



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de
los pavimentos

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Abraham de Jesús Fernández de Castro Figueroa

Dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

Querétaro, Qro. A 26 de Julio del 2019



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Efecto Potencial de la conducción autónoma sobre el
deterioro de los pavimentos

por

Abraham de Jesús Fernández de Castro Figueroa

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-266672



Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Efecto Potencial de la Conducción Autónoma Sobre el Deterioro de los Pavimentos

Tesis

Que como parte para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Presenta

Ing. Abraham de Jesús Fernández de Castro Figueroa

Dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Presidente

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Secretario

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Vocal

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Suplente

M. I. Gerardo Medellín Aguilar
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Julio 2019
México

RESUMEN

Analizar la interacción que existe entre un vehículo y un pavimento asfáltico a lo largo de una carretera es de gran importancia, ya que están estrechamente relacionados con la duración de éste. El daño producido por las cargas dinámicas ejercidas por los cambios bruscos de aceleración, están caracterizados por el estilo de conducción, es decir, con qué rapidez el vehículo disminuye o aumenta la velocidad.

Un gran avance tecnológico en la actualidad en cuanto a vehículos es la incorporación de la autonomía de la conducción. Los vehículos autónomos en términos de conducción están dados por un estilo de manejo confortable y seguro, esto gracias a sus avanzadas tecnologías de detección y monitoreo, las cuales determinan la proximidad de los vehículos precedentes y el ambiente físico del manejo, disminuyendo la velocidad paulatinamente. Con esto, los esfuerzos transmitidos a través de los neumáticos hacia la superficie del pavimento (asociando la interacción vehículo-pavimento) podrían ser de menor magnitud, a diferencia de la conducción dada por un conductor, que por lo general exhibe cambios de velocidad son agresivos.

En esta investigación se estimaron los daños potenciales producidos por las cargas dinámicas ejercidas por los cambios bruscos de aceleración (estilo de conducción), es por ello por lo que en este documento se determinó el efecto de estos cambios de aceleración sobre un pavimento asfáltico, desarrollando dos estilos diferentes de manejo en una zona urbana. Los datos alcanzados para su análisis fueron utilizando un dispositivo con un sistema de posicionamiento global (GPS) y el análisis mediante un modelo de discretización de un pavimento asfáltico, dando como resultado que los daños menores son producidos a través de una aceleración suave y constante, característica importante de los vehículos autónomos.

SUMARY

Analyzing the interaction between a vehicle and an asphalt pavement along a road is of great importance, due they are closely related to the duration of it. The damage produced by the dynamic loads exerted by the sudden changes of acceleration, are characterized by the driving style, that is, how fast the vehicle decreases or increases the speed.

A great technology advance today upon vehicles, is the driving autonomy. Autonomous Vehicles in conduction terms are given by a comfortable and safe style of driving, this thanks of their advanced detection and monitoring technologies, which determine the proximity of the preceding vehicles and the physical environment of the handling, decreasing the speed gradually. With this, the efforts transmitted through the tires towards the surface of the pavement (associating the vehicle-pavement interaction) could be of smaller magnitude, unlike the conduction given by a driver, who usually exhibits changes of speed are aggressive.

In this investigation the potential damages caused by the dynamic loads exerted by the sudden acceleration changes (driving style) were estimated, that is why in this document the effect of these acceleration changes on an asphalt pavement was determined, developing Two different styles of driving in an urban area. The data reached for its analysis were using a device with a global positioning system (GPS) and the analysis using a model of discretization of an asphalt pavement, resulting in minor damage is produced through a smooth and constant acceleration, important characteristic of autonomous vehicles.

AGRADECIMIENTOS

Es mi responsabilidad, de manera muy personal, de una forma muy sencilla pero con un gran valor, reconocer y agradecer a aquellas personas que aportaron un poco de su tiempo y conocimiento en mi andar por este no tan sencillo lapso de educación y formación en mi vida, en el cual tuve altibajos que me motivaron a dar más de mí y superarlos a sus respectivos tiempos, pero aún más importante la cantidad de cosas positivas y significativas que me ocurrieron, haciéndome ver que siempre fui una persona capaz de cumplir con mis objetivos; a mis maestros, a mis compañeros que se convirtieron en mis amigos y a mi novia M.I. Silvia Salas Aguilar, pero muy en especial a la vida por permitirme estar aquí.

Hago referencia con todo mi amor a mi familia que son un motor de aliento dentro de mí, mi madre a la cual le agradezco por darme su apoyo incondicional de toda la vida, con sus palabras y su motivación, ese aliento que fue clave dentro de mí, con el fin de lograr, ser mejor día con día. Mi hermano que es una persona pequeña de edad y el cual es una motivación para convertirme en una persona en la que él se pueda guiar con toda la confianza y de la mejor manera en su futuro crecimiento y aprendizaje.

También agradezco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por darme la oportunidad de estudiar tiempo completo en un programa de maestría y a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por darme un espacio de calidad en el cual pase gran parte de mis días durante mi estancia en Querétaro, sus excelente docentes, programas, laboratorios y personal en general.

Siempre hay que ser agradecidos desde el punto en que lo que nos ocurre es un regalo que nos pone la vida y ésta siempre será bondadosa con cada uno de nosotros.

A todos, gracias.

Contenido	Pág.
RESUMEN	3
SUMARY	4
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE FÓRMULAS	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Descripción del problema.....	13
1.2 Justificación.....	17
1.3 Hipótesis y objetivo	21
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	22
2.1 Vehículos Autónomos	22
2.1.1 El surgimiento de la conducción autónoma	23
2.1.2 Tecnologías en VA	25
2.1.3 Seguridad	30
2.1.4 Transporte de carga automatizado	31
2.2 Estilos de manejo	32
2.3 Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	33
2.4 Pavimentos	34
2.4.1 Pavimentos Rígidos.....	35
2.4.2 Pavimentos flexibles	36
2.4.3 Daños al pavimento.....	37
2.5 Modelo de respuesta al pavimento y medida de rendimiento	42

3. METODOLOGÍA	45
3.1 Mediciones y análisis	46
3.2 Tipo de vehículo y tramo carretero para experimentación	46
3.3 Mediciones de estilos de conducción	47
3.4 Recolección de datos a través del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para su análisis	47
3.5 Vaciado de datos a software para desarrollar cálculos	56
3.5.1 MapSource	56
3.5.2 Excel	58
3.6 Cálculo del daño al vehículo a través de la utilización del modelo	59
3.7 Conducción ideal	59
3.8 Interpretación y redacción de resultados para discusión	60
4. RESULTADOS	61
4.1 Mediciones y análisis	61
4.2 Vehículo tipo B2 y Av. 5 de febrero	61
4.3 Medición de estilos de conducción	65
4.4 Vaciado de datos Mapsource	66
4.5 Resultado de los cálculos del daño al pavimento	69
5. CONCLUSIONES	78
6. REFERENCIAS	81

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 DATOS PROMEDIO DE UN GPS COMERCIAL.	33
TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y DE RENDIMIENTO GPSMAP 64S.	49
TABLA 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO USADO.	62
TABLA 4.2 DATOS VIALES; MEX-57.	63
TABLA 4.3 DATOS OBTENIDOS DEL EXPERIMENTO A TRAVÉS DE GPS.	68
TABLA 4.4 CÁLCULO DE DAÑO AL PAVIMENTO DE LA CONDUCCIÓN NORMAL.	69
TABLA 4.5 VALORES DE DESVIACIÓN. ESTÁNDAR PARA CADA RECORRIDO.	72

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 RUGOSIDAD EN UN PAVIMENTO ASFÁLTICO.	14
FIGURA 1.2 COMPOSICIÓN DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS, 2012.	18
FIGURA 2.1 VEHÍCULO AUTÓNOMO BASADO EN EL SOFTWARE DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE GOOGLE.....	28
FIGURA 2.2 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE CONVENCIONAL (ZÁRATE, 2011).....	36
FIGURA 2.3 ESFUERZOS DE TENSIÓN Y COMPRESIÓN EN UN PAVIMENTO ASFÁLTICO. ...	37
FIGURA 2.4 EJEMPLO DE RUTTING.....	38
FIGURA 2.5 BACHES	39
FIGURA 2.6 PROTUBERANCIA EN PAVIMENTO.....	40
FIGURA 2.7 PIEL DE COCODRILO	41
FIGURA 2.8 MODELO COMPRENDIDO POR ELEMENTOS DESACOPLADOS EN UN PAVIMENTO ASFÁLTICO.	42
FIGURA 2.9 MODELO DE PAVIMENTO DISCRETO DESACOPLADO.....	43
FIGURA 3.1 DIAGRAMA PARA EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	45
FIGURA 3.2 CAMIÓN TIPO C3 ¹	46
FIGURA 3.3 MODELO GPSMAP 62S MARCA GARMIN UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN ...	48
FIGURA 3.4 INTERFAZ PRINCIPAL DE UN GPSMAP 62s.....	50
FIGURA 3.5 MENÚ PARA CONFIGURACIÓN DE TRACKS.	51
FIGURA 3.6 OPCIÓN TRACK MANAGER GPSMAP 62s.....	52
FIGURA 3.7 LISTA DE TRACKS ALMACENADO EN EL DISPOSITIVO.	53
FIGURA 3.8 OPCIONES DEL TRACK ACTUAL.....	54
FIGURA 3.9 RUTA MOSTRADA EN LA OPCIÓN VER MAPA DEL TRACK SELECCIONADO.	55
FIGURA 3.10 INTERFAZ DE INICIO MAPSOURCE	56
FIGURA 3.11 PANTALLA DE TRABAJO DE MAPSOURCE.....	57
FIGURA 4.1 VEHÍCULO UTILIZADO PARA REALIZAR EXPERIMENTO.....	62
FIGURA 4.2 TRAMO EN QUE SE REALIZARON LAS PRUEBAS	64
FIGURA 4.3 INTERFAZ CON DATOS OBTENIDOS DE SUR A NORTE.....	66
FIGURA 4.4 PARÁMETROS DE LA RUTA REALIZADA.	67
FIGURA 4.5 GRÁFICO DE LA VARIACIÓN TOTAL DE LA VELOCIDAD.....	70

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

FIGURA 4.6 GRÁFICO DEL DAÑO AL PAVIMENTO.....	71
FIGURA 4.7 PERFILES DE ESFUERZOS Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA CADA VIAJE.....	76
FIGURA 4.8 RELACIÓN ENTRE LA ACELERACIÓN Y ESFUERZO	77

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

ÍNDICE DE FÓRMULAS

	Pág.
Energía de deformación.....	19
Módulo dinámico de la elasticidad del asfalto.....	20
Módulo dinámico de la rigidez.....	20
Tensión de corte.....	20
Fuerza aerodinámica.....	20
Formula para el cálculo de las muestras poblacionales finitas.....	64

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

1. INTRODUCCIÓN

Desde la creación de los vehículos automotores, se tiene la necesidad de crear redes de caminos carreteros (generada por la industrialización y sus respectivas necesidades de movilidad y de carga) que funjan como principales conductos de relación entre diversos puntos, con objeto de alcanzar un mayor nivel de desarrollo económico. Lo anterior es señalado debido a que un país es más competitivo, productivo y próspero cuando cuenta con infraestructuras de comunicaciones y transportes de buena calidad (indicadores de progreso) (Vázquez *et al.* 2004), lo que lo lleva a la creación, modernización y mantenimiento de las redes carreteras; generadoras de transformar positivamente un territorio.

El diseño de un pavimento asfáltico, el cual se considera en esta investigación, está basado principalmente en los esfuerzos estáticos (a través de las cargas); el cual se basa en diferentes métodos de diseño creados a lo largo de la historia (métodos empíricos, método mecanicista, entre otros) (Huang, 2014). Además, otros esfuerzos importantes, pero poco desarrollados, son los esfuerzos dinámicos, derivados de la inercia de las masas involucradas, así como de los esfuerzos tangenciales derivados de la tracción de los vehículos. En este sentido, investigaciones alrededor del mundo en el área de dinámica vehicular, han planteado, discutido y establecido algunas metodologías y procedimientos tanto de evaluación como de análisis del comportamiento (Vázquez *et al.* 2004), pues como lo señalan Danielson *et al.* (1996), existe la necesidad de elaborar procedimientos de análisis eficientes para simular el contacto de los neumáticos, ya que el desarrollo de procedimientos de contacto de fricción fiables y eficientes para neumáticos sería un área importante de investigación, sin embargo, predecir este comportamiento según Dodo y Thorpe (2004) seguía siendo un área con numerosas dificultades e incertidumbres debido a las complejas interacciones que existen entre el vehículo y la carretera.

1.1 Descripción del problema

La mayoría de los pavimentos se deterioran con el tiempo en una progresión sistemática de efectos; las cargas del tráfico, el clima, las propiedades del pavimento (materiales), así como las fuerzas y las tensiones derivadas de la velocidad del vehículo (cargas estáticas y dinámicas) ocasionando una respuesta que se deriva en comportamientos y deterioros específicos (Dadoo y Thorpe, 2002).

Uno de los principales problemas en las carreteras es el deterioro del pavimento, ya sea por fatiga o por deformaciones permanentes. Un ejemplo de daño por fatiga son los agrietamientos o la rugosidad (Figura 1.1), que, desde la creación de los coches contemporáneos, dicho indicador del estado de las carreteras ha sido de gran interés (Reza-Kashyzadeh *et al.* 2014), ya que la rugosidad en los pavimentos implica vibraciones en los vehículos, siendo ello uno de los parámetros más influyentes de daño en los componentes de éstos. Al respecto, uno de los problemas que existen es obtener estos valores de las fuerzas dinámicas en tiempo real, ya que ello implica un alto costo de instrumentación, y existe una falta de tecnología, al tiempo que es elevado su mantenimiento. Debido a lo anterior, se necesita de un método indirecto (Han *et al.* 2016), como se realiza en esta tesis, a través de un sistema de Posicionamiento Global (GPS), al cual se asocia un modelo de discretización de un pavimento asfáltico.

Por otro lado, con carreteras dañadas se obtienen aumentos en costos de mantenimiento de los vehículos y de las infraestructuras, como lo menciona Reagle (1995) citado por Romero *et al.* (2013), y estos a su vez contribuyen a mayores costos en el transporte y sobre todo que degradan la seguridad vial, perdiendo algunas características primordiales de un pavimento como lo es la comodidad y la seguridad (Glavica *et al.* 2017)

Según Arnold *et al.* (2010) los costos asociados al mantenimiento de los caminos se podrían recuperar cobrando a los conductores una tarifa (por ejemplo, un peaje o cargo) en algunas de las carreteras, con objeto de recuperar los costos asociados a la conservación y rehabilitación de los caminos, que son cubiertos por las

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

instituciones administradoras de las infraestructuras. Ello se considera una inversión, que incluye los costos de mantenimiento y de operación. Al respecto, sin embargo, la perspectiva del usuario sobre los precios de las carreteras es un elemento crítico que debe tenerse en cuenta en la planificación de los precios de las carreteras y la formulación de políticas (Glavica *et al.* 2017).

Un dato importante que cabe destacar es que en México actualmente se invierte cada año alrededor de 13 mil millones de pesos en mantenimiento y conservación de los más de 40 mil kilómetros libres de peaje, según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2016), siendo uno de los factores que ubican a México en el lugar número 52 de 148 naciones en cuanto a calidad de su infraestructura, de acuerdo con organismos internacionales. El problema de inversión en infraestructura es común a otras naciones. Como lo indica la Asociación Española Carretera (2018) en un comunicado de prensa, se contempló una reducción del 4.3% con respecto a 2017 en la partida destinada a conservación de carreteras y seguridad vial, pasando de 958.10 millones de euros en el ejercicio 2017, a 917 millones en 2018. Lo anterior, es un indicativo de las grandes cantidades de dinero que se asignan a este rubro alrededor del mundo, por lo cual la interacción entre el vehículo y la infraestructura es un tema de investigación global.



Figura 1.1 Rugosidad en un pavimento asfáltico.

Fuente: propia.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Una forma de disminuir los esfuerzos y las tensiones que producen daños al pavimento relacionados con la velocidad como se mencionó al comienzo de este subtema, es a través de los estilos de manejo (caracterizado en términos de energía), es decir, por medio de la dispersión de la aceleración, el cual representa un factor que influye en el deterioro del pavimento de acuerdo con los resultados de un estudio hecho por Montoya *et al.* (2016) para un tramo carretero en México.

Por consiguiente, se tendría que disminuir la magnitud de las fuerzas tangenciales en la interfaz llanta-pavimento, que como lo menciona Romero *et al.* (2013), las fuerzas de acuerdo con la 2da Ley de Newton son proporcionales a la aceleración aplicada al vehículo; y tales aceleraciones serían menores derivadas de una conducción no agresiva, es decir, con cambios no violentos de velocidad.

Mencionado lo anterior podemos comenzar a hablar de los estilos de conducción, la conducción normal de un vehículo convencional, es decir, dirigida por el estilo de manejo de un conductor, se caracteriza muchas veces por aceleraciones y frenadas bruscas. Tales aceleraciones y/o frenadas pueden ser generadas por las maniobras de rebase o por el simple hecho de tener un vehículo precedente que incite al conductor a disminuir la velocidad del vehículo. Para el caso de una infraestructura como lo es la de un pavimento asfáltico, al tener una velocidad constante originada por el estilo de conducción, representa daños menores a este tipo de pavimento.

Por otra parte, como nos indica Talebpour y Mahmassani (2016), los vehículos autónomos representan un avance tecnológico que ofrece una variedad de ventajas, ya que han sido prototipos con avances sustanciales en tecnologías de detección, reconocimiento de patrones asociados y de control de inteligencia. Li *et al.* (2015) nos indican que es un hecho que los vehículos autónomos tienen un gran potencial para mejorar la seguridad, el confort, y la eficiencia en la conducción, por consiguiente y retomando lo mencionado en el párrafo anterior sobre el estilo de manejo, se puede establecer que el estilo de manejo de un vehículo autónomo está caracterizado por arranques y frenadas suaves, de tal manera que se mantienen los espaciamientos adecuados entre vehículos, por mencionar un ejemplo, por lo cual provee los medios para realizar una conducción no brusca. De esta manera, el uso

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

de un vehículo autónomo generaría un manejo no agresivo y por consiguiente menores esfuerzos que afecten la calidad del pavimento.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

1.2 Justificación

Para un mejor equilibrio entre la relación vehículo-pavimento y costos entre usuario-gobierno, a continuación, se desarrolla la justificación de esta investigación.

