2 Deterioros presentes en el cuerpo descendente “B” del km 0+000 al 18+000.



En cuanto al sub-tramo Centinela – La Rumorosa que comprende del km. 18+000 al km. 64+000 (en ambos cuerpos), se encuentra menos afectado que el anterior, presenta menor cantidad de fallas y menor severidad en las mismas. En lo que respecta al cuerpo ascendente “A”, se predominan las fallas por exudación de asfalto, fisuras leves, grietas tipo mapa y piel de cocodrilo.

Figura 4.3 Deterioros presentes en el cuerpo ascendente “A” del km 18+000 al 64+000.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el cuerpo descendente “B”, del km 64+000 al 64+000, las fallas predominantes en este son grietas tipo mapa y grietas longitudinales, deformación longitudinal, grietas tipo mapa y piel de cocodrilo.

Figura 4.4 Deterioros presentes en el cuerpo descendente “B” del km 64+000 al 18+000.

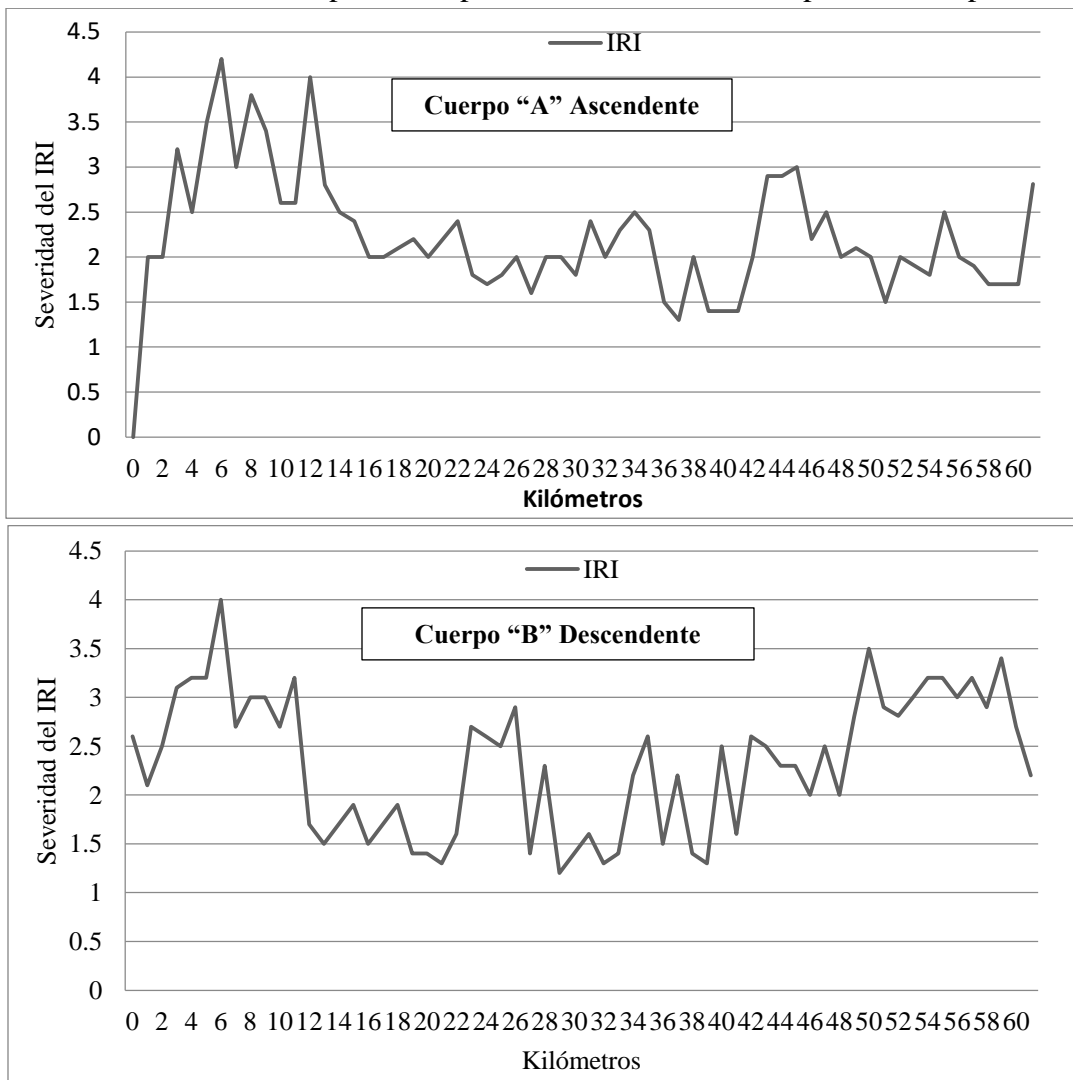


Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Condición superficial.

Con la finalidad de facilitar la comprensión de la información se opta por resumir y presentar los resultados del IRI y de la PR en el carril de baja de ambos cuerpos de la autopista, debido a que dicho tramo presenta mayor desgaste en comparación con el carril de alta. Lo anterior con la finalidad de facilitar la priorización de las intervenciones de conservación y mantenimiento. A continuación, se presentan los resultados de IRI promedio por kilómetro en cada cuerpo de la autopista (ver Figura 4.5). Es importante mencionar que según la normativa de SCT en autopistas un valor de IRI superior a 2.81m/km es considerado como no aceptable.

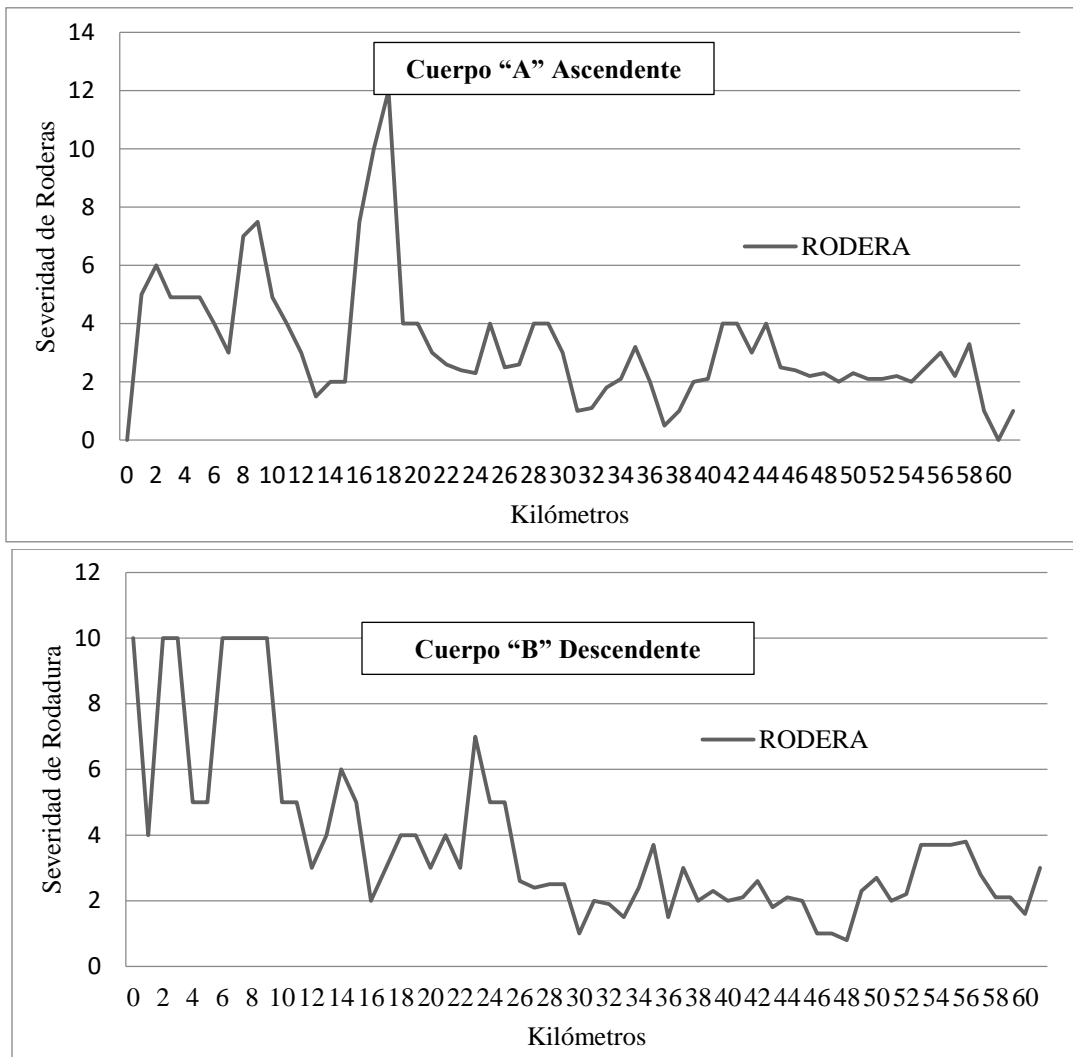
Figura 4.5 Resultado del IRI promedio por kilómetro en cada cuerpo de la autopista.



