



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Estudio de los Vehículos Doble Remolque en la
Dispersión de la Velocidad de Circulación y en el
Deterioro de Pavimentos

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. José Jacob Durán Casillas

Dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

Querétaro, Qro. A 07 de Junio del 2019



Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Estudio de los Vehículos Doble Remolque en la Dispersión de la Velocidad de Circulación y en el Deterioro de Pavimentos

Opción de titulación:

Tesis

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

Presenta

Ing. José Jacob Durán Casillas

Dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Presidente

Dr. José Luis Reyes Araiza
Secretario

Dr. Saúl Obregón Biosca
Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

M. I. Gerardo Ríos Quezada
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

México

Fecha Junio 2019

RESUMEN

En las carreteras, la superficie del pavimento cambia con el tiempo. Un factor que acelera este proceso de cambio, de entre muchos elementos que intervienen, es la sobrecarga que algunas configuraciones vehiculares presentan. Tal es el caso de los vehículos doble remolque (T3-S2-R4) en México, puesto que son la configuración que mayor Peso Bruto Vehicular (PBV) presentan. Estos, presentan un papel importante en cuanto al deterioro y a la reducción de la vida útil de los pavimentos flexibles, situación que se potencializa cuando se desplazan a bajas velocidades. Lo anterior no solo genera dichas eventualidades pertinentes a la infraestructura, sino que también está ligado con la disminución en la seguridad vial de los usuarios que desean trasladarse a mayores velocidades de circulación, ocasionando así un diferencial de velocidad elevado que pudiera tener repercusiones de accidentalidad. Esta situación tiene un mayor grado de peligrosidad si se analiza en pendientes ascendentes, debido a los problemas que los tracto camiones con doble remolque presentan para mantener una velocidad constante. En esta investigación se presenta un análisis que evidencia la existencia de dichos diferenciales en la carretera México-Querétaro entre vehículos de tipo T3-S2-R4 y vehículos ligeros (A), así como de un análisis mediante un modelo Newtoniano simple de almacenamiento energía en el pavimento que tiene como fin estimar la cantidad energía que las bajas velocidades de los vehículos T3-S2-R4 generan en un tramo carretero específico.

Palabras clave: velocidad, energía de almacenamiento, variación de la velocidad, pendientes positivas.

SUMMARY

On roads, the surface of the pavement changes over time. A factor that accelerates this process of change, among many elements that participate, is the overload that some vehicle systems present. This is the case of the double trailer vehicles (T3-S2-R4) in Mexico, the configuration that allows the greater gross vehicle weight (GWV). This situation is enhanced when moving at low speeds. This not only generates such eventualities pertinent to the infrastructure, but is also linked to the decrease in road safety of users who wish to move at higher speeds of traffic, thus causing a high speed differential that could have repercussions of accidents. This situation has a greater degree of danger when is analyzed in ascending slopes, due to the problems with the truck tract with double trailer to maintain a constant speed. This research presents an analysis that shows the existence of such differences in the Mexico-Querétaro highway between vehicles of type T3-S2-R4 and light vehicles (A), as well as an analysis by means of a simple Newtonian model of energy storage in a pavement section, which its purpose is to estimate the amount of energy that the low speeds of the vehicles T3-S2-R4 generate in a specific road section.

Key words: speed, storage energy, speed variation, positive slopes.

DEDICATORIA

A Dios, por estar siempre ahí cuando más lo necesito, por enseñarme el camino de la verdad y por mostrarme que existe luz dentro de mí.

A mis padres, motores de mi vida, por el esfuerzo constante a través de los años para ver la realización de sus hijos. Esto no sería posible sin el cariño y amor que genera su presencia en mi vida.

A mis hermanos, quienes independientemente de las diferencias buscan y fomentan la convivencia, el amor y el perdón.

A mi sobrina, por ser una luz en mi vida y un refugio de inocencia y paz.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización del proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por brindar los espacios y los métodos para que exista un entorno que permita un desarrollo académico idóneo.

A mi director de tesis, el Dr. José Antonio Romero Navarrete, por su apoyo incondicional aun en las distancias y a pesar de las dificultades presentadas a lo largo del desarrollo del proyecto de investigación.

A mis papás Francisco y María, por enseñarme a creer en mí cuando ni siquiera yo creía. Por ser incondicionales aun en las adversidades presentadas en los últimos tiempos. Por ser ese refugio para mi alma en el cual me fortalezco cada vez que las distancias nos permiten encontrarnos nuevamente. Por marcarme el camino.

A mi hermano Francisco, por ser un amigo en mi vida. Por las grandes platicas y los consejos mutuos que tienen como único fin, cuidarnos.

A mi hermana Carolina, por darme el coraje para tomar decisiones importantes en el momento adecuado. Por motivarme a hacerle frente a las adversidades cuando se presentan.

A mis hermanos Mónica y Carlos, por estar al pendiente de mí aún en la distancia.

A mi sobrina Ana, quien representa una hermosa luz en mi vida que me llena de calidez, esperanza y amor.

A mis primos Alonso y Alondra, por ser un refugio cuando más lo necesite y por todo lo aprendido en el tiempo compartido.

A mis compañeros y amigos que estuvieron a lo largo de todo este proceso, por mantenerme motivado y por ser incondicionales.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	10
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.3 HIPÓTESIS.....	15
1.4 OBJETIVO	15
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	16
2.1 EL DOBLE REMOLQUE	16
2.1.1 <i>Definición y características principales.....</i>	<i>16</i>
2.1.2 <i>Definición de “LCV’s” según el Departamento de Transporte de EUA</i>	<i>16</i>
2.1.3 <i>El “Turnpike Double” y sus características de interés.....</i>	<i>18</i>
2.1.4 <i>El Tractocamión Doblemente Articulado T3-S2-R4 según la SCT</i>	<i>19</i>
2.2 IMPLICACIONES EN LA ALTERACIÓN DE LA VELOCIDAD Y DAÑO AL PAVIMENTO.....	23
2.2.1 <i>Modelo a emplear para el análisis de seguridad.....</i>	<i>24</i>
2.2.2 <i>Método de velocidades de operación.....</i>	<i>27</i>
2.2.3 <i>Método de selección individual</i>	<i>27</i>
2.2.4 <i>Muestra representativa de velocidades</i>	<i>28</i>
2.3 LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	30
2.3.1 <i>Tipos de pavimento</i>	<i>31</i>
2.3.2 <i>Deterioro de pavimentos asfálticos.....</i>	<i>33</i>
2.3.3 <i>Modelo de almacenamiento de energía y deterioro</i>	<i>37</i>
3. METODOLOGÍA.....	44
3.1 IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO CARRETERO.....	45
3.1.1 <i>Definición de tramo carretero.</i>	<i>45</i>
3.2 DEFINICIÓN DEL VEHÍCULO DE DISEÑO.....	45
3.2.1 <i>Descripción de modelo matemático a emplear.....</i>	<i>45</i>
3.3 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS DIFERENCIALES DE VELOCIDAD	46
3.3.1 <i>Velocidades medidas en campo.</i>	<i>46</i>
3.3.2 <i>Método de selección individual</i>	<i>46</i>

3.3.3	<i>Muestra representativa de velocidades</i>	46
3.3.4	<i>Obtención de la pendiente del tramo carretero</i>	47
3.3.5	<i>Análisis del modelo</i>	47
3.3.6	<i>Análisis de resultados</i>	48
3.4	METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DAÑO AL PAVIMENTO	48
3.4.1	<i>Definición del modelo</i>	48
3.4.2	<i>Obtención de las variables que interceden</i>	48
3.4.3	<i>Análisis del modelo</i>	49
3.4.4	<i>Resultados y conclusiones</i>	49
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1.1	<i>Definición de tramo carretero.</i>	50
4.1.2	<i>Definición de vehículo de proyecto</i>	51
4.1.3	<i>Muestra representativa de velocidades</i>	52
4.1.4	<i>Variación de la pendiente en tramos objeto de análisis</i>	55
4.1.5	<i>Variación de la energía en los puntos analizados</i>	57
4.1.6	<i>Del historial de accidentes en el tramo objeto de análisis</i>	72
5.	CONCLUSIONES	76
6.	REFERENCIAS	79
7.	APÉNDICES	86
	DATOS VIALES, (2017). DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS, SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Las 10 causas principales de muerte en personas de 15 a 29 años.....	4
Figura 2. Visualización de los LCV's	17
Figura 3. Vista inferior de un vehículo Turnpike Double.....	17
Figura 4. Eje simple de un tractocamión.	18
Figura 5. Eje tándem de un tractocamión.....	19
Figura 6. Variación de la energía de deformación con respecto a la velocidad, por tipo de vehículo.	24
Figura 7. Relación entre velocidad, distancia y pendiente de un vehículo de 5 ejes en Francia en tramos con tres valores de pendiente longitudinal para el caso vacío y cargado.....	25
Figura 8. Relación entre pendiente, velocidad y tipo de vehículo pesado.....	26
Figura 9. Capas que conforman a un pavimento rígido.....	32
Figura 10. Capas que conforman a un pavimento flexible.	33
Figura 11. Deflexión promedio ejercida en el pavimento y su variación con la velocidad.	35
Figura 12. Fuerza de tracción en la parte inferior de la carpeta asfáltica.	37
Figura 13. Comparación de resultados obtenidos del enfoque de energía propuesto en comparación con el reportado por AASHO (1992).	38
Figura 14. Modelo físico del pavimento para la energía de deformación.	39
Figura 15. Modelo físico del pavimento para la energía de deformación.	39

Figura 16. Modelo físico del pavimento para la energía de deformación.	40
Figura 17. Modelo simplificado del pavimento para la obtención de la energía de deformación.....	40
Figura 18. Tramo carretero denominado “Cuesta China” en la carretera México – Querétaro	51
Figura 19. Perfil de elevación del tramo carretero denominado “Cuesta China” en la carretera México – Querétaro.....	51
Figura 20. Diagrama de dispersión de puntos en cada uno de los locaciones aforadas.	53
Figura 21. Diagrama de frecuencias de velocidades en cada uno de los puntos donde se obtuvieron muestras representativas.....	55
Figura 22. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 1 para diferentes condiciones de PBV.....	58
Figura 23. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 2 para diferentes condiciones de PBV.....	59
Figura 24. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 3 para diferentes condiciones de PBV.....	60
Figura 25. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 4 para diferentes condiciones de PBV.....	61
Figura 26. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 5 para diferentes condiciones de PBV.....	62
Figura 27. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 6 para diferentes condiciones de PBV.....	63
Figura 28. Valores de energía por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 con un PBV de 80 toneladas evaluados en los P1-P6.	65

Figura 29. Valores de energía por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 con un PBV de 66.5 toneladas evaluados en los P1-P6.	66
Figura 30. Valores de energía por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 con un PBV de 48 toneladas evaluados en los P1-P6.	67
Figura 31. Sumatoria de energías de los vehículos T3-S2-R4 evaluados, en cada punto para diferentes condiciones de PBV.	68
Figura 32. Sumatoria de energías de los vehículos T3-S2-R4 evaluados, en cada punto para diferentes condiciones de PBV, con los registros de velocidad sustituidos por el valor de 50 km /h.	69
Figura 33. Porcentaje de colisiones por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4 en la Carretera Federal 57.	72
Figura 34. Número de colisiones con víctimas por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4.	73
Figura 35. Número de víctimas mortales por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4.	73
Figura 36. Número de lesionados por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4.	73
Figura 37. Porcentajes por tipo de colisión en donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4 en la Carretera México 57.	74
Figura 38. Porcentaje de colisiones en el tramo objeto de estudio en relación con el total de la carretera México 57.	75

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. Nomenclatura para vehículos de transporte de carga (NOM – 012, 2017)	20
Tabla 2. Características de Nomenclatura, número de ejes y número de llantas del T3-S2-R4, (NOM – 2012, 2017).	20
Tabla 3. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y por tipo de carretera.	20
Tabla 4. Pesos bruto vehicular máximo permitido por clase de camino y tipo de vehículo.	21
Tabla 5. Constante correspondiente al nivel de confianza.	29
Tabla 6. Constante correspondiente al percentil deseado.	30
Tabla 7. Parámetros empleados para obtención de muestras representativas.	47
Tabla 8. Valor del percentil 85 de velocidad por configuración en cada punto de interés.	53
Tabla 9. Valor del percentil 50 de velocidad por configuración en cada punto de interés.	54
Tabla 10. Diferencial de velocidad de los vehículos A contra los vehículos T3-S2-R4 y la pendiente en cada punto de evaluación.	54
Tabla 11. Datos de los tramos donde se evaluó la pendiente.	56
Tabla 12. Evaluación de las estimaciones de energía acumulada para las tres condiciones de en cada uno de los puntos evaluados.	63
Tabla 13. Diferencial total de energía entre los registros de velocidad evaluados y la sustitución de valores con un límite de velocidad a 50 km/h.	69

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página.
Ecuación 1. Fórmula para la obtención de la muestra representativa de velocidades.	28
Ecuación 2. Energía de deformación	41
Ecuación 3. Deflexión.....	41
Ecuación 4. Módulo de la mezcla asfáltica.....	41
Ecuación 5. Módulo del bitumen.	41
Ecuación 6. Penetración del bitumen.	42
Ecuación 7. Temperatura de reblandecimiento de la prueba de anillo y bola del bitumen recubierto.....	42
Ecuación 8. Índice de penetración del bitumen recubierto.	42
Ecuación 9. Tiempo de carga efectivo.	42
Ecuación 10. Energía total que el j -ésimo vehículo genera al pavimento.	43

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos de transporte de mercancías, tienen una gran importancia en la mayoría de los países del mundo (Evgeniko, 2016). En Estados Unidos, el sector comercial de transporte de mercancías tiene ingresos de más de quinientos mil millones de dólares y emplea cerca de 10 millones de personas (Knipling, 2007). Además, el transporte en vehículos de carga mueve más de once mil millones de toneladas de bienes al año, que es alrededor del 60% del total del tonelaje doméstico desplazado (Schwartz y Fleming, 2007). De igual manera, el transporte de carga terrestre en 28 países de la Unión Europea es el método principal de movimiento de mercancía. Basado en datos del 2014, se muestra que se movieron mediante el transporte más de 3' 524,000 millones de t/km, donde el 49 por ciento de este monto se realizó mediante transporte terrestre (European Commission, 2016).

De igual manera para México, el transporte terrestre de carga es un elemento vital en el sistema productivo nacional. El abasto de insumos a la industria, el traslado de productos intermedios a plantas de procesamiento, el aprovisionamiento a centros de distribución y el flujo de productos terminados para el consumidor final son el reflejo cotidiano de la dinámica de la economía nacional (Moreno *et al.*, 2015). La rama del Transporte en México se encuentra en el sexto lugar dentro de las principales actividades generadoras de empleo en el país y año con año presenta un crecimiento superior al promedio nacional. Dentro de esta actividad destaca el transporte de carga, que para 2013 ocupó el quinto lugar como actividad generadora de empleo, con un 6.1 por ciento del total que fue de 35.5 millones de ocupaciones remuneradas (IMT, 2015).

El movimiento terrestre de mercancías por el medio carretero es un flujo clave en la distribución de bienes en regiones de importancia de la economía nacional, esto debido a la cobertura que la red carretera tiene. Para 2015 se estima que el monto manejado por el medio de transporte carretero fue de 522 millones de toneladas, equivalente al 86% del movimiento doméstico total (Moreno *et al.*, 2015). Asimismo, el abasto de insumos a la industria, el traslado de productos intermedios a plantas de procesamiento, el aprovisionamiento a centros de distribución o el flujo

de productos terminados para el consumidor final son el reflejo cotidiano de la dinámica de la economía nacional (Moreno *et al.* 2015).

Una de las principales razones por las que las compañías de transporte prefieren los vehículos de carga con doble remolque o semirremolque, es la reducción en costos del traslado de mercancías y el ahorro que implica, ya que pueden trasladar un mayor volumen de carga útil al destino deseado. Lo anterior contempla que estos vehículos cuenten con ventajas, tal como un ahorro en el costo de transporte, que según Backman y Nordström *et al.* (2002) se da mediante un uso eficiente del combustible cuando se pretende llevar mercancías a distancias largas, calculado ello con base en el volumen transportado de carga en la red vial, pues según Knight *et al.* (2008), un número menor de vehículos pesados en las carreteras afecta positivamente al flujo del tráfico.

Por un lado, una de las cuestiones más importantes en el comportamiento de los vehículos de carga en las carreteras, como lo menciona Grislis (2010), es su aceleración y el mantenimiento de la velocidad. Por ejemplo, la falta de existencia de carriles exclusivos de aceleración en una vía que cuenta con un solo carril por sentido y que aparte presenta pendientes verticales positivas, provoca que su velocidad disminuya, creando conflictos con los vehículos ligeros que desean rebasar. Cuando un vehículo de carga viaja a 16 km/h menos que la velocidad de operación de una carretera, la probabilidad de que se vea envuelto en un accidente de tránsito se incrementa hasta 3.7 veces. De igual manera, si el vehículo de carga viaja a 32 km/h por debajo de la velocidad de operación, la probabilidad de que se vea envuelto en un accidente de tránsito se incrementa hasta quince veces (Harkey *et al.*, 1996). Por otro lado, Daniels (2006) argumenta que los vehículos de carga que cuentan uno o más remolques, causan deterioros mucho más grandes que los vehículos ligeros o que algunos camiones de carga simples, observando que en algunas investigaciones realizadas por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials por su siglas en inglés), en su guía “Guía para estructuras de pavimento”, se ha comprobado que el daño que ocasionan al pavimento algunos de los vehículos de carga más pesados, equivale al mismo

impacto que ocasionan 2,000 vehículos ligeros. El daño al pavimento es causado por la transmisión de cargas que se tienen en los ejes. La sobrecarga axial presente en un solo eje dentro de un vehículo de carga puede causar daños serios al pavimento aún si el peso bruto del pavimento no se excede en su totalidad (Daniels, 2006; AASHTO, 1998). De manera similar, un mayor número de ejes puede mitigar el daño que el posible excedente de peso de estos vehículos ocasiona. De acuerdo a Backman y Nordström *et al.* (2002) y a Vierth *et al.* (2008), los vehículos de carga de doble remolque que cuentan con siete u ocho ejes con un peso bruto restringido (de 60 toneladas aproximadamente), son mucho menos agresivos al pavimento que los típicos vehículos combinados europeos de 5 ejes (44 toneladas aproximadamente). Con el fin de evidenciar el daño de los vehículos pesados a la estructura del pavimento, Lijun, Sun (2015), reporta los resultados obtenidos de la evaluación de varios pavimentos asfálticos en provincias de China, donde la deformación permanente observada, que se presenta en forma de “roderas” o “huellas” en el pavimento. Donde se observó que en aquellos caminos donde existe la presencia de vehículos de carga que presentan sobrecarga, resaltan crecimientos laterales de las huellas de rodadura de hasta 50 milímetros. Así también se observó que la presencia de roderas es mayor en tramos con pendientes positivas, debido a las bajas velocidades de circulación que alcanzan valores de entre 20 y 40 km/h.

Con el fin representar el potencial daño de configuraciones vehiculares de carga y su potencial daño al pavimento, Romero *et al.* (2017), ponen en evidencia la relación que tiene la velocidad de desplazamiento del vehículo y la deflexión en el pavimento asfáltico. Así también, dicha investigación expone que a medida que la velocidad baja (60km/h), la deflexión máxima en el pavimento presenta valores mayores que cuando la velocidad aumenta (110km/h). Continuando con lo anterior, también se muestra como naturalmente la deflexión es más elevada si el vehículo se encuentra en condiciones de carga total, la cual dependerá de las condiciones que la ley correspondiente establece. Así también, Romero *et al.* (2000), ejemplificaron la cantidad de energía de deformación que se almacena en el pavimento a través de los vehículos pesados, dicho modelo toma en cuenta

elementos dinámicos de respuesta del pavimento a los esfuerzos inducidos por los vehículos pesados.

Continuando con la seguridad vial, Wegman *et al.* (2015) recomienda analizar los factores de mayor importancia, de manera que se pueda saber con exactitud por qué los accidentes ocurren y que factores de riesgo los detonan, que incluyen los siguientes: las condiciones en que los operadores manejan, las condiciones del camión involucrado en el accidente y las condiciones del pavimento, asimismo, las condiciones de los elementos que conforman la carretera, ya que determina la severidad del choque; una vez que se tienen identificados y establecidos estos factores, se procede a proponer soluciones públicas para prevenir algún siniestro más efectivamente. Estos son los parámetros de enfoque directamente relacionados con el tema y su propuesta consiste en contar con la información necesaria y en el lugar adecuado de aplicación.

Los accidentes de tránsito son una de las causas de muerte más importantes en el mundo, y la principal causa de muerte entre personas de edades comprendidas entre los 15 y 29 años, como se muestra en la Figura 1. Situándose por encima del suicidio y el VIH/Sida, con un 25% y un 24% respectivamente.

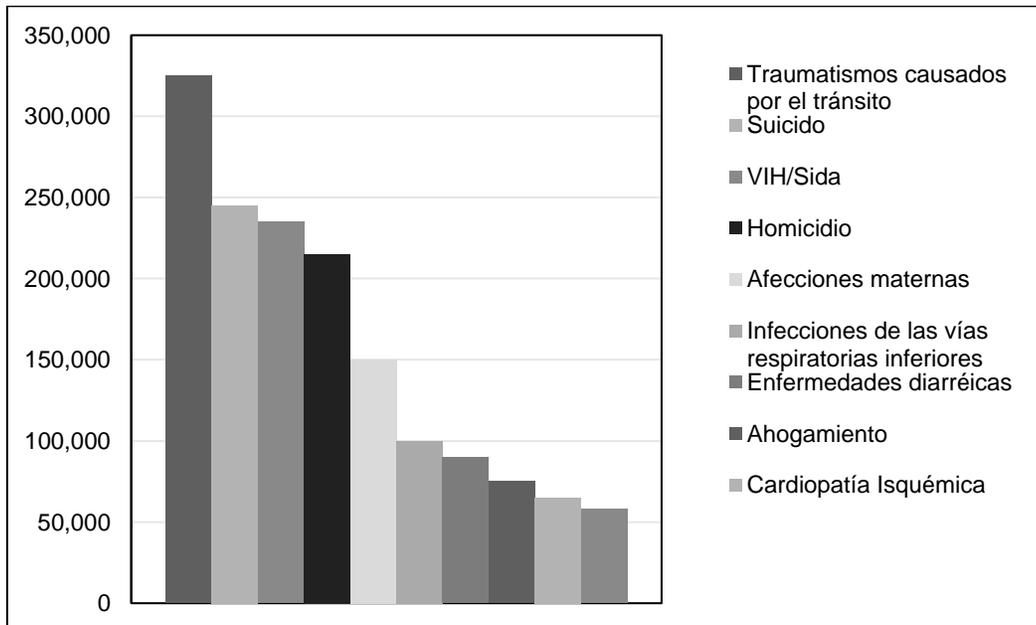


Figura 1. Las 10 causas principales de muerte en personas de 15 a 29 años.

Fuente: OMS, (2015).

Existen ciertos elementos que generan la presencia de accidente y que están relacionados con los vehículos de carga con doble remolque. Christoforou *et al.* (2010), mencionan que las características particulares de los vehículos de carga inciden en la ocurrencia de accidentes, esto puede ser ocasionado por el mismo vehículo en cuestión (debido a sus características de tracción, incremento de dimensiones y pesos), por el comportamiento del conductor (conductores profesionales pasan más tiempo manejando que un conductor regular) y por uso que se le dé al vehículo para el transporte de mercancías (cuyo uso comercial debería tener más y mejores criterios de eficiencia, regulaciones y restricciones).

Anticipando las posibles eventualidades que configuraciones vehiculares con pesos y dimensiones elevadas podrían tener, el gobierno de Canadá implementó un cambio realizado en las políticas de ingeniería propuestas por su gobierno en 1974 y 1988, con el fin de aumentar la productividad técnica de los vehículos de carga en su red vial y crear una competencia con el transporte ferroviario, los llevó a una modificación de la reglamentación de los pesos y dimensiones permitidos de su red nacional. Esto creó la implementación de nuevas políticas para el diseño y planeación de la red de autopistas, así como para el diseño y la evaluación de la geometría de los caminos, los pavimentos y los puentes; lo cual, como recomendación de Regehr *et al.* (2009) requiere la especificación de un vehículo de proyecto propuesto, así como información detallada del volumen de los tractores a considerar, incluyendo su configuración y su peso. Una de las implicaciones en el diseño, que la inclusión de estos vehículos en la red genera, es la modificación de la pendiente ascendente, debido a que provoca, según Jorgensen (1978), que los vehículos de carga se desplacen a velocidades mucho menores a las del resto de la flota vehicular, lo cual incrementa las tasas de accidentes causados por estos vehículos. Algunos resultados sugieren que, en caminos interestatales, las tasas de accidentalidad donde se ven involucrados vehículos de carga, son significativamente afectadas por la curvatura horizontal y la pendiente vertical del mismo (Mohamedshah *et al.*, 1993).