Es una realidad que el crecimiento y desarrollo de un país se da a través de aspectos globalizados, como los sociales, educativos, económicos, políticos y medioambientales. El aspecto más significativo y con el que la mayor parte del mundo identifica a un país primermundista es su desarrollo económico (independientemente de los otros aspectos), pues se considera que una economía es desarrollada cuando tiene altos niveles de crecimiento económico y seguridad financiera, esto, a través del PIB, el cual se determina con el total de ingresos brutos de un país dividido entre el total de sus habitantes.

Un país es más competitivo, productivo y próspero cuando cuenta con infraestructura de comunicaciones y transportes de calidad alineada a las necesidades de movilidad y de carga (Vázquez *et al.* 2014), debido a que la industrialización y el comercio exterior son detonantes positivos dentro de un territorio, lo que permite alcanzar un mayor nivel de desarrollo si se atiende de forma eficiente y racional el valor sobre sus propios recursos naturales y el aprovechamiento de sus materias primas. Al respecto, las importaciones y exportaciones marcan el nivel de comercialización que existe en un país, ya que el comercio mundial ha demostrado una dinámica intensiva de crecimiento en los últimos años al ser transportado por todos los medios posibles; terrestres, aéreos y marítimos (Ozturk & Patrock, 2018).

En México, por ejemplo, la infraestructura carretera moviliza la mayor parte de la carga (55% del total) y de las personas (98% del total) que transitan el país. Ambas movilizaciones pueden ser comparadas ya que son heterogéneas debido al volumen, peso, bienes, duración, entre otros, según lo señalan Meersman *et al.* (2016).

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Para atender esta demanda, la red carretera en México cuenta con 377,660 km de longitud, dividida entre red federal (49,652 km), carreteras alimentadoras estatales (83,982 km), la red rural (169,429 km) y brechas mejoradas (74,596 km) (Figura 1.2), por lo que la relevancia del transporte terrestre de mercancías en México aparece en varios aspectos de la vida nacional (Moreno *et al.* 2016).

Algunas carreteras están a cargo del gobierno federal y constituyen los corredores carreteros, que proporcionan acceso y comunicación a las principales ciudades, fronteras y puertos marítimos del país y, por lo tanto, registran la mayor parte del transporte de pasajeros y carga. Algunos tramos son libres, es decir que circular por ellas no tiene costo, otras son de cuota, en las que se debe pagar un peaje para utilizarlas (INEGI).

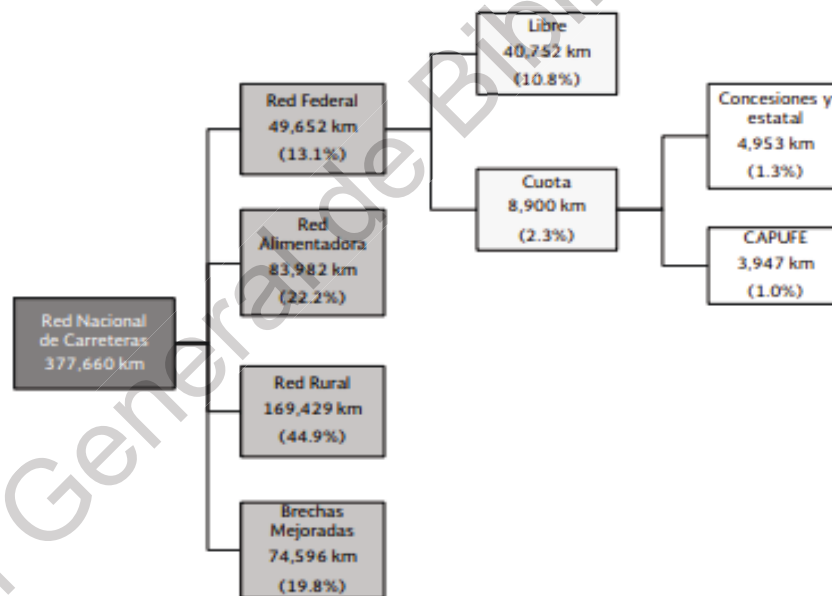


Figura 1.2 Composición de la Red Nacional de Carreteras, 2012.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura.

Los costos de conservación originados por los daños en las carreteras son un indicativo de la necesidad que se tiene por preservar en buen estado las carreteras,

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

pues Saha *et al.* (2013) mencionan que la evaluación de la condición del pavimento es uno de los componentes más importantes dentro del diseño, la rehabilitación y la administración del pavimento. Ello porque esta evaluación incluye los daños causados a la infraestructura: el daño por esfuerzo, por rugosidad o por fricción en la estructura, este último muy importante según la Federal Highway Administration (2010) en su apartado *pavement friction*.

La rugosidad no solo afecta directamente la calidad de conducción y la comodidad de conducción, sino también la vida útil y el costo de mantenimiento del pavimento (Liu *et al.* 2016), en un ciclo que se da entre la interacción de los neumáticos y la superficie del pavimento.

Las cargas dinámicas generadas por el vehículo transmitidas mediante la dispersión de la aceleración suscitan a que en ciertos puntos del pavimento se tenga un daño mayor. Un ejemplo claro de esto es lo mencionado por Hu *et al.* (2017), que al realizar ciertos ensayos notó que los vehículos en desaceleración (frenado), inducen a las tensiones cortantes y tensiones verticales más severas en la estructura del pavimento en términos de magnitud, es decir, de forma aumentada.

Los estudios realizados por Han *et al.* (2016), son un indicativo de que se sigue buscando información de esta interacción (vehículo - pavimento), además, demuestra que existe una estrecha relación entre la fuerza ejercida por un neumático y el coeficiente de fricción superficial, por ejemplo, con este coeficiente se permite estimar la fuerza de tracción máxima, así como la fuerza de frenado, además de ser importante para garantizar la seguridad del tráfico y la comodidad de conducción (Hou *et al.* 2018)

Por otra parte, existen estudios que contemplan la velocidad generada por algún tipo de vehículo, así como la obtención de datos a través de los dispositivos de sistemas de posicionamiento global. Un ejemplo claro de esto es el de Cortés *et al.* (2016), que realizan un estudio en el que presenta un método basado en datos de GPS en el que analiza sistemáticamente las velocidades medias de autobuses comerciales. Ello resulta muy conveniente ya que la velocidad del autobús comercial

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

es un factor clave en la operación de los sistemas de transporte público, porque representa una medida directa de la calidad del servicio prestado a los usuarios y sus costos. Además, explica que en este estudio se puede aplicar a una ruta completa a segmentos específicos de cualquier longitud, ya sea para un día completo o para ciertos períodos de tiempo.

Otro estudio realizado para determinar la dispersión de la aceleración es el hecho por Montoya *et al.* (2016), el cual realizó un estudio con el que logró determinar el daño causado al pavimento. Para ello, se ensayó con un camión viajando a través de una carretera con una longitud de 114.5 km con tramos rectos en su mayoría. En este estudio se muestra el resultado de tres ensayos realizados individualmente con diferente velocidad, identificando que los mayores daños en el pavimento se producen cuando se tiene una baja y una alta velocidad, mientras que el daño es menor causado por una velocidad media o moderada. Cabe mencionar que estas variaciones solo se atribuyen al estilo de conducción y no a otro tipo de variables que puedan inferir en la velocidad (por ejemplo, el tráfico, la temperatura, entre otros).

Con lo investigado y escrito anteriormente, se puede justificar la razón por la que surge esta investigación: lograr la reducción de recursos económicos que están presentes en la conservación de las carreteras y en las reparaciones a los daños en vehículos ocasionados por la intrusión de un pavimento dañado a través de datos GPS, además, cabe destacar que la investigación sobre modelación de un conductor es un tema importante para cuantificar y mejorar las soluciones tecnológicas mediante la simulación en los sistemas de transporte y vehículos inteligentes, según Javanmadri *et al.* (2017).

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

1.3 Hipótesis y objetivo

La conducción autónoma podría disminuir hasta en un 30% los daños al pavimento ocasionados por la dispersión de la aceleración. Con base en esto, también se disminuyen los costos por rehabilitación y conservación de carreteras.

Objetivo

Analizar de manera comparativa una conducción ideal (representando la conducción autónoma) respecto a una conducción real en términos de energía de deformación (carga de la rueda y dispersión de la aceleración), lo anterior, para determinar la cantidad de daño que ocasiona cada tipo de conducción al pavimento y hacia su propio sistema.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Vehículos Autónomos

Los vehículos autónomos representan un avance tecnológico que ofrece una variedad de ventajas, ya que han sido prototipos con avances sustanciales que se caracterizan por su capacidad para desplazarse de manera independiente debido a que disponen de un conjunto en tecnologías de detección, reconocimiento de patrones asociados y de control de inteligencia (láser, radar, sistema de posicionamiento global, visión artificial, entre otros) que les permite percibir el entorno que les rodea y tomar decisiones en consecuencia (Talebpour & H. Mahmassani, 2016)(Vassallo, 2017). Además, hablar de vehículos autónomos es hablar del gran potencial para mejorar la seguridad, el confort, y la eficiencia en la conducción y aunque parece ser un destino lejano el hecho de que un vehículo autónomo esté involucrado dentro del parque vehicular, recorriendo las carreteras antes de estar involucrado en una zona urbana en donde existen más alternativas de manejo debido a la interacción con los otros usuarios (Li *et al.* 2017), la tecnología de los vehículos autónomos se está convirtiendo rápidamente en una realidad en las carreteras estadounidenses (Fávaro *et al.* 2018). Es por eso que las pruebas en las vías públicas ya se están llevando a cabo en varios estados, incluidos, entre otros, California, Texas, Nevada, Pensilvania y Florida, así mismo los avances en los últimos años han sido muy significativos; como las pruebas realizadas por los vehículos autónomos de Google, los cuales han sido un detonante para que algunos fabricantes de automóviles (Volvo, Audi, entre otros) estén actualmente diseñando y probando sus prototipos en Estados Unidos, en donde algunos estados ya han legalizado la circulación de vehículos autónomos para pruebas en vías públicas (Zhibin *et al.* 2017).

En términos generales, un vehículo autónomo es cualquier vehículo que adopta una tecnología capaz de soportar y ayudar a un conductor humano en las tareas de: 1) controlar un vehículo (y sus funciones principales de gobierno y control de su velocidad); y 2) monitorear el entorno circundante (por ejemplo, otros vehículos /

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

peatones, señales de tráfico, marcas viales, entre otros.). Estas dos funciones están claramente interconectadas y dependen entre sí, dado que la ejecución de determinadas funciones de control (por ejemplo, aceleración o deceleración) dependerá de las entradas y señales recibidas del entorno circundante (por ejemplo, un semáforo en rojo) (Fàvaro *et al.* 2018).

2.1.1 El surgimiento de la conducción autónoma

A través de la historia se han dado un sinnúmero de especulaciones acerca de los vehículos de combustión interna debido a los grandes cambios que han sufrido a partir de su invención a mediados del siglo XIX y su completa renovación durante el siglo XX. Una de las grandes preguntas siempre ha sido cómo serán los vehículos del futuro, y aunque ha habido mucho desarrollo de tecnologías para ellos, el hecho de contar con un vehículo que se conduzca por sí mismo ha acaparado las miradas del mundo entero y que puede revolucionar la humanidad.

La historia nos habla de grandes descubrimientos en la conducción autónoma desde los años 20's, cuando a través de ondas de radio se podía controlar un vehículo mediante otro, o años después, a través de dispositivos electrónicos colocados sobre la carretera que pudieran guiar al automóvil. Sin embargo, estos desarrollos no tuvieron un impacto significativo en la industria automotriz hasta hace menos de tres décadas con grandes esfuerzos académicos, de la industria y por parte del gobierno, así como el desarrollo de la computación y de la inteligencia artificial (Li *et al.* 2017). Un ejemplo es que a partir de los 90's ya con mejores tecnologías en el mundo, surgieron otro tipo de ideas que no tardaron en hacerse realidad. Las diferentes tecnologías con sensores orillaron a la conducción autónoma a ser semi-autónoma logrando realizar pruebas de recorrido largas que incluían maniobras de rebalse, pero siempre con la posibilidad de que el conductor pudiera intervenir en el caso de que ocurriera algún error. Durante el inicio del siglo XXI y mediante concursos desarrollados por la Secretaría de Defensa de los Estados Unidos,

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

comenzaron los grandes retos que dieron como resultado los vehículos autónomos en la actualidad (Romero *et al.* 2014) (Urmson *et al.* 2008) (Chloe, 2018).

Google es una de las principales empresas que se aventuró a dar el gran paso de la tecnología en los vehículos a través de su proyecto Waymo en 2009, con los primeros recorridos largos en EU y en el 2010 anunciaba que estaba desarrollando un auto que circulara por las carreteras sin un conductor detrás del volante (Albanesius, 2010). En el 2014 reveló un nuevo prototipo de su automóvil sin conductor, que no tenía volante, acelerador o pedal de freno, siendo 100% autónomo y ya realizaba pruebas en California, Estados Unidos, y sus alrededores, con más de 1.3 millones de millas realizadas hasta el 2015, de las cuales más del 30% fueron hechas sobre las calles. Estamos hablando de que Google realizaba entre 50,000 y 60,000 Km por mes; lo que un adulto promedio en EU conduce de 2 a 4 años. Actualmente conducen más de 40,000 km cada día, la mayoría en calles urbanas complicadas, sumándolos a los 4,300 millones de kilómetros que se realizaron durante el 2017 (Google, 2015) (Waymo, 2018).

2.1.2 Tecnologías en VA

Existen diversos tipos de automatización aplicadas a un vehículo, según la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés) que van desde la no automatización, hasta la automatización completa (Tabla 1). De acuerdo con esta clasificación, la conducción autónoma tiene el más alto nivel de automatización, pues no es necesario contar con un conductor para realizar la conducción, volviéndose un pasajero más en la duración del transcurso de viaje, sin importar el tipo de condiciones que se presenten a lo largo del trayecto. Tales niveles de una forma más general se podrían resumir en tres: a) autonomía parcial, en la que el conductor permite al vehículo realizar alguna función si lo requiere; b) alta autonomía, en la que el conductor solo interviene en situaciones extraordinarias en las que el vehículo pueda necesitar apoyo, pero en la mayor parte del tiempo el vehículo se puede valer por sí mismo; c) completa autonomía, el vehículo es capaz de realizar en todo momento la conducción sin que el hombre intervenga en decisión alguna sobre la conducción (Vassallo, 2017)(NHTSA, 1970).

Los primeros dos niveles se presentan en la mayoría de los vehículos que, generalmente se presentan con el frenado de emergencia. El nivel tres se presenta en algunos modelos de Tesla, los cuales cuentan con un sistema de piloto automático; usa cámaras y radares para mantener una velocidad establecida, frenar automáticamente y cambiar de carril sin la necesidad de que el conductor intervenga en las decisiones, pero con la condición de que las manos del conductor deben permanecer en el volante o soltarlos por no más de 10 minutos (Krisher & Durbin 2016).

Los vehículos autónomos están equipados con sensores de la más alta tecnología (Tabla 2) con los cuales pueden percibir lo que sucede alrededor como un ser humano puede percibirlo a través de la vista y del oído. Así, con los sensores se facilita la toma de decisiones, pues cada uno recibe diferente información, por ejemplo, el sensor de la visión percibe si un obstáculo precedente es un vehículo, un peatón o un ciclista, mientras que el sensor de proximidad determina la distancia que existe

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

hasta ese objeto según Kala (2016). La navegación autónoma del vehículo se puede visualizar como cinco componentes principales: percepción, localización y cartografía, planificación de ruta, toma de decisiones y control de vehículos (Cheng, 2011) (Van Brummelen et al. 2018).

Tabla 1. Nivel de automatización según SAE

Niveles de automatización	Quién hace qué
1	El conductor realiza la conducción
2	Un sistema avanzado de asistencia al conductor (ADAS) puede ayudar algunas veces con una labor ya sea con la dirección o con el frenado y la aceleración, pero no ambos.
3	Un sistema avanzado de asistencia al conductor (ADAS) en el vehículo puede en realidad controlar tanto la dirección como el frenado / acelerar simultáneamente en algunas circunstancias. El conductor humano debe continuar prestando toda su atención ("controlar el entorno de conducción") en todo momento y realizar el resto de la tarea de conducción.
4	Un Sistema Automatizado de Conducción (ADS) en el vehículo puede realizar todas las tareas de manejo y monitorear el entorno de manejo, esencialmente, conducir todo, en ciertas circunstancias. El humano no necesita prestar atención en esas circunstancias.
5	Un sistema de conducción automatizada (ADS) en el vehículo puede conducir todo en cualquier circunstancia. Los ocupantes humanos son solo pasajeros y nunca deben involucrarse en la conducción.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Las tecnologías mencionadas, junto con algunas otras que acompañan a un vehículo autónomo se muestran en la Figura 1, en donde 1B son sensores que determinan la posición de los objetos hasta una distancia de 50 m, siendo este del tipo ultrasónico. El tipo de sensor es LIDAR y cuenta con tres tipos: un LiDAR de corto alcance que brinda al vehículo una vista ininterrumpida directamente a su alrededor, un LiDAR de rango medio de alta resolución y un potente LiDAR de largo alcance de nueva generación; 2) Sensores COMPLEMENTARIOS a través de una unidad de medición inercial (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro), codificadores y un Sistema de Posicionamiento Global; 3) El sensor giratorio en el techo escanea más de 300 metros en todas direcciones para generar un mapa tridimensional preciso del entorno del automóvil, tiene la detección tridimensional y cuenta con los sensores de Stereovision y 3D LIDARs. Se compone de varios conjuntos de cámaras de alta resolución, diseñadas para funcionar bien a gran distancia, en condiciones de luz natural y poca luz. El tipo 4) Cuenta con cuatro sensores del tipo RADAR que miden los movimientos realizados por el coche, ayudando a localizar con precisión su posición. Tienen una vista continua de 360 grados, por lo que pueden rastrear la velocidad que llevan los diferentes usuarios en el camino (al frente, detrás y a ambos lados del vehículo), lo también le permite tener un mejor control y mejores movimientos para estacionarse, añadiendo la reducción de huella de estacionamientos (Romero *et al.* 2014) (Van Brummelen *et al.* 2018) (Waym, 2018) (Nourinejad, 2018).