Fuente: Elaboración propia.

La sección plana y recta de la autopista presenta el mayor grado de rugosidad principalmente del 0+000 al 15+000. Asimismo, el cuerpo descendente de la autopista presenta mayor grado de rugosidad siendo superior de 2.81m/km en distintas secciones del tramo. En cuanto a la PR, la normativa de la SCT indica que el valor de PR de 5.1 a 8.0 se considera aceptable y un valor superior a 8 es considerado como no aceptable. A continuación, se presentan los resultados de PR obtenidos en campo (ver Figura 4.4).

Figura 4.6 Resultado del PR promedio por kilómetro en cada cuerpo de la autopista.



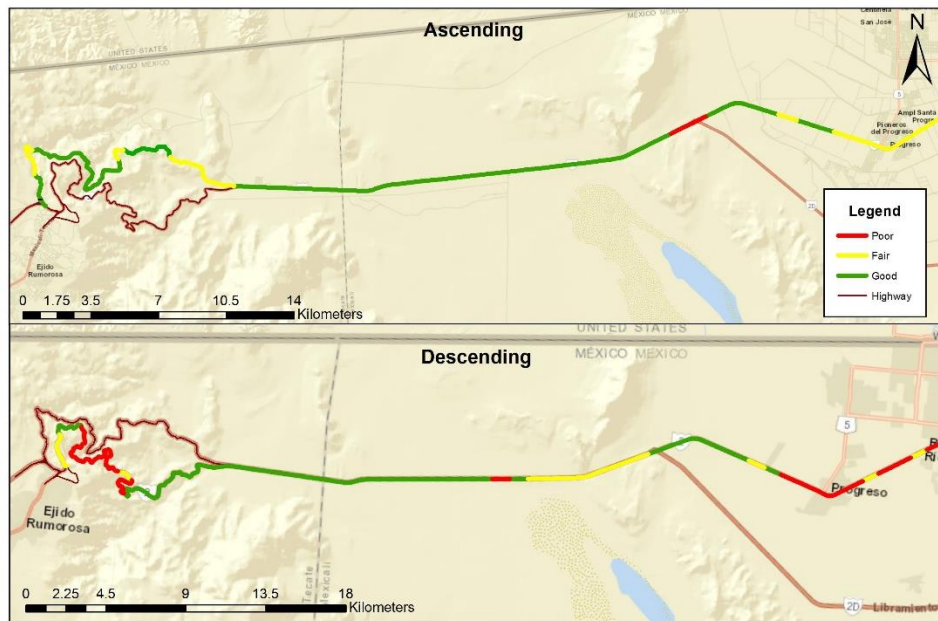
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 4.4, del 16+000 al 20+000 se presentan daños muy severos en el cuerpo ascendente del tramo. Por otro lado, se muestran los resultados para el tramo descendente, donde la severidad del daño llega a un nivel no aceptable principalmente del 0+000 al km 11+000.

Los resultados de la clasificación por daños superficiales al año 2014 muestran que el tramo descendente es el más deteriorado, mismo que presenta malas condiciones en un 28.1% de su recorrido siendo más crítico en la zona montañosa donde se presentan pendientes y curvas pronunciadas; y en los primeros kilómetros de su recorrido que son

considerados parte de la zona urbana. Por otro lado, el 70% del cuerpo ascendente presenta buenas condiciones. Dicha información se presenta en la Figure 4.

Figure 4.7 Condiciones superficiales de la autopista.

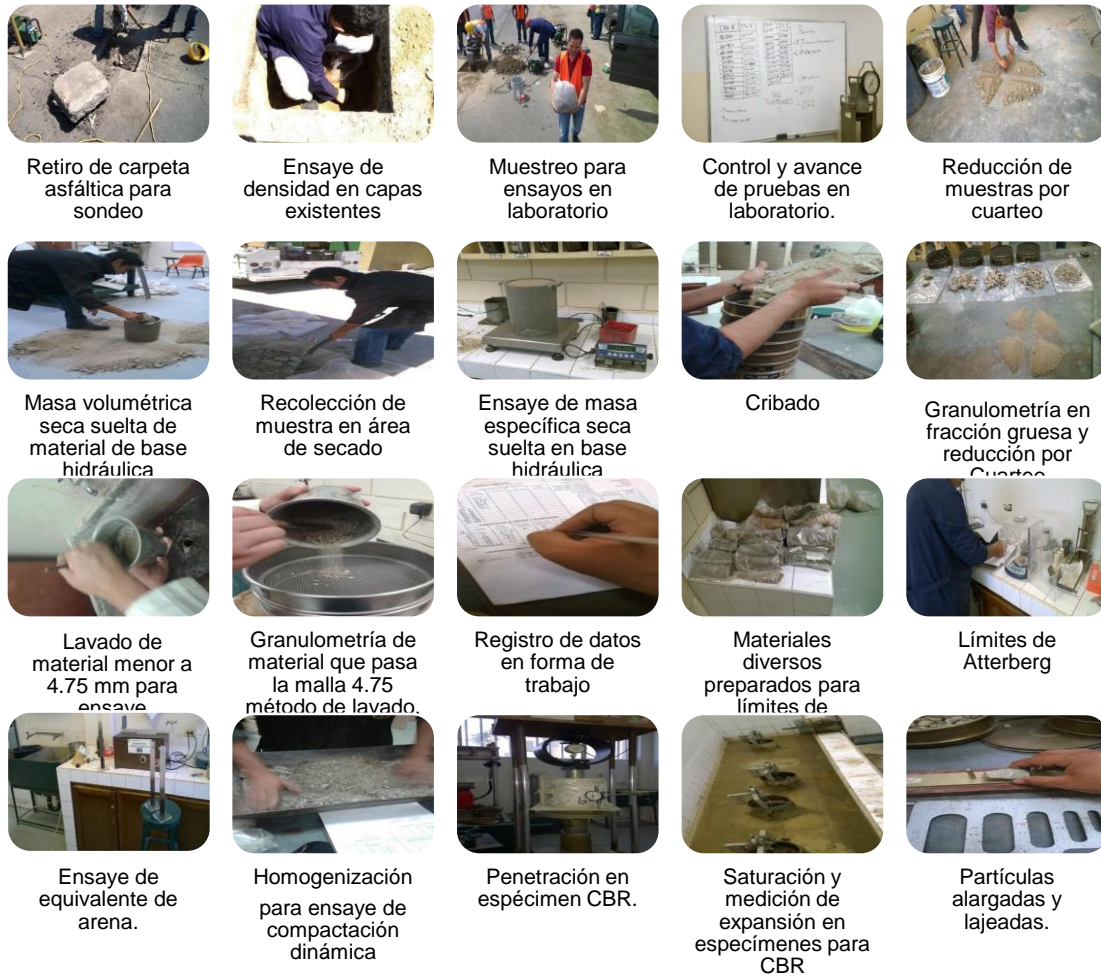


Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Condición estructural.

Con la finalidad de conocer el perfil estratigráfico de la estructura del pavimento, se realizaron un total de 61 sondeos a lo largo del tramo de estudio. En lo que respecta al subtramo Mexicali – Centinela del km. 0+000 al km. 18+000 se efectuaron 9 sondeos en el cuerpo ascendente “A” y 9 sondeos en el cuerpo descendente “B”, sumando un total de 18 sondeos. En lo correspondiente al subtramo Centinela – Rumorosa del km. 18+000 al km. 64+000 se efectuaron 21 sondeos en el cuerpo ascendente “A” y 22 en el cuerpo descendente “B”, sumando un total de 43 sondeos. La Figura 4.8 Presenta un reporte fotográfico de los sondeos y pruebas de laboratorio efectuadas al material extraído.