En México, en los últimos años se han presentado una serie de acontecimientos catastróficos que involucran a los vehículos de carga de mayores dimensiones en la Red Carretera Federal (RCF), tanto en Peso Bruto Vehicular como en longitud máxima, que son los de tipo T3-S2-R4. Dichos acontecimientos han sido objeto de señalamiento por parte de la sociedad y de la prensa nacional debido a las repercusiones humanas, materiales y económicas que generan. A continuación se enlistan algunos accidentes sucedidos en distintas locaciones en la RCF mexicana, dentro de los cuales no se tiene evidencia científica pero sirven como evidencia a considerar para observar las repercusiones que el desinterés, la no conveniencia y la falta de exigencia en la reglamentación nacional en la circulación de estos vehículos generan:

1. En abril del año 2012, se presentaron 43 muertos y 27 heridos en el choque entre un camión y un tráiler con remolque en el que viajaban trabajadores agrícolas en el estado de Veracruz. El accidente se presentó a las 04:30 horas, en el Municipio de Álamo Potrero. Las autoridades atribuyen el suceso al exceso de velocidad y al sobrepeso (PROCESO, 2012).
2. En abril del año 2012, se presentaron diez muertos y 26 lesionados debido al impacto de una caja de tráiler contra un autobús donde viajaban estudiantes. El suceso se presentó en el kilómetro 41 de la autopista México – Toluca, (Animal Político, 2012).
3. En julio del año 2017, se presentaron dos muertos debido a la caída del vehículo en el que circulaban por el “Paso Exprés” en Cuernavaca. Dicha obra fue inaugurada tan solo tres meses antes y presentaba irregularidades, (Animal Político, 2017).
4. En junio del año 2018, se presentaron siete muertos debido a la pérdida del sistema de frenos de un tráiler en la carretera panamericana y el libramiento norte, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (El Sol de México, 2018).
5. En julio del año 2018, se presentaron 12 muertos debido al impacto de una camioneta de transporte público que se impacta contra un tráiler

estacionado en el kilómetro 18 sobre el acotamiento de la carretera México – Pachuca, (El Universal, 2018).

6. En octubre del año 2016, se presentaron 13 muertos y dos heridos en el impacto de un autobús de pasajeros contra un tractocamión doble remolque que transportaba madera en el kilómetro 300 de la carretera México – Veracruz, en el municipio de Amatlán de los Reyes, (Excelsior, 2016).
7. En abril del año 2017, se presentaron 24 muertos y nueve heridos en el impacto de un vehículo doble remolque que transportaba combustible y un camión de pasajeros. Los sucesos se presentaron en la Autopista Siglo XXI, en La Unión, Guerrero, (El Sur, 2017).

Un análisis mucho más a fondo de lo anterior, se presenta en Romero *et al.* (2014), donde de entre muchos factores que intervinieron, se presentó un accidente catastrófico, donde 27 personas fallecieron, tanto de manera directa, como de manera indirecta, el cual se presentó debido a un vehículo de tipo T3-S2-R4 cargado con materiales peligrosos. Dicho accidente se originó debido a la maniobra evasiva que el vehículo realizó y al posterior desacople y explosión del auto tanque. El análisis argumenta que intervinieron elementos relacionados tanto a la infraestructura como al vehículo, que, de haberse tomado en cuenta con antelación, hubieran evitado el acontecimiento del mismo.

Debido a estos fuertes sucesos y a manera de respuesta, la autoridad mexicana pertinente, que es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la propuesta y posterior modificación a la norma NOM- 012 sobre los pesos y dimensiones máximas los que pueden circular los vehículos de autotransporte que circulan por la RCF. Dentro de las nuevas regulaciones que entraron en vigor, y que tienen que ver con los vehículos T3-S2-R4, están aquellas que tienen que ver con sus características físicas, operacionales y mecánicas, las cuales se enlistan a continuación:

- Obligatoria adaptación de un sistema de posicionamiento global (GPS), el cual servirá de elemento base para ubicación y control de tanto la velocidad como la posición de la unidad.
- Utilización de un motor “gobernado” que permita transitar a una velocidad de máximo 80 km/h.
- Implementación de frenos antibloqueo (ABS), y un ajuste de frenos automático.
- Los convertidores o “dollys” con los que cuente la unidad deberán cumplir las especificaciones mencionadas en la NOM-035-SCT-2.
- Deberán de contar con una potencia mínima de 430 caballos de fuerza y 4,650 lb-ft de torque.
- Dichas unidades deberán de limitar su circulación cuando la Secretaría de Comunicaciones y Transportes lo exija, sobre todo en periodos vacacionales, lo anterior para reducir el número de accidentes.
- Independientemente del Peso Bruto Vehicular con el que circulen (ya sea inferior), deberán mantener las exigencias que esta modificación a la norma exija, aún si circulan con 66.5 ton o menos.

Dichas exigencias se encuentran en NOM-012-SCT-2-2017 y entraron en vigor en el año 2018 por lo cual, todos los tractocamiones de carga con estas características que circulen por la RCF, deben contar con el permiso establecido por la SCT. Hasta agosto de 2018, se han realizado aproximadamente 110,000 revisiones sobre el cumplimiento de las modificaciones a la NOM-012, dentro de las cuales, se realizaron 3,000 a transportistas que cuentan con vehículos doblemente articulados, dentro de los cuales 500 de estos no cumplían con los requisitos que se emitieron en la nueva NOM-012, por lo cual fueron acreedores a una sanción estipulada, (T21, 2018). Según la OMS (2015), los países que con éxito han llevado a cabo intervenciones más eficaces para mejorar la seguridad vial han logrado reducir el número de víctimas mortales en carretera. El despliegue de estas intervenciones a nivel mundial ofrece un gran potencial para mitigar daños futuros y salvar la vida de muchas personas. Tal es el caso de España, que del año 2000 al

2013 redujo hasta en un 70.9% el índice medio de fatalidades en carreteras, (OECD/TIF, 2015).

En términos de daño al pavimento, Romero *et al.* (2017), ponen en evidencia la relación que tiene la velocidad de desplazamiento del vehículo y la deflexión en el pavimento asfáltico. Así también, dicha investigación expone que a medida que la velocidad baja (60km/h), la deflexión máxima en el pavimento presenta valores mayores que cuando la velocidad aumenta (110km/h). Así también, se muestra como naturalmente la deflexión es más elevada si el vehículo se encuentra en condiciones de carga total, la cual dependerá de las condiciones que la ley pertinente establece.

En esta investigación, el enfoque se sitúa en los problemas causados por las bajas velocidades que ocasionan los vehículos de carga que cuentan con doble remolque (T3-S2-R4) cuando transitan por vías con pendientes ascendentes, produciendo un riesgo para los vehículos ligeros que se desplazan a mayores velocidades debido a la reducción repentina de la velocidad, al efecto de la pendiente y posiblemente al sobrepeso. Estas bajas velocidades también podrían tener repercusiones en la vida útil del pavimento asfáltico, acelerando el proceso de deterioro debido a permanencia en un tiempo mayor de la carga del vehículo sobre la estructura del pavimento.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Tomando en cuenta la década de los 90's y con el propósito de destacar los corredores más importantes en el territorio mexicano, Rico *et al.* (1998), realizaron un análisis del transporte de carga terrestre tanto de carreteras nacionales como de la infraestructura ferroviaria, donde se destacan los principales corredores carreteros, donde se resalta como número uno la interacción entre la Ciudad de México y Querétaro, con un valor de 85,000 toneladas al día con un valor de carga de 164 millones de pesos para el año de análisis. Para el año 2017, según Datos Viales (2017), se estimó que en la carretera México – Querétaro, en el km. 107 la vía presentó un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) superior a los 28,000 vehículos, donde el 5.6 por ciento de esos vehículos eran el vehículo objeto de análisis de esta investigación.

En el caso de México, dentro de las actividades objetivo de la SCT, que es el organismo rector de cuestiones que son afines al transporte, lo que se pretende conseguir con la política administrativa y de infraestructura, es la de garantizar el acceso y la comunicación a fin de que los mexicanos puedan comunicarse y trasladarse de manera ágil, eficiente y segura. Para que esto se cumpla resulta importante el mantenimiento bajo condiciones ideales de las carreteras nacionales, tanto en la calidad de su infraestructura como en el hecho de garantizar la seguridad de los usuarios por la RCF. Debido a esto, existe la necesidad de informar y conocer los niveles de accidentalidad presentes en las entidades federativas, las carreteras y las rutas, con el fin de que los usuarios conozcan la realidad que se vive en el entorno (Mayoral *et al.*, 2018). La velocidad es por mucho la causa número uno de accidentes con vehículo motorizado alrededor del mundo, pero no solo es el exceso de velocidad la causa principal, sino la amplia diferencia entre velocidades dentro de la flota vehicular. En Lave (2014) se argumenta que no es el exceso de velocidad lo que genera una alta accidentalidad en una carretera sino que también aquellos vehículos que limitan o irrumpen el flujo coordinado de la flota vehicular, o que circulan a una velocidad inferior a la establecida por la ley, son también causales principales de posibles accidentes. Cuando la mayoría de los vehículos circulan a

velocidades de operación similares, independientemente de si son altas o bajas, la tasa de fatalidad tiende a disminuir. La varianza que se puede presentar en una carretera puede ser uno de los principales detonantes de las altas tasas de accidentalidad.

Uno de los principales problemas en cuanto a la dispersión de la velocidad en carreteras de dos carriles, y que tiene que ver con los vehículos de transporte de mercancías, según Hanely y Forkenbrock (2005) es que estas configuraciones vehiculares aumentan potencialmente el riesgo de aquellos conductores/usuarios de vehículos ligeros que desean ir a una velocidad más elevada, o bien, aquellos que desean rebasarlos. Gattis *et al.* (1997) y Romana (1999) con base en observaciones de rebases en Estados Unidos, argumentan que si el número de vehículos de transporte de carga de mercancías con al menos siete ejes en el flujo del tráfico de una carretera bidireccional aumenta, y si la velocidad a la que viajan es tan baja que crean una diferencia de espaciamiento entre cada uno de ellos es de tres segundos o menos, entonces el número de vehículos que intentan rebasar aumentará considerablemente, lo cual puede repercutir en una mayor tasa de accidentalidad.

En Estados Unidos, para el año 2016, se registraron un total de 37,461 personas fallecidas por un accidente que involucró un choque entre vehículos de motor (FARS, 2016). Dentro de los datos que maneja el Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América (USDOT, por sus siglas en inglés), se muestra que para 2015 existieron registros de accidentes fatales en los que se vieron involucrados al menos un vehículo de carga (que incluye a un elemento tractor y al menos un elemento de carga tipo remolque), de 2,655 accidentes fatales, así como de aproximadamente 42,000 accidentes donde hubo al menos un herido (USDOT, 2015).

De acuerdo a la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos de América (FHWA, por sus siglas en inglés), para 2016, más de 37,000 personas fallecieron en accidentes de vehículos motorizados, situación que se presenta con un 5.6 por ciento de crecimiento respecto al año anterior. De la cantidad antes

mencionada, el 27 por ciento de estos accidentes donde hubo tales víctimas mortales ocurrieron mientras que uno de los vehículos involucrados se desplazaba con exceso de velocidad. De manera subsecuente, aproximadamente el 11 por ciento de estas víctimas estuvieron involucradas en un choque con un vehículo de transporte de carga de grandes dimensiones, donde es importante destacar que el 72 por ciento de las víctimas de estos accidentes eran conductores de otros vehículos, lo cual destaca el riesgo que los vehículos de carga generan en las demás configuraciones vehiculares, donde los vehículos ligeros destacan como los más afectados, (NHTSA, 2017).

En México, para el año 2014 se registraron un total de 8,014 percances en carreteras federales que dejaron un saldo de 3,784 personas muertas y 17, 502 lesionadas (solo de lo que se tiene registro), donde los daños materiales ascienden a 1,170 millones de pesos. Las cifras anteriores representan un costo total de accidentes de alrededor de 3,350 millones considerando costos unitarios en pesos (Cuevas *et al.*, 2015). Así también, para el año 2017 ocurrieron un poco más de 11, 883 percances que dejaron un saldo de 2,921 personas fallecidas. En los anteriores participaron 19,388 vehículos, donde en el 26 por ciento de los casos, participaron vehículos de carga, que incluyen las configuraciones aceptadas por la Norma Mexicana, que son el Camión Unitario (C), el Tractor Articulado (T-S) y el Tractocamión Doblemente Articulado (T-S-R o T-S-S), (SCT, 2017). Continuando con lo anterior, y haciendo énfasis en la configuración objeto de estudio en esta investigación (T3-S2-R4), se presenta que en Estados Unidos para 2016, fallecieron 4,317 personas que se vieron involucradas en una accidente con un vehículo de carga, donde en el 80 por ciento de estos, se vieron inmiscuidos tractocamiones de pesos que rebasan las 26,000 lb de Peso Bruto Vehicular (PBV). En México, para el año 2017, hubo 955 colisiones donde se vio involucrado el Tractocamión Doblemente Articulado (T3-S2-R4), dentro de las cuales se presentaron 308 colisiones con víctimas, donde hubo 195 muertos y 536 lesionados, presentando daños económicos que ascendieron a 232' 437, 050 millones de pesos (Cuevas *et al.*, 2017).

La seguridad vehicular en las carreteras pudiera verse afectada de manera natural por las deficiencias que se presentan en la carretera en turno y en el vehículo, sobre todo si se presentan eventos extraordinarios, como lo son las maniobras de emergencia. Dichas maniobras, que pueden ser los frenados repentinos, las maniobras de evasión y los cambios de carril, que pueden ser debidos a distintas razones como las condiciones del pavimento, son situaciones que se presentan comúnmente en los vehículos de transporte de carga terrestre, (Vázquez *et al.*, 2004).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El tema central de esta investigación se enfoca en el posible efecto negativo que los tractocamiones con doble remolque (T3-S2-R4) presentan en una carretera donde las condiciones en sitio son desfavorables para que se garantice un eficiente desplazamiento a lo largo de una trayectoria.

Por un lado, en términos de daño a la infraestructura, las bajas velocidades de desplazamiento de los vehículos T3-S2-R4 producen una cantidad de energía mayor, situación que acelera el proceso de deterioro de los pavimentos. Por otro lado, y en cuanto a la seguridad vial se refiere, las bajas velocidades de los vehículos T3-S2-R4 representan un riesgo para los vehículos de menor configuración y de menores proporciones debido a las características físicas del vehículos, puesto que su robustez genera un potencial riesgo y un incremento en la severidad de un posible accidente. En este caso y debido a su capacidad para desplazarse libremente aún en condiciones de pendiente positiva considerable, el vehículo ligero (A) se encuentra en un potencial riesgo, puesto que una posible eventualidad entre estas dos configuraciones vehiculares cuando se desplazan a velocidades que difieren hasta en 80 km/h, pudiera tener repercusiones catastróficas.

La concentración de energía debida a las bajas velocidades y el riesgo a la seguridad vial debido a las reducciones de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 se potencializan cuando coexisten en un tramo carretero un TDPA elevado, la presencia de un gran porcentaje de vehículos de tipo T3-S2-R4 en el TDPA y la existencia de una condición de pendiente positiva desfavorable que, aunado al posible sobrepeso de estos vehículos de carga, genera una reducción de la velocidad por debajo de los 40 km/h, y que alcanza valores hasta de 20km/h en algunos casos.

1.3 HIPÓTESIS

Las bajas velocidades de circulación de los vehículos T3-S2-R4, generan mayor cantidad de energía por unidad de volumen de un pavimento flexible. Se considera que un diferencial de velocidad superior a 50 km/h, entre vehículos tipo T3-S2-R4 y ligeros (A) representa un riesgo para la seguridad vial.

1.4 OBJETIVO

Estimar el efecto que, sobre la seguridad vial y el deterioro de los pavimentos tiene la dispersión de la velocidad de circulación de los vehículos de doble remolque en tramos carreteros con pendientes ascendentes.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 EL DOBLE REMOLQUE

Debido al enfoque deseado en esta investigación, es preciso definir la configuración vehicular objeto de análisis, con el fin de conocer sus principales características físicas y de operación. Así también, se describen las situaciones a considerar en cuanto a la reducción de la velocidad y a la concentración de carga en el pavimento asfáltico se refiere. También se agregan las características permitidas por la Norma Mexicana – 012 de pesos y dimensiones y una comparación con la norma estadounidense de pesos y dimensiones, con el fin de destacar el potencial riesgo de permitir pesos más elevados.

2.1.1 Definición y características principales

Como se presenta en la literatura del siguiente modo, es preciso definir a los vehículos objeto de estudio. En tal caso, los vehículos a considerar son a los cuales normalmente se les refiere en México como vehículos con doble semirremolque, doblemente articulados, vehículos doble remolque, o bien, coloquialmente como “fules”. A diferencia del entorno mexicano, en Estados Unidos y en algunos otros países se les conoce como Long Combination Vehicles (LCV's, por sus siglas en inglés), mismos que Barton y Morrall (1998) incluyen en la mayoría de las combinaciones, tales que, en su suma total longitudinal excedan los 25 metros. Incluso, Scopatz (2001), define que los vehículos con estas configuraciones son más largos y más pesados que cualquier otro vehículo de carga, y que pueden llegar a tener dos o más espacios de carga, de los cuales al menos uno mide más de 8.53 metros de largo y tiene un peso bruto vehicular de más de 36 toneladas. Aunado a esto, Hanley y Forkenbrock (2005) agregan que los “LCV's” son usados mayormente para trasladar mercancía entre origen y destino, con la singularidad de que no tienen entregas o cargas intermedias.

2.1.2 Definición de “LCV's” según el Departamento de Transporte de EUA

Los “LCV’s” son definidos como vehículos de carga terrestre con al menos 7 ejes y dos o más configuraciones de remolque, cuyos elementos de carga son impulsados por un tractor. Dentro de las configuraciones principales que conforman los “LCV’s” destacan el “Rocky Mountain Double”, el “Turnpike Double” y el “Triple Trailer Combination”. Dentro de estos vehículos, el que se homologa al T3-S2-R4 que se presenta en la norma mexicana, es el Turnpike Double, mismo que se muestra en perfil en la Figura 2 y en vista inferior en la Figura 3.

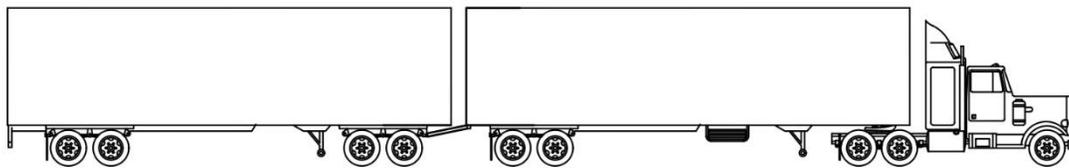


Figura 2. Visualización de los LCV's .

Fuente: propia.

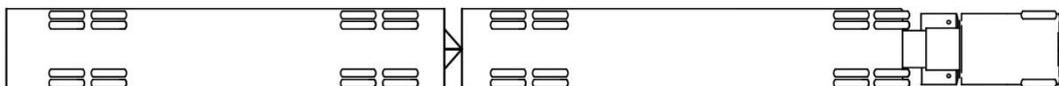


Figura 3. Vista inferior de un vehículo Turnpike Double.

Fuente: propia.

Estos vehículos tienen permitido circular por 23 estados de los Estados Unidos a través de carreteras interestatales, sólo si dicha circulación se realiza con

un permiso solicitado a la entidad en turno y con las especificaciones que la misma requiera, tal es el caso de Dakota del Sur, donde la Administración de la Seguridad de Carreteras Federales (FMCA, por sus siglas en inglés) permite la circulación de LCV's hasta con 129,000 lb (58.57 t). En el resto del Sistema Interestatal de Autovías (SIA) solo se permite que circulen vehículos de carga terrestre con un Peso Bruto Vehicular (PBV) superior a 80,000 lb (36.40 t) a menos que se especifique como el caso de Dakota del Sur. Este último valor mencionado, es el máximo permitido en el SIA para vehículos de transporte de carga de cuatro, cinco, seis y siete ejes según sea su espaciamiento entre tipo de ejes, (FHA, 2015).

2.1.3 El "Turnpike Double" y sus características de interés

El SIA no solo se tiene un control de pesos en cuestiones de PBV para estos vehículos, sino que también se tiene un control para las diferentes configuraciones de tipo de eje que se pueden presentar en los "LCV's". A fines de esta investigación, se exponen esquemáticamente los tipos de eje que componen al vehículo objeto de análisis, el cual para el caso de los Estados Unidos sería el "Turnpike Double". Para conocer a detalle la configuración y composición de los ejes de este vehículo de carga, Figura 4 y la Figura 5 muestran visualmente los tipos de eje.

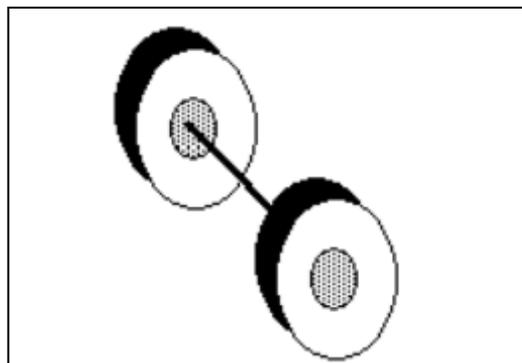


Figura 4. Eje simple de un tractocamión.

Fuente: propia.

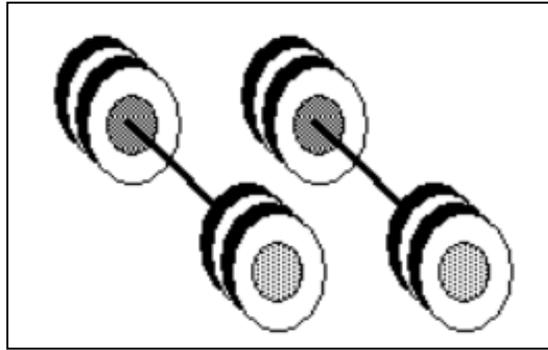


Figura 5. Eje tándem de un tractocamión.

Fuente: propia.

El número de composición por tipo de eje para el vehículo objeto de estudio es de un eje simple y cuatro ejes dobles o tándem, los cuales se muestran en la Figura 2. Para fines de esta investigación se contabilizarán de manera independiente, con el fin de igualarlo al caso mexicano, pero no significa que necesariamente el "Turnpike Double" cuente con este número preciso de tipo de ejes. Su configuración podría variar.

Ejemplificando lo anterior, la ley federal de los EUA, limita los pesos por tipo de eje de la siguiente manera:

- 20,000 lb (9.10 ton) para un eje simple.
- 34,000 lb (15.50 ton) para un eje tándem.

Por lo que el transportista deberá ser cuidadoso de que el vehículo no exceda tanto el límite de peso máximo permitido por tipo de eje como el PBV correspondiente al "Turnpike Double". De igual manera, se tiene una longitud máxima permitida para este tipo de vehículo de transporte de carga, la cual es de 114ft (34.7 m) (Federal Motor Carrier Safety Administration, 2003).

2.1.4 El Tractocamión Doblemente Articulado T3-S2-R4 según la SCT

Al igual que el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, también en México se cuenta con una ley federal de pesos y dimensiones, que es la PROY-NOM-012-SCT-2-2017 donde se especifican todas las consideraciones técnicas y operacionales de los vehículos de carga.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes define al vehículo doblemente articulado como un transporte de carga constituido por un tractocamión, un semirremolque y un remolque u otro semirremolque, acoplados mediante mecanismos de articulación. Es ahí donde se presenta la nomenclatura que le atañe, como se muestra en Tabla 1. También se caracteriza por su nomenclatura, su número de ejes y su número de llantas en la Tabla 2

Tabla 1. Nomenclatura para vehículos de transporte de carga (NOM – 012, 2017)

Clase: Vehículo o configuración	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Tractocamión	T
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S

Fuente: NOM – 012, (2017).

Tabla 2. Características de Nomenclatura, número de ejes y número de llantas del T3-S2-R4, (NOM – 2012, 2017).

Tractocamión semirremolque-remolque		
Nomenclatura	Número de ejes	Número de llantas
T3-S2-R4	9	34

Fuente: NOM – 012, (2017).

Al igual que los Estados Unidos, también se cuenta con exigencias mínimas de Peso Máximo Permitido (PMP) para el tipo de eje, así como del PBV máximo permitido para las diferentes clasificaciones vehiculares, donde también se debe mencionar que debido a las características operativas y de dimensión de los vehículos de carga terrestre, no todos pueden circular por toda la RCF. Las especificaciones máximas de PMP por tipo de eje y por tipo de carretera se muestran en la Tabla 3, así también se muestra el PBV máximo permitido para las diferentes configuraciones de vehículos de carga terrestre y el tipo de camino al cual tienen permitida la circulación en la Tabla 4.

Tabla 3. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y por tipo de carretera.