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

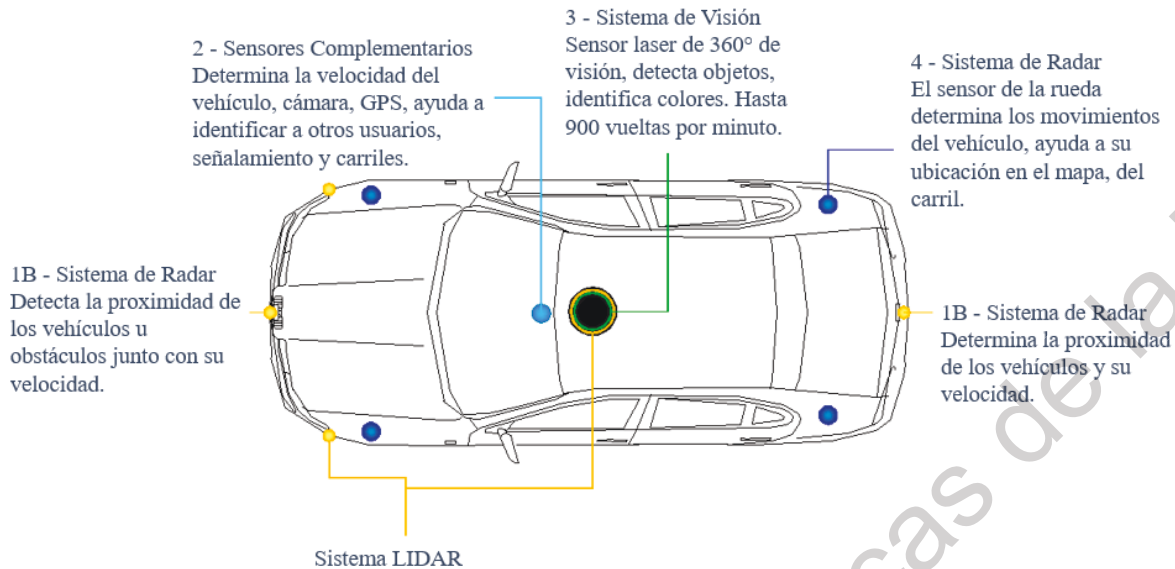


Figura 2.1 Vehículo autónomo basado en el software de Inteligencia Artificial de Google.

Fuente: propia

Por otro lado, cuenta con un sistema de computación y redes de sensores, dispositivos informáticos para la gestión de procesos de la programación muy importante y para los procesos menos importantes, así también, como la alimentación que requieren todos los dispositivos, sensores y actuadores. Adentro, el vehículo cuenta con dispositivos tecnológicos suficientes para la interacción que necesita tener el usuario con el vehículo, es decir, medios por los cuales el pasajero notará que es lo que sucede durante el trayecto, elegir el destino, entre otros que ayudarán al usuario a tener una mejor accesibilidad.

Tabla 2. Tipos de sensores para detección y respuesta.

Fuente: propia

Tipo de sensor	Objetivo
LIDAR	Laser que detecta y determina las distancias a través de impulsos cada segundo en 360 grados y mide cuánto tiempo se tarda en reflejarse en una superficie y regresar al36 vehículo.
VISION	El sistema de visión incluye cámaras diseñadas para ver el mundo en contexto, como lo haría un ser humano, pero con un campo de visión simultáneo de 360 grados. Debido a que el sistema de visión de alta resolución detecta el color, ayuda a que el sistema detecte los semáforos, las zonas de construcción, los autobuses escolares y las luces intermitentes de los vehículos de emergencia.
RADAR	El radar usa longitudes de onda para percibir objetos y movimientos. Estas longitudes de onda pueden viajar alrededor de objetos como gotas de lluvia, haciendo que el radar sea efectivo en la lluvia, la niebla y la nieve, de día o de noche.
SUPPLEMENTARIOS	Sensores adicionales, incluidos en el sistema de detección de audio que puede escuchar sirenas de policías y vehículos de emergencia a cientos de metros de distancia, además cuenta con un GPS para complementar la amplia comprensión de la ubicación de los vehículos en el mundo.

2.1.3 Seguridad

La seguridad es un tema importante que a todos nos interesa, y el hecho de que un humano no se encuentre al volante de un vehículo nos hace desconfiar de la conducción autónomas, pero ¿realmente creemos que un vehículo autónomo será de gran peligro para la población mundial?

Hablar de la seguridad con la que cuentan los vehículos autónomos es una de las características más importantes, debido a que la autoconducción podría reducir significativamente la incidencia de accidentes de tráfico y muertes, ya que las pruebas y los millones de kilómetros de pruebas en diversos escenarios, comprueban que son controladores más suaves y seguros, incluso si en un accidente de tránsito el vehículo autónomo no es el responsable (Simonite, 2013). Por otro lado, podemos establecer dos cosas importantes; las pérdidas humanas y las pérdidas económicas.

Si hablamos de pérdidas humanas, es necesario decir que cada día alrededor de 3500 personas fallecen en las carreteras, decenas de millones de personas sufren heridas o discapacidades cada año y en la mayoría de los casos es debido a un error humano y sus diferentes comportamientos, incluso a su nivel socioeconómico (Obregón et al. 2018) (OMS,2018). Los niños, los peatones, los ciclistas y los ancianos son los usuarios más vulnerables de la vía pública, cada año 1,25 millones de personas mueren en las carreteras del mundo (Waymo, 2018); esta cifra se ha mantenido estable desde 2007. La mitad de todas las muertes que acontecen en las carreteras del mundo se produce entre los usuarios menos protegidos de las vías de tránsito: motociclistas (23%), peatones (22%) y ciclistas (4%). Además, los límites máximos de velocidad en vías urbanas deberían ser inferiores o iguales a 50 km/h, pues un peatón tiene menos del 20 % de probabilidades de morir si es atropellado por un automóvil que circula a menos de 50 km/h, pero casi un 60 % de posibilidades si es atropellado a 80 km/h)(Charlton & Starkey, 2017)(OMS, 2015). Además de que existen diferentes factores que aumentan la probabilidad de tener

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

una conducción no segura, como conducir bajo los efectos del alcohol, algo que el vehículo autónomo podría reducir al máximo.

Las pérdidas económicas por los percances viales son significativas alrededor del mundo, ya que el costo de los accidentes automovilísticos en 2010 ascienden a 242 mil millones de dólares en actividad económica, no solo en pérdidas de infraestructura (vehículos y daños a la vialidad), sino que además incluye 57.6 mil millones dólares de pérdida en la productividad laboral y 594 mil millones de dólares debido a la pérdida de vidas, e inclusive la disminución de la calidad de vida debido a lesiones y tratamientos.

2.1.4 Transporte de carga automatizado

El primer viaje largo por un vehículo de carga autónomo lo realizó la compañía Embark, y fue un viaje a través de EU que duró cinco días (Los Angeles CA a Jacksonville, Florida), aunque incluyó un conductor de seguridad a bordo detrás del volante, esto, debido a que dicho conductor tiene que estar listo para tomar el control, ya que la ruta que fue tomada involucraba frenos de reposo programados. Sin embargo, según la empresa, una vez que la tecnología esté lista para ejecutarse por sí sola, el viaje tomaría solo dos días en total.

El camión de Embark cuenta con todo el equipo que ya hemos visto en otros sistemas, como radares, cámaras, sensores de profundidad y LIDAR, lo que lo hace capaz de moverse a una velocidad constante sin importar las condiciones meteorológicas sea de día o noche, incluso es capaz de cambiar de carril.

Este sistema es considerado para muchos una especie de "piloto automático para autopistas", que es la parte del trayecto que tiende a ser más predecible y sin tanta dificultad, ya que aquí no hay peatones, ciclistas o semáforos, además de que la velocidad suele ser constante.

2.2 Estilos de manejo

Hablar del estilo de manejo, es hablar de comodidad. Sin embargo, hasta el momento, no se ha establecido una definición de comodidad ampliamente compartida y acordada en la comunidad científica (Bellen, 2018). Sin embargo, los estilos de manejo se pueden determinar a partir de las condiciones y sensaciones que se presentan a lo largo del camino de un conductor, por ejemplo, ancho de la carretera, curvatura horizontal, distancia de visibilidad (Ahie *et al.*, 2015; Charlton & Starkey, 2017), así como por la interacción que existe con otros vehículos, incitando al conductor a tener diferentes comportamientos y determinando los cambios de aceleración y velocidad del vehículo. Una forma sencilla de dar significado a un estilo agresivo de conducción es visualizando un comportamiento caracterizado por altas velocidades y cambios abruptos de aceleración, así, mientras un estilo dócil, se dará a través de velocidades constantes; sin aceleraciones y frenadas súbitas (Eboli *et al.* 2016).

Los estilos de manejo pueden clasificarse más o menos en agresivos, moderados y leves (Xu *et al.* 2015) y tienen que ver con la personalidad del conductor (Chen *et al.* 2013). Se caracterizan muchas veces por aceleraciones y frenadas bruscas, generadas por las maniobras de rebase o por el simple hecho de tener un vehículo precedente que incite al conductor a disminuir la velocidad del vehículo, además de diferentes factores externos que afectan al conductor y que en muchas investigaciones no se toman en cuenta (Qui *et al.* 2018).

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

2.3 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El sistema de posicionamiento global (GPS) se ha convertido en un sensor generalizado para la mayoría de navegación terrestre (Bevly, 2004). Se trata de un método que toma en consideración la dinámica lateral (Han *et al.* 2016), que, con el fin de lograr un sistema de posicionamiento de vehículos preciso, ininterrumpido y fiable, muchos investigadores y expertos han desarrollado GPS integrados ayudados por otros sensores (Park *et al.* 2017).

Esta medida de rendimiento tiene en cuenta la velocidad, la aceleración y los cambios de latitud / longitud, en una perspectiva integral. Los resultados del uso experimental de esta formulación sugieren que la conducción cambia con el tiempo y que hay valores máximos cuando diferentes factores están presentes simultáneamente. Esta información provista por los registros GPS puede traducirse en indicadores confiables (Cortés *et al.* 2011). Los datos promedio arrojados por un GPS comercial se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Datos promedio de un GPS comercial.

Fuente: Propia.

Índice	Tiempo	Altura sobre el nivel del mar	Longitud del Segmento	Tiempo del Segmento	Velocidad del Segmento	Curso	Posición Global
1	28/04/2017 8:17	77	13	00:00:01	46 km/h	79° real	N5220.256 E10 19.134

El modelo teórico por seguir está establecido mediante una metodología basada en datos GPS. Los datos del GPS constituyen la alteración del modelo de vehículo como lo es la aceleración longitudinal, causando la transferencia longitudinal de la carga, cambio de dirección o curso, provocando una aceleración lateral, y el cambio de elevación (Montoya *et al.* 2016).

2.4 Pavimentos

Un pavimento se puede definir como la estructura de una capa o conjunto de capas que están comprendidas entre la superficie de rodamiento y el nivel superior de las terracerías, teniendo como principal función la de proporcionar una superficie cómoda, uniforme en color y textura, resistente a los esfuerzos inducidos por el tráfico, y capaz de transmitir dichos esfuerzos de una forma adecuada a las terracerías (Rico & Del Castillo, 2005).

La estructura de un pavimento se conforma por las siguientes capas en su mayoría, la cantidad de capas y su espesor dependerá de las características morfológicas de los materiales.

Carpeta. - Soporta directamente el tránsito vehicular y es la que se encarga de brindar las características funcionales al pavimento. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y transmite los verticales hacia las capas inferiores. Puede ser construida con mezclas asfálticas (en frío) o concreto asfáltico (caliente), y se hace in situ o en fábrica.

Base. - Es la capa que se construye bajo la carpeta y su función es básicamente la de resistir los esfuerzos verticales que le llegan de arriba, así como distribuirlos adecuadamente hacia niveles inferiores sin que se produzcan deformaciones importantes, debe ser permeable y contar con la suficiente rigidez para no deformarse bajo las repeticiones de carga producidas por el tránsito.

Subbase. - Es la capa construida debajo la base y sobre la subrasante, puede ser o no construida dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante. Su función básica es la de proporcionar una cimentación adecuada para la correcta colocación de la base, en la medida de lo posible debe tener una función drenante por que deberá carecer de materiales finos; es la transición entre el pavimento y las terracerías.

Subrasante. - Su función es la de recibir los esfuerzos transmitidos por las capas superiores y transmitirlos al terreno de cimentación, está conformada por suelos naturales, seleccionados o cribados producto de cortes o de la extracción de bancos.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Subyacente. - Se construye bajo la subrasante y puede o no ser requerida. Los materiales que constituyen esta capa son suelos y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos.

Terraplén. - Su función es la de alcanzar el nivel de desplante para la construcción de la subyacente. El terraplén se construye con suelos y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos, y en ningún caso deben ocuparse materiales orgánicos y/o producto de despalmes.

2.4.1 Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos son aquellos formados por una losa de concreto Pórtland sobre una base, o directamente sobre la subrasante. Este tipo de pavimento transmite directamente los esfuerzos al suelo en una forma minimizada, es auto resistente, y la cantidad de concreto debe ser controlada.

En función a lo señalado anteriormente; se puede diferenciar que, en el pavimento rígido, el concreto absorbe gran parte de los esfuerzos que las ruedas de los vehículos ejercen sobre el pavimento.

Los pavimentos de rígidos pueden ser clasificados en 4 tipos: pavimentos de concreto con juntas planas, pavimentos de concreto con juntas reforzadas, pavimentos de concreto con refuerzo continuo y pavimentos de concreto pretensado. Se da a través de losas que se comportan como una viga de concreto simplemente apoyada y que son diseñadas para resistir a la tensión. El máximo esfuerzo también es conocido como módulo de ruptura (M_r) del concreto. El M_r tiene un profundo efecto sobre el potencial de agrietamiento por fatiga de las losas de concreto para cualquier magnitud dada de esfuerzo repetido a la flexión o tensión (Garnica *et al.* 2002).

2.4.2 Pavimentos flexibles

Un pavimento flexible es aquel construido con concreto asfáltico. Zárate (2011) indica que una estructura de pavimento flexible convencional (Figura 2.2) se conforma de una capa de mezcla asfáltica, comúnmente llamada “Carpeta Asfáltica”, ubicada en la superficie y que estructuralmente absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales. Debajo de esta carpeta, se construye una capa de materiales granulares denominada “Base”, a la cual se le transmiten la mayor parte de los esfuerzos verticales y es la encargada de resistir las sollicitaciones repetidas del tránsito. La “Sub-base” es colocada por debajo de la Base y por encima de la capa Subrasante; su función es servir como un cimiento para la base y una transición entre el pavimento y las terracerías.

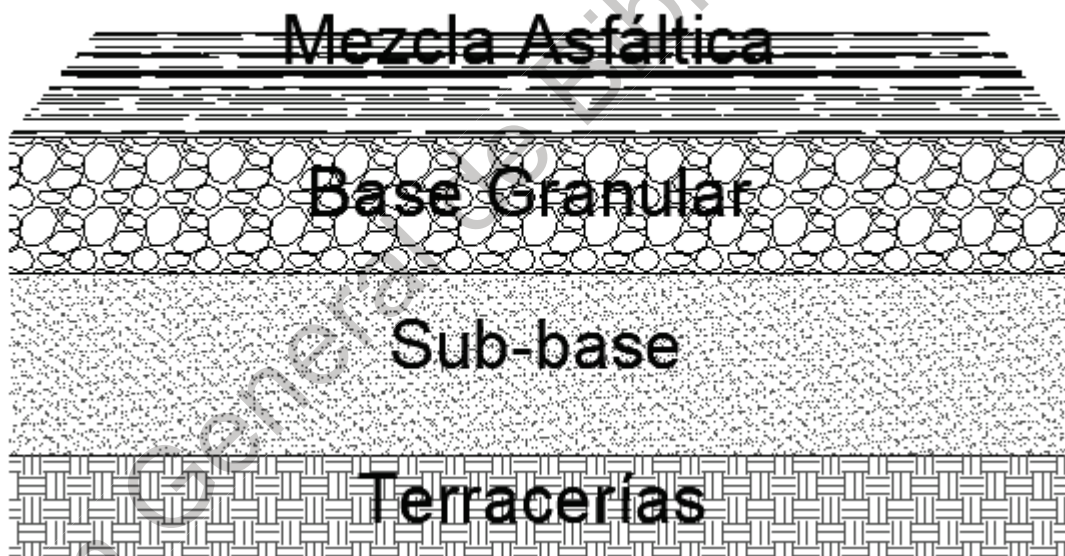


Figura 2.2 Estructura de pavimento flexible convencional (Zárate, 2011).

Según Huang (2004) un concreto asfáltico es una mezcla de agregados asfálticos que deben mezclarse, extenderse y compactarse a una temperatura elevada. La Figura 2.3 muestra los esfuerzos que recibe la estructura de un pavimento asfáltico,

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

así con esto, se puede observar cómo es que trabajan las capas y cuál es su comportamiento ante las diferentes cargas que vienen desde la superficie.

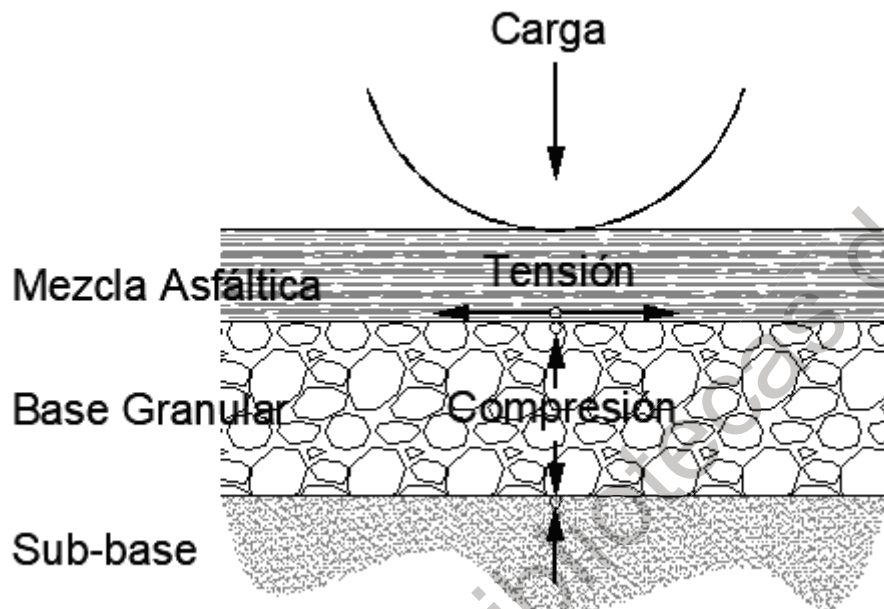


Figura 2.3 Esfuerzos de tensión y compresión en un pavimento asfáltico.