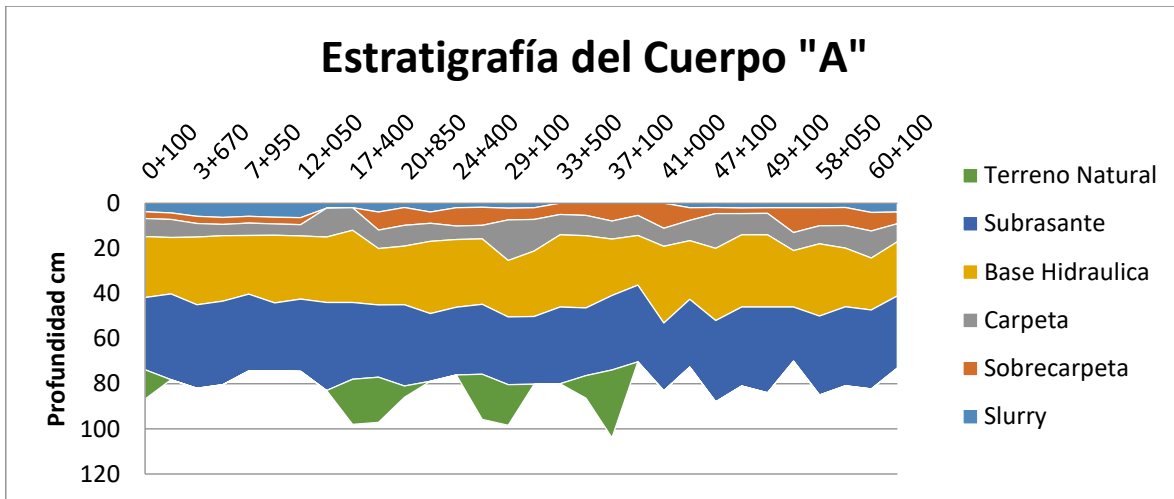
Figura 4.8 Trabajos de campo para obtención de aspectos cuantitativos del eje vial.



Fuente: Elaboración propia.

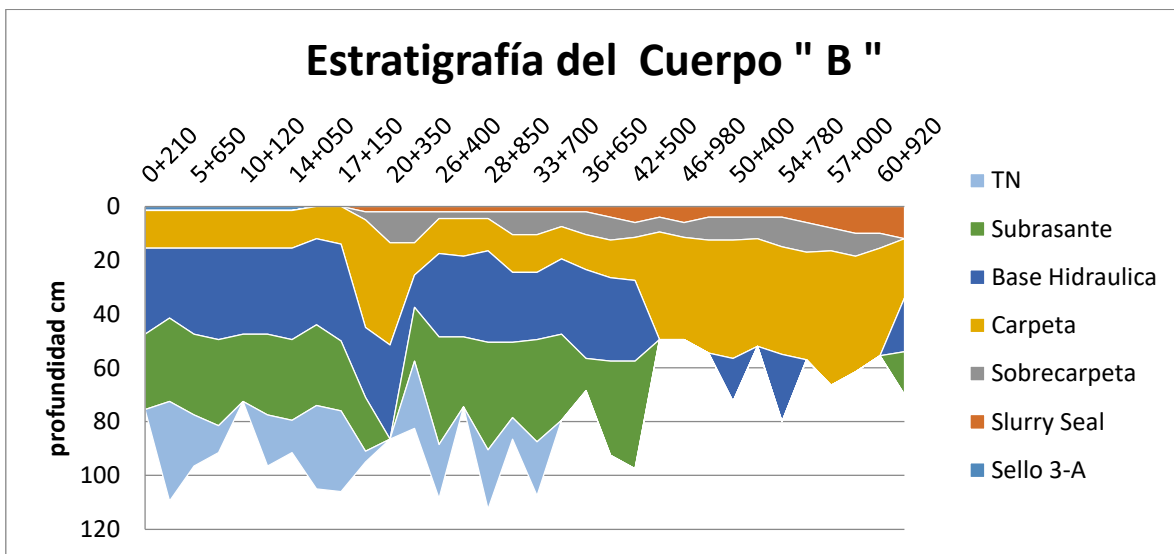
En la Figura 4.5 y 4.6 se presentan los espesores de las capas obtenidos de los sondeos y se presenta a través de un perfil estratigráfico del tramo existente para cada cuerpo de la autopista.

Figura 4.5 Espesores en cm del km 0+000 – km 64+000 cuerpo “A”



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6 Espesores en cm del km 0+000 – km 64+000 cuerpo “B”



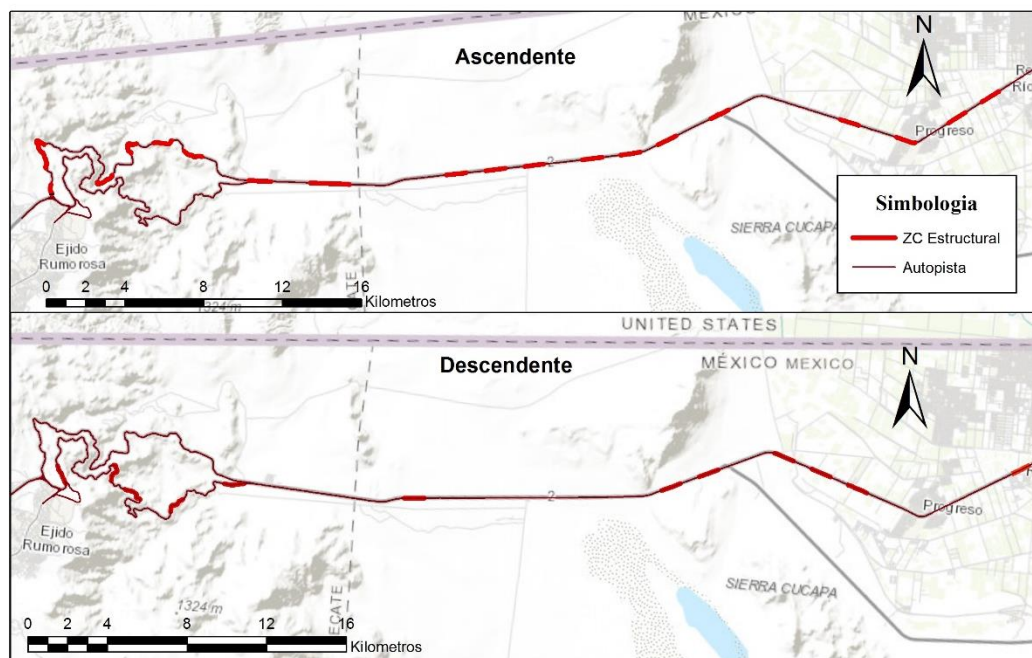
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, en el cuerpo ascendente, los espesores de las distintas capas de la estructura del pavimento son uniformes conservando similitud durante todo su recorrido. Por otro lado, en el cuerpo descendente, los espesores de las capas varían dependiendo de la ubicación. A partir del 45+000 y hasta el 64+000 el espesor de la carpeta excede el promedio de 10 a 40 centímetros que regularmente tiene en todo el tramo. Es

decir, los espesores de las capas de la estructura del pavimento son irregulares a lo largo del tramo, debido a los distintos procedimientos de conservación y mantenimiento que se han ejecutado en los últimos 15 años.

Por su parte, los resultados del análisis de las condiciones estructurales revelan los puntos de la red que presentan deficiencias de resistencia en alguna de las capas que conforman la estructura de pavimento. De acuerdo con la Figura 4.6, el cuerpo ascendente presenta mayores deficiencias estructurales, presentándose en un 37% de su recorrido. Por su parte, el tramo de descenso cuenta con deficiencias en el 20% de su recorrido. Sin embargo, el análisis de vida remanente reveló que dichas deficiencias no requieren de manera inmediata de un trabajo de reconstrucción total del pavimento, sino un tratamiento superficial.

Figura 4.7 Condiciones estructurales de la autopista.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 M2: Plan de intervenciones 2015-2020.

4.2.1 Revisión del pavimento existente.

Una vez obtenida la estratigrafía de las capas estructurales que conforman la autopista se procedió a utilizar el Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM a través del uso del

programa dispav-5 versión 3 para obtener la resistencia de las capas estructurales que conforman a la autopista.