Configuración de Ejes		Vehículo o Configuración	ET 4 y ET2	B4 y B2	C	D
Sencillo	Dos llantas	C-R y T-S-R	6.50	6.00	5.50	5.00
Sencillo	Dos llantas	C y T-S	6.50	6.00	5.50	5.00
Sencillo	Cuatro llantas	C-R y T-S-R	10.00	9.50	8.00	7.00
Sencillo	Cuatro llantas	C y T-S	11.00	9.50	8.00	7.00
Motriz sencillo	Cuatro llantas	C-R y T-S-R	11.00	10.50	9.00	8.00
Motriz sencillo	Cuatro llantas	C y T-S	12.50	10.50	9.00	8.00
Motriz doble /Tándem	Seis llantas	C-R y T-S-R	15.00	13.00	11.50	11.00
Motriz doble /Tándem	Seis llantas	C y T-S	17.50	13.00	11.50	11.00
Doble / Tándem	Ocho llantas	C-R y T-S-R	17.00	15.00	13.50	12.00
Doble / Tándem	Ocho llantas	C y T-S	19.00	15.00	13.50	12.00
Motriz doble /Tándem	Ocho llantas	C-R y T-S-R	18.00	17.00	14.50	13.50
Motriz doble /Tándem	Ocho llantas	C y T-S	21.00	17.00	14.50	13.50
Triple / Tridem	Doce llantas	C-R y T-S-R	23.50	22.50	20.00	NA
Triple / Tridem	Doce llantas	C y T-S	26.50	22.50	20.00	NA

Fuente: NOM – 012, (2017).

Tabla 4. Pesos bruto vehicular máximo permitido por clase de camino y tipo de vehículo.

Configuración vehicular	N° de ejes	N° de llantas	Peso Bruto Vehicular (t)			
			ET y A	B	C	D
C2	2	6	19.00	16.50	14.50	13.00
C3	3	8	24.00	19.00	17.00	16.00
C3	3	10	27.50	23.00	20.00	18.50
C2-R2	4	14	37.50	35.50	NA	NA
C3-R2	5	18	44.50	42.00	NA	NA
C3-R3	6	22	51.50	47.50	NA	NA
C2-R3	5	18	44.50	41.00	NA	NA
T2-S1	3	10	30.00	26.00	22.50	NA
T2-S2	4	14	38.00	31.50	28.00	NA
T3-S2	5	18	46.50	38.00	33.50	NA
T3-S3	6	22	54.00	45.50	40.00	NA

T3-S1	4	14	45.50	39.00	34.50	NA
T2-S1-R2	5	18	38.50	32.20	28.00	NA
T2-S1-R3	6	22	47.50	NA	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54.50	NA	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54.50	NA	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	54.50	NA	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60.50	NA	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66.50	NA	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60.00	NA	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51.50	NA	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58.50	NA	NA	NA

Fuente: NOM-012, (2017).

2.2 IMPLICACIONES EN LA ALTERACIÓN DE LA VELOCIDAD Y DAÑO AL PAVIMENTO

Harkey *et al.* (1996), argumentan que un número considerable de vehículos de carga con grandes dimensiones puede afectar la seguridad vial de una carretera puesto que presentan problemas para operar en tramos con pendientes ascendentes (disminuyendo su velocidad), para mezclarse con el resto de la flota vehicular, para maniobras de entrecruzamiento con otros vehículos, para hacer maniobras de frenado y para ejecutar maniobras de evasión repentina.

La disminución de la velocidad de los vehículos doble remolque tiene implicaciones no solo en la seguridad vial, sino también en el daño al pavimento. Por una parte podemos hablar de una estrecha relación entre la disminución de la velocidad, de los vehículos pesados y de la necesidad de rebase de los vehículos ligeros, y que, según Grisli (2010) provoca serios conflictos con ellos. Por otra parte, Daniels (2006), menciona que los vehículos doble remolque causan un daño muy superior al de los demás vehículos de carga, haciendo un paréntesis cuando evidentemente van sobrecargados, aunque no es necesario que vaya sobrecargado en su totalidad, basta con que un solo eje del vehículo lo esté para que exista un daño excedente en el pavimento. Algunas investigaciones dentro del efecto de la velocidad en el daño al pavimento y la presión ejercida por la llanta, muestran que conforme la velocidad se incrementa, los esfuerzos longitudinales de tensión, disminuyen (Chatti *et al.*, 1996).

En un estudio realizado por el Instituto Mexicano del Transporte y mediante una metodología conformada por modelos matemáticos lineales, Lozano *et al.* (1999) desarrollaron un modelo para ciertas configuraciones de vehículos de transporte de carga terrestre para simular su paso por la superficie de rodadura, donde se cuantificó mediante modelos matemáticos lineales, que simula la deformación y la energía almacenada en el pavimento, que se relaciona directamente con la velocidad del mismo. A menor velocidad de circulación, mayor cantidad de energía transmitida a la superficie del pavimento, como se muestra en la Figura 6 a continuación.

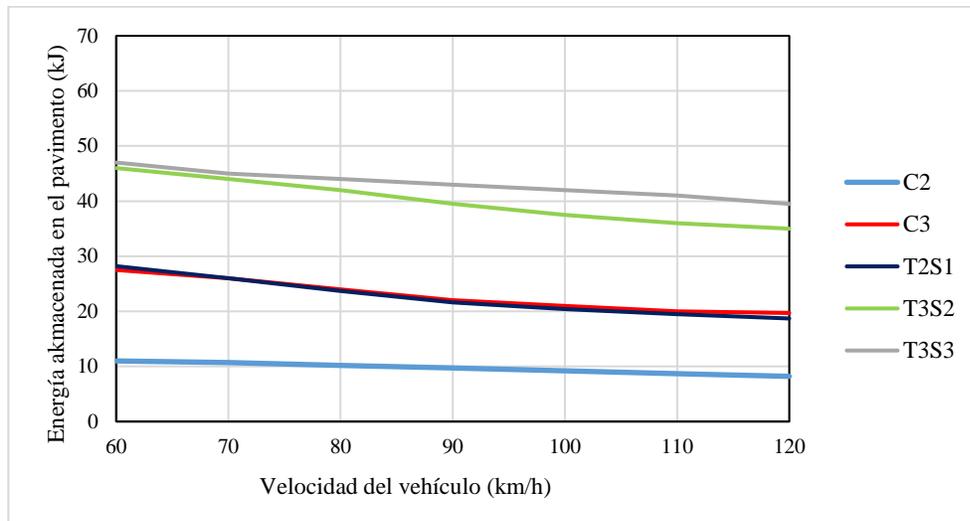


Figura 6. Variación de la energía de deformación con respecto a la velocidad, por tipo de vehículo.

Fuente: Lozano *et al.* (1999).

Donde se puede observar que para configuraciones menores al T3-S2-R4, el valor de energía almacenada en el pavimento resultó ser mayor para el vehículo más pesado y que circulaba a menor velocidad. Por lo que aparentemente se puede esperar una mayor cantidad de energía almacenada en el pavimento para un vehículo de carga de mayores dimensiones que se desplaza a la misma velocidad.

2.2.1 Modelo a emplear para el análisis de seguridad

Una de las cuestiones a estudiar en esta investigación es la disminución de la velocidad en carreteras con pendientes ascendentes de los vehículos doblemente articulados con los vehículos ligeros. La literatura muestra en Agent y Pigman (2002), que la mayoría de los accidentes donde se ven implicados los vehículos pesados, en la red carretera estadounidense, suceden en pendientes ascendentes. La mayoría de los accidentes tipo colisión delantera/trasera en los que se ven envueltos los vehículos pesados, se deben a una diferencia de 40-50 km/h entre los vehículos involucrados y, aunado a esto, Othman y Thompson (2007), mencionan que un valor superior al 4% en pendiente vertical puede ser mucho más riesgoso, en estudios realizados para carreteras suecas. Asimismo, Fu *et al.* (2011),

argumenta que la longitud del tramo con pendiente ascendente tiene un impacto importante en las carreteras en China.

Figura 7 muestra el comportamiento de un tractor semi-tráiler en la red carretera francesa, cuyo peso oscila entre 15-38 toneladas, que recorre una distancia dada entrando con una velocidad de 90km/h, donde se aprecia que con diferentes pendientes ascendentes, así como si se encuentra vacío o completamente cargado, existe una reducción importante de la velocidad que pudiera generar conflictos con los vehículos que se dirijan en la misma dirección y se encuentren a una distancia cercana a él:

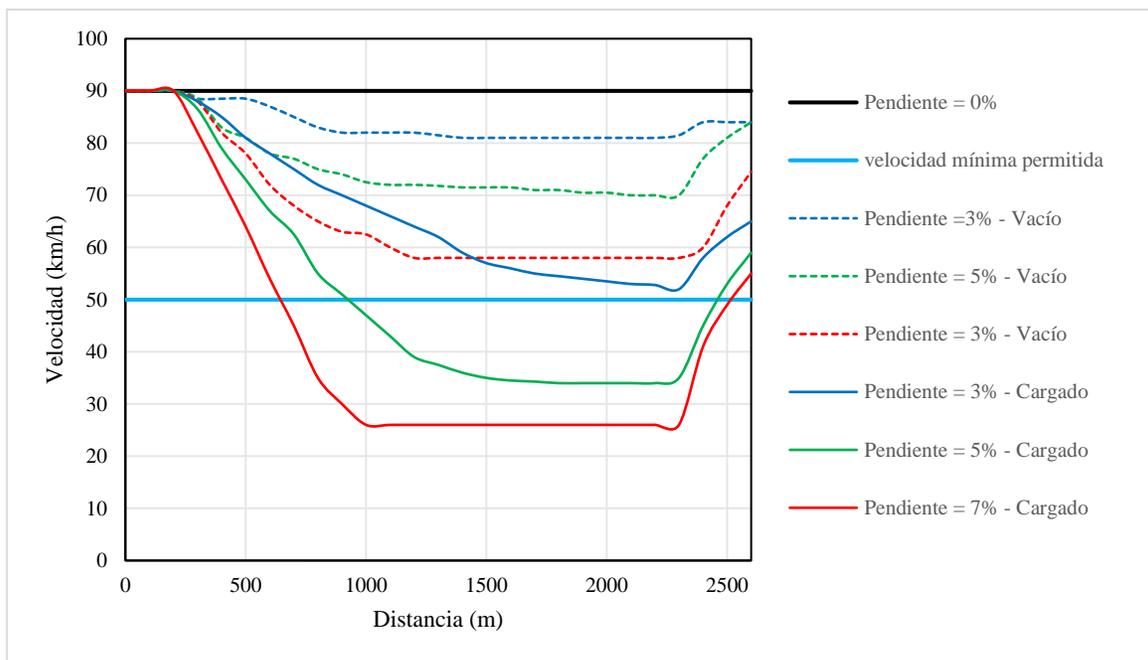


Figura 7. Relación entre velocidad, distancia y pendiente de un vehículo de 5 ejes en Francia en tramos con tres valores de pendiente longitudinal para el caso vacío y cargado.

Fuente: Cerezo y Conche, (2016).

Por lo que Cerezo *et al.* (2016) muestran en la Figura 8 la velocidad mínima en tramos ascendentes/descendentes en función de la pendiente longitudinal para dos diferentes cargas y concluye que el valor de pendiente límite para un semi-tráiler de cinco ejes es igual a 3.2 por ciento, que es el punto donde se alcanza la velocidad mínima de circulación en Francia.

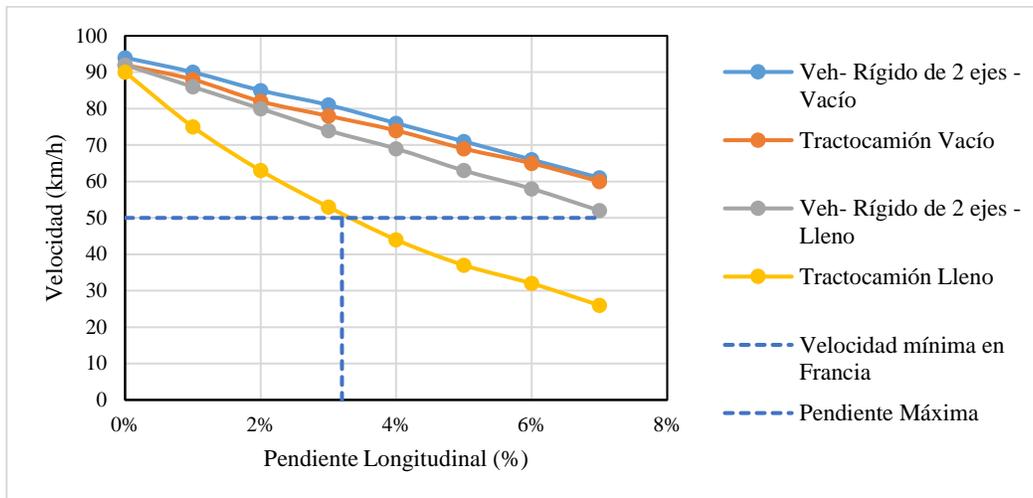


Figura 8. Relación entre pendiente, velocidad y tipo de vehículo pesado.

Fuente: Cerezo y Conche, (2016).

Una vez que se ha destacado la importancia de la velocidad en términos de almacenamiento de energía – daño al pavimento y los posibles riesgos de que los vehículos T3-S2-R4 disminuyan su velocidad repentinamente, el parámetro velocidad se vuelve la variable más importante en la investigación. De esta forma resulta esencial describir la forma de cómo se evalúa la misma en carreteras y cuáles son las formas de tomar una muestra representativa en un tramo con un TDPA elevado.

Después de hacer una consulta en la literatura se llega a la decisión de seguir el enfoque citado en el reporte de nombre Métodos y Prácticas para Establecer los Límites de Velocidad elaborado por la Administración Federal de Carreteras y el Instituto de Ingenieros del Transporte de Estados Unidos. Lo anterior se toma en cuenta debido a la descripción de los procedimientos a elaborar y al enfoque citado en dichos manuales, que resultan ser de utilidad para fines de esta investigación.

El enfoque de los estudios que se realizan para la toma de velocidades se hace mediante el Enfoque de Ingeniería, el cual se usa para establecer un límite de velocidades, que consiste en un proceso de dos etapas donde la velocidad se obtiene mediante el percentil 85 de velocidad, la velocidad de diseño del camino y algunos otros criterios. Para la obtención del percentil 85 de velocidad, situación

que nos atañe, se utilizan enfoques que pueden ser de utilidad para fines de esta investigación y que es descrito en el manual de nombre Métodos y Prácticas para Establecer los Límites de Velocidad: el Método de Velocidades de Operación.

2.2.2 Método de velocidades de operación

Es el típico procedimiento para establecer límites de velocidad cercanos al 85 por ciento de la velocidad a flujo libre. El método de la velocidad del percentil 85 resulta ser una buena metodología debido a que refleja el juicio de lo que la mayoría de los conductores desean, considerando condiciones razonables del tráfico y las características operativas de la carretera.

Este percentil es una buena representación de las velocidades de operación, que es a la cual los vehículos circulan bajo condiciones de flujo libre, y no es más que la velocidad a la cual el 85 por ciento de los conductores o vehículos de cierta denominación viajan en una locación en particular, (AASHTO,2001). La recolección de datos es esencial tanto para establecer velocidades de operación como para la resolución de hipótesis relacionadas con las velocidades actuales de una carretera. Una adecuada planeación del proceso de captación de datos debe hacerse eficientemente, de manera que el proceso represente la situación actual. Este proceso presenta la necesidad de una metodología detallada. Dicho proceso podría ser sencillo si se tiene el equipo adecuado, situación que requiere una pequeña muestra representativa de los datos, con el fin de obtener aproximaciones cercanas a la realidad. Los estudios de velocidad tienen el fin de evaluar cuestiones operacionales y de seguridad de un tramo específico de una carretera, (FHA, 2004).

2.2.3 Método de selección individual

Para la obtención de la velocidad existen dos métodos de medición, tanto directa e indirectamente, uno de ellos es el “Método de selección individual”, para el cual se requiere de una pequeña muestra de datos tomada en periodos de tiempo reducidos. Estos estudios están relacionados con investigaciones no de alcances superiores, sino de objetivos pequeños, como es el caso de esta investigación.

La herramienta más económica y que otorga una precisión aceptable para realizar las mediciones es la pistola láser o la pistola radar. El principio de estas últimas consiste en el empleo del Efecto Doppler para la determinación de la velocidad, el cual emite un haz de ondas de alta frecuencia hacia un vehículo en movimiento. Estas ondas se reflejan en el vehículo de interés y regresan al radar. El cambio en la frecuencia de ondas, determina la velocidad del vehículo. Se recomienda realizar el estudio en tramos carreteros rectos, debido a la no influencia de la interferencia angular. La precisión de las mediciones dependerá del equipo empleado y de la experiencia del aforador.

2.2.4 Muestra representativa de velocidades

Para establecer un perfil de las velocidades que circulan por un punto, se debe determinar cuántas velocidades son las necesarias para obtener una muestra que ejemplifique la situación real. El número de vehículos dependerá del nivel de confianza requerido y del análisis estadístico de los datos. El Manual de Estudios de Ingeniería de Transporte, elaborado por el ITE (2009), presenta la para la obtención de la muestra representativa para la estimación del percentil 85 de velocidad:

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2} \quad (1)$$

Ecuación 1. Fórmula para la obtención de la muestra representativa de velocidades.

donde,

N = Número mínimo de velocidades a obtener

S = Desviación estándar estimada de la muestra (km/h)

K = Constante del nivel de confianza deseado

U = Constante del percentil de velocidad deseado

E = Error permitido en la estimación de la velocidad (km/h)

Debido a diferentes factores tanto físicos como operacionales de los vehículos de carga, la obtención de velocidades para estos vehículos se debe de realizar en un periodo a parte de la medición de los vehículos ligeros, puesto que las características de operación son distintas. Para dicha muestra representativa, los parámetros se extraen de las recomendaciones propuestas por el manual. Los valores a considerar por parte del investigador se destacan a continuación.

2.2.4.1.1 Parámetro S , “Desviación estándar estimada de la muestra”

Lo ideal sería considerar la desviación con base en la experiencia del investigador en otros estudios realizados con antelación, pero como no es el caso, se recomienda calcular la desviación estándar de manera tradicional con los datos disponibles y así revisar si la muestra representativa fue suficiente, si no, será necesario recolectar más datos para aproximar este valor y obtener una muestra ideal.

2.2.4.1.2 Parámetro K , “Constante del nivel de confianza deseado”

El nivel de confianza, expresado por la constante K , es la probabilidad que la diferencia entre la velocidad media de la muestra y la velocidad promedio verdadera de la locación evaluada es menor al error permitido. Los valores permitidos para la constante K , para los niveles de confianza deseados son mostrados en la Tabla 5 para cualquier muestra superior a las 100 unidades.

Tabla 5. Constante correspondiente al nivel de confianza.

Constante Correspondiente al Nivel de Confianza	
Constante K	Nivel de Confianza (%)
1.00	68.30
1.50	86.60
1.64	90.00
1.96	95.00
2.00	95.50
2.50	98.80
2.58	99.00
3.00	99.70

Fuente: Box y Oppenlander, (1976).

2.2.4.1.3 Parámetro U , “Constante del percentil deseado”

Este parámetro U es la constante correspondiente al percentil deseado, que en este caso es el percentil 85. La Tabla 6 muestra las constantes correspondientes a algunos otros percentiles según sea el caso. A manera de regla, se recomienda que la muestra no sea menor a 30 unidades, para que los supuestos estadísticos de los demás parámetros tengan validez.

Tabla 6. Constante correspondiente al percentil deseado.

Constante Correspondiente al Percentil Deseado	
Constante U	Percentil de Velocidad
0.00	50
1.04	15 u 80
1.48	7 o 93
1.64	5 o 95

Fuente: ITE, (2009).

2.2.4.1.4 Parámetro E , “Error permitido en la estimación de la velocidad”

Es el reflejo de la precisión requerida en la estimación de la velocidad. Tiene una tolerancia aceptable y varía de ± 1.6 a 8.0 km/h. En otras palabras, si el analista desea obtener un porcentaje elevado de certeza que es verdad que la velocidad promedio de la población se encuentra en el intervalo deseado de error de la muestra seleccionada.

2.3 LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Una de las formas más completas de definir la estructura del pavimento es la que proporciona Mc Mahon *et al.* (1969), que es el conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son la de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, que resista a los esfuerzos ocasionados por el tránsito vehicular y a los efectos del clima principalmente. Las funciones principales de un pavimento son las de brindar comodidad, seguridad y economía a los usuarios, aunque también es indispensable que sea durable y que tenga condiciones adecuadas de permeabilidad. Para que esta situación se dé

también es importante que las capas inferiores se encuentren en condiciones ideales, pudiendo ser de menor calidad con relación a las capas superiores (Olivera, 1986). Lo anterior sucede debido a que la propagación de los esfuerzos se da en los materiales que tienen más calidad y mejor resistencia, que se ven mitigados ante las características de los materiales próximos a la superficie, dejando los pequeños esfuerzos a las capas inferiores.

A fines de esta investigación, se tiene un especial interés en la capa más próxima a la superficie, que se define como la capa de rodamiento o rodadura. La capa de rodamiento, puede ser principalmente de dos tipos de pavimentos: rígidos y flexibles, mismos que se detallan en la siguiente sección.

2.3.1 Tipos de pavimento

Principalmente los pavimentos se diferencian por los materiales que lo conforman y no por la forma en como distribuyen los esfuerzos que reciben o por las deformaciones que transmiten a las capas inferiores. Aun así, podemos decir que los siguientes son los dos grandes tipos de pavimentos: el pavimento rígido y el pavimento flexible. Definiendo al rígido como un pavimento que está conformado por una losa de concreto que es la superficie de rodamiento y al pavimento asfáltico, que lo conforma una carpeta asfáltica. Lo anterior hace referencia únicamente a la capa de rodadura.

2.3.1.1.1 Pavimento rígido

Para el primer caso, Olivera (1986) menciona que las cargas ejercidas por el tráfico se transmiten por toda la superficie de la losa y de las adyacentes, quienes trabajan en colaboración con la que está recibiendo directamente las cargas. Este pavimento no puede ceder a las deformaciones de las capas inferiores, puesto que esto ocasionaría una falla estructural. Cualquier esfuerzo permanente de los suelos bajo la losa es absorbido por la resistencia a tensión de la misma (Rico *et al.*, 1977). Se recomienda que la losa de concreto se coloque sobre una capa denominada sub-base, que cuenta con las especificaciones necesarias para evitar la migración superior de finos hacia la superficie, situación que ocasionaría fallas diversas en la

losa. A continuación se muestra en la Figura 9, la representación esquemática de la sección que compone a un pavimento rígido.

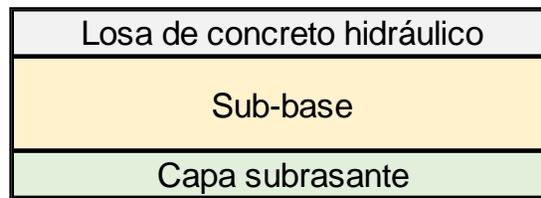


Figura 9. Capas que conforman a un pavimento rígido.

Fuente: Olivera, F; (1986).

Donde los espesores dependerán del diseño propuesto y de las características de los materiales disponibles.

2.3.1.1.2 Pavimentos flexibles (de interés para nuestra investigación)

Están compuestos por una carpeta asfáltica, que es la superficie de rodamiento. Esta capa es delgada y está compuesta por material bituminoso de alto costo y alta calidad. La transferencia de cargas de los vehículos hacia las capas inferiores se da mediante la fricción y cohesión de las partículas de los materiales. Por su parte la carpeta asfáltica tiene características de flexión, por lo que tiene la capacidad de deformarse en el momento en el que recibe la carga, para después regresar a su forma original sin que se rompa o falle (Olivera, 1986). Se puede decir que para este caso, el pavimento depende de la calidad fundamentalmente del material de la terracería, puesto que representa el apoyo. La Figura 10 muestra representa la sección de un pavimento flexible, donde los espesores dependerán del diseño propuesto y de las características de los materiales disponibles.

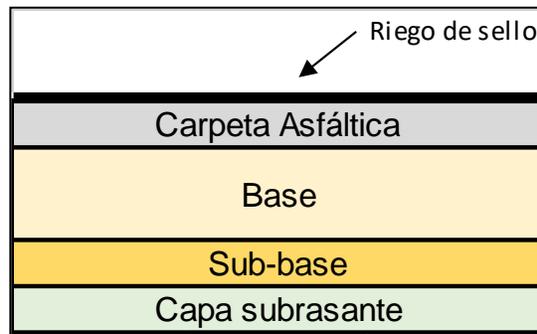


Figura 10. Capas que conforman a un pavimento flexible.

Fuente: Olivera, (1986).

Las principales características fundamentales de un pavimento flexible son la resistencia estructural, la capacidad deformable, la durabilidad, el costo, los requerimientos de conservación y la comodidad para el usuario; dichos elementos en su conjunto buscan una armonía de manera que cumpla con las especificaciones mínimas a las que fue diseñado, buscando optimizar procesos y prolongar la vida útil del mismo.

2.3.2 Deterioro de pavimentos asfálticos

Las deformaciones permanentes y el fenómeno de fatiga son considerados los dos eventos con más preponderancia en la vida útil de los pavimentos asfálticos. Dichos eventos pudieran presentarse con anticipación y están relacionados con tramos carreteros que cuentan con un alto flujo vehicular. Pero no es el alto flujo vehicular lo único que genera la presencia de estos fenómenos, sino el elevado número de configuraciones vehiculares que presentan pesos más elevados, o bien, un número elevado de configuraciones que circulan con sobrepeso por la carretera, la presencia de humedad en capas subyacentes, la baja calidad de los materiales con los que la estructura del pavimento fue elaborada, etc.