Fuente: Huang (2004).

2.4.3 Daños al pavimento

A través de este apartado, se pretende mostrar algunos daños ocasionados por diferentes parámetros hacia la capa del pavimento o hacia la estructura de este.

Generalmente, el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente son los dos principales modos de deterioro considerados para el diseño de pavimentos flexibles.

El agrietamiento por fatiga es causado por la deformación horizontal por tensión repetida. Una vez que se presentan las grietas, se propagan de forma ascendente hasta la superficie resultando en un deterioro gradual del pavimento (la pérdida de la capa de la estructura, daños superficiales, fisuras, etc.). La deformación permanente es causada por la deformación vertical por compresión acumulada en

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

la superficie de la capa de apoyo, aunque en realidad la deformación permanente puede ocurrir en todas las capas sobre todo en materiales granulares. Por lo tanto, es una realidad que la interacción de los vehículos con la infraestructura de los pavimentos genera efectos que provocan daños en una progresión sistemática que al paso del tiempo se ve reflejado no solo hacia el pavimento, sino, hacia ambos sistemas.

La deformación permanente es uno de los principales problemas que se producen en los pavimentos asfálticos, y se manifiesta típicamente como rutting (Figura 2.4), las cuales aparecen como depresiones longitudinales en las trayectorias de la rueda acompañadas de pequeños trastornos a los lados (Ganó Jae Kim, 2017).



Figura 2.4 Ejemplo de rutting.

Fuente: Propia.

Baches

Cavidad o hundimiento local de la capa de rodadura, viene acompañada en ciertas ocasiones con agrietamientos (Figura 2.5). Son generalmente una pérdida parcial de trozos de la capa de rodadura, se presentan en varios tamaños a través de desprendimiento de los agregados, aunado a esto, aumentan su estado provocado por el tránsito vehicular, siendo sus principales causas el espesor deficiente, drenaje insuficiente, puede presentarse por retención de agua en zonas fisuradas o derivado de otros daños como la piel de cocodrilo.



Figura 2.5 Baches

Fuente: Propia.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Protuberancia

Otro caso es el del desplazamiento vertical de la carpeta asfáltica hacia la superficie (Figura 2.6). Pueden presentarse bruscamente ocupando grandes o pequeñas áreas, en algunos casos vienen acompañadas de grietas. Las principales causas son, estabilidad inadecuada, compactación inadecuada, tránsito intenso o incluso capas de concreto asfáltico colocado sobre un pavimento rígido.



Figura 2.6 Protuberancia en pavimento.

Fuente: Propia.

Piel de Cocodrilo

La denominada piel de cocodrilo (Figura 2.7), es originada a partir de una falla por fatiga. Estas fisuras interconectadas y con patrones irregulares se propagan de forma longitudinal y transversal hasta cierta manera paralela entre ellas. Pueden presentarse de diferentes tamaños dependiendo de las tensiones originadas por las cargas del tránsito y del espesor de las capas del pavimento. Por otra parte, también se pueden generar por problemas de drenaje, los cuales afectan a las capas granulares, por falta de capacidad portante, rotura debido al tráfico, fatiga, envejecimiento, entre otras.



Figura 2.7 Piel de cocodrilo

Fuente: Propia.

2.5 Modelo de respuesta al pavimento y medida de rendimiento

El método para realizar esta investigación está basado en un modelo discreto de un pavimento asfáltico desarrollado por Romero *et al.* (2013). El modelo está asociado con la energía de deformación de los pavimentos, atribuida por la carga de la rueda. Esta carga instantánea y de cierta duración, es establecida al momento del contacto entre la cara del neumático y el pavimento. Debido a que el modelo del pavimento está dado por elementos asfálticos desacoplados, es decir, que su longitud está establecida por el área de contacto del neumático tal y como se muestra en la Figura 2.8, de este modo, se puede establecer que la longitud de cada elemento será constante, por lo tanto, este modelo se aplica a un solo elemento en un momento determinado.

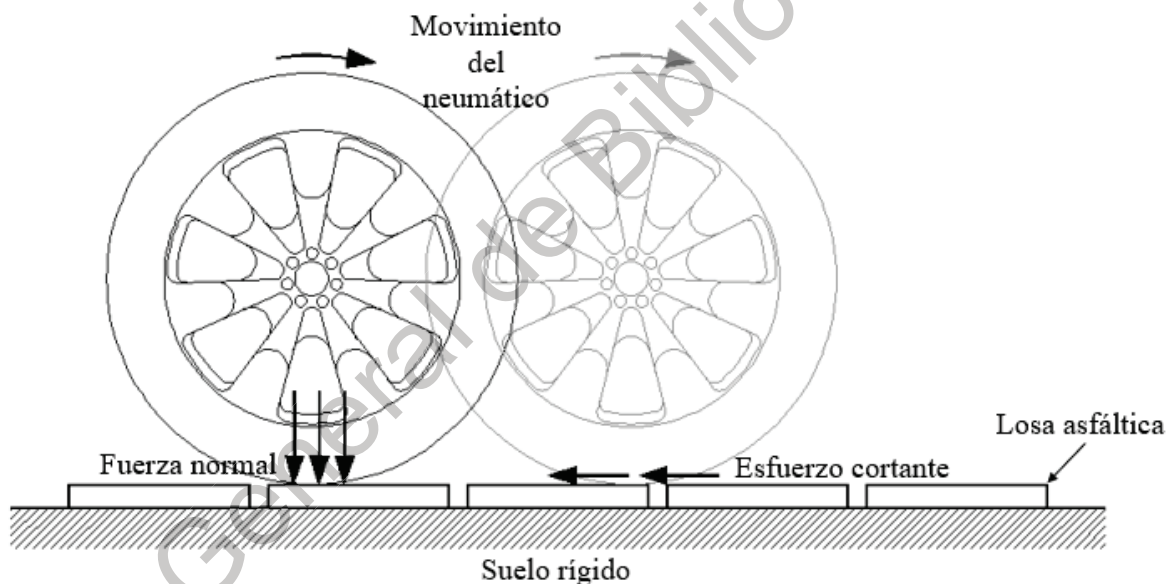


Figura 2.8 Modelo comprendido por elementos desacoplados en un pavimento asfáltico.

Fuente: Romero *et al.* (2013)

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

La energía de deformación en un pavimento asfáltico, está asociada con fuerzas normales y tangenciales, como se muestra en la Figura 2.9.

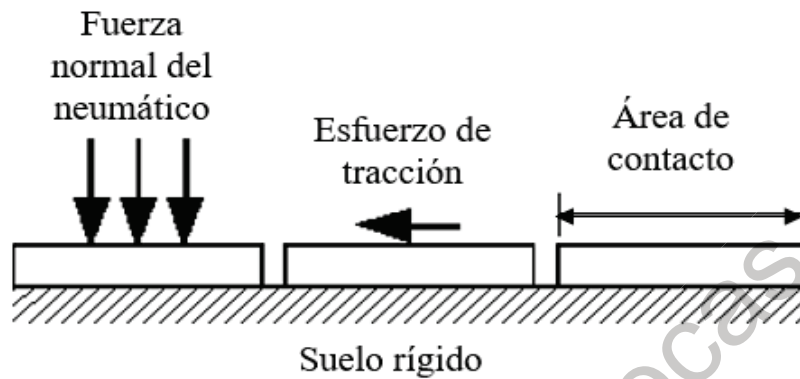


Figura 2.9 Modelo de pavimento discreto desacoplado.

Fuente: Romero et al. (2013)

En donde la fuerza normal Wd que actúa sobre estos elementos, siendo una función de la vibración del vehículo, y la fuerza tangencial Ft depende de la fuerza de tracción necesaria. La energía de deformación del pavimento U está asociada a ambas fuerzas como se mencionó anteriormente, y las tensiones respectivas σ y τ , como se muestra en la siguiente expresión:

$$U = \frac{\sigma^2}{E_D} + \frac{1}{2G_D} \tau^2 \dots\dots\dots(1)$$

En donde:

U = La energía de deformación

σ = Fuerza normal

τ = Fuerza tangencial del pavimento

G_D = Módulo dinámico de la rigidez

E_D = Módulo dinámico de elasticidad del pavimento

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

El módulo dinámico de la elasticidad del asfalto

$$E_D = f(T, t_\ell, V_c) \dots \dots \dots (2)$$

El módulo dinámico de elasticidad del asfalto (E_D) se encuentra en función de la temperatura (T), el tiempo de carga (t_ℓ) y el contenido de vacío de la mezcla de pavimento (V_c).

$$G_D = \frac{E_D}{2(1+\nu)} \dots \dots \dots (3)$$

G_D es el módulo dinámico de la rigidez, en función de la relación de Poisson ν .

La tensión de corte τ se define como

$$\tau = F_t/A \dots \dots \dots (4)$$

En donde A es el valor del área de contacto y F_t es la suma de la fuerza aerodinámica, la resistencia a la rodadura y la componente tangencial del peso del vehículo, como se muestra en la expresión 5 (Rakha *et al.* 2001, Romero *et al.* 2013):

$$F_t = C_D A_p \frac{\rho}{2} V^2 + N_t C_r (c_2 V_{kph} + c_3) W_d + W_d \sin \lambda \dots \dots \dots (5)$$

En donde:

C_D = coeficiente de arrastre del área frontal del vehículo.

A_p, ρ = densidad de masa del aire.

c_1, c_2 = constantes que dependen del tipo de neumáticos y pavimento;

C_r = constante de resistencia a la rodadura en función de la condición del pavimento.

V_{kph} = velocidad del vehículo en km / h ;

λ = pendiente de la carretera.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 3.1 se muestra el esquema de la metodología propuesta para la experimentación, con la cual se determinó el daño al pavimento asfáltico causado por el estilo de conducción, al mismo tiempo que el daño ocasionado al vehículo. Lo dicho hasta aquí buscando cumplir el objetivo antes citado y lograr un resultado positivo de la hipótesis.

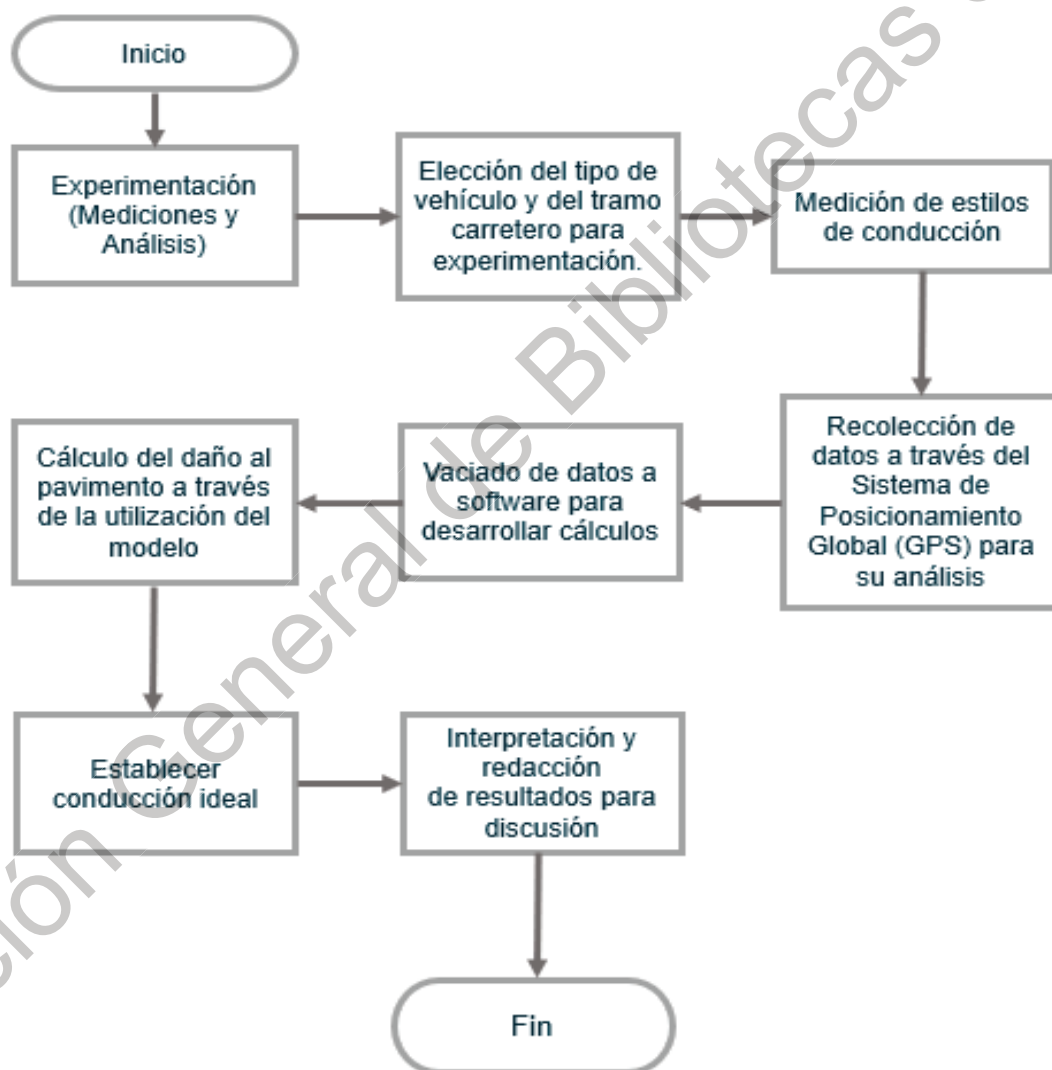


Figura 3.1 Diagrama para el desarrollo de la metodología de la investigación

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

3.1 Mediciones y análisis

En este capítulo se describen los procesos que se llevaron a cabo para desarrollar la experimentación de este proyecto de investigación,

3.2 Tipo de vehículo y tramo carretero para experimentación

Una forma de distribución de carga por el medio terrestre se da mediante los vehículos denominados en México como C3 (Figura 3.2), los cuales se han caracterizado por su uso frecuente en diferentes regiones del país, resultando formas muy cómodas de transporte de mercancías en distancias cortas, en las que muchas veces un tractocamión de grandes dimensiones (Por ejemplo, T3-S2) no tiene la facilidad de movilizarse por ciertos caminos, ya sea por las características geométricas de la vialidad o por la regulación de pesos y dimensiones que existe en el país (NOM-012-SCT-2-2014). Adicional a esto, este tipo de vehículos representan un riesgo significativo para otros usuarios de las carreteras debido a su tamaño y peso (OCDE, 2017).

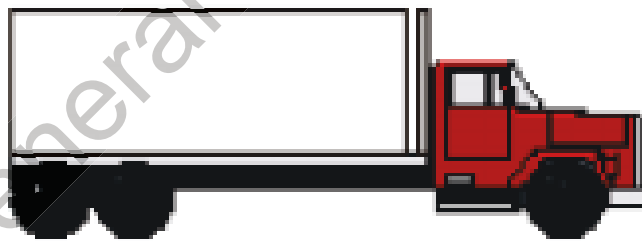


Figura 3.2 Camión tipo C3 ¹

Fuente: Nom-012-SCT-02-2014

¹La denominación del vehículo se da con la nomenclatura C que significa camión y el número 3 que representa el número total de ejes con los que cuenta.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Es por lo anterior, por lo que se el vehículo C3 se utilizará en este proyecto de investigación para asociarlo con el daño al pavimento, a través del estudio de impacto que tiene un vehículo con estas características en el país.

3.3 Mediciones de estilos de conducción

Este apartado fue el más importante debido a que es la parte fundamental del experimento. Se realizaron diez diferentes mediciones, que involucraron diferentes conductores con el objetivo de demostrar que cada conductor tiene su propio estilo de manejo. Las mediciones se llevaron a cabo entre semana; fue un miércoles y jueves entre las 11:00 y 14:00 horas con el objetivo de tener una conducción fluida y con algunas interacciones entre el vehículo que se utilizó para las pruebas y el resto de la flota vehicular que en ese momento se trasladaba sobre la vialidad. Asimismo, se buscó que fuera un día normal (no feriado o fin de semana) para que el experimento se desarrollara en condiciones de tráfico que comúnmente se presentan en el día a día de la semana.

3.4 Recolección de datos a través del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para su análisis

Una vez realizadas las conducciones, la recolección de datos se dio a partir de la herramienta GPS. La marca que se utilizó fue uno marca Garmin GPSMAP 62s (Figura 3.3) posee una pantalla de 2,6" brillante en color que puede leerse a la luz del sol y un funcionamiento sencillo con cualquier tipo de guantes en un entorno inestable, frío o húmedo ya que cuenta con una interfaz de usuario basada en botones. La descripción general y algunas de las características con que cuenta esta herramienta se muestran a continuación y son provenientes de la página de venta oficial en México



Figura 3.3 Modelo GPSmap 62s marca Garmin utilizado en la investigación

Fuente: Propia.

- ✓ Pantalla en color de 2.6" que puede leerse a la luz del sol
- ✓ Receptor GPS y GLONASS de alta sensibilidad con antena Quadrifilar Helix
- ✓ Sistema de batería doble optimizado para exteriores
- ✓ 4 GB de memoria interna y ranura para tarjetas microSD™
- ✓ 250,000 cachés preinstalados para geocaching sin papeles de Geocaching.com

Tabla 3.1 Características físicas y de rendimiento GPSmap 64s.

Dimensiones de la unidad (Ancho/Alto/Profundidad)	6.1 x 16 x 3.6 cm
Peso	260.10 g con pilas
Precisión	Margen de error para la ubicación exacta. Por ejemplo, la ubicación del GPS tiene una precisión de +/- 4 m.
Resistencia al agua	IPX7
Batería	2 pilas AA (no incluidas); se recomienda NiMH o litio
Tipo de pantalla	TFT transreflectiva de 65,000 colores
Tamaño de la pantalla (Ancho/Alto)	3.6 x 5.5 cm; 6.6 cm de diagonal
Resolución de pantalla (Ancho/Alto)	160 x 240 píxeles
Autonomía de la pila/batería	16 horas
Memoria/historial	4 GB
Receptor de alta sensibilidad	Sí
Interfaz del equipo	Compatible con USB

La función Track en el dispositivo Garmin 64s, es la que se utilizó para la obtención de los datos que se necesitaban para los cálculos a desarrollar en esta investigación. El dispositivo graba automáticamente los “tracks” y permite descargarlos o simplemente observarlos a través del mapa.