La información del cuerpo ascendente “A” producto de la revisión del pavimento existente se presenta de acuerdo con una división de subtramos, facilitando con ellos la obtención de la vida previsible:

- Km 0+000 al km 4+000
- Km 4+000 al km 8+000
- Km 8+000 al km 15+000
- Km 15+000 al km 18+000
- Km 18+000 al km 29+000
- Km 29+000 al km 35+000
- Km 35+000 al km 40+000
- Km 40+000 al km 53+000
- Km 53+000 al km 64+000

La información del cuerpo descendente “B” producto de la revisión del pavimento existente se presenta de acuerdo con una división de subtramos, facilitando con ellos la obtención de la vida previsible:

- Km 64+000 al km 53+000
- Km 53+000 al km 40+000
- Km 40+000 al km 35+000
- Km 35+000 al km 29+000
- Km 29+000 al km 18+000
- Km 18+000 al km 15+000
- Km 15+000 al km 8+000
- Km 8+000 al km 5+000
- Km 5+000 al km 0+000

En el presente capítulo se encuentra una versión resumida de los datos obtenidos de dicho análisis. Sin embargo, dicha información puede ser consultada en el ANEXO 1.

4.2.2 Definición de prioridades de intervención.

Una vez analizada la información superficial y estructural de la autopista se procede a identificar puntos críticos de la autopista. Dichos puntos son valores que se encuentran fuera de los parámetros de operación mínimos establecidos por la normativa de la SCT para el IRI y PR, así como la establecida por el libro CMT: características de los materiales del IMT/SCT, para las diferentes capas que integran la estructura del pavimento. El resumen de dicho análisis se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Identificación de puntos críticos en la autopista

Superficiales				Estructurales			
Ascendente		Descendente		Ascendente		Descendente	
KM	Punto crítico	KM	Punto crítico	KM	Punto crítico	KM	Punto crítico
3	IRI	3	IRI y PR	2	VRS BH	1	VRS BH
5	IRI	4	IRI	4	VRS BH	10	VRS BH
6	IRI	5	IRI	7	VRS BH	12	VRS BH
8	IRI	6	IRI y PR	10	VRS BH	14	VRS BH
9	IRI	7	PR	17	VRS BH	18	VRS BH
12	IRI	8	IRI y PR	20	VRS BH	20	VRS BH
10	IRI	9	IRI y PR	22	VRS BH	33	VRS BH
12	IRI	11	IRI	24	VRS BH	42	VRS BH
17	PR	26	IRI	27	VRS BH	46	VRS BH
18	PR	50	IRI	29	VRS BH	52	VRS BH
43	IRI	51	IRI	31	VRS BH	54	VRS BH
44	IRI	53	IRI	37	VRS BH	63	VRS BH
45	IRI	54	IRI	38	VRS BH		
		55	IRI	41	VRS BH		
		56	IRI	45	VRS BH		
		57	IRI	47	VRS BH, SR		
		58	IRI	49	VRS BH		
		59	IRI	52	VRS BH		
				58	VRS BH		
				59	VRS BH		
				61	VRS BH		

¹Los puntos críticos establecen deficiencias en el VRS en alguna de las capas que conforman el pavimento, BH corresponde a la base hidráulica, SR corresponde a la capa subrasante.

Como se mencionó anteriormente, las deficiencias estructurales no requieren trabajos de reconstrucción de manera inmediata. Sin embargo, se muestran las secciones más propensas a sufrir daños por deformación o fatiga para intervenciones futuras.

4.2.3 Trabajos de mantenimiento y rehabilitación para el mejoramiento de las condiciones de la autopista.

El plan de intervenciones enmarca el planteamiento estratégico previo a la realización de los trabajos, permitiendo definir y planear las distintas intervenciones sobre el tramo de estudio en un periodo de tiempo. Es importante mencionar, que los tramos que presentan deterioros severos requieren atención inmediata, ya que al seguir progresando terminan colapsando gran parte de la estructura del pavimento.

Es por ello, que el objetivo de este apartado es proponer un plan que contenga las intervenciones de conservación más adecuadas y pertinentes, de acuerdo al tipo de falla superficial y estructural que se presente en la autopista.

Una vez analizada la información de los datos de campo se procede a determinar los trabajos a realizar en el plan de intervenciones. Dicho plan contempla trabajos desde 2014 a 2019. Sin embargo, la mayoría de los trabajos propuestos ya han sido ejecutados al año 2018, con excepción de los primeros 18 kilómetros de la autopista, ubicados en el área urbana. Cabe mencionar que dicha sección es administrada por otro organismo local que no ha realizado las intervenciones propuestas. A continuación, se presentan los trabajos ejecutados en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Trabajos de conservación y mantenimiento realizados en la autopista en el periodo 2014-2018

Ascendente			Descendente		
Año	Trabajo de mantenimiento	Cadenamiento (km)	Año	Trabajo de mantenimiento	Cadenamiento (km)
2015	Sobrecarpeteo 40 mm	18+000 a 23+000	2015	Sobrecarpeteo 40 mm	30+008 a 22+000
2015	Sobrecarpeteo 40 mm	33+642 a 35+850	2016	Fresado y reconstrucción 50 mm	60+000 a 64+000
2015	Sobrecarpeteo 40 mm	43+000 a 49+012	2016	Fresado y reconstrucción 50 mm	60+000 a 56+000
2015	Sobrecarpeteo 40 mm	60+000 a 61+405	2016	Fresado y reconstrucción 50 mm	56+000 a 52+000
2016	Fresado y reconstrucción 50 mm	20+000 a 29+000	2016	Fresado y reconstrucción 50 mm	40+500 a 36+000
2017	Fresado y reconstrucción 50 mm	20+000 a 29+000	2017	Slurry seal	23+000 a 19+000
2017	Slurry seal	29+000 a 41+600	2017	Fresado y reconstrucción 50 mm	19+000 a 18+000
2017	Fresado y reconstrucción 50 mm	41+600 a 42+500	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	60+000 a 48+500
2017	Slurry seal	49+000 a 53+500	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	48+500 a 45+300
2017	Sobrecarpeteo 40 mm	53+500 a 55+500	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	44+000 a 40+500
2017	Slurry seal	55+500 a 60+800	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	40+500 a 36+000
2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	18+000 a 20+000	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	35+900 a 34+800
2018	Slurry seal	20+000 a 29+000	2018	Slurry seal	34+800 a 32+000
2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	29+000 a 41+600	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	31+290 a 24+280
2018	Slurry seal	42+600 a 49+000	2018	Slurry seal	24+500 a 23+300
2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	49+500 a 53+600	2018	Fresado y reconstrucción 50 mm	23+100 a 18+000

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior se realizaron tres estrategias de conservación superficial. Una primera estrategia fue con slurry seal, que consiste en aplicar una mezcla líquida homogénea de agua, emulsión asfáltica, filler mineral y agregado bien graduado. La segunda estrategia fue con trabajos de sobrecarpeta de 40 mm, que consisten en la aplicación de un riego de liga y la colocación de una carpeta de granulometría densa. La tercera estrategia fue el fresado y reconstrucción, que se refiere al retiro de una capa de 100 mm de carpeta existente y colocación de una capa de 50 mm de carpeta asfáltica nueva.

4.3 M3: Análisis del mejoramiento de las condiciones de la autopista.

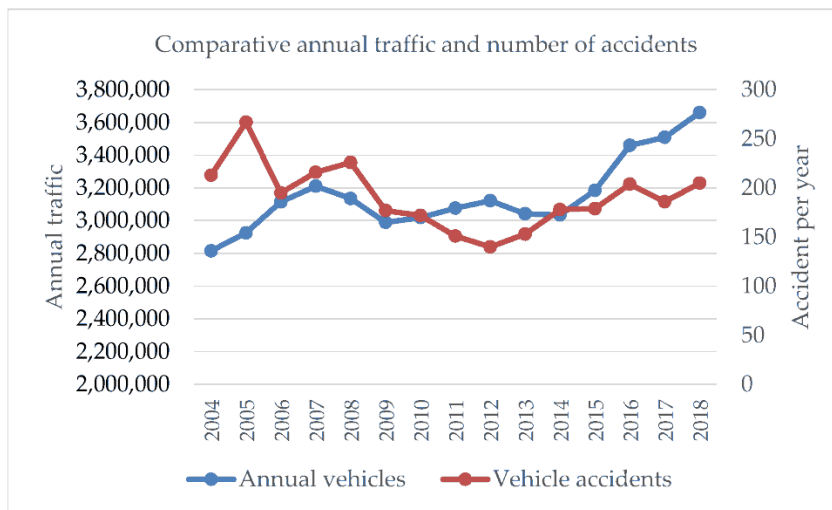
Como se mencionó anteriormente, los resultados en el mejoramiento de las condiciones de desempeño de la autopista se reflejan en distintos indicadores de operatividad. Para este documento se toma en cuenta el aumento en el uso de la autopista, reducción de la cantidad de accidentes y el mejoramiento de la seguridad y confort del usuario, mediante el índice de serviciabilidad. A continuación, se presentan los análisis utilizados para medir dichos indicadores.