El aumento de la presencia de deformaciones y fatiga en la estructura del pavimento puede deberse a la pobre aplicación y análisis del pavimento flexible, así como de la falta de atención por medio de las autoridades para identificar los componentes preponderantes que originan este fenómeno, (Behiry, A., 2012). Para

que este análisis se haga de manera adecuada, es necesario conocer los dos fenómenos presenciales, tanto sus orígenes como sus tratamientos post-aparición, de manera que ambos puedan mitigarse y prevenirse. Un factor clave propuesto por Vaiana *et al.* (2012), es el que tienen las interacciones entre llanta y la superficie del pavimento, puesto que afecta directamente la seguridad vial de los demás vehículos. Aunque, como menciona Li *et al.* (2013) cabe destacar que esto no está necesariamente ligado a la tasa de accidentes de una autovía, sino que hay otros factores que podría tener más importancia. Estas interacciones, conforme pasa el tiempo pueden llegar a acentuarse en el pavimento, originando surcos o “roderas” que podrían tener problemas para los usuarios. A continuación se profundiza en estos dos eventos antes mencionados, destacando la importancia de su estudio para el conocimiento del fenómeno generado preponderantemente por el transporte de vehículos de carga.

2.3.2.1.1 Deformaciones permanentes

Las deformaciones permanentes son uno de los más serios problemas relacionados con los pavimentos asfálticos. Behiry (2012) menciona que si la compresión vertical es elevada, la deformación permanente ocurre en la superficie de la estructura del pavimento debido a la sobrecarga que se presenta, generando la presencia de surcos o “roderas”. Algunas evidencias de que el pavimento está sufriendo deformaciones, se presentan cuando, por ejemplo, se forman depresiones ocasionadas por el flujo vehicular en las orillas de los carriles que hace que se empiece a observar agrietamiento y desprendimiento de partículas en el patrón paralelo al flujo del tráfico sobre el pavimento (Tian *et al.*, 2017). Las dos causas principales que generan estas depresiones longitudinales son la presencia de deformación permanente en la capa subrasante y la existencia de deformación permanente en una de las capas de asfalto, donde usualmente es la más superficial.

Si bien las consideraciones estáticas que se hacen para entender el modelo de daño al pavimento, funcionan bien para vehículos ligeros a bajas velocidades, Liu (2015), expone que las consideraciones dinámicas de daño al pavimento, emitidas por un vehículo de transporte de carga, puede hacer que este fenómeno

se asemeje más a la realidad, puede a la vez también puede brindar una descripción más detallada del fenómeno. La dinámica en la carga de los vehículos de transporte de carga acelera el proceso de deterioro de los pavimentos. Es necesario definir en este punto que esta investigación solo tomará en cuenta la capa conocida como “de rodadura”, aunque las fuerzas ejercidas sobre la estructura del pavimento también presentan alcances a capas inferiores.

En un estudio del planteamiento de un modelo de interacción vehículo/carretera, Romero *et al.* (2017) propusieron al pavimento como un modelo de elemento finito y al vehículo como un modelo variable. Los efectos del vehículo y la infraestructura fueron analizados con diferentes condiciones operacionales de manera que se notaran las repercusiones dinámicas del vehículo sobre la infraestructura. La Figura 11 muestra la deflexión promedio ejercida en el pavimento y su variación con la velocidad.

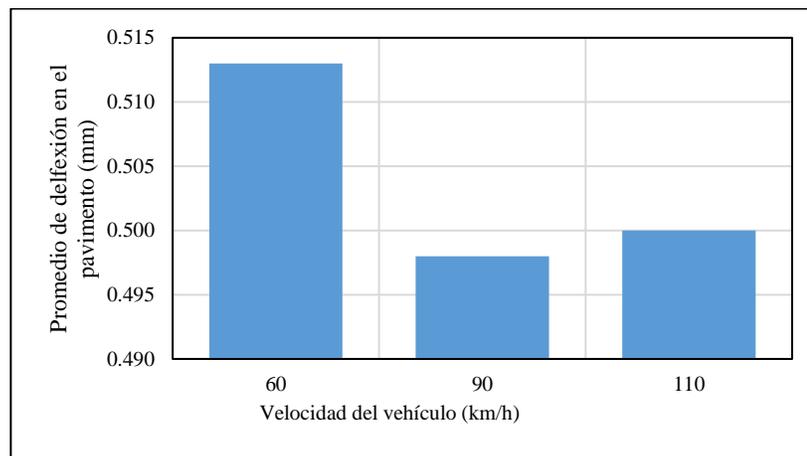


Figura 11. Deflexión promedio ejercida en el pavimento y su variación con la velocidad.

Fuente: Romero *et al.* (2017).

Donde se observa que a una menor velocidad la deflexión ejercida en el pavimento presenta valores mayores, los cuales van disminuyendo conforme la velocidad aumenta.

2.3.2.1.2 Fatiga

El agrietamiento por fatiga es considerado uno de los dos principales problemas que se presenta en los pavimentos flexibles. Se le llama coloquialmente “piel de cocodrilo” debido al patrón de espaciamiento que presenta entre las grietas. Dicho problema, según Garnica *et al.* (2005) es causado por la falla de la capa más superficial debido a la carga repetida del tráfico, que pudiera acelerarse si una cantidad considerable de vehículos de carga circula con un peso superior al inicialmente considerado para el cual el pavimento en turno fue diseñado. Así, es resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica. Se considera que el agrietamiento por fatiga está asociado más a un problema estructural, que a uno de calidad de materiales.

Los esfuerzos que se ejecutan en la superficie del pavimento flexible de acuerdo a Behiry, A., (2012) son los esfuerzos horizontales de tensión en el fondo de la capa de mezcla asfáltica y el esfuerzo de compresión vertical en la parte superior de la capa siguiente. Si los esfuerzos horizontales de tensión son excesivos, se podrán entonces observar agrietamientos superficiales y el pavimento tenderá a fallar por fatiga. Aunado a lo que se mencionó anteriormente, Garnica *et al.* (2005) argumentan también que los materiales que se encuentran en la parte inferior de la carpeta asfáltica deben ser lo suficientemente resistentes entre sí para soportar las tensiones ejercidas, ya que es el punto donde comienza la fisura en caso de que la resistencia a la tracción de la carpeta asfáltica sea inferior a las fuerzas de tensión ejercidas. Dicho fenómeno se aprecia usualmente en las huellas por donde las cargas pesadas se aplican. Las fisuras iniciales podrían ser un preámbulo de la aparición de la fisura por fatiga, que posteriormente se unirán con otras, ocasionando así el fenómeno visible de la “piel de cocodrilo”. Si también se menciona que este fenómeno no se reconoce a tiempo y sobre esto, no se hacen labores de mantenimiento pertinentes, se podrían presentar entonces desprendimientos de bloques de carpeta asfáltica, los cuales podrían generar la aparición de los denominados “baches” sobre la superficie de la carretera. La Figura 12 muestra un esquema de las fuerzas de tensión ejercidas en el pavimento.

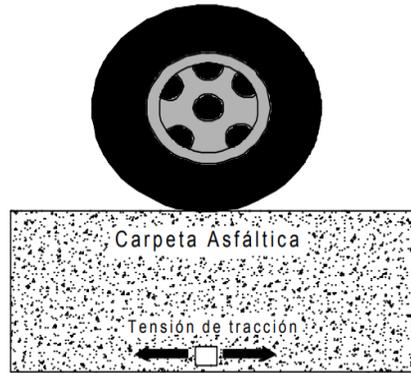


Figura 12. Fuerza de tracción en la parte inferior de la carpeta asfáltica.

Fuente: Garnica *et al.* (2005).

2.3.3 Modelo de almacenamiento de energía y deterioro

El siguiente análisis tiene que ver con la energía ejercida en el pavimento que los vehículos pesados ocasionan cuando su velocidad se ve disminuida. La energía almacenada o recibida en un pavimento se relaciona directamente con la respuesta al esfuerzo-deformación durante el paso de una llanta con una carga dada. Romero *et al.* (1990, 2013), validaron este enfoque en el que la energía almacenada en el pavimento, está relacionada con el deterioro del mismo, en el caso de la deformación permanente. Dicha validación se basó en datos de la AASHO. La Figura 13 ilustra esta relación.

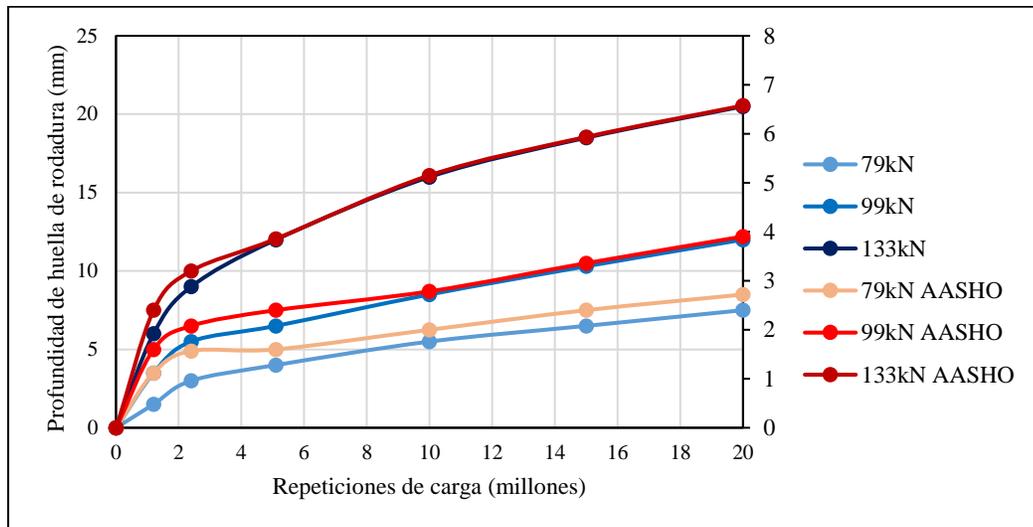


Figura 13. Comparación de resultados obtenidos del enfoque de energía propuesto en comparación con el reportado por AASHO (1992).

Fuente: Romero (2013).

De acuerdo a este modelo, el pavimento se compone de un conjunto de ladrillos asfálticos no acoplados, cuya longitud coincide con la longitud de la pisada de la llanta, como se muestra en la Figura 14 y la Figura 15 correspondientemente. De tal manera, la fuerza de presión aplicada se distribuye de manera uniforme mientras que la forma de la huella del neumático coincide con la longitud y ancho de los elementos del pavimento como se muestra en la Figura 16 y la Figura 17 correspondientemente. La altura de estos ladrillos se determina de acuerdo a criterios estándar de diseño de pavimento, mismos que están soportados por una subrasante infinitamente rígida. De esta manera, el alcance del modelo empleado se limita a evaluaciones comparativas de los efectos potenciales que tienen tanto del nivel de carga como la velocidad del vehículo, sobre el deterioro de la capa asfáltica del pavimento. La Figura 17 ilustra este modelo.

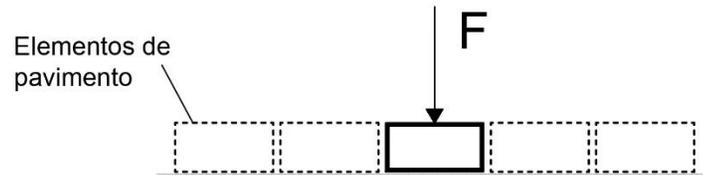


Figura 14. Modelo físico del pavimento para la energía de deformación.

Fuente: Romero *et al.* (2000)

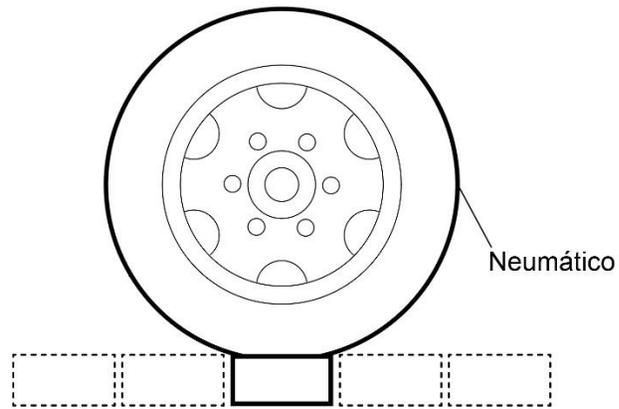


Figura 15. Modelo físico del pavimento para la energía de deformación.

Fuente: elaboración propia

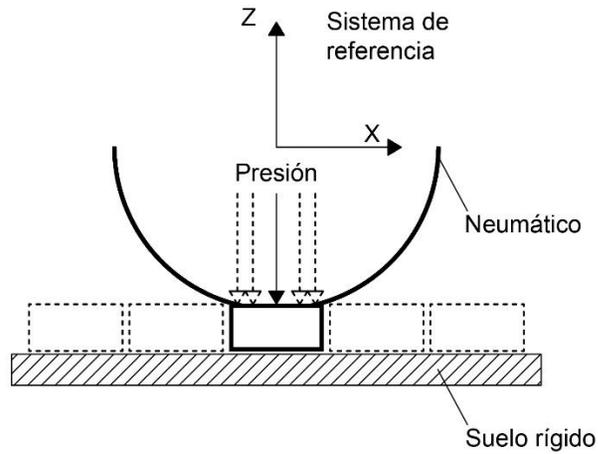


Figura 16. Modelo físico del pavimento para la energía de deformación.

Fuente: Romero *et al.* (2000)

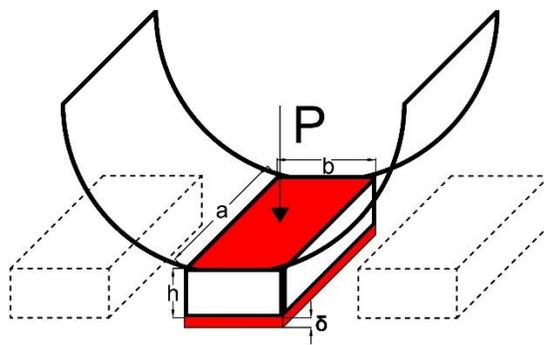


Figura 17. Modelo simplificado del pavimento para la obtención de la energía de deformación.

Fuente: Romero *et al.* (2000)

La Figura 17 muestra el modelo de la energía de deformación por unidad de volumen, en donde la energía almacenada U (Joules) en el bloque de pavimento, asociada a una carga P (N) y a una deflexión δ (m) que está dada por (Beer and Jhonston, 1982):

$$U = \left(\frac{1}{2}\right) * P\delta \quad (2)$$

Ecuación 2. Energía de deformación

donde la deflexión δ , se calcula de acuerdo a la Ley de Hooke, en donde se emplea un módulo dinámico para la mezcla asfáltica (E_{DM}), como una función de la temperatura de la mezcla y el tiempo de residencia de la llanta en el bloque de pavimento. De esta manera, la deformación delta está dada por:

$$\delta = \frac{P \cdot h}{AE_{DM}} \quad (3)$$

Ecuación 3. Deflexión

donde,

h = altura del bloque (m)

A = área de contacto llanta-bloque (m), correspondiente a axb de la Figura 17

E_{DM} = Módulo elástico de la mezcla asfáltica (Pa),

E_{DM} está dado por la siguiente ecuación (Collop y Cebon, 1995) (Pa):

$$E_m = E_b \left[1 + \frac{257.5 - 2.5VMA}{n(VMA - 3)} \right]^n \quad (4)$$

Ecuación 4. Módulo de la mezcla asfáltica.

donde E_b es el módulo del bitumen, dado por la siguiente ecuación que proponen Collop y Cebon, (1995):

$$E_b = 1.157 * 10^{-7} t_l^{-0.368} 2.178^{-PI^R} (T_{RB}^R - T_{asp})^5 \quad (5)$$

Ecuación 5. Módulo del bitumen.

donde

T_{asp} = temperatura de la capa de asfalto (°C);

T_{RB}^R = temperatura de reblandecimiento de la mezcla bituminosa recuperada (°C);

PI^R = índice de penetración de la mezcla bituminosa;

Las propiedades T_{RB}^R y PI^R , serán obtenidas a partir de la penetración inicial P^I del bitumen usando las siguientes ecuaciones empíricas:

$$P^R = 0.65P^I \quad (6a)$$

Ecuación 6. Penetración del bitumen.

$$T_{RB}^R = 98.4 - 26.35 \log(P^R) \quad (6b)$$

Ecuación 7. Temperatura de reblandecimiento de la prueba de anillo y bola del bitumen recubierto.

$$PI^R = [27 \log P^I - 21.65] / [76.35 \log P^I - 232.82] \quad (6c)$$

Ecuación 8. Índice de penetración del bitumen recubierto.

donde,

P^I = penetración inicial del bitumen;

t_l = tiempo de carga (s);

El tiempo de carga efectivo t_l se estimará mediante la siguiente fórmula:

$$\log(t_l) = 5 \times 10^{-4} h_{asp} - 0.2 - 0.94 \log(v) \quad (6d)$$

Ecuación 9. Tiempo de carga efectivo.

donde,

h_{asp} = espesor de la capa de asfalto (mm);

v = velocidad (km/h);

$$n = 0.83 \log \left[\frac{4 \times 10^4}{E_b} \right];$$

VMA = porcentaje de huecos en el agregado mineral = porcentaje de huecos en la mezcla asfáltica + porcentaje de aglutinante bituminoso.

Es importante mencionar que los parámetros descritos anteriormente son de carácter idealizado, o sea, se proponen los valores que el autor desarrolló, que se encuentran dentro de los rangos permisibles de diseño, mismos que se presentan a continuación.

$$0.01s < t_i < 0.1s$$

$$-1.0 < PI^R < 0.1$$

$$-1.0 < (T_{RB}^R - T_{asp}) < 0.1$$

$$12\% < VMA < 30\%$$

$$E_b > 5\text{MPa}$$

Las fuerzas sobre los bloques de pavimento se consideran, como las derivadas a la carga estática, de acuerdo a una distribución ideal de la carga distribuida sobre el total de neumáticos.

Considerando que un segmento de camino está compuesto por una serie de elementos y que cada uno de estos está sujeto a cargas estáticas asociadas a los vehículos en estudio (T3-S2-R4), la energía total en una serie de instantes i que el j -ésimo vehículo transmite al pavimento, está dada por (7):

$$U_{ijk} = \sum_{j=1}^{j=m} \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=32} \left\{ \left[\left(\frac{P_k \delta_k}{2} \right) \right]_i \right\}_j \quad (7)$$

Ecuación 10. Energía total que el j -ésimo vehículo genera al pavimento.

donde, k es el número de llantas del vehículo T3-S2-R4 (32), i es igual al número de instantes y depende de la distancia recorrida y de la velocidad del vehículo; así también j es igual al número de vehículos considerados.

3. METODOLOGÍA

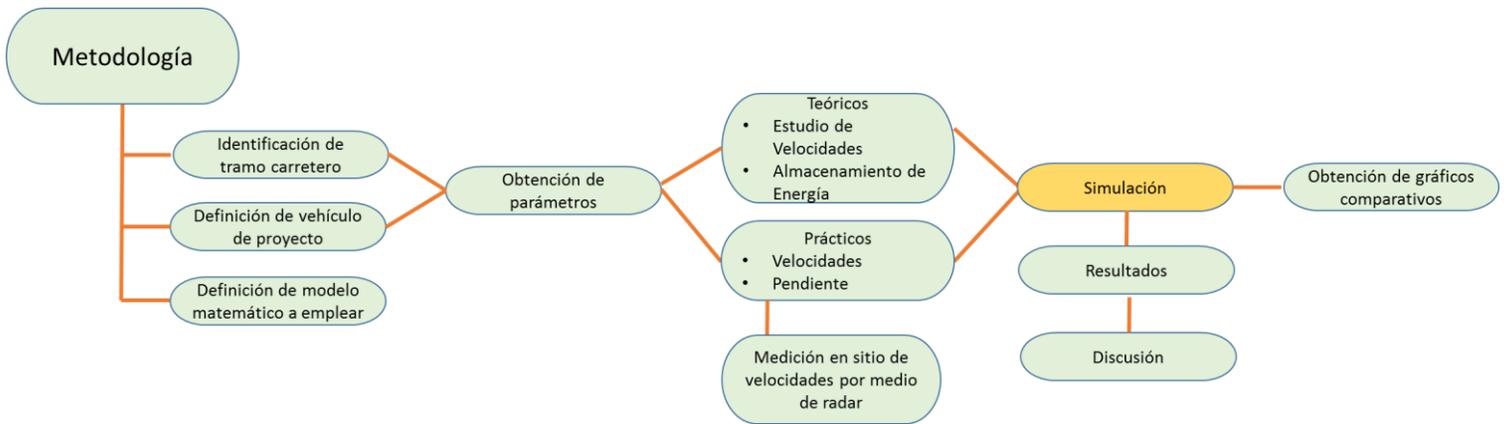


Figura 1. Diagrama de metodología

Si lo que se pretende es realizar una metodología de trabajo para un modelo que tomará en cuenta la dispersión de la velocidad en un flujo vehicular carretero con fines de seguridad vial, para sí considerar estas velocidades en el modelo de almacenamiento de energía (deterioro de pavimentos) se deben tomar en cuenta las configuraciones vehiculares pertinentes en las variaciones que pudieran presentar. Dichas variaciones principalmente radican en sí dicho vehículo circula con carga o en su defecto, sin ella.

El fin de la siguiente metodología es la de estimar las repercusiones que los elevados intervalos de velocidad en la flota vehicular generan, haciendo énfasis en el efecto de los T3-S2-R4 sobre los vehículos ligeros, de manera que sirva de evidencia y se aprecie el impacto que la variable velocidad tiene en la seguridad vial y en el deterioro de pavimentos. Se considera un tramo carretero que presenta un elevado TDPA tanto de vehículos ligeros como de vehículos T3-S2-R4, así también, se selecciona dicho tramo debido a la pendiente pronunciada que presenta en alrededor de 5.5 kilómetros que a su vez, ha sido objeto de crítica y presión social por parte de la población debido al número de accidentes relacionados con los vehículos de tipo T3-S2-R4.

3.1 IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO CARRETERO

3.1.1 Definición de tramo carretero.

Para determinar el área de estudio donde se llevará a cabo esta metodología es preciso destacar las razones por las cuales se realizó dicha selección. Normalmente se hace respondiendo a un llamado de la sociedad, a una investigación por parte de alguna entidad gubernamental o científica, debido a los riesgos observados con el paso del tiempo. Una sección o tramo carretero elegido debe contener ciertas características pero sobre todo debe ser homogénea. Una sección homogénea es aquella en la que:

- El área del camino es consistente
- Las características del camino son consistentes (anchos de carril, hombros de camino, superficie regular, etc.)

Se debe tomar en cuenta que se trabaja en un tramo con pendiente ascendente considerable (mayor del 3% como mínimo). Así también, se pretende encontrar un tramo carretero donde la presencia de vehículos de transporte de carga terrestre sea elevada.

3.2 DEFINICIÓN DEL VEHÍCULO DE DISEÑO

La selección en este punto tiene como intención demostrar la importancia que tiene el T3-S2-R4 tanto en implicaciones de seguridad vial como de daño al pavimento. Se decide destacar el porcentaje de vehículos de la configuración objeto de análisis que existen en la red nacional, con el fin de señalar la importancia que tienen en la RCF.

3.2.1 Descripción de modelo matemático a emplear

La intención de este punto es la de destacar por qué el modelo Newtoniano es una selección precisa y confiable para evaluar el daño al pavimento emitido por los vehículos de transporte de carga terrestre T3-S2-R4, así como la toma de velocidades en campo para obtener aproximaciones de la situación real.

3.3 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS DIFERENCIALES DE VELOCIDAD

3.3.1 Velocidades medidas en campo.

El nombre que reciben los estudios es el de “Estudio de velocidad de punto” y se refiere a locaciones específicas donde es de interés del investigador, saber el valor del parámetro velocidad, bajo condiciones del tráfico y condiciones tanto climáticas como operacionales en un preciso momento. Es de interés del investigador saber cuáles son las velocidades que se medirán, así como las configuraciones vehiculares que son de interés para el mismo, de manera que se haga énfasis en ellas, o bien, si lo que se busca es la obtención del parámetro de toda la flota vehicular, esta deberá hacerse bajo condiciones de flujo libre, evitando horas de saturación, donde la capacidad de la vía este viéndose alcanzada por la alta demanda vehicular, (ITE, 2009).

3.3.2 Método de selección individual

Para la obtención de la velocidad existen dos métodos de medición, tanto directa e indirectamente, uno de ellos es el “Método de selección individual”, para el cual se requiere de una pequeña muestra de datos, tomada en periodos de tiempo reducidos. Estos estudios están relacionados con investigaciones no de alcances superiores, sino de objetivos pequeños, como es el caso de esta investigación.

La herramienta más económica y que otorga una precisión aceptable para realizar las mediciones es la pistola láser o la pistola radar. El principio de estas últimas consiste en el empleo del Efecto Doppler para la determinación de la velocidad, el cual emite un haz de ondas de alta frecuencia hacia un vehículo en movimiento. Estas ondas se reflejan en el vehículo de interés y regresan al radar. El cambio en la frecuencia de ondas, determina la velocidad del vehículo. Se recomienda realizar el estudio en tramos carreteros rectos, debido a la no influencia de la interferencia angular. La precisión de las mediciones depende del equipo empleado y de la experiencia del aforador.