Como primera parte es necesario dirigirse a la configuración (de la grabación del track (Figura 3.4).



Figura 3.4 Interfaz principal de un GPSmap 62s.

Propia.

Lo antes mencionado se hace a través de las siguientes indicaciones:

1. Menú principal
 - Configuración > Tracks > Track log.
2. Seleccionar la forma de grabación (Figura 3.5).

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

- Grabar y mostrar para que aparezca la línea en el mapa que indicará el track
- Seleccionar el método de grabación. Se determinó la opción de tiempo con un intervalo a cada segundo para obtener mejor detalle de los datos.

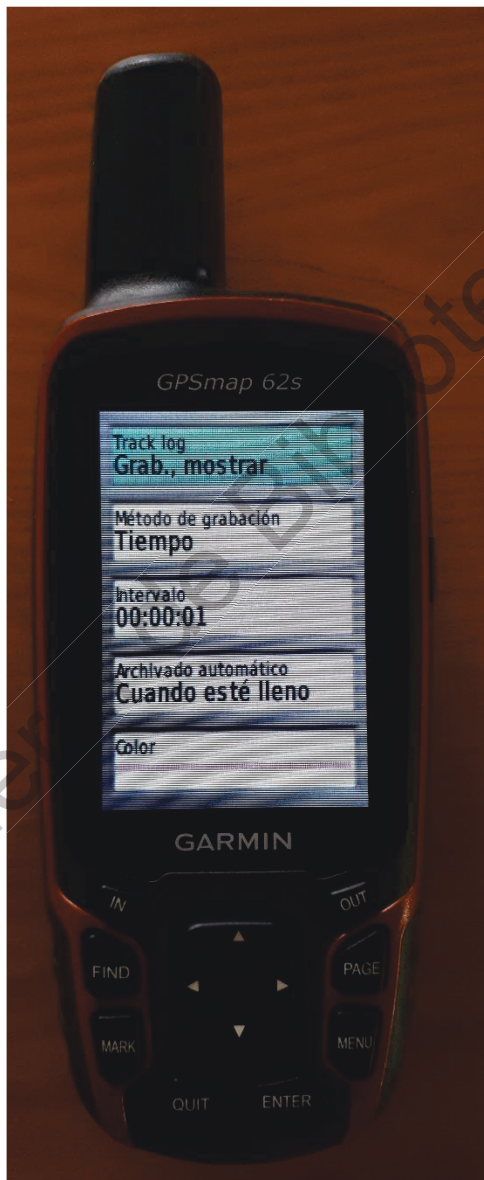


Figura 3.5 Menú para configuración de tracks.

Fuente: Propia.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Posterior a esta configuración, se procede a realizar la experimentación para generar los datos que más adelante se utilizarán para el desarrollo de los cálculos y los gráficos.

Para observar los resultados de la grabación de los *tracks* es necesario:

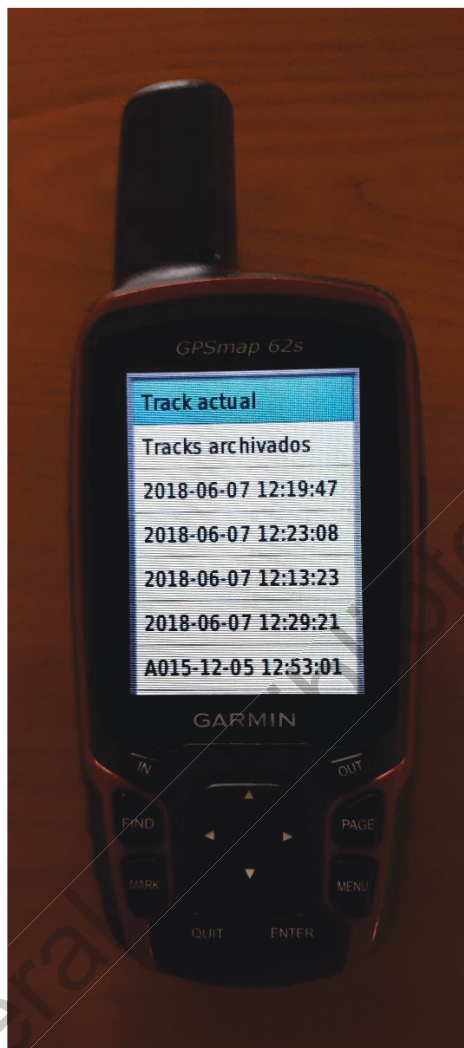
1. Ir al menú principal en la opción Track Manager (Figura 3.6). En esta opción se desplegará una lista con todos los tracks grabados y almacenados que se encuentran el dispositivo.



Figura 3.6 Opción Track Manager GPSmap 62s.
Fuente: Propia.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

2. Se selecciona el track actual (Figura 3.7).

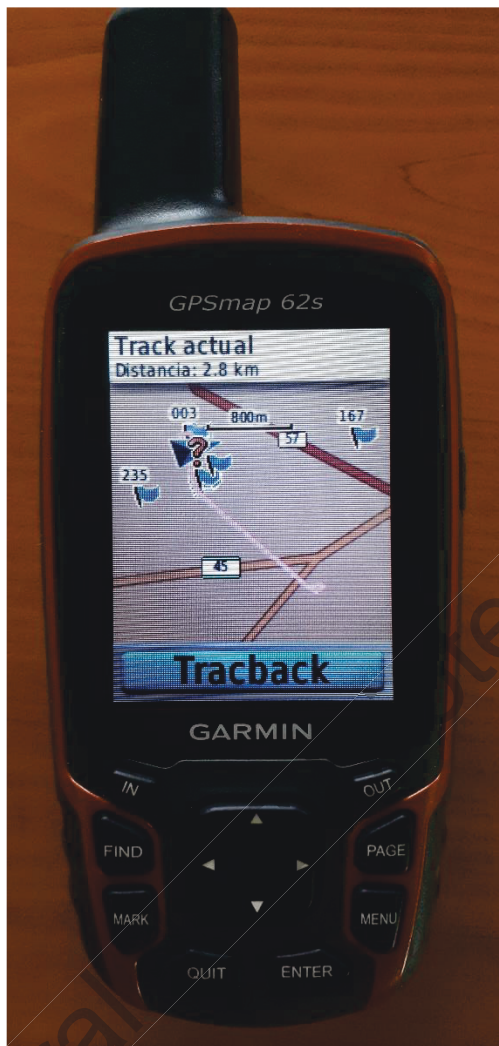


*Figura 3.7 Lista de Tracks almacenado en el dispositivo.
Fuente: Propia.*

3. Al seleccionar track actual se despliega un menú con varias opciones (Figura 3.8). Aquí puedes guardar el track en el momento que termine la ruta para la cual deseas conocer sus parámetros.



Figura 3.8 Opciones del Track actual.
Fuente: Propia.



*Figura 3.9 Ruta mostrada en la opción ver mapa del track seleccionado.
Fuente: Propia.*

Asimismo, se puede dar en la opción ver mapa ara abrir el track que se seleccionó, como se muestra en la figura Figura 3.9. Con esto se puede dar por hecho que la generación de los datos procesada por el GPS se efectuó con éxito al ver los resultados en pantalla y corroborar efectivamente que la ruta trazada coincide con la ruta que se efectuó durante el experimento.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

3.5 Vaciado de datos a software para desarrollar cálculos

Obtenidos los datos del experimento con el GPS se procedió a transferirlos a un equipo de cómputo para proceder a realizar los cálculos. El proceso se hizo mediante la herramienta Mapsource y posteriormente con Microsoft Excel para poder realizar los cálculos correspondientes para determinar el daño al pavimento.

3.5.1 MapSource

MapSource es un software que en casi todos los casos es compatible con los dispositivos Garmin, que permite crear, ver y editar puntos de referencia, rutas y caminos a través de la computadora, para transferirlos a un nuevo dispositivo de navegación o de computación.

Uno de los objetivos de Garmin es proporcionar a sus clientes la cartografía más completa y precisa disponible a través de sus dispositivos, pero todas las fuentes de datos contienen algunos datos inexactos, lo anterior, debido a que los datos que se manejan provienen de fuentes privadas o gubernamentales y simplemente en algunos países no está al alcance de lo público, lo anterior según se especifica en la introducción del manual del Mapsource.



Figura 3.10 Interfaz de inicio MapSource
Fuente: Propia.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

El área de trabajo de este Software (Figura 3.11) es muy sencilla y de fácil uso, aunque no contiene mapas cargados, se pueden descargar para efecto de una mejor visualización. Sin embargo, no es necesario ya que se puede trabajar perfectamente en este sin necesidad de contener los mapas.

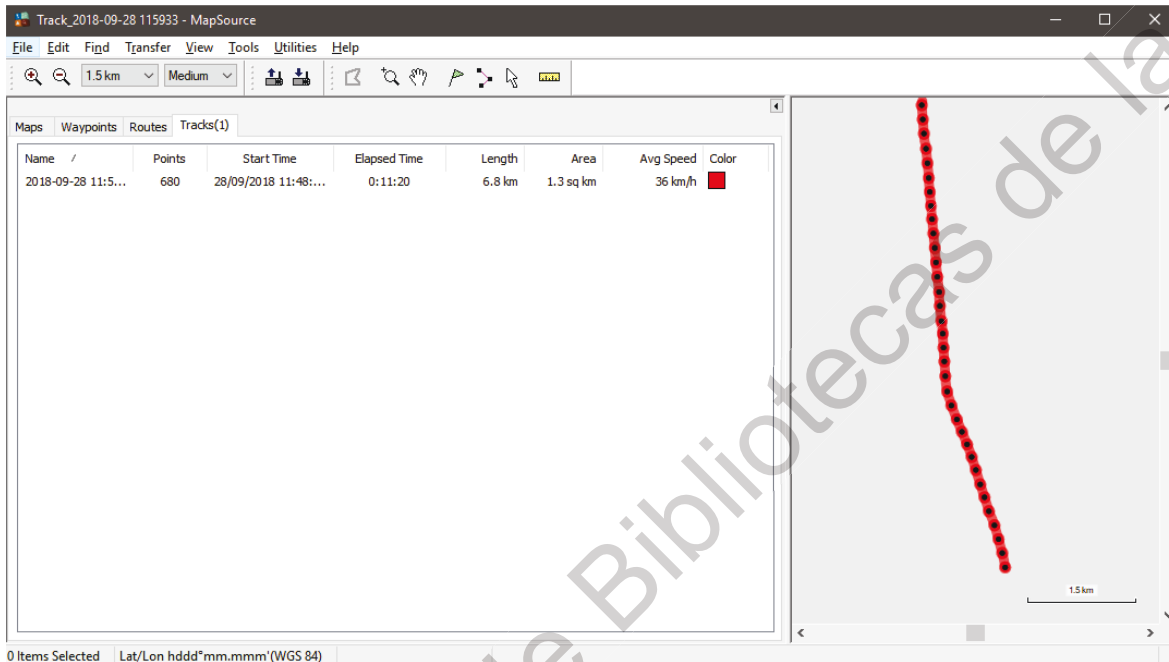


Figura 3.11 Pantalla de trabajo de Mapsource
Fuente: Propia.

Para este trabajo lo único que se hizo en este software es el traspaso de los datos obtenidos en el GPS, ya que son archivos con extensión gpx y es necesario contar con un software que la acepte.

El procedimiento es sencillo, se debe abrir Mapsource y abrir el archivo desde la pestaña file, una vez abierto el archivo, nos mostrará los datos en general de lo que fue el recorrido. Para obtener todos los puntos hechos, bastará con dar doble click sobre los datos del recorrido. En este punto, podemos encontrar un perfil de elevación de la ruta, filtrar información, mostrar la ruta en el mapa, cambiar de color, entre otras funciones.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Una vez abierto, se debe guardar como txt. La ruta es en la pestaña de archivo y posterior guardar como txt, lo anterior es para hacerlo compatible y poder abrir los datos en Excel para comenzar a trabajarlos.

3.5.2 Excel

Excel es una hoja de cálculo electrónica en la cual se puede escribir, almacenar, manipular, calcular y organizar todo tipo de información, ya sea numérico o de texto. Se decidió utilizar Excel ya que más alcance y usada a nivel global para realizar cualquier operación con mayor facilidad debido a que está compuesta por filas y columnas que facilitan su uso. Excel también permite graficar de varias formas, lo que hace un medio viable para interpretar los resultados.

Una vez convertido de la extensión txt a xls de los datos obtenidos, se procedió a realizar las diferentes operaciones que ayudaron a tener como resultado el daño de cada medición y obtener el daño total que se produce en el tramo, realizando gráficos que ayudaron a la interpretación de los resultados.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

3.6 Cálculo del daño al vehículo a través de la utilización del modelo

Como se expuso en el apartado Modelo de respuesta al pavimento y medida de rendimiento en la sección de Fundamentación teórica, el modelo que se utilizó fue un modelo discreto para el cálculo de daño al pavimento a través de la fuerza ejercida por los cambios de velocidad del vehículo.

3.7 Conducción ideal

A continuación, se muestran los detalles de las conducciones que se buscó asemejar al momento de tomar los datos de las diferentes velocidades que surgieron durante las mediciones.

- Vehículo autónomo

Para determinar el estilo de conducción autónomo se estableció a partir de la conducción que tuvo menores cambios de aceleración, abordando el estudio realizado por Bellem *et al.* (2016), el cual aborda el problema de permitir un estilo de conducción altamente automatizado y cómodo. En este trabajo los autores conllevan a realizar dos tipos de estudio para identificar métricas (la seguridad, la funcionalidad y la comodidad) que se puedan utilizar para parametrizar (asemejar) un estilo de conducción autónoma, debido a que no cuentan con un vehículo con estas características de alta calidad. Estos estudios se realizaron en un entorno urbano y rural. Se condujo manualmente un recorrido asumiendo un estilo de conducción diario, cómodo y dinámico en orden aleatorio. Los resultados obtenidos enfatizan la importancia del análisis basado en maniobras, es decir, se identificaron una variedad de métricas específicas de la maniobra, como la aceleración, los arranques, la rapidez y la distancia de avance en segundos. Lo anterior fue fundamental, como requisitos previos para diferenciar entre los tres estilos de manejo que ellos buscaban realizar. Con esto se quiere decir que las métricas son algunos de los componentes esenciales para el desarrollo de una conducción

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

cómoda y altamente automatizada, por lo tanto, es una buena forma de representar el estilo de la conducción autónoma.

Dicho lo anterior, se realizó el experimento simulando las métricas de una conducción autónoma, sin la necesidad de contar con un vehículo autónomo.

- Vehículo convencional

El estilo de manejo normal, es decir, el que es dirigido por un ser humano, no es más que la realización de una conducción clásica que cualquier individuo realiza en el momento en que se dirige desde su punto de origen hasta un punto de destino. Esta conducción se desarrolló de manera normal, con las interacciones que conlleva una ruta, con frenadas y aceleradas del vehículo que funcionan de forma correcta para los cálculos que se llevaron a cabo en esta investigación.

3.8 Interpretación y redacción de resultados para discusión

En esta sección se llevó a cabo el análisis de los resultados encontrados con el cálculo del daño al pavimento.

Se procedió a realizar tablas y gráficos que ayudaran a interpretar los resultados obtenidos. Se hicieron diferentes gráficos con diferentes parámetros para entender el comportamiento de los diferentes tipos de conducción.

4. RESULTADOS

Los resultados de cada apartado correspondiente a la metodología son expuestos en esta sección.

4.1 Mediciones y análisis

La recolección de datos fue hecha en la carretera Mex-57 en la ciudad de Santiago de Querétaro (México) por medio de un dispositivo GPS. La longitud del tramo carretero fue de 6.3 km; en su mayoría recta y con pendientes inapreciables, plano y con pocas pendientes. La capa de rodadura corresponde a un pavimento asfáltico y en buenas condiciones. Los vehículos fueron tomados aleatoriamente, pero con las mismas características técnicas para no tener variaciones en cuanto a la potencia del motor, la cantidad de neumáticos, entre otros.

A continuación, en los siguientes subtítulos, se redactan las características y resultados de todo lo correspondiente a la experimentación.

4.2 Vehículo tipo B2 y Av. 5 de febrero.

El vehículo que se utilizó es un tipo B debido a la facilidad con la que se pueden abordar en una zona metropolitana como lo es la de Santiago de Querétaro, y con el objetivo de minimizar al máximo los problemas que la experimentación pudiera ocasionar al utilizar un vehículo pesado.

El un vehículo es un tipo B2 mostrado en la Figura 4.1, y se eligió este tipo de vehículo debido a la facilidad de disposición que se tiene.



Figura 4.1 Vehículo utilizado para realizar experimento.

Fuente: Tomado de Higer (2018).

Algunas de las características más importantes del vehículo se muestran en la tabla Tabla 4.1, la cual incluye la masa del vehículo; parámetro importante a la hora del cálculo de la fuerza que posteriormente impactará en el pavimento.

Tabla 4.1 Características del vehículo usado

Fuente Higer 2018.

Parámetro	Característica
Modelo de bus	KLQ6108G
Modelo de motor	YC6G240-30(240hp, China III)
Tamaño (m)	10.510 × 2.480 × 2.950
Masa total máxima	16,500
Velocidad máxima (km/h)	≥85
Transmisión	QJ805
Suspensión	Suspensión de ballesta / suspensión de aire, 6 airbags (frontal: 2, trasero: 4)
Frenos	ABS

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Por otra parte, el experimento, como ya se mencionó, se realizó en la carretera Mex-057 en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, en ambos sentidos para facilitar la realización de éste. La carretera en el tramo elegido es llamada de manera local Avenida 5 de febrero y el tramo elegido está comprendido por las coordenadas 20.619574, -100.421717 y 20.674762, -100.433873. Se eligió este segmento carretero por tener una estación de monitoreo por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ubicado en las coordenadas 20.636829, -100.428829, mismo cuya función principal es conocer los datos viales en ese punto.