4.3.1 Mejoramiento en la seguridad de la autopista.

Con la finalidad de analizar la estrategia utilizada en el mejoramiento de las condiciones de seguridad de la autopista se realizó un análisis estadístico de accidentes debido a que de acuerdo con los registros de accidentes proporcionados por FIARUM, se estima un gasto mínimo de \$10, 098,298 de pesos ocasionados por los accidentes viales en el periodo del 2000 al 2018. Siendo la seguridad un eje prioritario en el funcionamiento de una carretera.

En cuanto al aumento del uso de la autopista y los accidentes registrados, se observa en la Figure 6, que del 2008 al 2015 la tasa de crecimiento vehicular es negativa. Es decir, la cantidad de vehículos que circula por la autopista es menor cada año. Sin embargo, desde que entra en ejecución el plan de intervenciones, el crecimiento vehicular promedio a 2018 es del 5% anual; teniendo su mayor despunte en 2016. A pesar de dicho crecimiento, la cantidad de accidentes anuales no ha aumentado de manera proporcional a dicho crecimiento. De hecho, se observa que en los últimos diez años se ha mantenido un promedio de 180 accidentes anuales.

Figura 4.8 Comparativo tráfico de autopista número de accidentes.



Fuente: Elaboración propia.

De manera general, la mayor cantidad de accidentes ocurre en el periodo de tiempo de las 13 a 17 horas e históricamente el 59% de los accidentes viales ocurren en el tramo de descenso montañoso, seguidos por el tramo de ascenso montañoso con 16% y descenso plano con 14%, mientras que el 11% restante corresponde a los accidentes en el tramo ascenso plano (ver tabla 4.3).

Tabla 4.3 Ubicación de accidentes.

Ubicación	Ascenso Montañoso	Descenso Montañoso	Ascenso plano	Descenso plano
Accidentes	16%	59%	11%	14%

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por FIARUM.

Por otro lado, el tipo de accidente que más ocurre es la volcadura y las causas varían dependiendo del tramo carretero y la condición de ascenso (26%) o descenso (54%). La segunda causa de accidentes se refiere a la salida del camino por parte de los vehículos; en el tramo de ascenso representa el 28% de los accidentes totales, mientras que en el descenso alcanza el 26% (ver tabla 4.4).

Tabla 4.4 Tipos de accidentes.

Tipo de accidente	Choque	Incendio	Volcadura	Salida del camino	Otro
Ascenso	18%	12%	26%	28%	16%
Descenso	12%	2%	54%	26%	6%

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por FIARUM.

Respecto al tipo de vehículos que más se accidentan, en el tramo de ascenso son los automóviles compactos tipo sedán, representando el 32% de los accidentes el segundo tipo de vehículo son los tractocamiones. Por otro lado, en el tramo descenso los involucrados en mayor porcentaje de accidentes son los tractocamiones o vehículos pesados con el 41%, los segundos corresponden a autos tipo sedán. (Ver tabla 4.5).

Tabla 4.5 Accidentes por tipo de vehículo.

Tramo	Autobús	Camión	Camioneta	Casa rodante	Pick up	Moto	Sedan	Tracto-camión	No registrado
Descenso	1.33%	5.85%	12.27%	0.09%	12.01%	1.06%	25.61%	41.07%	0.71%
Ascenso	2.51%	3.34%	17.90%	0.0%	15.87%	2.39%	31.98%	25.54%	0.48%

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por FIARUM.

En el presente apartado se analiza la ubicación y causa de los accidentes que se han presentado en la autopista La Rumorosa. Lo que ha permitido identificar los tramos que presentan mayor grado de accidentalidad. Dentro de los accidentes registrados en la autopista La Rumorosa el 59% de ellos sucedieron en terreno montañoso en el tramo de descenso y otro 16% pero en el tramo de ascenso, lo que suma el 75% de los accidentes totales. A este respecto, se estima un gasto mínimo de \$ 10, 098,298 pesos ocasionados por los accidentes viales en el periodo 2000-2018. Dicho gasto está basado en reparaciones al tramo afectado por causa del accidente. Sin embargo, no hay datos suficientes para conocer las pérdidas económicas derivados del transporte de carga, reparaciones a los vehículos o gastos de defunción por lo que esta cifra es aún mayor. El tipo de accidentes con mayor

frecuencia es en primer lugar volcadura con 54% en el descenso y en segundo lugar con 28% en el ascenso la salida del camino.

4.3.2 Mejoramiento del confort de los usuarios.

Para medir el efecto de los trabajos ejecutados en el nivel de servicio se realizó una simulación de los trabajos propuestos y su impacto en el Índice de Seviabilidad. La simulación de los trabajos en el tramo fue realizados con el Sistema de Gestión de Infraestructuras HDM-4 Versión 1.03, utilizando el módulo de Work Effects (WE), mismo que incluye relaciones para la modelización del deterioro de la carretera y los efectos de los trabajos en el mejoramiento de las condiciones del pavimento.

Como se mencionó anteriormente, la calibración del modelo de predicción se realiza mediante estudios de campo y literatura existente relacionada a los impactos de las estrategias de mantenimiento y rehabilitación, las condiciones de la zona de estudio y el cálculo de los ejes equivalentes reales utilizando la ecuación (1) por año del 2014 al 2018 (Tabla 4.6).

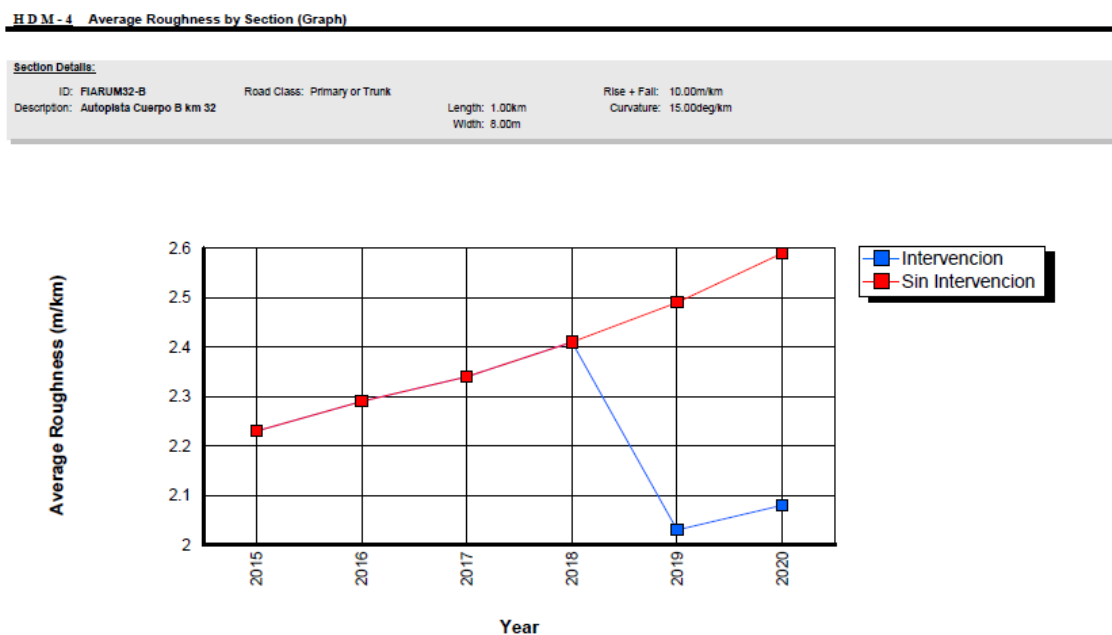
Tabla 4.6 Cálculo de ejes equivalentes reales 2014-2014.