3.3.3 Muestra representativa de velocidades

Para establecer un perfil de las velocidades que circulan por un punto, se debe determinar cuántas velocidades son las necesarias para obtener una muestra que ejemplifique la situación real. El número de vehículos dependerá del nivel de confianza requerido y del análisis estadístico de los datos. El Manual de Estudios de Ingeniería de Transporte ITE (2009), presenta la Ec. (1) para la obtención de la muestra representativa para la estimación del percentil 85 de velocidad.

Debido a diferentes factores tanto físicos como operacionales de los vehículos de carga, la obtención de velocidades para estos vehículos se realiza en un periodo distinto del considerado para los vehículos ligeros, puesto que las características de operación son distintas.

En la Tabla 7 se muestra los valores de los parámetros empleados tanto para los vehículos ligeros (A) como para los vehículos tipo T3-S2-R4 para la obtención de la muestra representativa en cada uno de los puntos de análisis del tramo carretero.

Tabla 7. Parámetros empleados para obtención de muestras representativas.

Configuración vehicular		
	A	T3-S2-R4
S	Var	Var
K	2	2
U	1.64	1.04
E	3.2	6.44

Fuente: elaboración propia.

3.3.4 Obtención de la pendiente del tramo carretero

El propósito de este paso es el de evaluar la pendiente existente del tramo objeto de análisis de manera que posteriormente se pueda relacionar con la severidad que la carretera genera al ocasionar reducciones de velocidad considerables en vehículos de tipo T3-S2-R4.

3.3.5 Análisis del modelo

Como etapa final, se analiza el modelo de evaluación matemático a tomar en cuenta las velocidades de los vehículos doble remolque con los vehículos ligeros, buscando evidenciar las grandes diferencias en velocidad de los dos tipos de vehículos, representándolos mediante el percentil 85 de velocidad.

3.3.6 Análisis de resultados

Por último, se analizan los resultados y se elaboran conclusiones. Se espera que los resultados muestren o no relación entre la dispersión de la velocidad y los posteriores cálculos de energía almacenada en el pavimento.

3.4 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DAÑO AL PAVIMENTO

Como segunda área de estudio, la metodología a emplear para la evaluación de las condiciones del pavimento, en primera instancia consiste en observaciones de campo del lugar seleccionado o de interés, donde se puedan apreciar las deformaciones que los vehículos doble remolque ocasionan al asentarse, lo cual eleva de manera más considerable el daño al mismo. Lo anterior, se realiza mediante el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad, que mide la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino (Arriaga, M., Garnica, Paul. y Rico, A., 1998), que en este caso es la carretera seleccionada. Posteriormente y como segunda instancia mediante la toma de datos de campo, se procederá a un análisis matemático mediante un software de simulación, con el fin de presentar y dimensionar el daño a la estructura del pavimento, tanto por la sobrecarga de algún eje como de la disminución de la velocidad, que implica una concentración de la carga más puntual.

3.4.1 Definición del modelo

El modelo a emplear para la cuantificación del daño al pavimento, es el empleado por Romero y Lozano (2006), que considera factores dinámicos y estáticos. Es importante considerar las fuerzas tangenciales ejercidas por el camión de carga a considerar, que son obtenidas por la revisión de la literatura.

3.4.2 Obtención de las variables que interceden

Análisis de la información existente, que considere el vehículo de proyecto (T3-S2-R4) y una revisión de la literatura de aproximaciones similares con el fin de tener datos lo más cercanos a la situación a evaluar posibles. Se realizan las observaciones en campo antes mencionadas para ajustar los datos del planteamiento y configuración vehicular propuesta, de manera que el modelo se desempeñe coherentemente.

3.4.3 Análisis del modelo

Una vez obtenidos los datos tanto de campo como mediante la revisión de la literatura, se procede a realizar un análisis detallado en el programa básico Excel que ilustre de la manera más precisa posible una aproximación al comportamiento de la energía emitida en la situación actual en la estructura del pavimento.

3.4.4 Resultados y conclusiones

Por último, se analizan los resultados y se elaboran conclusiones. Se destacan comparaciones de las estimaciones para cada uno de los casos evaluados y su comportamiento con respecto a las pendientes y velocidades obtenidas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1 Definición de tramo carretero.

El tramo objeto de estudio es el correspondiente a la carretera México – Querétaro, tramo que históricamente presenta valores elevados del TDPA, que alcanza hasta más de 50,000 vehículos en algunos de sus tramos. Donde en algunos puntos, la configuración de interés T3-S2-R4 presenta valores de hasta el 5.6 por ciento, figurando como un contenido elevado de vehículos en la flota diaria vehicular. Así también, resulta ser un tramo conflictivo, puesto que se presentan muchos accidentes año con año y la presión de la población local es latente en medios informativos. Por ejemplo, para el año 2017 se presentaron 15 colisiones donde se vieron involucrados estas configuraciones vehiculares, en las cuales en 6 casos de estas, hubo 6 personas fallecidas y 3 lesionados. Estos datos, que se reportan por la Policía Federal no representan el número total de accidentes sucedidos, lo cual no quiere decir que no existan más colisiones a lo largo del año, sino que son los únicos de los que se tiene registro.

Dado lo que se desea saber es el diferencial de velocidad del T3-S2-R4 con respecto a los vehículos ligeros o de tipo A, así como su variación a lo largo de una pendiente prolongada, se decide realizar las mediciones en la denominada “Cuesta China” así conocida por la población local, que comprende 5.12 km, del kilómetro 205 + 300 al 210 + 420, en el sentido contrario del kilometraje. Tramo que presenta una pendiente con un comportamiento que se puede considerar de crecimiento homogéneo, teniendo un valor superior al 4% por ciento en 5 puntos, exceptuando el primero de ellos, cuyas condiciones son casi planas, correspondientes a un valor de pendiente de 1%. Dicho tramo se muestra en la Figura 18. Aunado a esto, se presentan los puntos donde se realizaron las mediciones de la velocidad, con el fin de ubicar los puntos evaluados en la planta general. Los puntos se seleccionaron pensando en la seguridad del aforador y buscando hacer una evaluación en tramos rectos de la carretera, donde se observaran características consistentes en cada uno de los lugares de interés. Posteriormente en la Figura 19 se muestra el perfil de elevación del tramo de interés, donde se puede apreciar el tramo recto

aproximadamente hasta el primer kilómetro, mismo que después presenta un incremento constante en la elevación hasta el punto final.



Figura 18. Tramo carretero denominado “Cuesta China” en la carretera México – Querétaro

Fuente: Google Earth



Figura 19. Perfil de elevación del tramo carretero denominado “Cuesta China” en la carretera México – Querétaro.

Fuente: Google Earth

4.1.2 Definición de vehículo de proyecto

La definición del vehículo de proyecto en primera instancia se debe a que resulta incongruente como en la RCF se permite la circulación de un vehículo de

transporte de carga de mercancías T3-S2-R4 libremente, siendo que para muchos países su circulación está limitada por las repercusiones de seguridad y costos de mantenimiento de la infraestructura vial. Se observa como en Estados Unidos se permite su circulación pero solo en determinados estados, donde única y exclusivamente pueden circular por tramos carreteros indicados y bajo permisos otorgados por las autoridades locales, como se menciona el caso de Dakota del Sur, situación que hace que las empresas transportistas tengan exigencias mayores que las que se pudieran tener en México.

De manera destacada, también resulta importante hacer análisis de los vehículos T3-S2-R4 debido al número de accidentes presentados en la RCF, situación que se encuentra en estado crítico y que resulta de carácter prioritario hacer intervenciones para reducir el número de víctimas como resultado de un accidente, ya sea como responsable o como participante, de estas configuraciones vehiculares, como se menciona en las investigaciones realizadas por el Instituto Mexicano del Transporte.

4.1.3 Muestra representativa de velocidades

A continuación en la Figura 20 se muestra se muestra el total de registros capturados en las estaciones P1-P6, donde se observa la agrupación de las velocidades conforme la distancia y el efecto de la pendiente se incrementa.

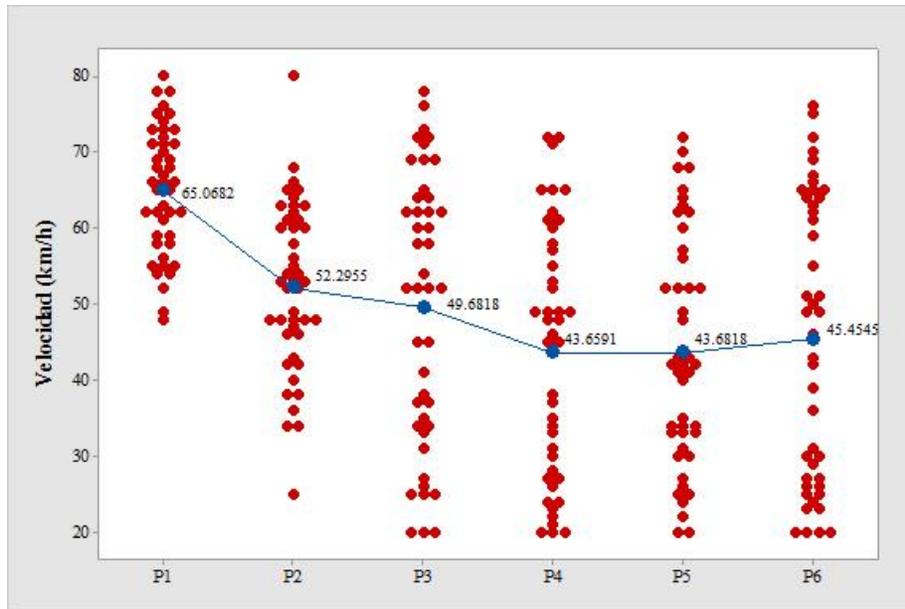


Figura 20. Diagrama de dispersión de puntos en cada uno de los locaciones aforadas.

Fuente: elaboración propia.

Con base en las observaciones apreciadas en los puntos de aforo, se presentan los valores pertinentes al percentil 85 de velocidad en la Tabla 8 para cada uno de los puntos evaluados, tanto para los vehículos ligeros (A) como para los vehículos T3-S2-R4, así también se muestran los valores correspondientes al percentil 50 de velocidad de los vehículos T3-S2-R4. Por último se muestra en Tabla 10 los diferenciales de velocidad entre configuración vehicular y entre los diferentes percentiles utilizados, así como el valor de la pendiente en cada tramo de 100 metros de cada punto.

Tabla 8. Valor del percentil 85 de velocidad por configuración en cada punto de interés.

Percentil 85 de velocidad (km/h)	
Configuración vehicular	
A	T3-S2-R4

P1	92.31	73.94
P2	86.56	72.55
P3	100.91	72.55
P4	97.18	62.00
P5	101.25	62.74
P6	95.83	66.72

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Valor del percentil 50 de velocidad por configuración en cada punto de interés.

Percentil 50 de velocidad (km/h)		
	Configuración vehicular	
	A	T3-S2-R4
P1	82.41	65.50
P2	77.95	51.88
P3	89.60	60.89
P4	92.95	45.00
P5	89.81	40.00
P6	94.17	45.33

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Diferencial de velocidad de los vehículos A contra los vehículos T3-S2-R4 y la pendiente en cada punto de evaluación.

Δv (km/h)		
	A(P85), T3-S2-R4 P(85)	A(P50), T3-S2-R4 P(50)
P1	18.36	16.91
P2	14.01	26.07
P3	28.36	28.71

P4	35.18	47.95
P5	38.51	49.81
P6	29.11	48.83

Fuente: elaboración propia.

Así pues, se muestra en la Figura 22 la distribución de los valores de velocidad para cada punto evaluado, donde se presentan valores mayores en donde la pendiente resulta ser menor, lo cual permite el libre flujo, en contraste con los puntos donde los valores de pendiente son altos, que muestran valores de velocidad menores, alcanzando algunos valores mínimos de hasta 20 km/h.

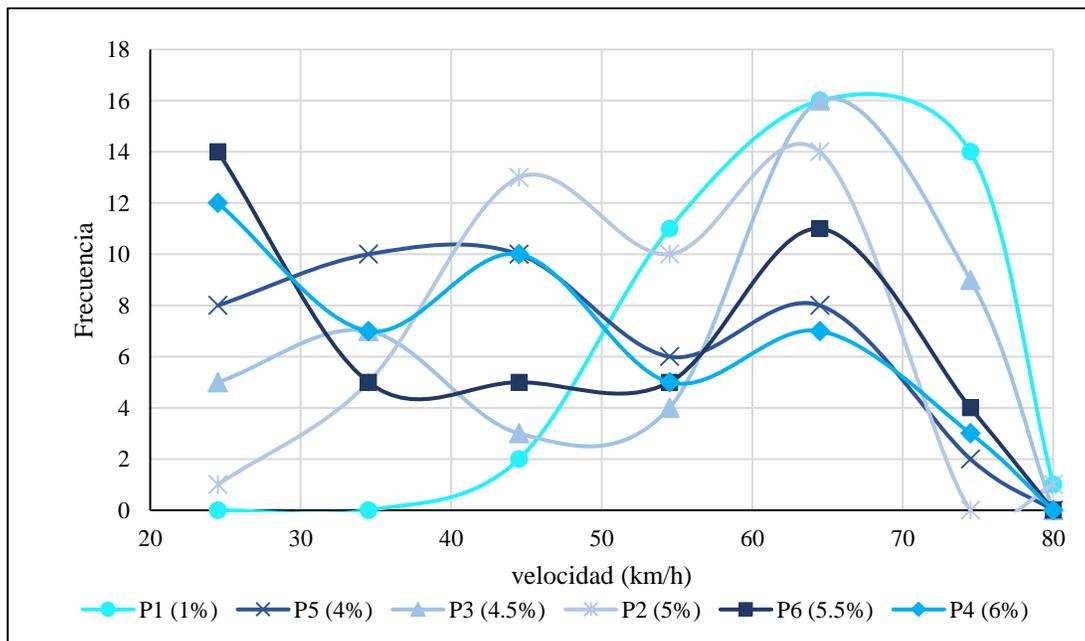


Figura 21. Diagrama de frecuencias de velocidades en cada uno de los puntos donde se obtuvieron muestras representativas.

Fuente: elaboración propia.

4.1.4 Variación de la pendiente en tramos objeto de análisis

Se muestran los valores de pendiente en porcentaje obtenidos para cada tramo seleccionado con longitud de 100 metros, la cual se muestra a manera de resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos de los tramos donde se evaluó la pendiente.

Puntos de interés	kilometraje	Elevación (m)	Elevación (m)	Distancia (m)	Pendiente (%)
P1	0+140.00	1852	1851	100	1.00%
P2	1+408.00	1887	1882	100	5.00%
P3	2+607.00	1928.50	1924	100	4.50%
P4	3+413.00	1969	1963	100	6.00%
P5	4+211.00	1999	1995	100	4.00%
P6	5+268.00	2033.50	2028	100	5.50%

Fuente: elaboración propia.

4.1.5 Variación de la energía en los puntos analizados

El pavimento se modeló como una serie de elementos resorte – amortiguador, lo que permite aproximar el comportamiento visco elástico del pavimento. El módulo de la estructura del pavimento permite calcular la deformación y la energía acumulada, la cual se puede relacionar con la estructura del pavimento, donde queda en evidencia la energía que estas configuraciones vehiculares transfieren al pavimento.

La respuesta del pavimento presenta una variación de acuerdo a las propiedades que se consideren de la mezcla asfáltica, que incluyen su dependencia a la velocidad de operación de la carga. El modelo asume un sistema de referencia en movimiento con el vehículo, de tal modo que para cada eje corresponde una energía almacenada en un momento determinado.

A continuación, se muestra en la Figura 22 la representación gráfica entre velocidad y energía acumulada a partir de cada registro de velocidad en el Punto 1 ubicado en la Figura 18. Lo anterior se realizó para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley establece.

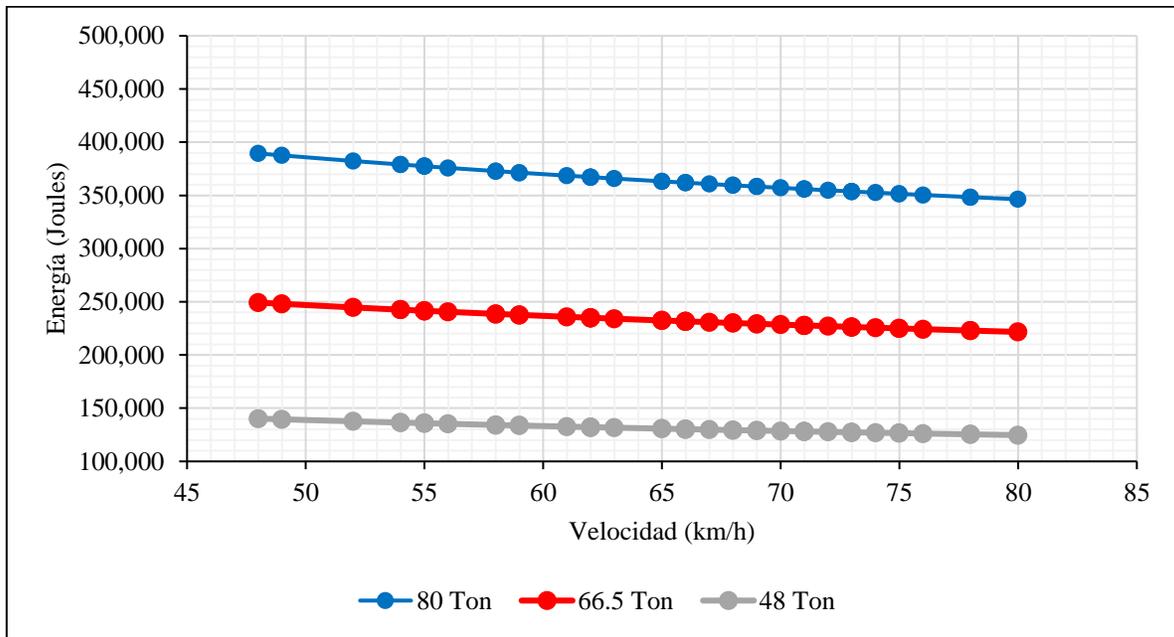


Figura 22. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 1 para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

Así también, se muestra en la Figura 23 la representación gráfica entre velocidad y energía acumulada a partir de cada registro de velocidad en el Punto 2 ubicado en la Figura 18. Lo anterior se realizó para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley establece.

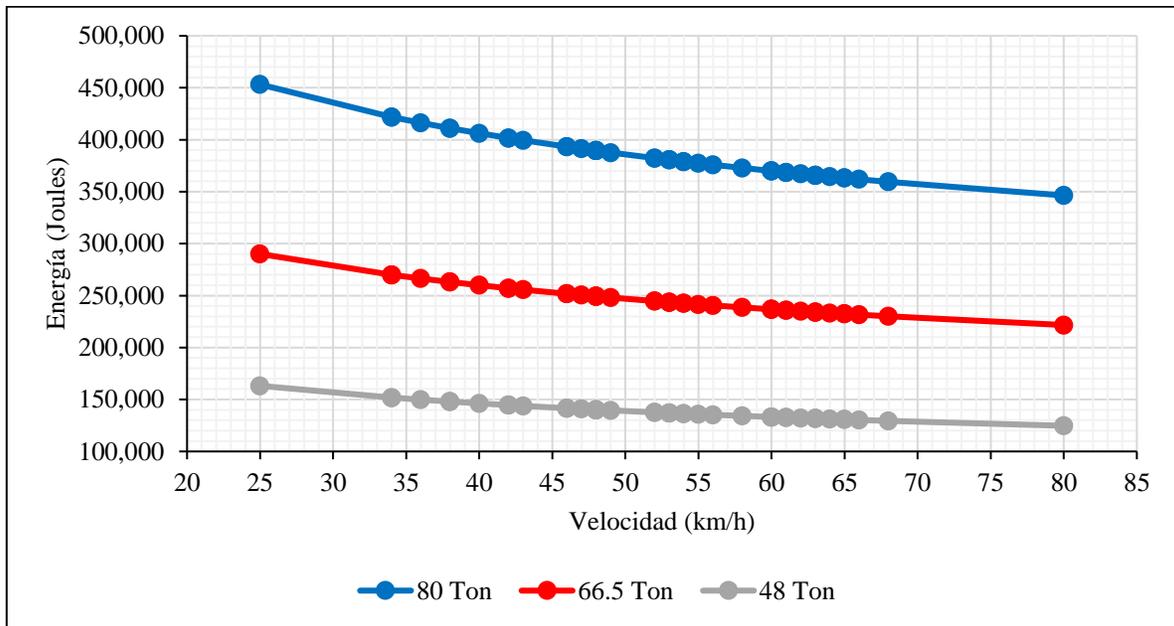


Figura 23. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 2 para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

Así también, se muestra en la Figura 24 la representación gráfica entre velocidad y energía acumulada a partir de cada registro de velocidad en el Punto 3 ubicado en la Figura 18. Lo anterior se realizó para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley establece.

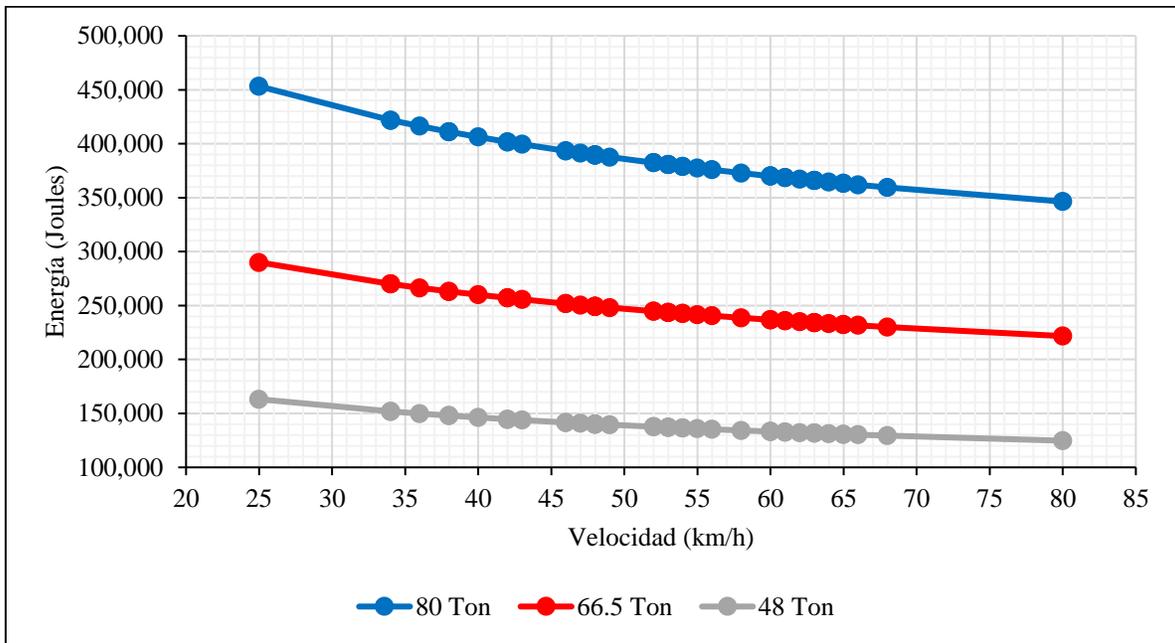


Figura 24. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 3 para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

Así también, se muestra en la Figura 25 la representación gráfica entre velocidad y energía acumulada a partir de cada registro de velocidad en el Punto 4 ubicado en la Figura 18. Lo anterior se realizó para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley establece.

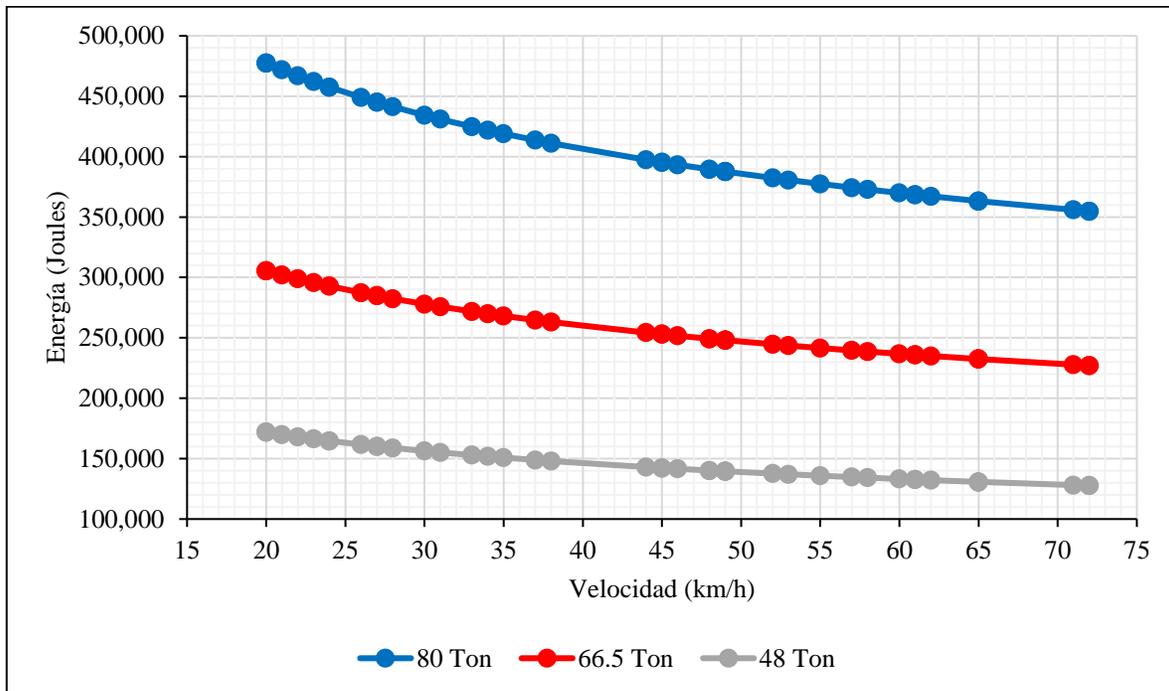


Figura 25. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 4 para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

Así también, se muestra en la Figura 26 la representación gráfica entre velocidad y energía acumulada a partir de cada registro de velocidad en el Punto 5 ubicado en la Figura 18. Lo anterior se realizó para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley establece.