Con lo anterior, se concluye que el experimento para esta investigación se llevó a cabo en una carretera de tipo federal con TDPA de 48,891 vehículos y una vasta configuración vehicular (Tabla 4.2), razón por la cual, la conducción se dio con una buena cantidad de interacciones con otros vehículos, lo que provocó maniobras de rebase y maniobras de limitación de velocidad, así como la necesidad de tener que detenerse por completo derivado del ascenso y descenso de pasajeros. Con esto se obtiene un amplio marco de posibilidades para desarrollar los diferentes estilos de manejo que se pretenden realizar para después compararlos e interpretarlos.

Tabla 4.2 Datos viales; Mex-57

Fuente: Datos viales SCT

LUGAR	ESTACIÓN km	CLASIFICACIÓN VEHICULAR EN PORCIENTO														COORDENADAS					
		TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros	A	B	C	K'	D	LATITUD	LONGITUD	
Querétaro	0.00																				
T. Der. Libramiento Querétaro	6.28	3	1	48891	0.3	91.2	1.0	3.8	0.7	1.6	1.1	0.1	0.2	91.5	1.0	7.5	0.071	0.503	20.636829	-100.428829	
T. Der. Libramiento Querétaro	6.28	3	2	49411	0.2	90.8	1.0	4.2	0.8	1.6	1.1	0.1	0.2	91	1.0	8.0	0.068	0.503	20.636773	-100.428943	

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

El tramo carretero es mostrado en la Figura 4.2 comprende de alrededor de 6.3 km de longitud, incluyendo en su diseño curvas horizontales y verticales leves provocadas por su ubicación geográfica. El estado de la carretera se encuentra en buenas condiciones a nivel de la rasante y cuenta con buen señalamiento vial (Horizontal y Vertical).

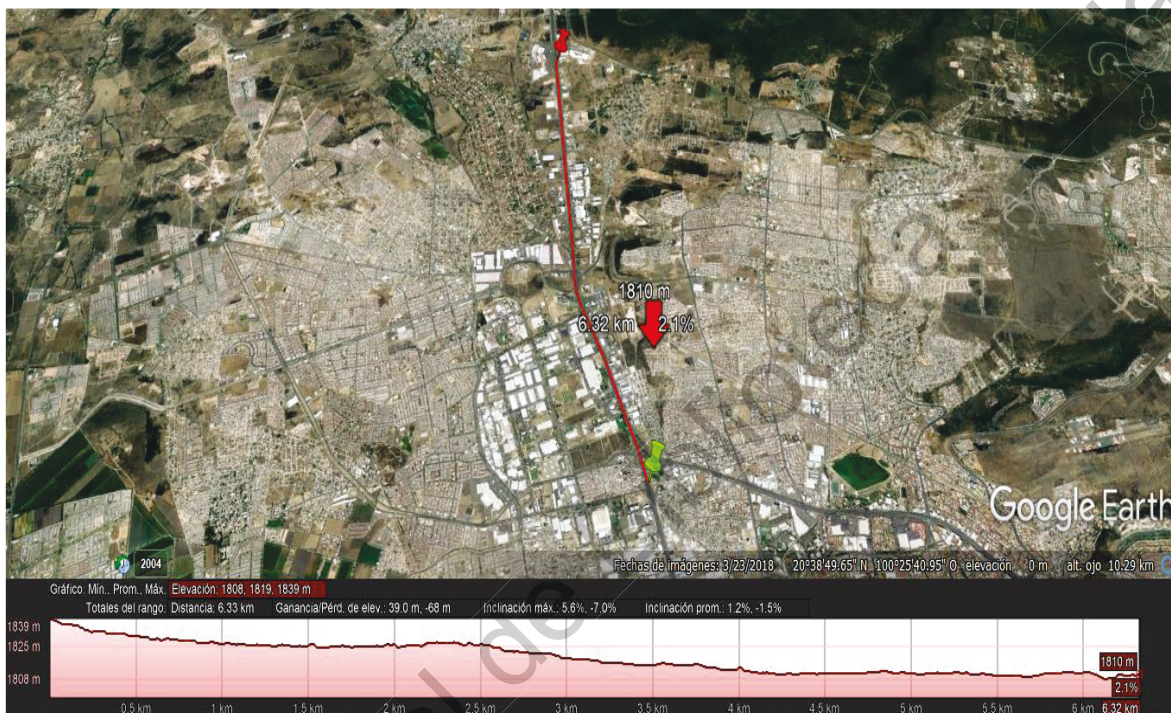


Figura 4.2 Tramo en que se realizaron las pruebas

Fuente: Propia.

4.3 Medición de estilos de conducción

El procedimiento consistió obtener datos de un recorrido normal de un vehículo tipo B2, en el cual a través del GPS podríamos conocer la velocidad del vehículo para posteriormente procesarla y analizar la energía de deformación que se almacena en el pavimento en el momento en el cual el vehículo tenía cambios de bruscos de velocidad; teniendo como resultados aceleraciones positivas y en su mayoría negativas.

El proceso de recolección se hizo para un número total de 13 vehículos (N=13) para tener un tamaño de muestra representativo y fue recolectado a cada segundo para facilitar el proceso de análisis en el momento de querer conocer las diferentes aceleraciones del vehículo, este dato fue obtenido por la Ecuación 6. La cual se utilizó por ser una población finita, es decir, que se conoce el total de la población y deseásemos saber cuántos del total tendremos que estudiar.

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2(N-1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q} \dots\dots\dots(6)$$

Donde

- N = Total de la población
- Z_{α} = 1.645 al cuadrado (si la seguridad es del 90%)
- p = proporción esperada (en este caso 5% = 0.05)
- q = $1 - p$ (en este caso $1 - 0.05 = 0.95$)
- d = precisión (en la investigación se usó 6%).

$$n = \frac{20 \cdot 1.96^2 \cdot 0.05 \cdot 0.95}{0.06^2(20 - 1) + 1.96^2 \cdot 0.05 \cdot 0.95} = \frac{3.64952}{0.250876} = 13$$

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

4.4 Vaciado de datos Mapsource

La Figura 4.3 muestra cómo el programa de MapSource transforma los datos obtenidos con el Garmin para su interpretación, siendo el medio compatible y comprensible entre el usuario y el dispositivo, ya que observar los resultados en un CPU es más aceptable que observarlos en la pantalla del mismo GPS, además que cuenta con un apartado en el cual se muestra la ruta completa con diferentes puntos de control que el mismo GPS genera.

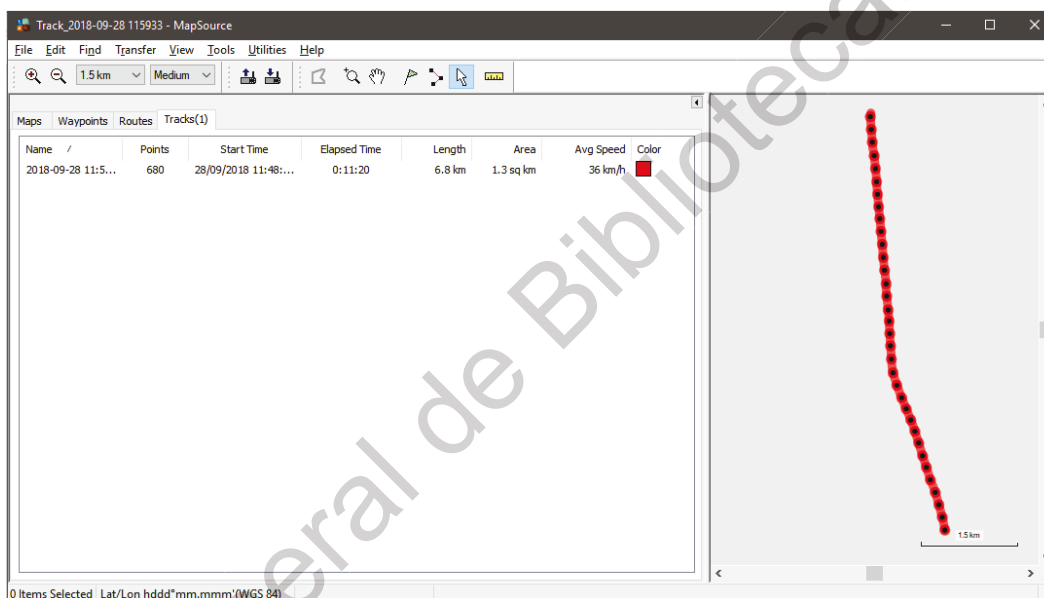
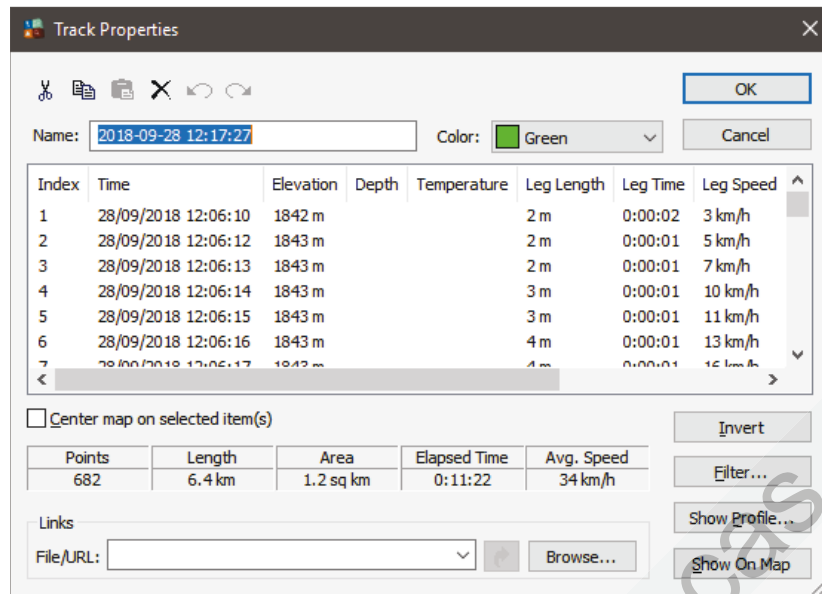


Figura 4.3 Interfaz con datos obtenidos de sur a norte.

Fuente: Propia.

Por otro lado, la Figura 4.4 muestra las propiedades de la ruta que se realizó para la conducción normal y la simulación de la conducción autónoma. Esta tabla de propiedades nos da en el formato de MapSurce los parámetros del tiempo, elevación, el intervalo de tiempo, la velocidad, entre otras, mostradas en la Tabla 4.3.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos



Index	Time	Elevation	Depth	Temperature	Leg Length	Leg Time	Leg Speed
1	28/09/2018 12:06:10	1842 m			2 m	0:00:02	3 km/h
2	28/09/2018 12:06:12	1843 m			2 m	0:00:01	5 km/h
3	28/09/2018 12:06:13	1843 m			2 m	0:00:01	7 km/h
4	28/09/2018 12:06:14	1843 m			3 m	0:00:01	10 km/h
5	28/09/2018 12:06:15	1843 m			3 m	0:00:01	11 km/h
6	28/09/2018 12:06:16	1843 m			4 m	0:00:01	13 km/h
7	28/09/2018 12:06:17	1843 m			4 m	0:00:01	15 km/h

Points	Length	Area	Elapsed Time	Avg. Speed
682	6.4 km	1.2 sq km	0:11:22	34 km/h

Figura 4.4 Parámetros de la ruta realizada.

Fuente: Propia.

Los datos obtenidos del recorrido con el dispositivo GPS y procesados mediante la herramienta Mapsource, se muestran en la Tabla 4.3. Estos datos se muestran en el formato de Excel y son los datos que se van a utilizar para realizar los cálculos del daño al pavimento. La tabla solamente muestra 10 puntos de los más de 600 que se acopiaron; colocada únicamente para efecto ilustrativo y de mejor comprensión.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Tabla 4.3 Datos obtenidos del experimento a través de GPS

Fuente: Propia.

Índice	Tiempo	m.s.n.m	Tiempo del Segmento	Velocidad del Segmento	Curso	Posición Global
1	07/06/2018 12:13	1752 m	0:00:01	1.4 km/h	220° true	N20 35.717 W100 24.873
2	07/06/2018 12:13	1752 m	0:00:01	0.8 km/h	203° true	N20 35.717 W100 24.873
3	07/06/2018 12:13	1752 m	0:00:01	0.7 km/h	206° true	N20 35.717 W100 24.873
4	07/06/2018 12:13	1752 m	0:00:01	0.3 km/h	173° true	N20 35.717 W100 24.873
5	07/06/2018 12:13	1752 m	0:00:01	0.5 km/h	208° true	N20 35.717 W100 24.873
6	07/06/2018 12:14	1753 m	0:00:01	0.6 km/h	209° true	N20 35.717 W100 24.873
7	07/06/2018 12:14	1752 m	0:00:01	0.4 km/h	185° true	N20 35.716 W100 24.873
8	07/06/2018 12:14	1753 m	0:00:01	0.1 km/h	223° true	N20 35.716 W100 24.873
9	07/06/2018 12:14	1752 m	0:00:01	0.3 km/h	278° true	N20 35.716 W100 24.873
10	07/06/2018 12:14	1753 m	0:00:01	1.4 km/h	220° true	N20 35.717 W100 24.873

4.5 Resultado de los cálculos del daño al pavimento

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.4, en la cual como primer paso se convierte la velocidad. El GPS da la velocidad en Km/h, por lo que para entrar al modelo es necesario convertirla a m/s.

La segunda columna corresponde a la aceleración; calculada a través de la velocidad y el tiempo. La aceleración es calculada para hacer efectiva la segunda ley de Newton, y poder calcular la fuerza que ocupa el vehículo para cambiar de dirección

Tabla 4.4 Cálculo de daño al pavimento de la conducción normal.

Fuente: Propia.

Time (Seg)	Velocidad (m/s)	Aceleración	F=mG (N)	Peso por rueda	F=ma	Área de contacto (m)	Normal stress (kg/cm ²)	Front Mass	Rear Mass	Shearing Stress (kPa)	Velocidad (Km/h)
0	0.38888889	-0.16666667	176580	88290	-3000	0.12	470.0625	6500	11500	-12.5	1.4
1	0.22222222	-0.02777778	176580	88290	-500	0.12	470.0625	6500	11500	-2.0833	0.8
2	0.19444444	-0.11111111	176580	88290	-2000	0.12	470.0625	6500	11500	-8.3333	0.7
3	0.08333333	0.05555556	176580	88290	1000	0.12	470.0625	6500	11500	4.16667	0.3
4	0.13888889	0.02777778	176580	88290	500	0.12	470.0625	6500	11500	2.08333	0.5
5	0.16666667	-0.05555556	176580	88290	-1000	0.12	470.0625	6500	11500	-4.1667	0.6
6	0.11111111	-0.08333333	176580	88290	-1500	0.12	470.0625	6500	11500	-6.25	0.4
7	0.02777778	0.05555556	176580	88290	1000	0.12	470.0625	6500	11500	4.16667	0.1
8	0.08333333	0	176580	88290	0	0.12	470.0625	6500	11500	0	0.3
9	0.08333333	-0.02777778	176580	88290	-500	0.12	470.0625	6500	11500	-2.0833	0.3
10	0.05555556	0.02777778	176580	88290	500	0.12	470.0625	6500	11500	2.08333	0.2

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

En la Figura 4.5 se muestra el gráfico con las diferentes variaciones de velocidad de cada uno de los viajes realizados. Este gráfico muestra en conjunto todos los resultados para observar de forma general el comportamiento de las velocidades, analizar los rangos y destacar los puntos máximos de velocidad que se tuvieron para el experimento. En el trayecto se presentaron diferentes interacciones con otros vehículos, asimismo, paradas y maniobras de rebase que permitieron obtener resultados peculiares para cada viaje.

El gráfico que se muestra en la Figura 4.6 es el resultado de los cálculos realizado para determinar el daño al pavimento total del trayecto. El gráfico muestra el daño segundo a segundo. Los cambios de aceleración muestran los daños al pavimento en forma de picos máximos y mínimos, generada por la aceleración y la masa del vehículo en un área determinada. El gráfico también muestra el esfuerzo normal y está ilustrado con una línea punteada, este esfuerzo es de 470 kpa por eje y es el mismo para todos los viajes debido a que la masa del vehículo es la misma.

Con estos gráficos se puede realizar una comparativa con base en los tiempos del recorrido, demostrando que la relación entre los cambios de velocidad y el daño al pavimento existen.

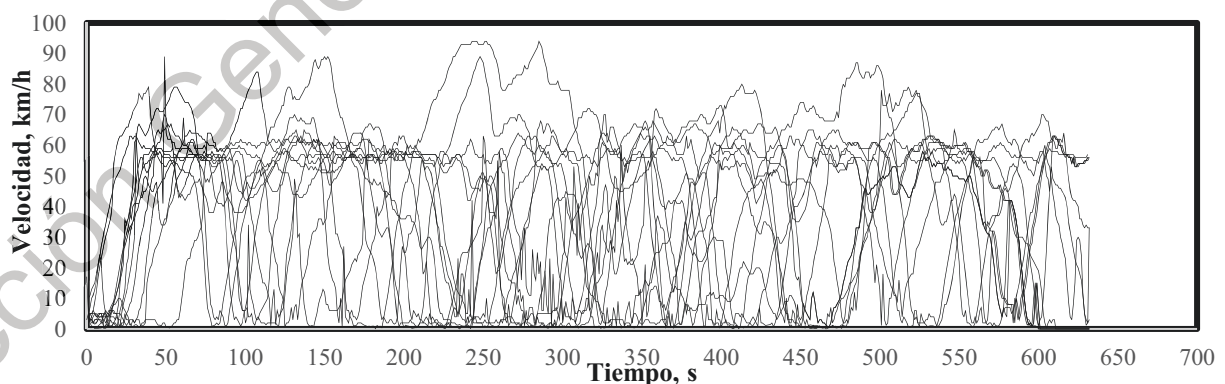


Figura 4.5 Gráfico de la variación total de la velocidad

Fuente: Propia.