		TDPA	Categoría de vehículos							Millones de ejes equivalentes
			A Vehículo ligero	B Autobús de tres ejes	C2 Camión de dos ejes	C3 Camión de tres ejes	T3S2 Camión articulado con remolque simple y cinco ejes	T3S3 Camión articulado con remolque simple y seis ejes	T2S2R4 Camión articulado con doble remolque y nueve ejes	
2014	Ascenso	4970	70.7	4.7	8.7	2.1	10.6	1.4	1.8	2.6
	Descenso	5243	68.4	5	8.9	2.4	11.7	1.5	2.1	3
2015	Ascenso	4906	70.3	4.3	7.8	1.7	9.3	3	3.6	2.7
	Descenso	4627	67.5	5.5	8.4	1.1	11.8	2	3.7	2.8
2016	Ascenso	5025	70.4	4.3	7.8	1.7	9.3	2.9	3.6	2.8
	Descenso	4837	67.7	5.5	8.4	1.1	11.8	1.9	3.6	2.9
2017	Ascenso	5100	72.6	3.6	10	1	9.1	1.3	2.4	2.5
	Descenso	4721	68.8	4	11.3	1.2	10.7	1.4	2.6	2.7
2018	Ascenso	5641	73.8	3	5.8	1.3	10.7	2.4	3	2.7
	Descenso	5471	68.8	3.8	11.9	1	8.9	3.5	2.1	3.1

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta un ejemplo del reporte generado para un tramo analizado (Ver Figura 4.9).

Figura 4.9 Ejemplo de simulación de efecto de los trabajos km 32 cuerpo descendente.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.43, el tramo analizado corresponde al kilómetro 32 del cuerpo descendente de la autopista. Dicho tramo fue intervenido en 2018 mediante un trabajo de fresado y reencarpetado. Lo que derivó en una mejora en sus condiciones de regularidad para el periodo de análisis. Los reportes del tramo se encuentran en el ANEXO 2 del presente documento. Una vez obtenido el efecto de los trabajos se calculó el índice de serviciabilidad de ASSHTO. Para medir el efecto de los trabajos en el servicio de los usuarios.

Tabla 4.7 Ejemplo del análisis de mejoramiento de servicio para el km 32 del cuerpo descendente.

PSI inicial	PSI al 2020 sin intervención	PSI posterior a la intervención	PSI a 2020 con proyecto
3.66	2.68	3.09	3.02
Buena	Regular	Buena	Buena

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 4.7 el tramo analizado mantuvo su condición inicial de serviciabilidad en el nivel de Bueno debido a las acciones de conservación que se llevaron a cabo en dicho tramo. De no haber realizado dicha intervención para el periodo de estudio dicho tramo hubiera pasado de un estado bueno a uno regular. Es importante mencionar que el tramo de ejemplo presentaba buenas condiciones iniciales. Sin embargo, distintos puntos de la red presentaban malas condiciones lo que propiciaba niveles de servicio muy bajos.

El análisis de serviciabilidad de la autopista puede consultarse en el ANEXO 3 del presente documento. A continuación, se presentan los resultados simplificados de dicho análisis (Ver tabla 4.8).

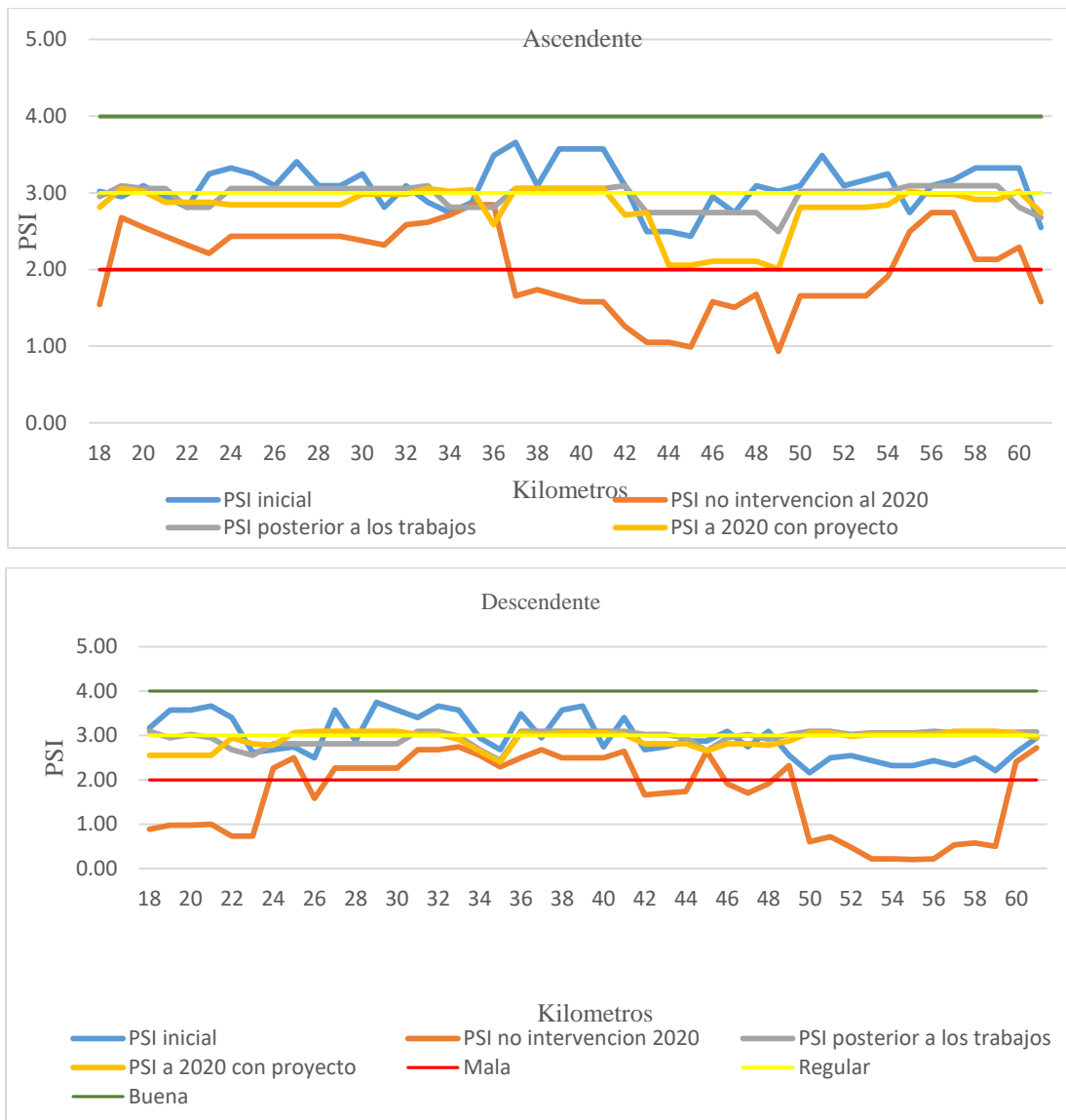
Tabla 4.8 Resultados del análisis de serviciabilidad de la Autopista Centinela- La Rumorosa.

Porcentajes Tramo Ascendente	
Incremento 1 nivel	40.98%
Incremento 2 niveles	13.11%
mantuvo su nivel	45.91%
Porcentajes Tramo Descendente	
Incremento 1 nivel	44.68%
Incremento 2 niveles	17.02%
Incremento 3 niveles	19.15%
Mantuvo su nivel	19.15%
Porcentajes Globales de la Autopista	
Incremento 1 nivel	42.83%
Incremento 2 niveles	15.07%
Incremento 3 niveles	9.58%
Mantuvo su nivel	35.53%

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.8 muestra los resultados de las intervenciones en el nivel de servicio a los usuarios. El incremento por niveles refleja como un tramo paso de una condición de servicio inferior a una superior. Por ejemplo, un incremento en un nivel refleja un tramo que de no haberse intervenido hubiera llegado al periodo de análisis con un nivel de servicio regular. Sin embargo, una vez realizada la intervención para el final del periodo este obtuvo un nivel de servicio bueno. Es decir, incremento en 1 nivel en la escala del índice de serviciabilidad presente. Es importante mencionar que la simulación no contempla los primeros 18 kilómetros de la autopista debido a que no se han realizado las intervenciones propuestas por lo que fueron omitidas en el cálculo del mejoramiento del servicio. La figura 4.10, presenta los resultados resumidos de la simulación del efecto de los trabajos en el mejoramiento del desempeño del pavimento, mediante el PSI.

Figura 4.10 Larguillo de simulación del mejoramiento del desempeño de la autopista.