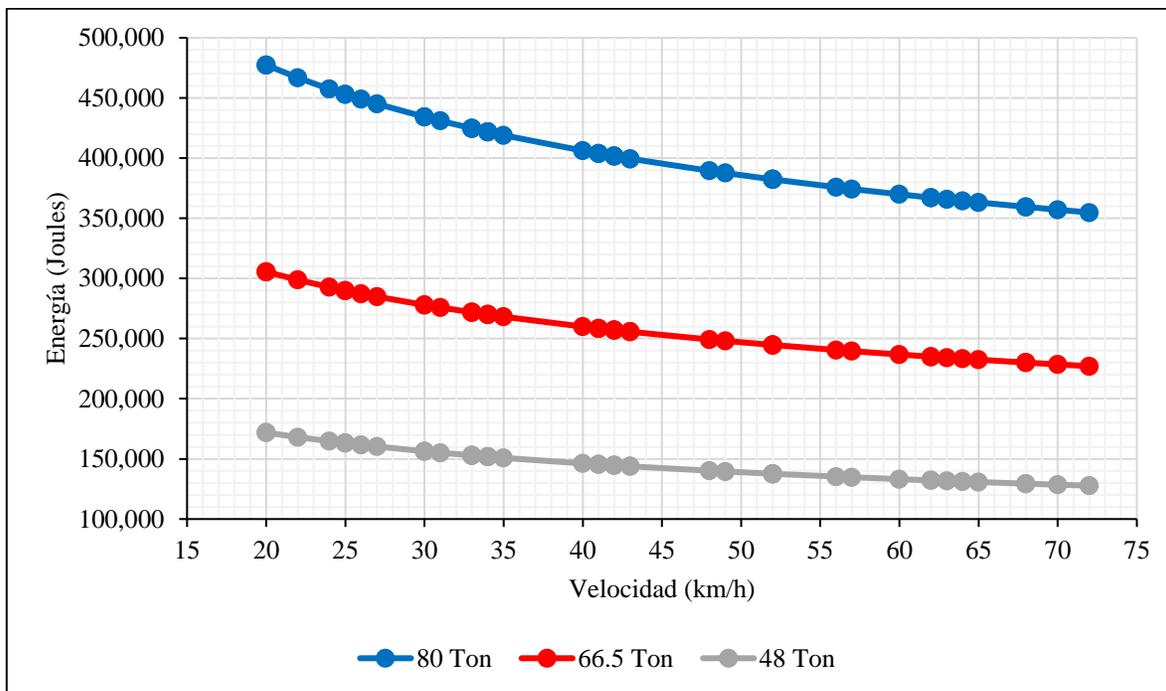


Figura 26. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 5 para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

Así también, se muestra en la Figura 27 la representación gráfica entre velocidad y energía acumulada a partir de cada registro de velocidad en el Punto 6 ubicado en la Figura 18. Lo anterior se realizó para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley establece.

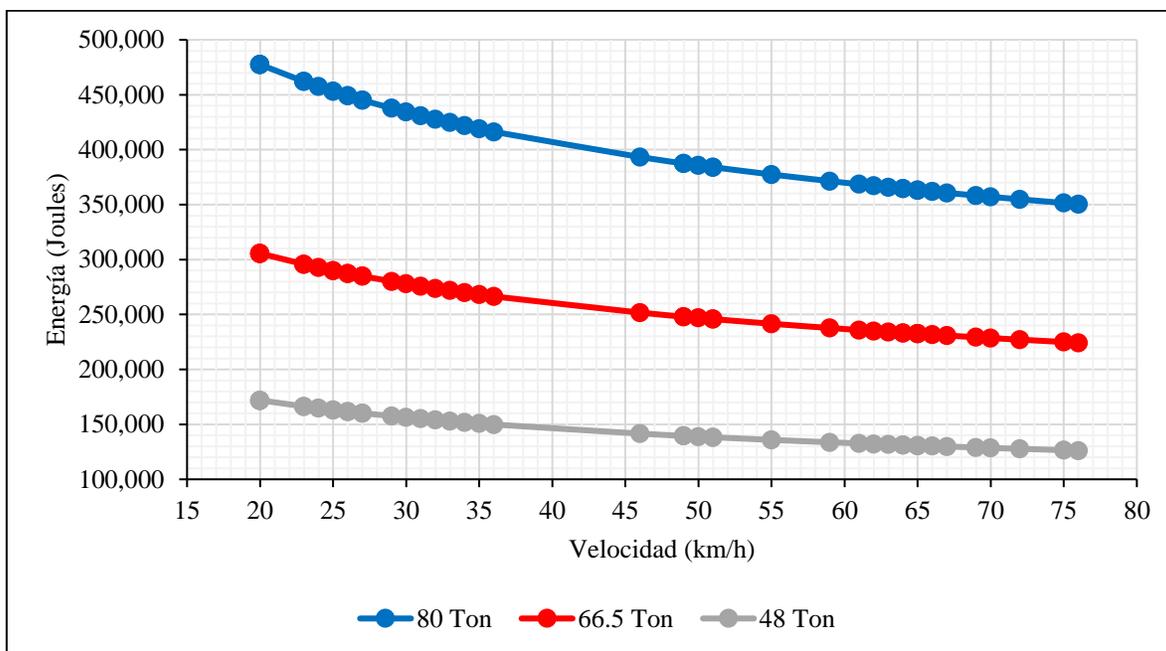


Figura 27. Energía emitida por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 evaluados en el Punto 6 para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

A manera de resumen, se muestra en la Tabla 12 los valores acumulados de energía para cada uno de los casos mencionados en cada uno de los puntos donde se evaluó velocidad.

Tabla 12. Evaluación de las estimaciones de energía acumulada para las tres condiciones de en cada uno de los puntos evaluados.

Punto	%	U (J)		
		48 ton	64 ton	80 ton
P1	1.00%	5,765,843.76	10,250,388.91	16,016,232.67
P2	5.00%	6,090,894.07	10,828,256.13	16,919,150.20
P3	4.50%	6,258,881.85	11,126,901.07	17,385,782.92
P4	6.00%	6,448,672.22	11,464,306.17	17,912,978.39
P5	4.00%	6,423,212.71	11,419,044.81	17,842,257.52
P6	5.50%	6,438,865.09	11,446,871.28	17,885,736.37
	Σ	37,426,369.71	66,535,768.37	103,962,138.07

Fuente: elaboración propia.

Donde se presentan diferencias porcentuales notorias entre cada uno de los puntos, obteniendo una diferencia de 5.64% entre el Punto 1 y el Punto 2, una de 2.76% entre el Punto 2 y el Punto 3, una de 3.03% entre el Punto 3 y el Punto 4, una de 0.39 entre el Punto 4 y el Punto 5 y una de 0.24% entre el Punto 5 y el Punto 6. Considerando que, los análisis de acumulación de energía se realizaron para tres configuraciones de PBV, se muestra también en la Tabla 12 que los valores de energía acumulados entre la condición debajo del límite propuesto por la NOM-012 (48ton) y la situación cercana al límite (66.5ton) difieren en un 78% más para el segundo caso. De manera similar, se muestra también como los valores energía acumulados entre la condición cercana al límite (66.5ton) y la situación de PPBV por encima de la NOM-012 (80)t, difieren en un valor superior al 56% entre sí.

De manera similar, pero esta vez poniendo en análisis también la pendiente correspondiente a cada punto donde se evaluó la velocidad, se muestra en las Figuras 28, 29 y 30 los valores de velocidad presentados anteriormente, los correspondientes de energía para cada velocidad y el valor de pendiente evaluada en cada punto. Tendiendo así, la Figura 28 para el caso del vehículo que circula con un PBV de 80 toneladas, la Figura 29 para el caso del vehículo T3-S2-R4 que circular al límite de lo permitido por la NOM-012 que es de 66.5 toneladas y la Figura 30 para el caso del vehículo T3-S2-R4 circulando por debajo de lo permitido por la NOM-012, en este caso con 48 toneladas.

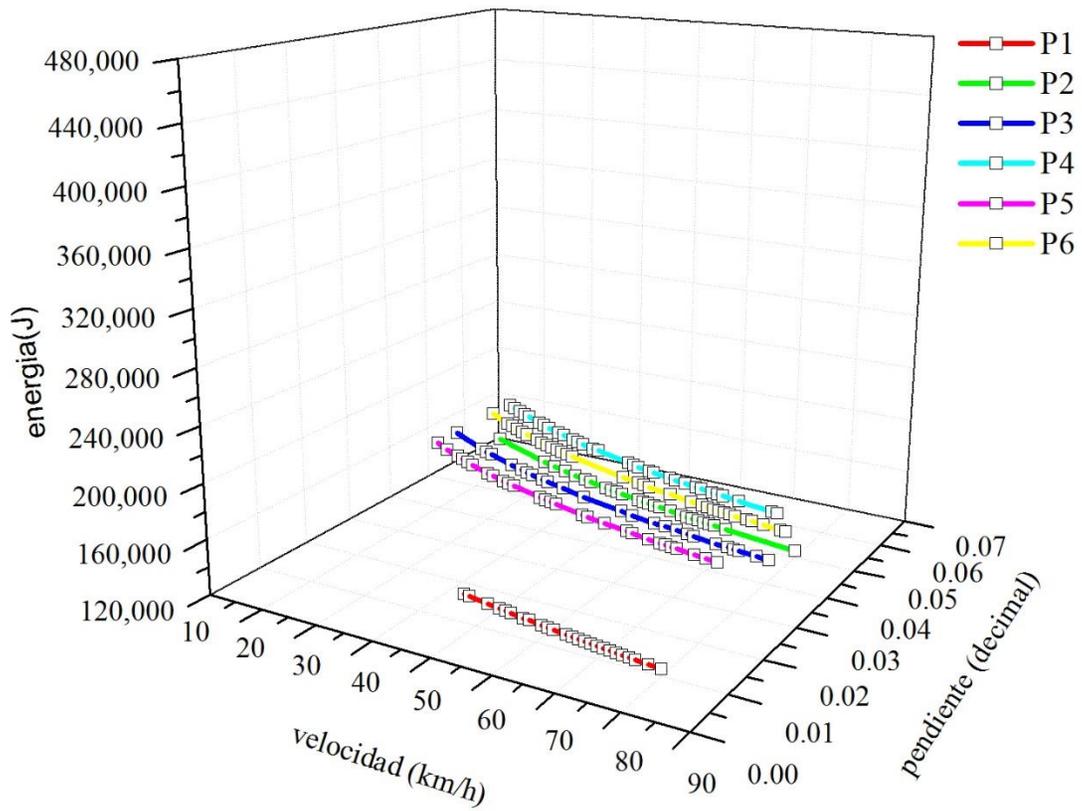


Figura 28. Valores de energía por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 con un PBV de 80 toneladas evaluados en los P1-P6.

Fuente: elaboración propia.

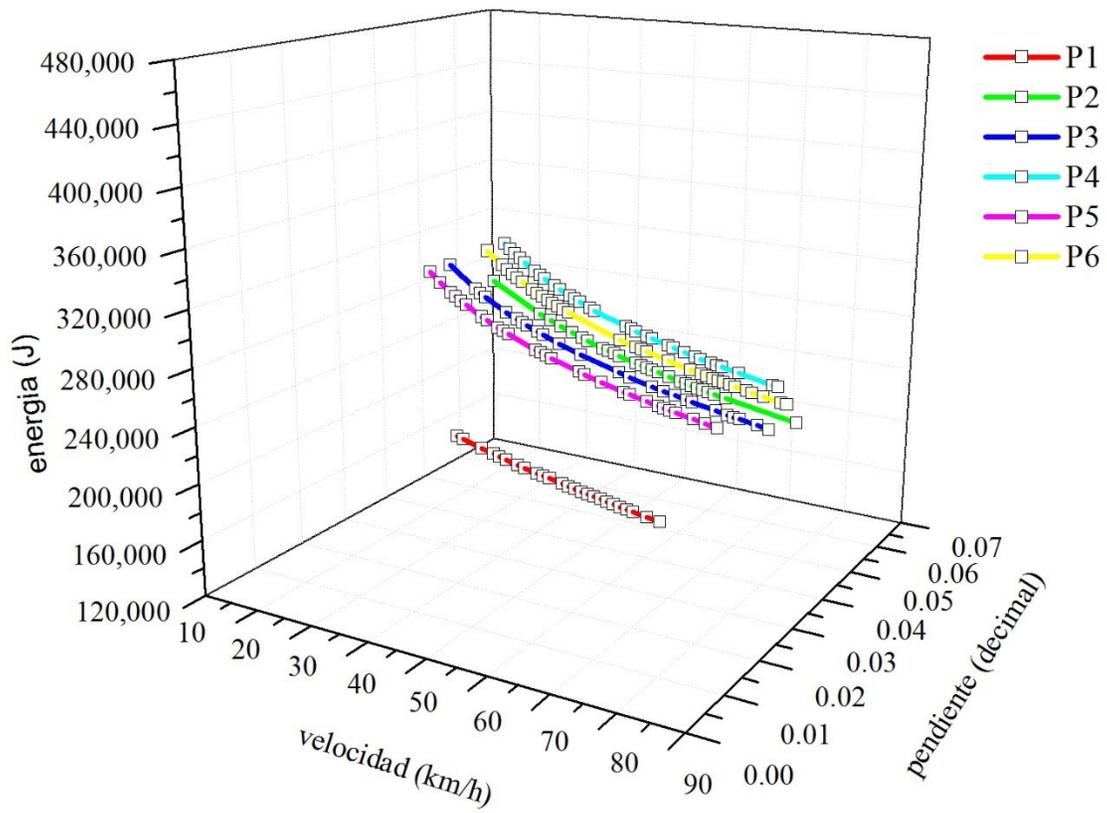


Figura 29. Valores de energía por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 con un PBV de 66.5 toneladas evaluados en los P1-P6.

Fuente: elaboración propia.

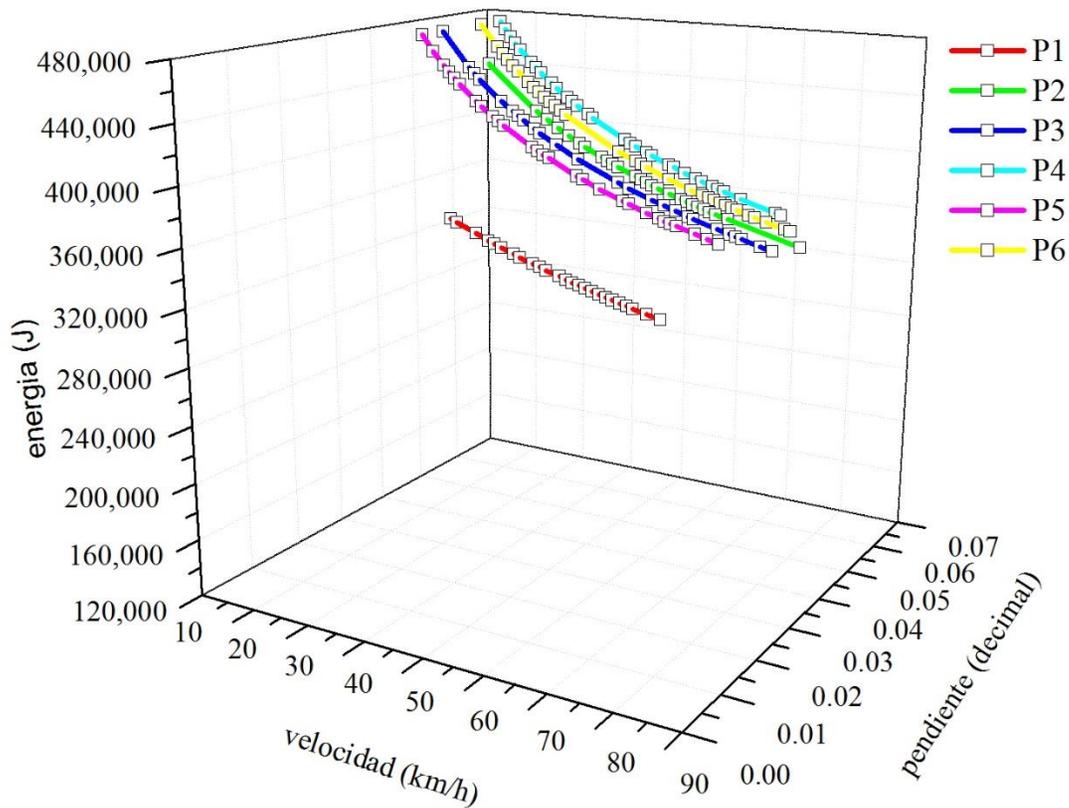


Figura 30. Valores de energía por cada registro de velocidad de los vehículos T3-S2-R4 con un PBV de 48 toneladas evaluados en los P1-P6.

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, en la Figura 31 se muestra la sumatoria de energías acumuladas por cada vehículo T3-S2-R4 registrado, para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, que es con 80 toneladas, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley dicta, o sea 48 toneladas.

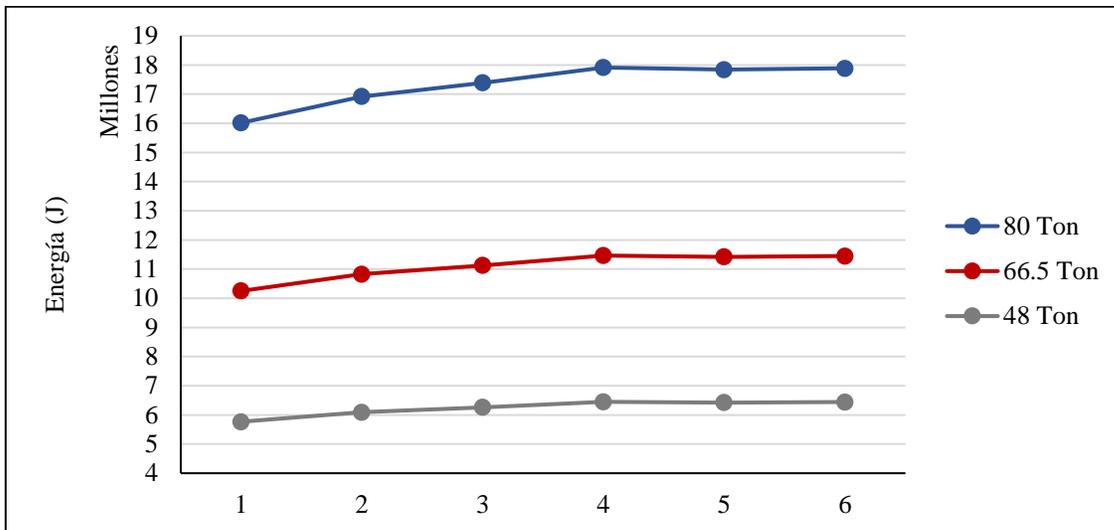


Figura 31. Sumatoria de energías de los vehículos T3-S2-R4 evaluados, en cada punto para diferentes condiciones de PBV.

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, en la Figura 32 se muestra la sumatoria de energías acumuladas por cada vehículo T3-S2-R4 registrado, para el caso donde el vehículo circula hasta un 20% por encima del PBV que la NOM-012 establece, que es con 80 toneladas, para el caso donde circula al límite que la norma establece, que es de 66.5 toneladas y para el último caso donde el vehículo circula en un 28% debajo del PBV que la ley dicta, o sea 48 toneladas. La diferencia principal con este gráfico radica en el hecho de que se sustituyeron las velocidades inferiores a 50 km/h por el mismo valor. Esto se realiza para evidenciar la cantidad de energía que se dejaría de almacenar en el pavimento si se emplearan dichos valores.

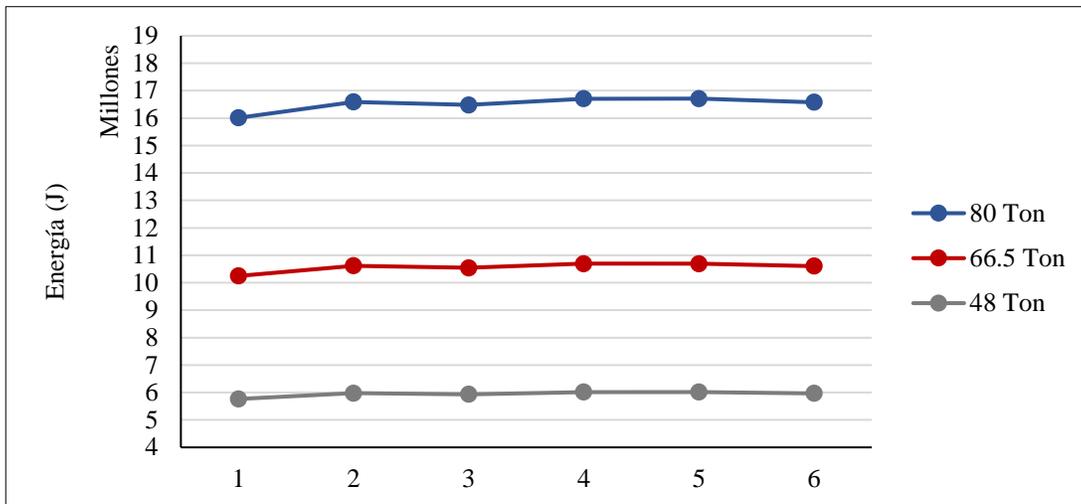


Figura 32. Sumatoria de energías de los vehículos T3-S2-R4 evaluados, en cada punto para diferentes condiciones de PBV, con los registros de velocidad sustituidos por el valor de 50 km /h.

Fuente: elaboración propia.

Destacando la diferencia de energía acumulada a lo largo de los 6 puntos de evaluación de la velocidad emitida por los vehículos T3-S2-R4. La Tabla 13 muestra el diferencial total, que equivale al 6.9% más de energía acumulada.

Tabla 13. Diferencial total de energía entre los registros de velocidad evaluados y la sustitución de valores con un límite de velocidad a 50 km/h.

	48 Ton	Lim. NOM-012	Excede NOM-012
Valores Reales	37426369.71	37426369.71	66,535,768.37
Valores Sustituidos	35,668,041.92	35,668,041.92	63,409,852.30
ΔU	1,758,327.78	1,758,327.78	3,125,916.06

Fuente: elaboración propia.

Así pues, las Figuras 22 – 27 muestran los valores de energía para cada registro de velocidad de cada vehículo de tipo T3-S2-R4 en cada uno de los puntos evaluados. Se puede observar para los tres casos de PBV analizados se presenta un comportamiento correspondiente a una función exponencial. En general, se aprecia como los registros de velocidad mayores generan las menores cantidades de energía y de manera opuesta, los registros de velocidad menores evidencian cantidades de energías mayores, situaciones que son resultado del comportamiento

del modelo simplificado de tabique asfáltico y de la carga de la llanta, que se describen en el apartado de Fundamentación Teórica.

De este modo, se observa que el comportamiento exponencial de cada una de las Figuras 22 – 27 se vuelve más crítico y notorio cuando se considera el caso que contiene el PBV mayor, pues la función exponencial tiene a alargarse más a medida que los valores de velocidad presentados son menores.

Las Figuras 28, 29 y 30 muestran el resumen de los gráficos de cada uno de los puntos evaluados pero ahora consideran el valor de pendiente correspondiente a cada uno de los puntos, donde se observa como el Punto 1 que presenta el menor valor de pendiente (1%), presenta las menores cantidades de energía, a diferencia de los demás Puntos y valores correspondientes de pendiente, que presentan un comportamiento similar. Los valores de pendiente superiores al 4% (caso P2, P3, P4, P5 y P6) presentan valores de energía similares, situación que queda en evidencia con las Figuras 28, 29 y 30. Lo anterior se refuerza con la Figura 31, que muestra como los acumulados de energía a partir del Punto 1, cuyo valor de pendiente es de 1% y van en aumento hasta el Punto 3, que presenta un valor de pendiente de 4.5% y posteriormente se la variación permanece baja hasta el Punto 6, cuyo valor de pendiente es de 5.5%. Esto se puede entender por el hecho de que el incremento de pendiente entre el Punto 1 y el Punto 2 es muy repentino, lo cual corresponde también a las variaciones de velocidad observadas en la Figura 21.