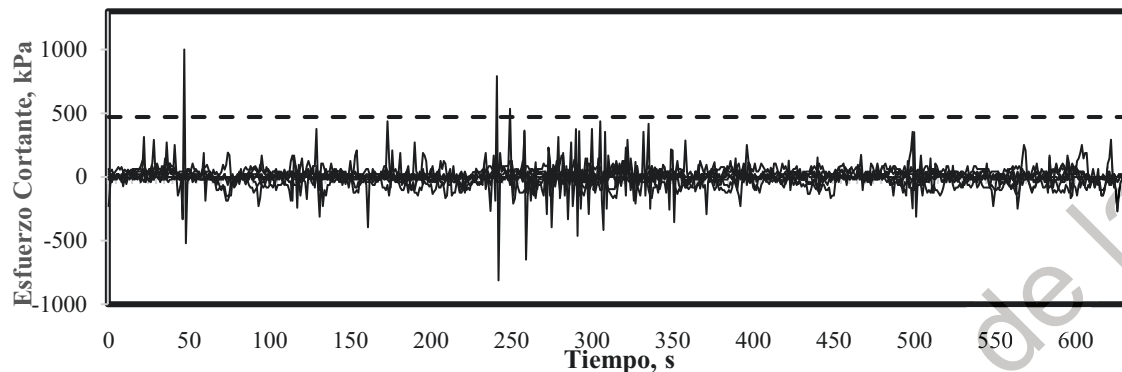


Figura 4.6 Gráfico del daño al pavimento.

Fuente: Propia.

Asimismo, en la Figura 4.7 son mostrados cada uno de los gráficos con sus diferentes esfuerzos a lo largo de los 6 km del recorrido, estos viajes estuvieron caracterizados por diferentes valores desviaciones estándar como se muestran en la Tabla 4.5, demostrando la variación de aceleraciones que tiene cada estilo de manejo.

Se puede observar que cada gráfico cuenta con diferentes rangos de daño que van relacionados con los cambios de velocidad y la desviación estándar de aceleración correspondiente. Los máximos valores de daños están presentes cuando existe un incremento o decremento de velocidad en el momento de conducción, estos varían en cada recorrido, pero se puede observar que los que, a mayores esfuerzos, mayor será su desviación estándar de la aceleración.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Los recorridos (c) y (f) son los que muestran un comportamiento con mayores variaciones en su recorrido, ya que se observan grandes picos en el gráfico que representa mayores daños, asimismo, de los 12 valores de desviación estándar, estos recorridos tienen 1.19 y 1.02 respectivamente. Los recorridos (h) y (k) muestran desviaciones altas que se atribuyen al igual que los dos casos anteriores a mayores daños en el pavimento, y se puede corroborar al analizar el comportamiento del gráfico, el cual muestra variaciones que alcanzan los 400.000 kpa. Estos cuatro recorridos, son los que más daño causaron, por lo tanto, se pueden denominar estilos de conducción agresivos, debido a los cambios bruscos de velocidad.

Tabla 4.5 Valores de Desviación. Estándar para cada recorrido.

Recorrido	Desviación Estándar de Aceleración
a	0.45
b	0.69
c	1.04
d	0.57
e	0.48
f	0.83
g	0.52
h	0.76
i	0.52
j	0.54
k	0.64
l	0.64

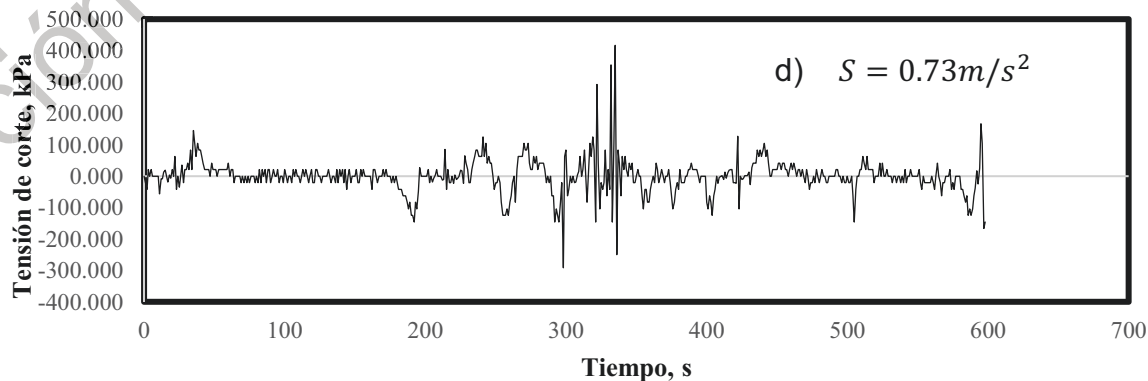
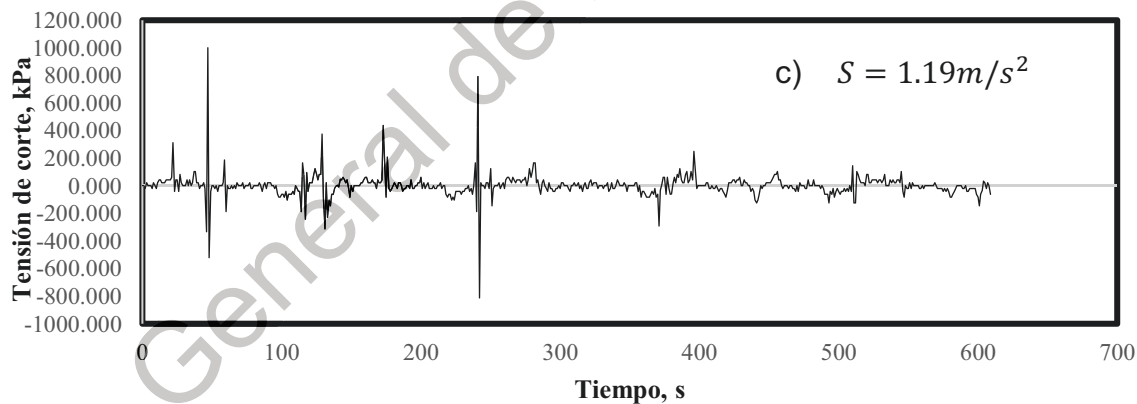
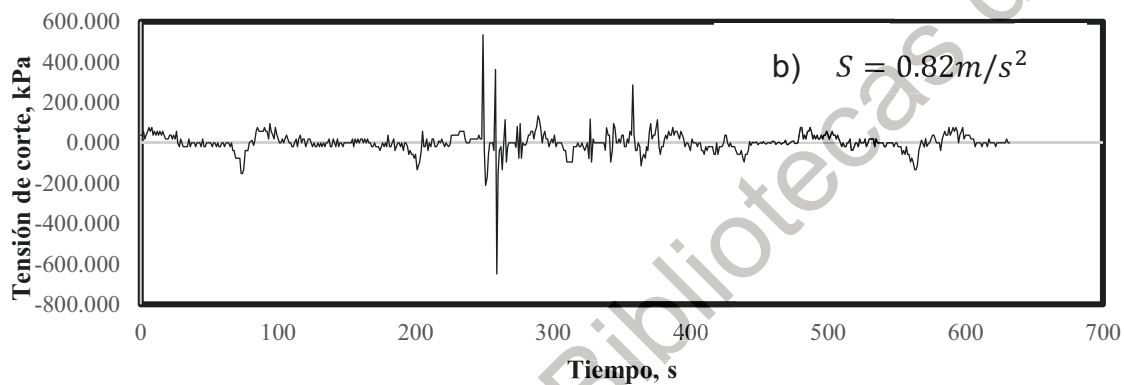
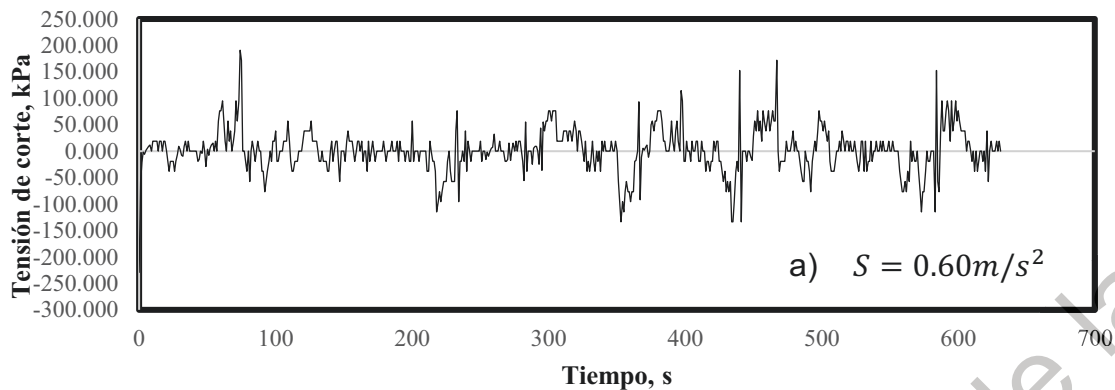
Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

Con base en los resultados de los recorridos (b), (d), (g) y (l), se pueden interpretar como estilos constantes, lo cuales no muestran gran diferencia en los cambios de velocidad, excepto en algunos puntos del recorrido, lo que hace que su desviación estándar aumente. El recorrido (b) es un ejemplo de esto, los valores que presenta a lo largo de la ruta no son tan abruptos ya que a lo largo de todo el recorrido presenta esfuerzos no mayores a 200.000 kpa, sin embargo, cuenta con situaciones que llevaron a esa conducción a tener cambios bruscos de aceleración; misma situación para los otros tres casos.

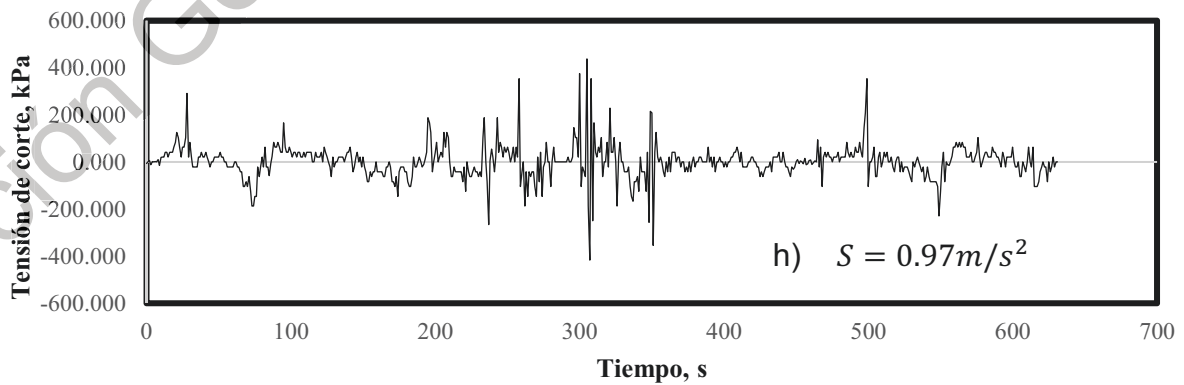
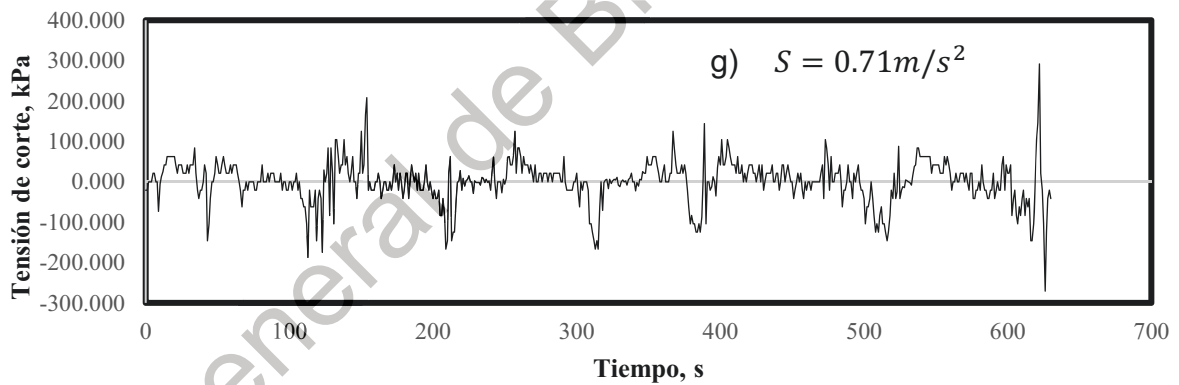
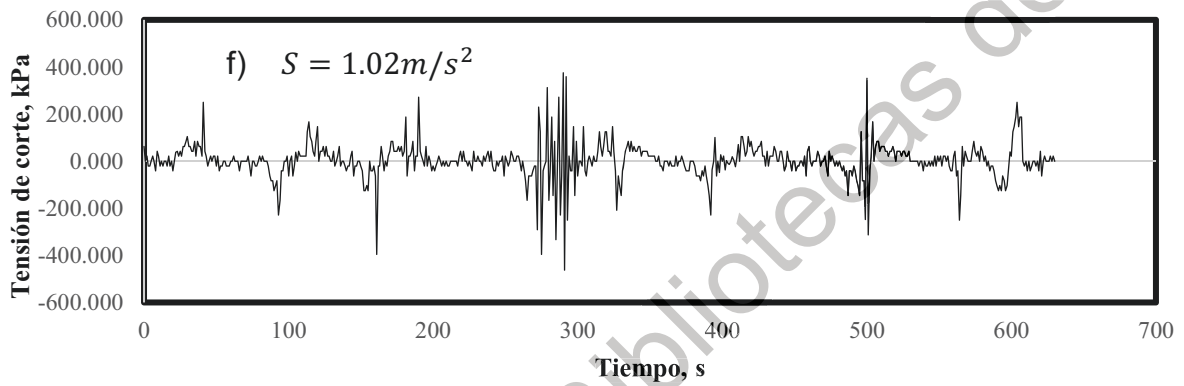
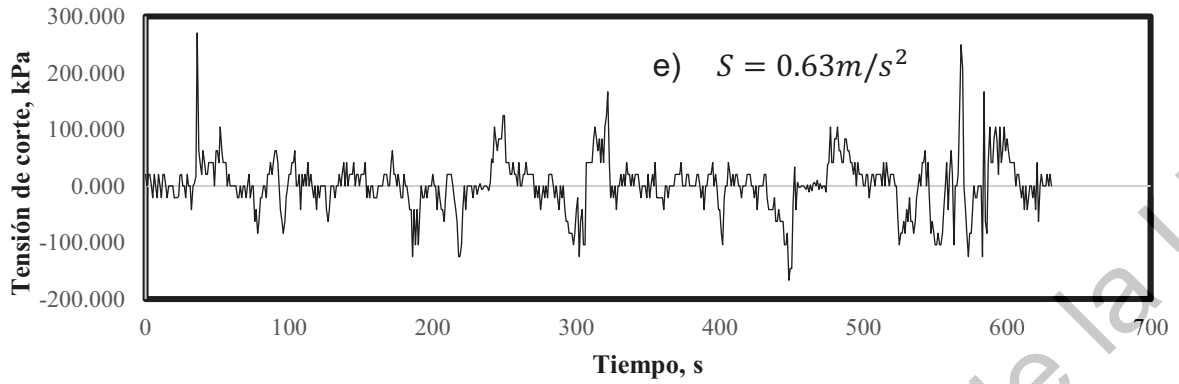
Los estilos suaves de manejo son los que presentan velocidades constantes en la mayor parte del viaje y al momento de tomar una decisión, lo hacen con cambios moderados de velocidad. Esto es, menor diferencia entre las aceleraciones, por lo tanto, menores esfuerzos que dañen al pavimento.

Los recorridos (a), (e), (i) y (k) son los que presentan menores valores de desviación estándar y variaciones de velocidad, así como, menores esfuerzos y, por lo tanto, menores daños al pavimento. Lo anterior podemos relacionarlo con una conducción suave, pues podemos observar que cada comportamiento de la línea del gráfico no es tan brusco.

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos



Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos



Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

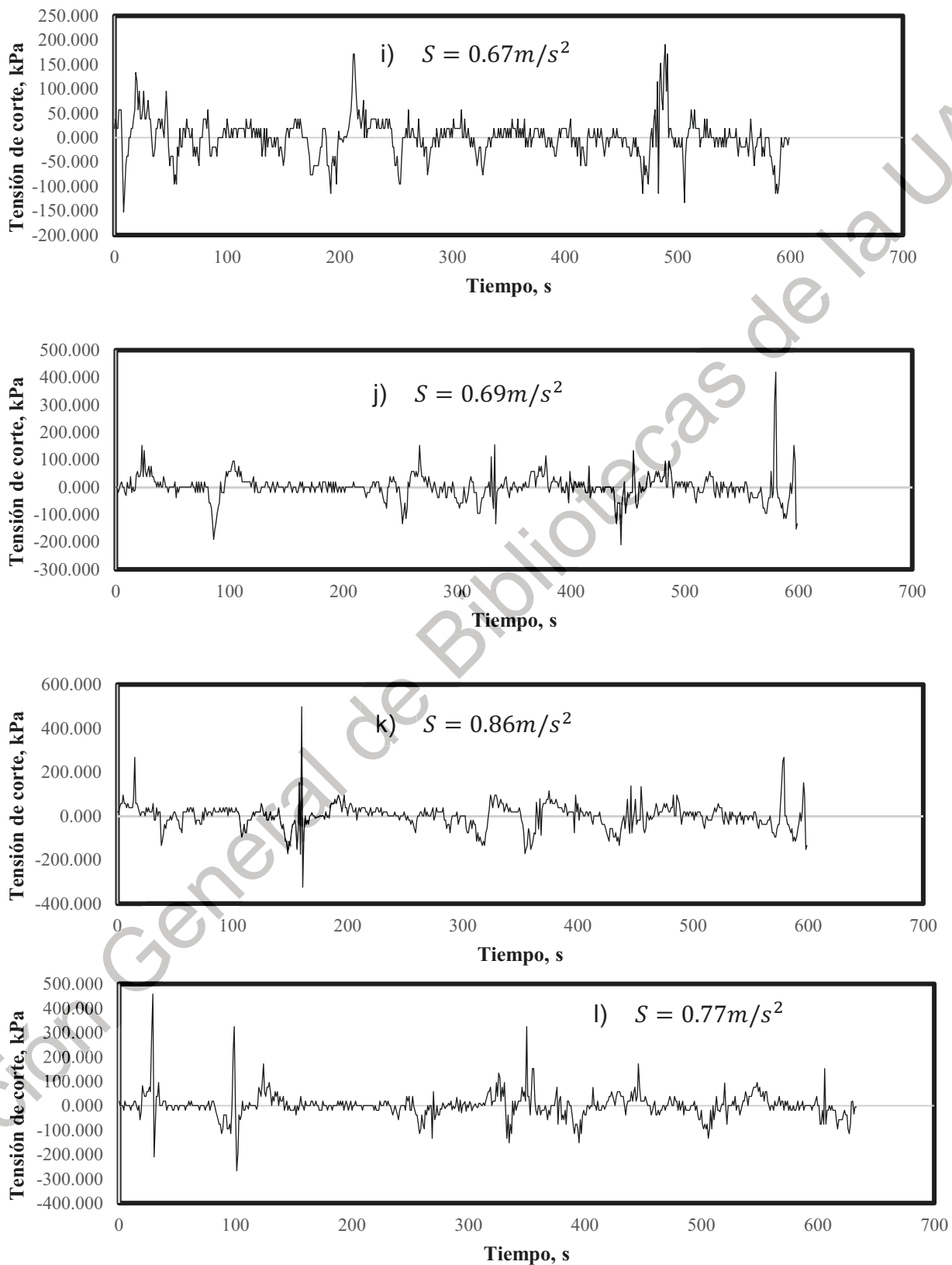


Figura 4.7 Perfiles de esfuerzos y desviación estándar para cada viaje

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

En el gráfico mostrado en la Figura 4.8 representa los resultados generales de la dispersión de la aceleración y la suma total de los esfuerzos cortantes.