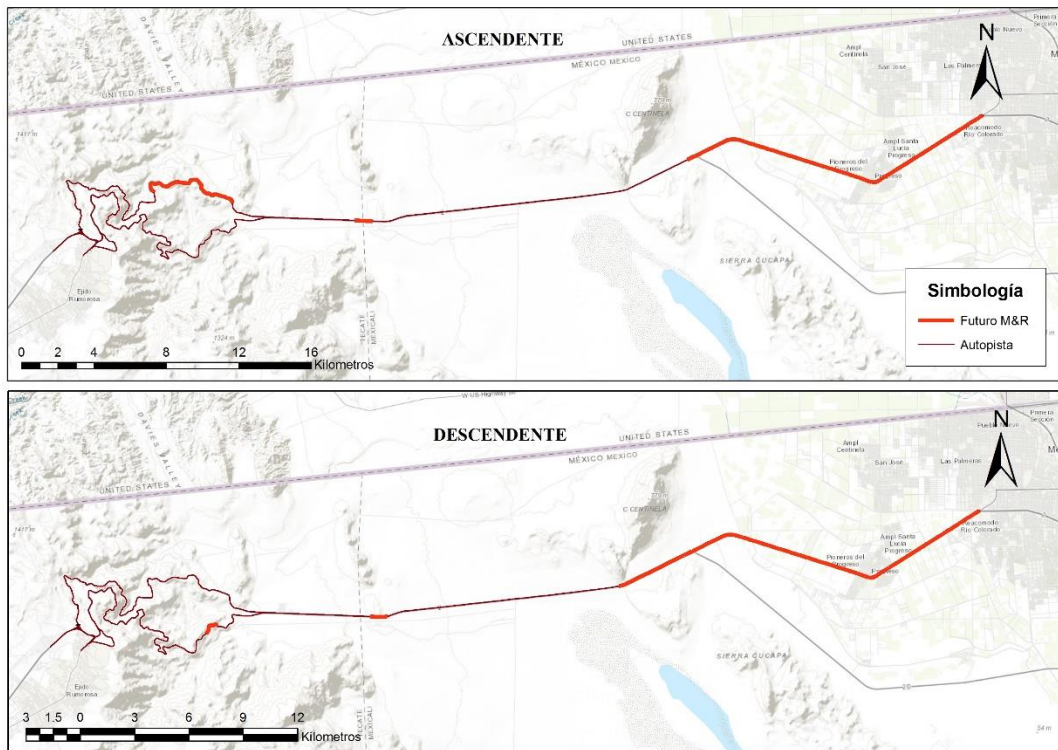
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la figura anterior, se demuestra que las intervenciones influyeron positivamente en el mejoramiento del desempeño de la autopista. Debido a que los niveles simulados con proyecto se mantienen en los rangos de regular a bueno al año 2020. Adicionalmente, los resultados permiten priorizar intervenciones futuras en ambos cuerpos de la autopista. De acuerdo con Morova et al. (2013) la mitad de los evaluadores del estudio de AASHTO determinan que un rango de 3.0 en el PSI es considerado como aceptable y menor a 2.5 es inaceptable. Por lo que la autopista presenta buenas condiciones de desempeño y conservaran dicha característica durante los siguientes años.

4.3.2 Prioridades de intervención posteriores a 2020.

Una vez analizada la información presentada es posible identificar las intervenciones que serán necesarias una vez terminado el periodo de análisis (Figura 4.11). Estas zonas son las más propensas a sufrir deformaciones que afecten el nivel de servicio y seguridad de los usuarios por lo que se recomienda su pronta intervención.

Figura 4.11 Zonas prioritarias a intervenir posterior a 2020.



Fuente: Elaboración propia.

De primera mano es necesario realizar trabajos de mantenimiento y rehabilitación en los primeros 18 kilómetros de la autopista en ambos cuerpos, debido a que no se han realizado las intervenciones propuestas para esa sección de la autopista, por lo que se recomienda su intervención inmediata. En el caso del tramo ascendente las primeras intervenciones deberán enfocarse del km 44+000 al 50+000 y posteriormente atender el tramo aislado del km 36+000 al 37+000. Por su parte en el cuerpo descendente es necesario

intervenir del km 18+000 al 22+000 y posteriormente tramos aislados del km 35+000 al 36+000 y del km 45+000 al 46+000.

Conclusiones.

Evaluar las condiciones superficiales y estructurales del pavimento existente son indispensables, para determinar las acciones de conservación y mantenimiento que brinden mayores beneficios a los tomadores de decisiones y usuarios de los caminos.

Las condiciones superficiales influyen directamente en el nivel de servicio y seguridad de un tramo carretero debido a que la calidad del rodamiento es el principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario. Por otro lado, el funcionamiento correcto de los pavimentos depende de las características de resistencia de los materiales de constituyen su estructura, ya que estas definen la magnitud de las deformaciones, provocadas por las condiciones del área de estudio, tales como la temperatura de la zona y características del tráfico.

Una vez obtenidas las condiciones actuales de la autopista es posible calcular la vida previsible tanto de la carpeta como de su estructura, con la finalidad de asegurar que todos los trabajos propuestos se lleven a cabo dentro del tiempo necesario. Para el ciclo que contempla el plan de intervenciones no es necesaria la ejecución de trabajos de reconstrucción total del pavimento, por lo que las propuestas de intervención contemplan solamente trabajos a nivel superficial. Sin embargo, dicho análisis permite identificar las zonas más propensas a falla y que requerirán intervenciones de reconstrucción total del pavimento en futuros planes de intervención. Sin embargo será necesario una revisión en campo para determinar el trabajo de intervención más apropiado para cada zona.

Algunas de las intervenciones propuestas no se realizaron con base al plan de intervenciones, particularmente en los primeros 18 kilómetros de la autopista, los cuales son administrados por otro organismo. Por lo que, se recomienda su intervención inmediata, debido a que dicho tramo presenta deficiencias superficiales y estructurales.

En cuanto a la seguridad, la principal causa de accidentes en la autopista se atribuye al factor humano, reflejado en volcaduras, salidas del camino por exceso de velocidad, solo por mencionar las más frecuentes. Sin embargo, las mejoras de las características de la infraestructura que influyen en la seguridad de la circulación vial tienen una gran eficacia. De acuerdo con los resultados, a pesar de que el tráfico aumentó de manera exponencial a partir del mejoramiento de las condiciones de la autopista, no lo hizo la cantidad de accidentes anuales. Sin embargo, las intervenciones de conservación y mantenimiento del

pavimento atienden los factores relacionados a la rodadura, por lo que es necesaria la revisión del trazado, pendiente o grado de curvatura, así como intervenciones relacionadas con la mejora del diseño geométrico y la regulación a través de dispositivos de señalamiento vial y de seguridad.

De manera general, los resultados del análisis de serviciabilidad demuestran que las intervenciones realizadas en la autopista mejoraron el confort y seguridad de sus usuarios, de acuerdo al PSI. Adicionalmente, algunos tramos ya mantenían niveles de servicio favorables por lo que las intervenciones ayudaron a conservar estas condiciones.

Se concluye que el modelo de planeación propuesto contribuye en la mejora del desempeño de la autopista, ya que permite planificar y administrar la asignación de recursos en la toma de decisiones oportunas sobre conservación y mantenimiento. Por otro lado, permite generar valiosos insumos para la implementación de un PMS. Lo anterior, permite a las agencias administradoras de caminos de países en desarrollo, brindar un sistema de transporte de calidad a sus usuarios.

Referencias.