Continuando con lo anterior, se observa que en la sumatoria de energías de cada punto mostrada en la Figura 31, el Punto 1 presenta las menores cantidades de energía. Esto se debe al número de registros que se presentaron en dicho punto, los cuales presentaban valores más elevados de velocidad en comparación con el resto de los puntos evaluados. Lo anterior se refuerza con los valores de percentiles 85 y 50 del vehículo T3-S2-R4, que se presentan en la Tabla 8 y Tabla 9, donde se observa que el Punto 1 contiene los valores mayores. Así también, la Figura 21 muestra como las velocidades se agrupan en valores superiores en el Punto 1 en comparación con el resto de los puntos y la distribución de los mismos presenta variaciones correspondientes a la Figura 20 y a las Tabla 8 Tabla 9, que en el caso

de la Figura, se presenta un comportamiento de agrupación en cada uno de los puntos a partir del P2, donde ya las velocidades empiezan a tener un aislamiento dos direcciones, tanto en velocidades superiores a los 50 km/h, como en velocidades inferiores a esta. Así también los valores de percentil 50 valores bajos de velocidad, los cuales sirven como evidencia de que aproximadamente la mitad de los vehículos evaluados se desplazan a velocidades inferiores a los 50 km/h.

4.1.6 Del historial de accidentes en el tramo objeto de análisis

Con el objetivo de hacer énfasis en los problemas en cuanto a la seguridad vial se refiere, se realizó una petición al Instituto Mexicano del Transporte de los datos de accidentalidad en los que el vehículo T3-S2-R4 se vio involucrado en la Carretera Federal México 57 del periodo 2010 – 2017, con el fin de destacar el tipo de accidente presentado en la misma y verificar si alguno de estos accidentes ocurrió en los kilómetros donde se realizaron las muestras representativas de velocidades. Se presentan a continuación, las eventualidades en el tramo carretero antes mencionado.

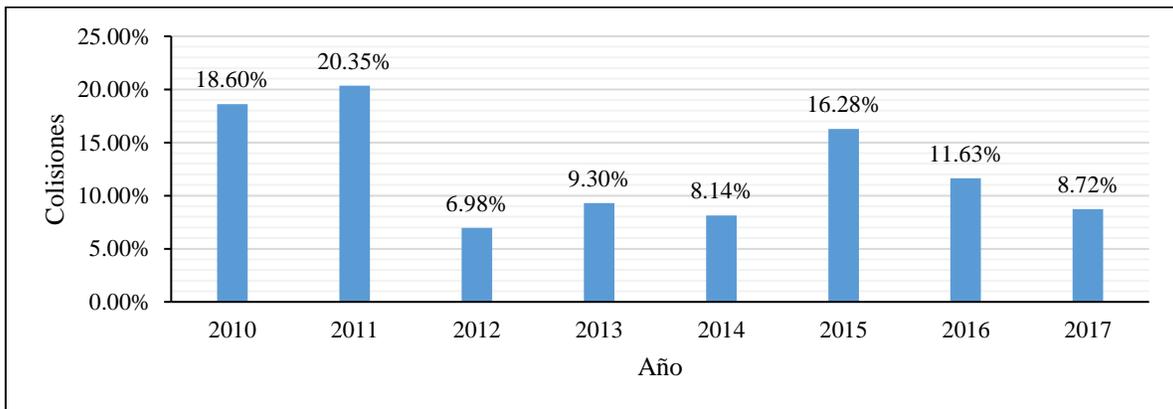


Figura 33. Porcentaje de colisiones por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4 en la Carretera Federal 57.

Fuente: elaboración propia.

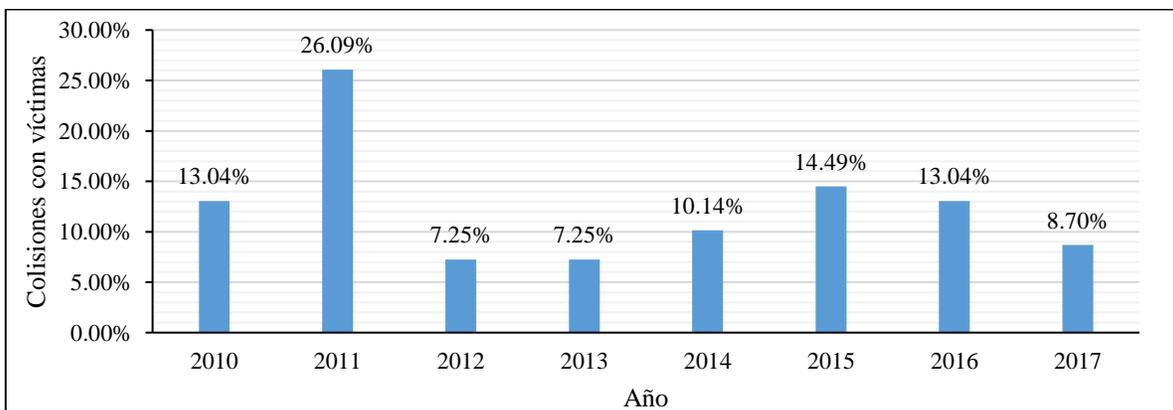


Figura 34. Número de colisiones con víctimas por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4.

Fuente: elaboración propia.

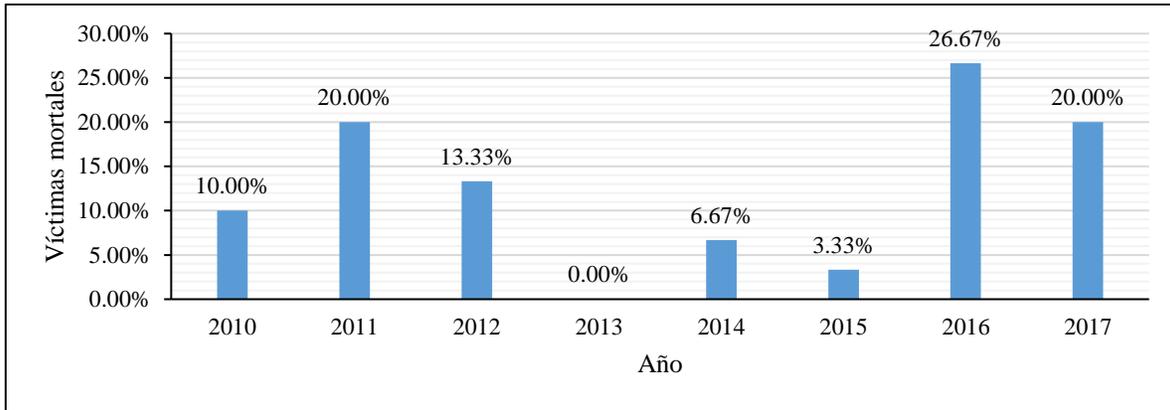


Figura 35. Número de víctimas mortales por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4.

Fuente: elaboración propia.

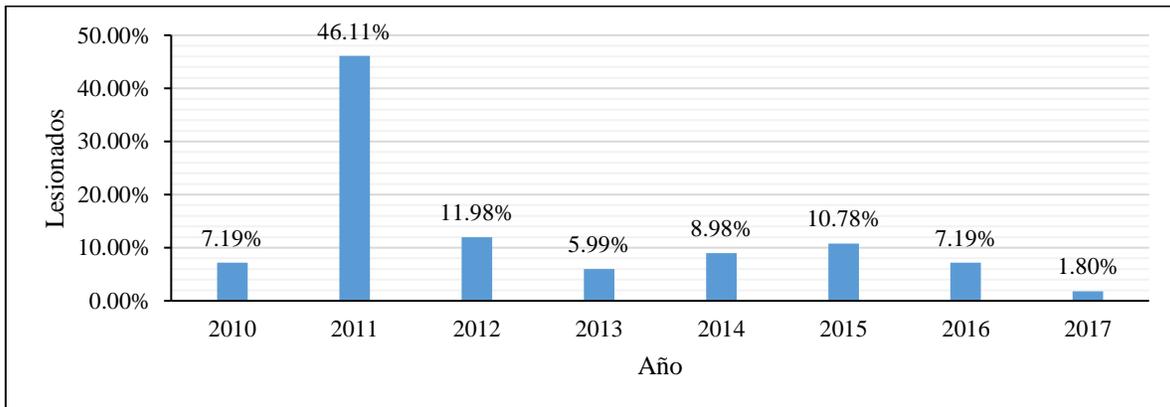


Figura 36. Número de lesionados por año donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4.

Fuente: elaboración propia.

En primera instancia, se observa como en la Figura 33 y en Figura 34 se distribuye el porcentaje de colisiones y colisiones con víctimas respectivamente, teniendo como el año más crítico al año 2012, con un total de 35 colisiones del total a través del periodo analizado. Así también, las colisiones con víctimas presentan un valor máximo en el año 2011, con un total de 18. Lo anterior no significa que la

mayor cantidad de personas que perecieron debido al siniestro se presente en dicho año, como se evidencia en la Figura 35, donde resalta como valor máximo el año 2016. Así también, en la Figura 36, se presenta el año 2011 como el año en que se presentaron un mayor número de lesionados en el periodo analizado, con un total de 77.

Continuando con el mismo periodo, pero ahora haciendo énfasis en el tipo de accidente, se muestra en la Figura 37, la distribución porcentual por tipo de accidente, donde destaca el choque por alcance con el 40.12%, teniendo al Choque Lateral como el segundo más común, tan solo con el 13.95%.

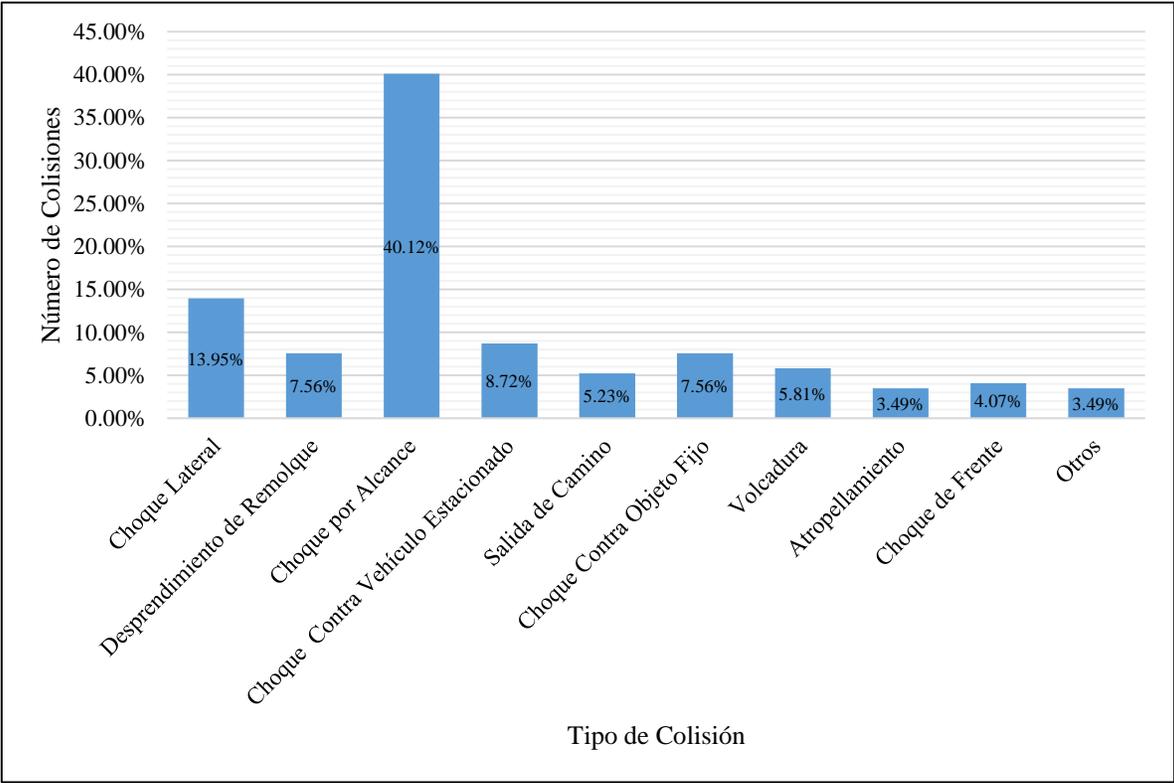


Figura 37. Porcentajes por tipo de colisión en donde se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4 en la Carretera México 57.

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior, resulta ser una evaluación aproximada al contexto global, donde las colisiones con vehículos de carga son comunes y, donde el choque por alcance es el que mayor porcentaje presenta. Tal es el caso de la “NHTSA’s National Center

for Statistics and Analysis”, que en su documento “Traffic Safety Facts”, destaca porcentajes de impacto con fatalidades donde se vieron involucrados vehículos de carga con otras configuraciones vehiculares, destacando que dichas colisiones por alcance para los vehículos de carga presentan un valor del 21%, mientras que para otras configuraciones se presentan en un 6% del total de colisiones presentadas para 2017. Lo que destaca que en una de cada cuatro colisiones donde existen fatalidades, en donde se ve involucrado un vehículo de carga, se presenta una colisión en la parte trasera del vehículo de carga (NHTSA, 2017).

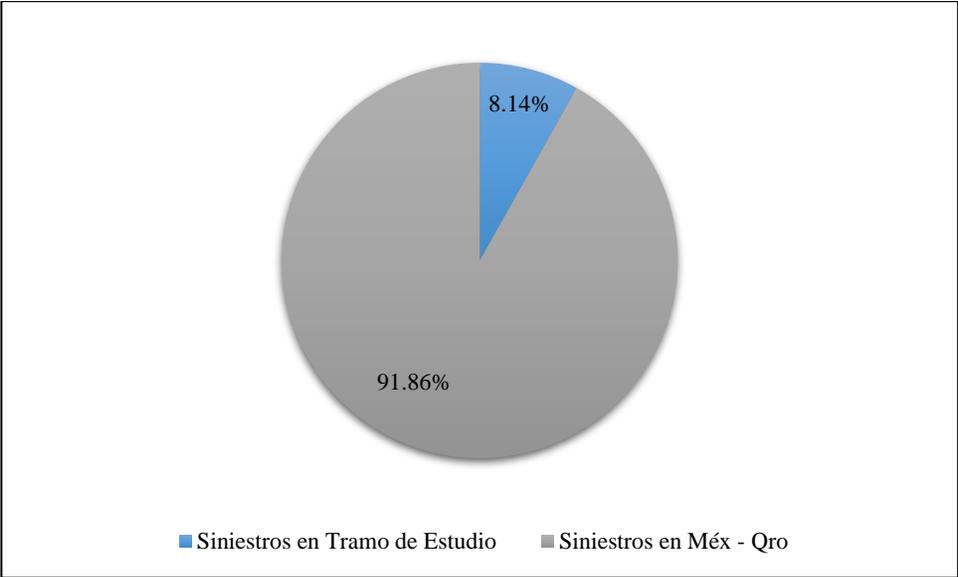


Figura 38. Porcentaje de colisiones en el tramo objeto de estudio en relación con el total de la carretera México 57.

Fuente: elaboración propia.

Por último, se presenta el porcentaje de colisiones en los que se vio involucrado el vehículo T3-S2-R4 en el tramo de estudio. Donde se destaca que el 8.14% de los accidentes se presenta en tan solo 5.12 kilómetros de la longitud total de la carretera (211.60km), que equivalen al 2.42%. Lo cual evidencia la problemática de este tramo carretero.

5. CONCLUSIONES

El tramo carretero que se selecciona resulta ser un claro ejemplo de la interacción económica que existe en un corredor importante en la RCF, en este caso el corredor México Querétaro. Esta situación no es solo reciente, sino que se puede apreciar que el intercambio de bienes y el valor de la mercancía es de los más grandes del país, situación que se preserva desde los años 90's.

La comparación entre las configuraciones permitidas en Estados Unidos y México nos evidencian las diferencias de pesos permitidos en ambos países, tanto en PBV como en peso máximo permitido por tipo de eje, lo cual nos habla del control que se tiene en un país desarrollado. Esto se debe a las fuertes implicaciones que puede conllevar el no limitar los pesos de estas unidades, ya sea que hablemos de la seguridad vial como del daño a la infraestructura carretera.

Respecto al análisis de las velocidades en el tramo objeto de estudio, se presentó una evaluación con seis conjuntos de registros de velocidad de punto a lo largo de una carretera que presenta valores de pendiente superiores a lo recomendable en la literatura, alcanzando valores de hasta 6%. En dichos registros se evaluaron dos configuraciones vehiculares permitidas en la NOM-012 mexicana: Los vehículos de tipo T3-S2-R4 y los vehículos ligeros (A).

Las muestras representativas fueron tomadas con diferentes parámetros debido a la recomendación del manual ITE, cuyos valores difieren debido a las circunstancias operativas en sitio y al tiempo de disponibilidad de la herramienta para realizar los trabajos. Así, el error y el nivel de confiabilidad de la muestra representativa del vehículo T3-S2-R4 presenta una amplitud mayor. Esto no significa que la muestra no cuente con validez, sino que el comportamiento de los datos valida el estudio. De tal manera que se observan registros con velocidades elevadas y registros con velocidades tan bajas, que alcanzaban el límite inferior de velocidad permitido para que el radar realizara el registro adecuadamente, que es de 20 km/h. En consecuencia y observando el cambio en la pendiente conforme la longitud avanza, las velocidades sufren un comportamiento con una tendencia de decremento en velocidades y un incremento en el número de registros de velocidad

por debajo de los 50 km/h, como se presente en los resultados observados en los valores de Percentil 50, valores que validan mejor la gráfica comparativa de frecuencia de velocidades. En este caso, el percentil 85 de velocidad no mostró el comportamiento observado en campo, puesto que se mantenía en valores superiores a la realidad.

Lo anterior se realizó con el fin de obtener muestras representativas que sirvieran para la realización de análisis posteriores confiables, tanto de diferenciales de velocidad entre los vehículos de tipo T3-S2-R4 y los vehículos ligeros (A) como también, evidencia importante para alimentar el modelo simplificado de energía de deformación.

El modelo simplificado de energía de almacenamiento empleado resulta ser una buena aproximación de la acumulación de energía ejercida por vehículos de transporte de carga terrestre, como se demuestra en la literatura citada. La diferencia de esta investigación radica en que se hace para un vehículo de tipo T3-S2-R4, lo cual nos muestra la situación actual en una carretera mexicana con un TDPA elevado, con la característica de presentar un pavimento flexible. Se destaca como las velocidades más bajas generan las mayores cantidades de energía por unidad de volumen en el tramo carretero, dicha diferencia se presenta de una manera más contundente conforme el PBV aumenta. Tal es el caso de la situación que presenta 80 toneladas, cuya cantidad de energía emitida por los registros de velocidad considerados supera a la situación que circula con el PBV (64 toneladas) más cercano al límite de la NOM-012 en un 56% más. Así también, esta última situación supera la cantidad de energía por unidad de volumen respecto al caso que se encuentra por debajo de la NOM-012 (48 toneladas) en un 78% más.

Por último, el breve resumen del historial 2010-2017 de la carretera México – Querétaro 57 donde los vehículos de tipo T3-S2-R4 se vieron involucrados en alguna colisión, muestra en comportamiento de dichos accidentes con el paso del tiempo. Dicha base de datos evidencia como la colisión por alcance es la más común en la carretera objeto de análisis, situación que no es lejana a lo sucedido en un país desarrollado como lo es Estados Unidos, donde el choque por alcance

figura también de manera habitual en los vehículos de carga. Aunado a esto, se presenta un porcentaje superior al 8% de accidentes en tan solo 2.42% de la longitud total de la vía, correspondientes al tramo evaluado, lo cual podría resaltar la peligrosidad de dicho tramo y la necesidad de realizar medidas de seguridad vial para reducir el número de accidentes con esta problemática configuración vehicular.

6. REFERENCIAS

- AASHTO, (1998), AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, (2001), A Policy of Geometric Design of Highway and Streets, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Agent, K.R; Pigman, J.G. (2002), Investigation of the Impact of Large Trucks on Interstate Highway Safety. Research Report KTC-02-5/SPR248-02-1. Kentucky Transportation Center.
- Arriaga, M; Garnica, Paul; Rico, A. (1998), Documento Técnico 108. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.
- Backman, H; Nordström, R. (2002), Improved Performance of European Long Haulage Transport. Report 2002:6 E. Stockholm: Institutet för transportforskning.
- Barton, Raymond A; Morrall, J. (1998), Study of Long Combination Vehicles on Two-Lane Highways, *Transportation Research Record*. 1613, 43-49.
- Behiry, A. (2012), Fatigue and Rutting Lives in Flexible Pavement, *Ain Shams Engineering Journal*, 3, 367-374.
- Cerezo, V; Gothié, M; Dupré, G. (2008), The Danger of Ramps for Heavy Goods Vehicles. *10th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology*, Paris, France.
- Cerezo, V; Conche, F. (2016), Risk Assessment in ramps for heavy vehicles-A French study, *Accident Analysis and Prevention*, 91, 183-189.
- Chatti, K; B. Kim, H; Yun, Kyong K; Mahoney, Joe, P; Monismith, Carl L. (1996), Field investigation into effects of vehicle speed and tire pressure on asphalt concrete pavement strains. *Transportation Research Record* 1539, 66-71.

- Christoforou, Z. D; Karlafatis, M. G; Yannis, G. (2010), Heavy vehicle age and road safety, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Transport 163, 41-48.
- Collop, A, C; Cebon, D. (1995), Parametric Study of Factors Affecting Flexible – Pavement Performance, *Journal of Transportation Engineering* 121, 485-494.
- Cuevas, A; Pérez, J; Mayoral, E; Mendoza, A. (2015), Documento Técnico 63, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.
- Cuevas, A; Pérez, J; Mayoral, E; Mendoza, A. (2017), Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales 2017, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- Daniels, D. (2006), *Longer Combination Vehicle (LCV) Regulation Training*. 1st edition. Delmar Cengage Learning.
- European Commission, (2016), EU Transport in figures, statistical pocket book 2016, Publications Office of the European Union, Brussels, Belgium.
- Evgenikos, P; Yannis, G; Folla, K; Bauer R; Machata, K; Brandstaetter, C. (2016). Characteristics and causes of heavy goods vehicles and buses accidents in Europe, *6th Transport Research Arena April 18-21, Warsaw*. Transportation Research Procedia 14, 2158 – 2167.
- FARS, (2016), National Highway Traffic Safety Administration, United States Department of Transportation.
- Federal Highway Administration, (2015), Compilation of Existing State Truck Size and Weight Limit Laws, United States of America Department of Transportation, Washington, DC.
- Federal Motor Carrier Safety Administration, (2003), Highway / Heavy Vehicle Interaction, Commercial Bus and Road Safety, Synthesis3.

- FHA, (2004), *Methods and Practices for Setting Speed Limits: An informational report*, Federal Highway Administration.
- Fu, Rui; Guo, Yingshi; Yuan, Wei; Feng, Hongyun; Ma, Y. (2011), The correlation between gradients of descending roads and accident rates, *Safety Science*, 49 (3), 416–423.
- Garnica, P; Delgado, H; Sandoval, C. (2005). Análisis de Varianza del Efecto de Algunos Factores que Influyen en la Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- Gattis, J. L; Alguire, Mary S; Townsend, Kristy; Shreenath, Rao. (1997), Rural Two Lane Passing Headways and Platooning, *Transportation Research Record*, 1579, 27-34.
- Grislis, A. (2010), Longer Combination Vehicles and Road Safety, *Transport*, 25(3), 336-343.
- Hanley, Paul F; Forkenbrock, David J. (2005), Safety of Passing longer combination vehicles on two-lane highways, *Transportation Research Part A* 39 1-15.
- Harkey, David L; Council, Forrest M; Zegger, Charles V. (1996), Operational Characteristics of Long Combination Vehicles and Related Geometric Design Issues, *Transportation Research Record*, 1523, 22-28.
- Harrison, R; Sánchez-Ruiz, Luis A; Lee, C. (1998), Truck Traffic Crossing the Texas-Mexico Border, *Transportation Research Record*, 1643, 136-142.
- Highway Research Board, (1962), *The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research, Special Report 61E, Publication No. 954*, National Research Council, Washington, D.C.
- IMT, (2015), *Manual Estadístico del Sector del Transporte*, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

- Islas, V; Torres, G; Rivera, C. (2000), *Productividad en el Transporte Mexicano*, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.
- ITE, (2009), *Manual of Transportation Engineering Studies*, Institute of Transportation Engineers.
- Jorgensen (Roy Jorgensen Associates, Inc.), (1978). *Cost and Safety Effectiveness of Highway Design Elements*. National Cooperative Highway Research Program, Report No. 197, Washington, DC, USA.
- Knight, I; Newton, W; McKinnon, A; Palmer A; Barlow, T; Mc Crae, I; Dodd M; Gouper G; Davies, H; Daly, A; McMahon, W; Cook, E; Ramdas, V; Taylor, N. (2008), *Longer and/or Longer and Heavier Goods Vehicles (LHVs) – a Study of the Likely Effects if Permitted in the UK*. Published Project Report PPR285. United Kingdom: TRL Limited.
- Knipling, Ronald R. (2007), *The Domain of Truck and Bus Safety Research*. Transportation Research Circular, No. E-C117, *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, DC, 1-8.
- Lave, Charles A. (2014), *Speeding Coordination and the 55 MPH Limit*, American Economic Association, *JSTOR*.
- Liu, J., (2015), *Research on the damage of heavy vehicles to the pavement*. *Third International Conference on Management, Education, Information and Control*, Automotive Engineering institute, Jiangxi University of Technology, Nanchang .
- Li,Y; Liu, Ch; Ding, L. (2013), *Impact of pavement conditions on crash severity*. *Accident Analysis and Prevention*, 59, 399-406.
- Lozano, A; Hernández, J.R; Romero, José A. (1999), *Documento Técnico 117*. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.