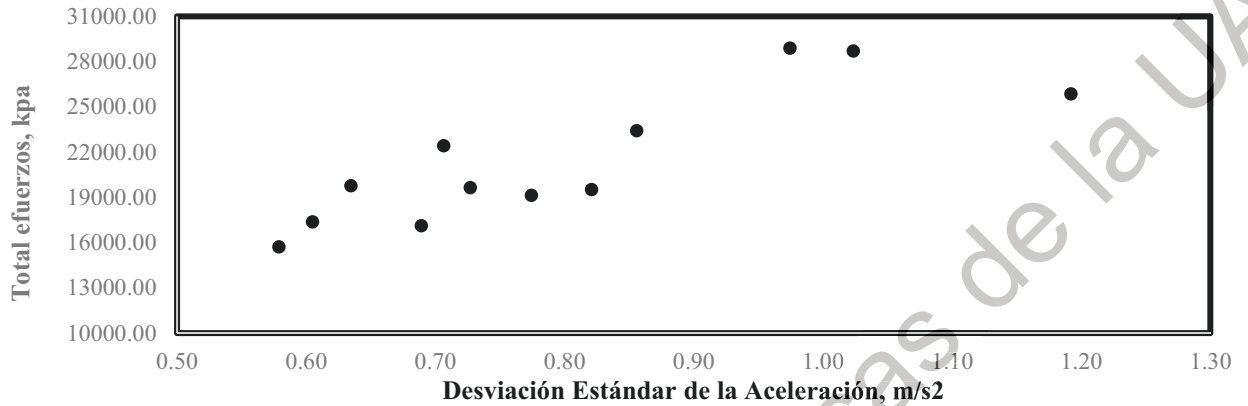


Figura 4.8 Relación entre la Aceleración y Esfuerzo

En el análisis de los diferentes recorridos en el gráfico anterior se puede notar que el recorrido (a) es el recorrido que resultó con el menor valor de desviación y se puede atribuir a que no hubo mucha diferencia entre los valores de aceleración, dadas estas condiciones podríamos decir que se asemeja a una conducción ideal, es decir una conducción autónoma.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación pretende informar sobre los aspectos del comportamiento que tendrían los vehículos autónomos en las secciones estructurales de los pavimentos asfálticos en vías urbanas, suburbanas, o ejes carreteros. Estos datos deben a su vez añadirse a diferentes entornos, como otro impacto importante de los vehículos autónomos, para seguir un método de daños al pavimento por la dispersión de la aceleración, o para ser tomado en cuenta en las actividades de diseño, construcción y conservación de las carreteras. Como conclusión, se destacan a continuación los principales aspectos que se describen en el presente trabajo.

Acerca de los datos GPS

La metodología de datos GPS resultan ser de gran conveniencia para el cálculo de diferentes parámetros y diferentes líneas de investigación. En esta investigación los datos GPS fueron empleados para determinar el daño que provoca la dispersión de la aceleración sobre un pavimento asfáltico; ya que los datos del GPS constituyen la alteración del modelo de vehículo como lo es la aceleración longitudinal, cambio de dirección o curso y el cambio de elevación.

Los resultados del uso experimental de esta formulación sugieren que la conducción cambia con el tiempo y que hay valores máximos cuando diferentes factores están presentes simultáneamente.

Daño al pavimento

El daño al pavimento se deriva de una progresión sistemática de efectos que de acuerdo con la intensidad se derivan en diferentes daños. El ejemplo tomado en esta investigación es el deterioro por fatiga llamado rugosidad, el cual fue tomado como indicativo de qué tan dañado

Se concluye que, con mayores cambios de velocidad, mayor será el daño que el vehículo hará sobre el pavimento. Lo contrario a lo anterior, se da mediante una

Efecto potencial de la conducción autónoma sobre el deterioro de los pavimentos

conducción no tan variada en su velocidad, esto es: a velocidad constante, menores aceleraciones y menores daños al pavimento.

Una conducción no tan variada en sus cambios de velocidad disminuye los daños hacia el pavimento, esto es: a velocidad constante, menores aceleraciones y menores daños al pavimento.

Un efecto potencial al disminuir los daños ocasionados por la aceleración en las carreteras, se puede dar en la disminución de los precios dados hacia esta, contribuyendo a un menor desgaste y disminución de los daños de costos por conservación y mantenimiento, y así implementar campañas de concientización hacia los conductores para que se tenga un mejor uso de las diferentes infraestructuras carreteras; y con esto, potencializar mejores conducciones e incluso, tener una mejor seguridad al momento de conducir.

Conducción Autónoma

La autonomía en los vehículos ha destacado en los últimos años e impactado a la sociedad que se desenvuelve cerca de la localización de los fabricantes, quienes han puesto en marcha múltiples pruebas que interactúan en el día a día de los diferentes usuarios. Esta tesis se adelantaba al hecho de que en algún futuro no muy lejano existiera una flota vehicular de transporte pesado en las carreteras del mundo, y es por eso por lo que se decidió averiguar qué consecuencias traería en términos de daño, sobre el pavimento.

La conclusión es que los VA tienen un gran potencial para mejorar la seguridad, el confort, y la eficiencia en la conducción, es decir, que tienen un estilo de manejo no agresivo y que da como resultado menores esfuerzos que afecten la calidad del pavimento; esto basado en los resultados de los estudios hechos en esta investigación, ya que se logró determinar que las velocidades constantes conllevan a tener menores esfuerzos que afecten a la calidad del pavimento.

Puntos para destacar de la investigación

- Encontrar una metodología de bajo costo para determinar el daño al pavimento.
- Resaltar las características de la conducción autónoma y agregar, además, que este tipo de tecnologías serán más amigables con la estructura del pavimento.
- Un punto importante dentro de esta investigación es que no fue necesario contar con un vehículo autónomo para realizar la experimentación. Así con esto, se comparte esta metodología con fines de encontrar más bondades que pudiera traer consigo un vehículo con estas características.
- Resaltar el uso que puede tener un GPS, debido a que son dispositivos que han revolucionado las diferentes ramas de la ciencia, además que, contar con uno es de fácil accesibilidad.
- Los daños al pavimento se dan a través de cargas repetitivas de ejes, y de la interacción que hay con otros factores, como el clima. Sin embargo, el estilo de conducción también añade un importante impacto de daños sobre el pavimento de las carreteras, principalmente en la primera capa en donde ocurren los daños por fatiga.

6. REFERENCIAS

1. Ahie L.M., Charlton S.G. & Starkey N.J. (2015). The role of preference in speed choice. *Transportation Research Part F*; 30: 66–73.
2. Alberti S., Crispino M., Giustozzi F. & Toraldo E. (2017). Deterioration trends of asphalt pavement friction and roughness from medium-term surveys on major Italian roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*; 10: 421- 433.
3. Amjad I. & Sameer A. (2017), Evaluation of implementation of municipal roads' maintenance plan in Palestine: A pilot case study. *International Journal of Pavement Research and Technology*;10: 454–463.
4. Amoo-Dodoo N. A. & Thorpe N. (2004). A pavement damage-based system for charging HGVS for their use of road infrastructure. *Highways Workshop University of Bergamo*: 26-27.
5. Arslan D., Gürü M., & Çubuk M. K. (2014). Preventing of rutting and crackings in the bituminous mixtures by monoethylene and diethylene glycol based synthetic polyboron compounds. *Construction and Building Materials*; 50: 102-107.
6. Asociación Española de la Carretera. (2018). Comunicado de prensa. <https://www.aecarretera.com/sala-de-prensa/comunicados/comunicados-2018/2861-pge2018-cae-un-4-3-la-inversion-en-conservacion-y-seguridad-vial> Fecha de consulta: 01/06/2018
7. Bellem H., Schönenberg T., Krems J. F. & Schrauf M. (2016). Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles. *Transportation Research*; 41, 45-54.
8. Bevly D. M., (2004), Global Positioning System (GPS): A Low-Cost Velocity Sensor for Correcting Inertial Sensor Errors on Ground Vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*;126: 255-264.
9. Charlton S.G. & Starkey N. J. (2017). Driving on urban roads: How we come to expect the 'correct' speed. *Accident Analysis and Prevention*; 108: 251–260.

10. Chen Z., Fang H., Yafeng Y. & Yuchuan D. (2017). Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks. *Transportation Research Part B*; 99: 44-61.
11. Cheng L., Tingting W., Qian S. & Anjun Y. (2018). Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions. *Construction and Building Materials*; 173:801-810
12. Choi, M., Oh, J. J. & Choi, S. B. (2013). Linearized. Recursive least squares methods for real-time identification of tire-road friction coefficient. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*; 62(7): 2906–2918.
13. Cortés C.E., Gibson J., Gschwender A., Munizaga M., & Zúñiga M. (2010). Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*;19: 695-707.
14. Dadoo, N. A. & Thorpe, N. (2002). Road User Charging for Heavy Goods Vehicles. 7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. Delft, The Netherlands. 63-71.
15. Eboli L., Mazzulla G. & Pungillo G. (2016). Combining speed and acceleration to define car users' safe or unsafe driving behaviour. *Transportation Research Part C*; 68: 113–125.
16. Favarò F., Eurich S. & Nader N. (2018). Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accident Analysis & Prevention* 110: 136-148.
17. Favarò F.M., Nader N.S. Eurich, Tripp M. & N. Varadaraju. (2017). Examining accident reports involving autonomous vehicles in california, *Plos One*, 12 (9) <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184952>
18. Federal Highway Administration (2010). Highway Safety Improvement Program, Pavement Friction, Washington DC. https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/pavement_friction/index.cfm
Fecha de consulta: 02/06/2018
19. Garnica P., Flores M., Gómez J. A., & Delgado H. (2005) Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Publicación Técnica, 267. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

20. Garnica P., Gómez J.A. & Sesma J.A. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. Publicación Técnica No.197. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
21. Glavica D., Mladenovicb M., Lutinenb T., Cicevica S. & Trifunovica A. (2017). Road to price: User perspectives on road pricing in transition country. *Transportation Research Part A*; 105:79-94.
22. Han K., Hwang Y., Lee E. & Chooi S. (2016). Robust estimation of maximum tire-road friction coefficient considering road surface irregularity. *International Journal of Automotive Technology*; 17(3): 415-425.
23. Hana D., G. Zhub, H. Hua & L. Li. (2018). Dynamic simulation analysis of the tire-pavement system considering temperature fields. *Construction and Building Materials*; 171: 261-272.
24. Holly Moore (2007). *Matlab para ingenieros*. Pearson Educación de México, S.A. de C.V. Primera edición.
25. Hong-hai L., Zhong-xin X., Zhi-geng Z. & Bing L. (2016). Research and verification of transfer model for roughness conditions of pavement construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*; 9: 222-227.
26. Hou Y., Zhang H., Wu J., Wang L. & Xiong H. (2018). Study on the microscopic friction between tire and asphalt pavement based on molecular dynamics simulation. *International Journal of Pavement Research and Technology*; 11: 205-212
27. Hu X., Faruk A.N.M., Zhang J., Souliman M.I. & Walubita L.F.. (2017). Effects of tire inclination (turning traffic) and dynamic loading on the pavement stress-strain responses using 3-D finite element modeling. *International Journal of Pavement Research and Technology*; 10: 304-314.
28. Huang Y. H. (2004). *Pavement analysis and desing*. Person Prentice Hall, Segunda Edición.
29. Instituto Nacional de Estadística y Geografía <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/terciario/transporte/carreteras.aspx?tema=E> (Fecha de consulta: 13/05/2018)

30. Javanmardi S., Bideaux E., Trégouët J.F., Trigui R., Tattegrain H., Nicouleau B. E. (2017). Driving Style Modelling for Eco-driving Applications. IFAC-Papers On Line; 50:13866-13871.
31. Lozano A., Romero J., Hernández J., Carrión F., Vázquez D. (1999). Aspectos de la dinámica de vehículos pesados y su relación con el daño a pavimentos. Publicación Técnica No.119. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
32. Mahendra, A. (2008). Vehicle Restrictions in Four Latin American Cities: Is Congestion Pricing Possible. *Transport Reviews*; 28(1): 105–133.
33. Maina J.W., De Beer M. & Y. Van Rensburg (2017) Modelling tyre-road contact stresses in pavement design and analysis.
34. Mommens K., Tomvan Lier T. & Macharis C. (2016). Loading Unit in Freight Transport Modelling. *Procedia Computer Science*; 83: 921-927
35. Montoya Z.R., Romero J. A., Betanzo Q.A. & Obregón B.S. (2016). A road and environmental pricing methodology. *Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística*.
36. Moreno Q.E., Bustos R.A, Gradilla H.L., Montoya Z.R. & Martner P.C. (2016). Desarrollo de un Modelo Nacional de Transporte Segunda Fase: Actualización de Datos y Análisis de Escenarios. Publicación Técnica No.482. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
37. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2017) Revisión de la Regulación del Transporte de Carga en México
38. Ozturk O. & Patrick J. (2018) An optimization model for freight transport using urban rail transit. *European Journal of Operational Research*; 267(3): 1110-112.
39. Park G., Yoonjin H. & Seibum C. (2017). Vehicle Positioning Based on Velocity and Heading Angle Observer Using Low-Cost Sensor Fusion. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*; 139.
40. Prasada J.R., Kanugantib S., Bhanegaonkarc P. N., Sarkar A. K. & Arkatkard S. (2013). Development of Relationship between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses: A Study on PMGSY Roads. *2nd Conference of*

Transportation Research Group of India (2nd CTRG), Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2013; 104: 322 – 331.

41. Reza-Kashyzadeha, A., Ostad-Ahmad-Ghorabib, M.J., and Arghavanb, A. (2014). Investigating the effect of road roughness on automotive component. *Engineering Failure Analysis*; 41: 96-107.
42. Rico A. & Del Castillo H. (2005). *La Ingeniería de suelos en las vías terrestres Carreteras, ferrocarriles y aeropuertos*, vol.2. D.F., México: LIMUSA. Noriega Editores.
43. Rico A., Téllez R. & Garnica P. (1998). Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Publicación técnica, 104 Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
44. Rico R.A. & Mendoza D.A. (1995). Una estrategia para la conservación de la red carretera. Documento Técnico No. 11, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
45. Romero J. A., Lozano G.A., Betanzo Q.A., & Obregón B.S. (2013). A flexible pavement damage metric for a straight truck. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*; 20(3): 209-221.
46. Romero, José A. (2017). A massive vehicle – flexible pavement dynamic interaction simulator. Nafems World Congress, Stockholm, Sweden.
47. Santos A., Freitas E., Faria S., Oliveira J.R. & Rocha A.M. (2014). Degradation prediction model for friction in highways .*14th International Conference on Computational Science and Its Applications, Springer International Publishing*, Guimaraes, Portugal; 606-614. Fecha de consulta 17/01/2018
48. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). Datos viales. Fecha de consulta: 15/05/2018
49. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Comunicado de prensa. 2016. <https://www.gob.mx/sct/prensa/sct-invierte-13-mil-mdp-en-conservacion-de-40-mil-kilometros-de-carreteras-libres> Fecha de consulta: 17/01/2018
50. Serdal T. (2013). Modeling for pavement roughness using the ANFIS approach. *Advances in Engineering Software*;57: 59-64

51. Setyawana A., ZoorobbK S.E. & Hasanb E. (2013). Investigating and Comparing Traffic Induced and Restrained Temperature Stresses in a Conventional Rigid Pavement and Semi-Rigid Layers. *Procedia Engineering*; 54: 875-884.
52. Shaha Y.U., Jainb S.S., Tiwaric D. & Jain M.K. (2013). Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*; 104, 332 – 341.
53. Talebpour A. & Mahmassani H. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C*; 71:143-163.
54. Vázquez D., Fabela M. & Martínez M. (2004). Revisión documental sobre la Evaluación del Comportamiento dinámico de Vehículos pesados. Publicación Técnica No.259. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
55. Vivek K. & Krishna P. B. (2018). Evolution of tyre/road noise research in India: Investigations using statistical pass-by method and noise tráiler. *International Journal of Pavement Research and Technology*; 11 (3): 253-264.
56. Won J. K., Van P. L., Hyun J.L. & Huy T. P. (2017). Calibration and validation of a rutting model based on shear stress to strength ratio for asphalt pavements. *Construction and Building Materials*; 149: 327-337.
57. Xiaodi H., Faruk A.N.M., Zhang J., Souliman M.I. & Walubita L.F. (2017). Effects of tire inclination (turning traffic) and dynamic loading on the pavement stress–strain responses using 3-D finite element modeling. *International Journal of Pavement Research and Technology*; 10:304–314.
58. Xiaohui L., Zhenping S., Dongpu C., Daxue L. & Hangen H. (2015). Development of a new integrated local trajectory planning and tracking control framework for autonomous ground vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*;
59. Yue H., Hanfei Z. Jianfeng W., Linbing W. & Haoncheng X. (2018) Study on the microscopic friction between tire and asphalt pavement based on

molecular dynamics simulation; *International Journal of Pavement Research and Technology*; 11 (2): 205-212.

60. Zárate A.M. (2011) *Diseño de pavimentos flexibles, primera parte, vol.1.*

Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.

61. Zhaoa B. & Nagayamaa T. (2017). IRI Estimation by the Frequency Domain

Analysis of Vehicle Dynamic Responses. *Procedia Engineering*;188: 9-16

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