- AASHTO (1993). Guide for desing of pavement structures. Recuperado de <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>
- Al-Omari, B., & Darter, M. I. (1994). Relationships between international roughness index and present serviceability rating. *Transportation Research Record*, 14(35).
- Amorim, M., Ferreira, S., Couto, A. (2017). Seguridad vial y servicio médico de emergencia urbano (uEMS): ubicación de la estación de estrategia, *Revista de Transporte y Salud, Porto*, Portugal, 6: 60-78.
- Attoh-Okine, N., & Adarkwa, O. (2013). Pavement condition surveys—overview of current practices. Delaware Center for Transportation, University of Delaware: Newark, DE, USA.
- Bannour, A., Elomari, M., El Khadir, L., Afechkar, M., Lamrini, B., & Joubert, P. (2015). Calibration study of HDM-4 Model of structural cracking models for flexible pavements in Moroccan Context.
- Bennett, C. R., and Paterson. W.D.O. (2000). A Guide to Calibration and Adaptation, Volume Five of Highway Development and Management (HDM-4) Series.
- Bryce, J., Brodie, S., Parry, T., & Presti, D. L. (2017). A systematic assessment of road pavement sustainability through a review of rating tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 108-118.
- Cole, M. & Geib, J. (2016). MnDOT's Experience: Efforts to Improve Micro Surfacing Performance. Available online: <https://www.dot.state.mn.us/materials/pavementpreservation/mndotexperiences/documents/EffortstoImproveMicroSurfacingPerformance.pdf> (accessed on 9 April 2018).
- Corriere, F., & Rizzo, A. (2012). Sustainability in Road Design: A Methodological Proposal for the Drafting of Guideline. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 39-48.
- Corro, S., Prado, G., & Rangel, A. (1999). Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. Series de Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Corro, S., Castillo, G., Ossa, A., Hernández, A., Mandujano, D., Hernández, F., & Arizaga, S. (2014). Manual: Dispav-5, versión 3.0. Actualización del sistema para el diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones.
- Demasi, F., Loprencipe, G., & Moretti, L. (2018). Road safety analysis of urban roads: Case study of an Italian municipality. *Safety*, 4(4), 58.
- Dudziak, M., Lewandowski, A., Śledziński, M. (2017). Riesgos para la seguridad vial no comunes, *Procedia Engineering*, Poland, 177: 375-380.
- Elvik, R., Vaa, T. (2004). The Handbook of road safety measures, 1st ed. Elsevier, Amsterdam.
- Farooq, D., Moslem, S., & Duleba, S. (2019). Evaluation of driver behavior criteria for evolution of sustainable traffic safety. *Sustainability*, 11(11), 3142.
- FHWA. (1995). Pavements and size and weight regulations. Columbus Ohio: US Department of Transportation.
- Garnica, P. y. (2004). Conceptos Mecanicistas en pavimentos. Sanfandila, Qro: IMT.
- Gerber, A.D.; Miller, T.D.; Richardson, M.J (2018). Implementation and Calibration of a Laser Crack Measurement System for the Delaware Department of Transportation's Pavement Management Program. 2018. Available online: <https://trid.trb.org/view/1496710> (accessed on 19 May 2018).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). xiii Censo de población y vivienda. Aguascalientes, México. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/accesomicrodatos/cpv2010/default.aspx>
- Jain, S. S., Parida, M., & Thube, D. T. (2007). HDM-4 based optimal maintenance strategies for low-volume roads in India. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 16(4), 3.
- Lavin, P. (2014). Asphalt pavements: a practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects. CRC Press.
- Leal, J., Plaza, J. D., Pérez Pérez, I., & Casquero de la Cruz, E. (2004). Influencia de las características superficiales de los firmes en la seguridad vial. *Rutas: revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, (100), 13-31.

- Luo, G. Z., Fu, J. S., & Yan, P. (2013). Highway Construction Based on Sustainable Concept. In *Advanced Materials Research* (Vol. 726, pp. 4086-4090). Trans Tech Publications Ltd.
- Mao, X., Wang, J., Yuan, C., Yu, W., & Gan, J. (2019). A dynamic traffic assignment model for the sustainability of pavement performance. *Sustainability*, *11*(1), 170.
- Mendoza Sánchez, J. F. (2014). Criterios de sustentabilidad para carreteras en México. *Publicacion Tecnica*, (392). Montoya Goicochea, J. E. (2007). Implementación del Sistema de Gestión de Pavimentos con Herramienta HDM-4 para la Red Vial Nro. 5 Tramo Ancón-Huacho-Pativilca.
- Morova, N., Serín, S., Terzi, S., & Saltan, M. (2013). Prediction of the pavement serviceability ratio of rigid highway pavements by artificial neural networks. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, *2*(1), 12-25.
- Muench, S. T., Anderson, J. L., Hatfield, J. P., Koester, J. R., Söderlund, M., & Weiland, C. (2011). Greenroads Manual v1. 5. *Seattle, WA: University of Washington*.
- Mungaray-Moctezuma, A. (2013) “Carreteras federales en Baja California: 2008-2012” UABC, Mexicali, B.C.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), (2009). “Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial, es hora de pasar a la acción”. Departamento de Prevención de la Violencia y los Traumatismos y Discapacidad. Ginebra, Suiza.
- Orozco, J., Téllez, R., Pérez, A., Sánchez, M., & Torras, S. (2004). Sistema de evaluación de pavimentos.
- Ozer, H., Al-Qadi, I., & Harvey, J. (2016). Strategies for Improving the Sustainability of Asphalt Pavements (No. FHWA-HIF-16-012).
- Pantuso, A., Loprencipe, G., Bonin, G., & Teltayev, B. B. (2019). Analysis of pavement condition survey data for effective implementation of a network level pavement management program for Kazakhstan. *Sustainability*, *11*(3), 901.
- Pérez Pérez, I. (2007). Actuaciones para la mejora de la seguridad de la circulación vial. *Vía* 18, (5), 28-29.
- Rico Rodríguez, A., Téllez Gutiérrez, R., & Garnica Anguas, P. (1998). Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. *Publicación Técnica*, (104).

- Ríos, J., & Martínez, I. (2009). Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Rivera, C., & Mendoza, A. (2009). Análisis costo-beneficio y costo-efectividad de las medidas de seguridad implementadas en carreteras mexicanas. Instituto Mexicano del Transporte.
- Rohde, G. T., Jooste, F., Sadzik, E., & Henning, T. (1998). The calibration and use of HDM-IV performance models in a pavement management system. In Fourth International Conference on Managing Pavements. Durban, South Africa.
- Sandoval, C. H. H., Fonseca, A. M. P., & León, Y. F. V. (2013). Factibilidad de mezclas asfálticas de alto módulo con agregados del área de influencia de Tunja. Facultad de Ingeniería, 22(34), 9-20.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte - SCT. (1991) Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas. Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
- (1998) Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México.
- (2004) Sistema de evaluación de pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México.
- (2014^a) Evaluación superficial de los pavimentos (IRI, PR, MAC, DET), mediante el uso de equipos de alto rendimiento en diversos tramos de la Red Carretera Federal (autopistas de cuota, Corredores y Red Básica Libre), Dirección General de Servicios Técnicos, México.
- (2014b) Datos viales y tasas de crecimiento, Dirección Libro de evaluación y rehabilitación de pavimento flexible de la SCT. General de Servicios Técnicos, Baja California, México.
- Secretaría de Salud, P. S. (2014). Programa de acción específico seguridad vial (2013-2018). México. Recuperado de: http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Documentos/PAE_SV.pdf
- SERVIU METROPOLITANO (1998). Diagnóstico de servicialidad de pavimentos, Región Metropolitana. Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Silva-Balaguera, A., Daza-Leguizamón, O., & Lopez-Valiente, L. Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (SIG): una revisión.
- Sousa, J. B., Craus, J., & Monismith, C. L. (1991). Summary report on permanent deformation in asphalt concrete (No. SHRP-A-318).
- Smadi O. G. (2004). “Quantifying the Benefits of Pavement Management”, 6th International Conference on Managing Pavements, the Lessons, the Challenges, the Way Ahead. Brisbane, Queensland, Australia.
- Thenoux, G. Y Gaete, R. (1995). “Evaluación técnica del pavimento y Comparación de métodos de diseño de capas de refuerzo asfáltico”. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Tsunokawa, K. and Ul-Islam, R., 2003. Optimal pavement design and maintenance strategy for developing countries: an analysis using HDM-4. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(4), 193–208.
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., & Martínez, A. (2012). Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 11(1), 87-100.
- Vera, I., Thenoux, G., Solminihaç, H. D., & Echaveguren, T. (2010). Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 9(2), 76-88.
- Vázquez R (2006). Proyecto geométrico ejecutivo de la rehabilitación estructural del pavimento incluye obras menores y señalamiento, del subtramo km. 132+800 al km 147+915, tramo Tepalcapa-Palmillas, de la Autopista México-Querétaro. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, México.
- Wegman, F., (2016). El futuro de la seguridad vial: una perspectiva mundial. *IATSS Research*, Tokio, Japón, 40: 66-71.
- Wolters, A., Zimmerman, K., Schattler, K., & Rietgraf, A. (2011). Implementing pavement management systems for local agencies—State-of-the-art/state-of-the-practice synthesis.
- Yang, Y., Easa, S. M., Lin, Z., & Zheng, X. (2018). Evaluating highway traffic safety: an integrated approach. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.

- Yang, Y., Huang, L., Wang, J., & Xia, Y. (2019). Research on Reference Indicators for Sustainable Pavement Maintenance Cost Control through Data Mining. *Sustainability*, *11*(3), 877.
- Zaabar, I., & Chatti, K. (2010). Calibration of HDM-4 models for estimating the effect of pavement roughness on fuel consumption for US con conditions. *Transportation research record*, *2155*(1), 105-116.