- Martínez, J; Moreno, M; Morales, M; Herrera, A; Balbuena, J; Pérez, J; Bustos, A; Zamora, A. (2015), Manual Estadístico del Sector Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.
- Mayoral, E; Cuevas, A; Mendoza, A. (2018), Perfil de Siniestralidad de los Vehículos del Autotransporte de Carga y Pasajeros en las Carreteras Federales de 2010 y 2015, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.
- Mc Mahon, T. F; Thurmull, F; Halstead, J.W. (1969), Quality Assurance in Highway Construction. Part 1: Introduction and Concepts. Public Roads Ad. Vol. 35 No. 6.
- Mohamedshah, Yusuf M; Paniati, Jeffery F. Paniati; Hobeika, Antoine G. (1993), Truck accident models for interstates and two-lane rural roads. *Transportation Research Record* 1407, 35–41.
- Moreno , E; Bustos, A; Gradilla, L; Montoya, R; Martner, C. (2015), Hacia el desarrollo de un modelo nacional de transporte; primera fase: Construcción de la red intermodal y primeros análisis, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.
- NHTSA, (2017), Traffic Safety Facts: Large Trucks, National Traffic Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- NOM – 012 , (2017), NOM – 012 – SCT – 2 – 2017 Norma Oficial Mexicana sobre el peso y dimensiones máximos con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de jurisdicción federal, Secretaría de Gobernación, Diario Oficial de la Federación.
- OECD/ITF, (2015), Road Safety Annual Report, IRTAD, Paris.

- Olivera, F; Grupo Editorial Patria, (1986), *Estructuración de Vías Terrestres*, 2ª Edición, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- OMS, (2015), Informe Mundial sobre la Situación Mundial de la Seguridad Vial 2015, WHO/NMH/NVI/15.6
- Othman, S; Thomson, R. (2007), Influence of road characteristics on traffic safety. *Proc. the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)*, Lyon, France. Paper Number 07-0064.
- Rakha, H; Lucic, I; Demarchi, S; Van Aerde, M; Setti, J. (2001), Vehicle kinematics model for predicting maximum truck acceleration levels, *Journal of Transportation Engineering*, 127, 418-425.
- Regehr, J.D., Montufar, J., Clayton, A. (2009), Lessons Learned About the Impacts of Size and Weight Regulations on the Articulated Truck Fleet in the Canadian Prairie Region. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36, 607–616
- Rico, A; del Castillo, H; Editorial Limusa, (1977), *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*, México.
- Ricao, A; Mendoza, A; Mayoral, E. (1998), Main Freight Land Corridors in Mexico, *Transportation Research Record*, 1613, 79-87.
- Romana, Manuel G. (1999), Passing Activity on Two- Lane Highways in Spain, *Transportation Research Record*, 1678, 99-0979.
- Romero, José A; Lozano, A. (2000), A simulation methodology for analysis of vehicles pavement interactions in a real traffic environment, *6th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*, January, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Romero, José A; Lozano, A. (2006), Effect of trucks suspension and tire properties on pavement damage spatial distribution, *Transportation Research Record Meeting*, January, Washington, 1949, 148–154.

- Romero, José A; Lozano, A; Betanzo, E; Obregón, S. (2013), A flexible pavement damage metric for a straight truck, *International J. Heavy Vehicles Systems*, Vol. 20, No. 3.
- Romero, José A; Lozano, A; Obregón, A; Betanzo Quezada, E. (2017), A plane model of the interaction of a vehicle with the road infrastructure, *Advances in Engineering Software*, 117, 46-58.
- Schwartz, S.H; Fleming, S,A. (2007), Motor Carrier Safety: A statistical approach will better identify commercial carriers that pose high crash risks than does the current federal approach, Publication GAO-07-585, US Government Accountability Office, Washington DC, USA.
- Scopatz, Robert A. (2001), Crashes Involving Long Combination Vehicles. *Transportation Research Record 1779*, 01-2428, 162-172.
- Tanishita, M; van Wee, B. (2016), Impact of vehicle speeds and changes in mean speeds on per vehicle-kilometer traffic accident rates in Japan, *IATSS Research*.
- Tian, Y; Lee, J; Nantung, T; Haddock, John E. (2017), Development of a mid- depth profile monitoring system for accelerated pavement testing, *Construction and Building Materials*, 140, 1-9.
- TRB, (2011), Guidebook for Understanding Urban Good Movements, National Cooperative Freight Research Program, Report 14, Transportation Research Board of The National Academies.
- USDT, (2015), Large Trucks and Bus Crash Facts 2015, Federal Motor Carrier Safety Administration, Analysis Division, United States División of Transportation FMCSA-RRA-16-021.
- Vaiana R; Capiluppi G.F ; Gallelli V; luele T; Minani V. (2012), Pavement Surface Performances Evolution: an Experimental Application. *Procedia – Social and Behavior Sciences* 53, 1151 – 1162.

Vázquez, D; Fabela, Manuel de Jesús; Martínez, M. (2004), Revisión Documental Sobre la Evaluación del Comportamiento Dinámico de Vehículos Pesados, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México.

Vierth, I, Berel, H, McDaniel, J, Haraldsson, M, Hammarstrom, U, Mohammad – Reza, Y, Lindberg, G, Carlsson, A, Ogren, M, Bjorketun, U. (2008), The effects of long and heavy trucks on the transport system. VTI Report on a Government Assignment 605^a, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linkoping, Sweden.

Wegman, F. (2016), The Future of Road Safety: A Worldwide Perspective. *International Association of Traffic and Safety Science Research*. 40, 66-71.

Wegman, F; Berg, H.-Y; Cameron, I; Thompson, C; Siegrist, S; Weijermars, W. (2015), Evidence-based and data-driven road safety management, *International Association of Traffic and Safety Science Research*, 39, 19–25.

7. APÉNDICES

Datos Viales, (2017). Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO	Punto No.:
	Estudio de Velocidad de Punto FORMATO PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES	P1

Vialidad: Carretera México 57

Tramo: Dirección Querétaro - México

Sitio: 210 +420 km

Fecha: 22 de agosto de 2018

Hora de inicio: 10:00

Latitud: 20.560613°

Hora de término: 10:45

Longitud: - 100.369263°

Operador
de JOSÉ JACOB DURAN CASILLAS
pistola: _____

Firma: _____

Observaciones: _____

The speed profile for a particular road section can only be estimated by measuring individual speeds through a spot speed study. Prior to conducting these studies, the minimum number of vehicles for which speed data are needed to sufficiently estimate speed parameters should be estimated. The minimum number of vehicles required to accurately estimate the speed profile is dependent on the level of confidence required for the statistical analysis of the data. The ITE Manual of Transportation Engineering Studies⁴⁴ presents the following equation to calculate the minimum sample size for estimating the 85th percentile speed:

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

Where:

N = minimum number of measured speeds

S = estimated sample standard deviation, mph

K = constant corresponding to desired confidence level

U = constant corresponding to the desired percentile speed

E = permitted error in the speed estimate, mph

The Manual of Transportation Engineering Studies provides tables for determining the values for S, K, and U. Table 11 shows an example sample size calculation for estimating the 85th percentile speed, using this formula.⁴⁴

Table 11. Example Calculation of Sample Size for Study to Determine 85th Percentile Speed

Assumptions:	
The average standard deviation is rounded to 5.0 mph	S = 5.0 mph
The desired confidence level is 95 percent	K = 1.96
The study will determine 85th percentile speed	U = 1.04
The permitted error is 2 mph	E = 2 mph
Calculation:	
Sample Size	N = 37
Analysis:	
Using a sample size of 37, the 85th percentile speed can be determined within 2 mph at a 95 percent confidence level.	

Performing the same calculation with a permitted error of 1 mph (E = 1 mph) results in a sample size of 148. A common sample size for many jurisdictions is 100 vehicles. Assuming a standard deviation of 5 mph, and using a 95 percent level of confidence, the 100 vehicle sample size will yield between a 1 and 2 mph error in the 85th percentile speed, and it makes calculation of the 85th percentile fairly simple (refer to Appendix H).

Table 12 lists the sample sizes and sample periods used by three States. Most States use 100 or more vehicles in each direction for each station. Since meeting the minimum collection data on low-volume roads can be difficult, adjustments on the sample size can be made based on the duration of the collection period. On highways carrying low traffic volumes, the speed checks at any one station are usually discontinued after two hours, even if a minimum of 100 vehicles have not been recorded.

Table 12. Sample Sizes and Data Collection Periods Used by Three States

State	Sample Size	Exceptions
MASSACHUSETTS ⁴⁵	100 or more vehicles in each direction should be checked at each station.	On highways carrying low traffic volumes, the checks at any one station may be discontinued after two hours although a minimum of 100 vehicles have not been timed.
OHIO ⁴⁶	Record speeds of 100 vehicles for each direction of travel.	Observation need not exceed one hour even if less than 100 vehicles are recorded traveling in each direction.
TEXAS ⁴⁷	A minimum of 125 cars in each direction, at each station.	Discontinue after two hours if radar is used, or after four hours if a traffic counter that classifies vehicles by type is used—even if 125 cars have not been timed.

Fuentes:

- Forbes, G. J., T. Gardner, H. McGee, and R. Srinivasan. Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report. Publication FHWA-SA-12-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.

	Vehículos A						Vehículos T3-S2-R4					
	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código
1	93	A	100	A	86	A	70	T3-S2-R4	55	T3-S2-R4		
2	81	A	93	A	78	A	80	T3-S2-R4	54	T3-S2-R4		
3	96	A	106	A	90	A	69	T3-S2-R4	67	T3-S2-R4		
4	81	A	74	A	80	A	59	T3-S2-R4	76	T3-S2-R4		
5	80	A	93	A	66	A	69	T3-S2-R4				
6	95	A	87	A	87	A	62	T3-S2-R4				
7	73	A	92	A	92	A	49	T3-S2-R4				
8	86	A	79	A	79	A	75	T3-S2-R4				
9	71	A	92	A	82	A	78	T3-S2-R4				
10	92	A	82	A	86	A	62	T3-S2-R4				
11	86	A	77	A	84	A	71	T3-S2-R4				
12	82	A	111	A	89	A	66	T3-S2-R4				
13	88	A	96	A	76	A	59	T3-S2-R4				
14	76	A	95	A	77	A	58	T3-S2-R4				
15	79	A	99	A	94	A	65	T3-S2-R4				
16	82	A	92	A	76	A	55	T3-S2-R4				
17	89	A	100	A	86	A	54	T3-S2-R4				
18	69	A	72	A	85	A	66	T3-S2-R4				
19	77	A	85	A	85	A	62	T3-S2-R4				
20	84	A	83	A	81	A	61	T3-S2-R4				
21	79	A	76	A	102	A	71	T3-S2-R4				
22	83	A	90	A	86	A	68	T3-S2-R4				
23	75	A	102	A	83	A	63	T3-S2-R4				
24	77	A	99	A	79	A	72	T3-S2-R4				
25	72	A	71	A	82	A	71	T3-S2-R4				
26	74	A	84	A	75	A	74	T3-S2-R4				
27	68	A	84	A	88	A	48	T3-S2-R4				
28	71	A	85	A	73	A	55	T3-S2-R4				
29	70	A	93	A	82	A	62	T3-S2-R4				
30	72	A	83	A	91	A	73	T3-S2-R4				
31	78	A	89	A	86	A	66	T3-S2-R4				
32	96	A	80	A	79	A	68	T3-S2-R4				
33	87	A	79	A	84	A	78	T3-S2-R4				
34	90	A	86	A	81	A	52	T3-S2-R4				
35	69	A	70	A	82	A	73	T3-S2-R4				
36	76	A	78	A	75	A	75	T3-S2-R4				
37	68	A	80	A	79	A	73	T3-S2-R4				
38	84	A	85	A	86	A	65	T3-S2-R4				
39	87	A	76	A	85	A	56	T3-S2-R4				
40	85	A	77	A	83	A	58	T3-S2-R4				

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO	Punto No.:
	Estudio de Velocidad de Punto FORMATO PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES	P2

Vialidad: Carretera México 57
 Tramo: Dirección Querétaro - México
 Sitio: 209 +300 km Fecha: 22 de agosto de 2018

Hora de inicio: 11:00 Latitud: 20.582955°
 Hora de término: 11:45 Longitud: - 100.357388°

Operador de JOSÉ JACOB DURAN CASILLAS Firma: _____
 pistola: _____

Observaciones: _____

The speed profile for a particular road section can only be estimated by measuring individual speeds through a spot speed study. Prior to conducting these studies, the minimum number of vehicles for which speed data are needed to sufficiently estimate speed parameters should be estimated. **The minimum number of vehicles required to accurately estimate the speed profile is dependent on the level of confidence required for the statistical analysis of the data. The ITE Manual of Transportation Engineering Studies⁴⁴ presents the following equation to calculate the minimum sample size for estimating the 85th percentile speed.**

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

Where:

N = minimum number of measured speeds

S = estimated sample standard deviation, mph

K = constant corresponding to desired confidence level

U = constant corresponding to the desired percentile speed

E = permitted error in the speed estimate, mph

The *Manual of Transportation Engineering Studies* provides tables for determining the values for S, K, and U. Table 11 shows an example sample size calculation for estimating the 85th percentile speed, using this formula.⁴⁴

Table 11. Example Calculation of Sample Size for Study to Determine 85th Percentile Speed

Assumptions:	
The average standard deviation is rounded to 5.0 mph	S = 5.0 mph
The desired confidence level is 95 percent	K = 1.96
The study will determine 85th percentile speed	U = 1.04
The permitted error is 2 mph	E = 2 mph
Calculation:	
Sample Size	N = 37
Analysis:	
Using a sample size of 37, the 85th percentile speed can be determined within 2 mph at a 95 percent confidence level.	

Performing the same calculation with a permitted error of 1 mph (E = 1 mph) results in a sample size of 148. A common sample size for many jurisdictions is 100 vehicles. Assuming a standard deviation of 5 mph, and using a 95 percent level of confidence, the 100 vehicle sample size will yield between a 1 and 2 mph error in the 85th percentile speed, and it makes calculation of the 85th percentile fairly simple (refer to Appendix H).

Table 12 lists the sample sizes and sample periods used by three States. Most States use 100 or more vehicles in each direction for each station. Since meeting the minimum collection data on low-volume roads can be difficult, adjustments on the sample size can be made based on the duration of the collection period. On highways carrying low traffic volumes, the speed checks at any one station are usually discontinued after two hours, even if a minimum of 100 vehicles have not been recorded.

Table 12. Sample Sizes and Data Collection Periods Used by Three States

State	Sample Size	Exceptions
MASSACHUSETTS ⁴⁴	100 or more vehicles in each direction should be checked at each station.	On highways carrying low traffic volumes, the checks at any one station may be discontinued after two hours although a minimum of 100 vehicles have not been timed.
OHIO ⁴⁵	Record speeds of 100 vehicles for each direction of travel.	Observation need not exceed one hour even if less than 100 vehicles are recorded traveling in each direction.
TEXAS ⁴⁶	A minimum of 125 cars in each direction, at each station.	Discontinue after two hours if radar is used, or after four hours if a traffic counter that classifies vehicles by type is used—even if 125 cars have not been timed.

Fuentes:

- Forbes, G. J., T. Gardner, H. McGee, and R. Srinivasan. Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report. Publication FHWA-SA-12-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.

	Vehículos A						Vehículos T3-S2-R4					
	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código
1	83	A	70	A	77	A	58	T3-S2-R4	63	T3-S2-R4		
2	82	A	75	A	66	A	66	T3-S2-R4	52	T3-S2-R4		
3	80	A	82	A	71	A	63	T3-S2-R4	42	T3-S2-R4		
4	83	A	81	A	69	A	54	T3-S2-R4	64	T3-S2-R4		
5	74	A	76	A	75	A	48	T3-S2-R4				
6	75	A	91	A	80	A	48	T3-S2-R4				
7	72	A	84	A	78	A	48	T3-S2-R4				
8	67	A	65	A	76	A	55	T3-S2-R4				
9	78	A	77	A	83	A	34	T3-S2-R4				
10	86	A	63	A	87	A	34	T3-S2-R4				
11	85	A	89	A	79	A	53	T3-S2-R4				
12	80	A	75	A	77	A	60	T3-S2-R4				
13	79	A	81	A	75	A	47	T3-S2-R4				
14	89	A	82	A	76	A	60	T3-S2-R4				
15	86	A	74	A	78	A	60	T3-S2-R4				
16	97	A	80	A	73	A	63	T3-S2-R4				
17	70	A	78	A	89	A	53	T3-S2-R4				
18	67	A	67	A	67	A	42	T3-S2-R4				
19	80	A	75	A	70	A	56	T3-S2-R4				
20	73	A	75	A	72	A	62	T3-S2-R4				
21	82	A	89	A	69	A	40	T3-S2-R4				
22	90	A	61	A	77	A	49	T3-S2-R4				
23	76	A	59	A	87	A	25	T3-S2-R4				
24	78	A	77	A	85	A	38	T3-S2-R4				
25	77	A	76	A	82	A	43	T3-S2-R4				
26	79	A	90	A	81	A	36	T3-S2-R4				
27	78	A	96	A	79	A	38	T3-S2-R4				
28	72	A	65	A	86	A	65	T3-S2-R4				
29	79	A	76	A	72	A	53	T3-S2-R4				
30	80	A	72	A	84	A	80	T3-S2-R4				
31	77	A	81	A	74	A	54	T3-S2-R4				
32	78	A	77	A	72	A	48	T3-S2-R4				
33	92	A	81	A	95	A	46	T3-S2-R4				
34	62	A	76	A	70	A	61	T3-S2-R4				
35	80	A	91	A	81	A	65	T3-S2-R4				
36	79	A	86	A	90	A	46	T3-S2-R4				
37	87	A	79	A	89	A	68	T3-S2-R4				
38	79	A	78	A	81	A	61	T3-S2-R4				
39	77	A	89	A	82	A	52	T3-S2-R4				
40	100	A	67	A	82	A	48	T3-S2-R4				

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO Estudio de Velocidad de Punto FORMATO PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES	Punto No.: P3
--	--	-------------------------

Vialidad: Carretera México 57
 Tramo: Dirección Querétaro - México
 Sitio: 208+110 km Fecha: 22 de agosto de 2018

Hora de inicio: 16:00 Latitud: 20.587358°
 Hora de término: 16:45 Longitud: - 100.348466°

Operador de JOSÉ JACOB DURAN CASILLAS Firma: _____
 pistola: _____

Observaciones: _____

The speed profile for a particular road section can only be estimated by measuring individual speeds through a spot speed study. Prior to conducting these studies, the minimum number of vehicles for which speed data are needed to sufficiently estimate speed parameters should be estimated. **The minimum number of vehicles required to accurately estimate the speed profile is dependent on the level of confidence required for the statistical analysis of the data. The ITE Manual of Transportation Engineering Studies⁴⁴ presents the following equation to calculate the minimum sample size for estimating the 85th percentile speed.**

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

Where:

N = minimum number of measured speeds

S = estimated sample standard deviation, mph

K = constant corresponding to desired confidence level

U = constant corresponding to the desired percentile speed

E = permitted error in the speed estimate, mph

The *Manual of Transportation Engineering Studies* provides tables for determining the values for S, K, and U. Table 11 shows an example sample size calculation for estimating the 85th percentile speed, using this formula.⁴⁴

Table 11. Example Calculation of Sample Size for Study to Determine 85th Percentile Speed

Assumptions:	
The average standard deviation is rounded to 5.0 mph	S = 5.0 mph
The desired confidence level is 95 percent	K = 1.96
The study will determine 85th percentile speed	U = 1.04
The permitted error is 2 mph	E = 2 mph
Calculation:	
Sample Size	N = 37
Analysis:	
Using a sample size of 37, the 85th percentile speed can be determined within 2 mph at a 95 percent confidence level.	

Performing the same calculation with a permitted error of 1 mph (E = 1 mph) results in a sample size of 148. A common sample size for many jurisdictions is 100 vehicles. Assuming a standard deviation of 5 mph, and using a 95 percent level of confidence, the 100 vehicle sample size will yield between a 1 and 2 mph error in the 85th percentile speed, and it makes calculation of the 85th percentile fairly simple (refer to Appendix H).

Table 12 lists the sample sizes and sample periods used by three States. Most States use 100 or more vehicles in each direction for each station. Since meeting the minimum collection data on low-volume roads can be difficult, adjustments on the sample size can be made based on the duration of the collection period. On highways carrying low traffic volumes, the speed checks at any one station are usually discontinued after two hours, even if a minimum of 100 vehicles have not been recorded.

Table 12. Sample Sizes and Data Collection Periods Used by Three States

State	Sample Size	Exceptions
MASSACHUSETTS ⁴⁴	100 or more vehicles in each direction should be checked at each station.	On highways carrying low traffic volumes, the checks at any one station may be discontinued after two hours although a minimum of 100 vehicles have not been timed.
OHIO ⁴⁵	Record speeds of 100 vehicles for each direction of travel.	Observation need not exceed one hour even if less than 100 vehicles are recorded traveling in each direction.
TEXAS ⁴⁶	A minimum of 125 cars in each direction, at each station.	Discontinue after two hours if radar is used, or after four hours if a traffic counter that classifies vehicles by type is used—even if 125 cars have not been timed.

Fuentes:

- Forbes, G. J., T. Gardner, H. McGee, and R. Srinivasan. Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report. Publication FHWA-SA-12-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.

	Vehículos A						Vehículos T3-S2-R4					
	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código
1	90	A	93	A	89	A	52	T3-S2-R4	52	T3-S2-R4		
2	96	A	95	A	79	A	58	T3-S2-R4	38	T3-S2-R4		
3	115	A	76	A	93	A	69	T3-S2-R4	20	T3-S2-R4		
4	70	A	103	A	96	A	34	T3-S2-R4	64	T3-S2-R4		
5	96	A	96	A	90	A	62	T3-S2-R4				
6	94	A	91	A	103	A	60	T3-S2-R4				
7	79	A	63	A	91	A	65	T3-S2-R4				
8	112	A	110	A	89	A	71	T3-S2-R4				
9	92	A	96	A	86	A	37	T3-S2-R4				
10	96	A	115	A	74	A	45	T3-S2-R4				
11	103	A	85	A	104	A	58	T3-S2-R4				
12	90	A	85	A	79	A	73	T3-S2-R4				
13	95	A	94	A	78	A	64	T3-S2-R4				
14	76	A	86	A	100	A	34	T3-S2-R4				
15	96	A	93	A	93	A	25	T3-S2-R4				
16	72	A	85	A	102	A	35	T3-S2-R4				
17	101	A	116	A	101	A	20	T3-S2-R4				
18	88	A	86	A	82	A	37	T3-S2-R4				
19	78	A	112	A	72	A	69	T3-S2-R4				
20	90	A	98	A	83	A	31	T3-S2-R4				
21	76	A	100	A	85	A	60	T3-S2-R4				
22	103	A	92	A	89	A	52	T3-S2-R4				
23	100	A	95	A	82	A	25	T3-S2-R4				
24	85	A	79	A	97	A	76	T3-S2-R4				
25	95	A	96	A	95	A	33	T3-S2-R4				
26	123	A	82	A	102	A	45	T3-S2-R4				
27	86	A	94	A	87	A	41	T3-S2-R4				
28	86	A	74	A	81	A	62	T3-S2-R4				
29	82	A	91	A	77	A	62	T3-S2-R4				
30	90	A	89	A	68	A	25	T3-S2-R4				
31	86	A	106	A	79	A	62	T3-S2-R4				
32	90	A	86	A	80	A	27	T3-S2-R4				
33	103	A	90	A	105	A	26	T3-S2-R4				
34	82	A	86	A	98	A	69	T3-S2-R4				
35	91	A	76	A	93	A	52	T3-S2-R4				
36	118	A	82	A	95	A	54	T3-S2-R4				
37	90	A	90	A	95	A	78	T3-S2-R4				
38	83	A	95	A	77	A	72	T3-S2-R4				
39	80	A	75	A	89	A	72	T3-S2-R4				
40	86	A	92	A	97	A	20	T3-S2-R4				

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO Estudio de Velocidad de Punto FORMATO PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES	Punto No.: P4
--	--	-------------------------

Validad: Carretera México 57
 Tramo: Dirección Querétaro - México
 Sitio: 207+310 km Fecha: 23 de agosto de 2018

Hora de inicio: 10:00 Latitud: 20.583462°
 Hora de término: 10:45 Longitud: - 100.343359°

Operador
 de JOSÉ JACOB DURAN CASILLAS Firma: _____
 pistola: _____

Observaciones: _____

The speed profile for a particular road section can only be estimated by measuring individual speeds through a spot speed study. Prior to conducting these studies, the minimum number of vehicles for which speed data are needed to sufficiently estimate speed parameters should be estimated. **The minimum number of vehicles required to accurately estimate the speed profile is dependent on the level of confidence required for the statistical analysis of the data. The ITE Manual of Transportation Engineering Studies⁴⁴ presents the following equation to calculate the minimum sample size for estimating the 85th percentile speed.**

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

Where:

N = minimum number of measured speeds

S = estimated sample standard deviation, mph

K = constant corresponding to desired confidence level

U = constant corresponding to the desired percentile speed

E = permitted error in the speed estimate, mph

The *Manual of Transportation Engineering Studies* provides tables for determining the values for S, K, and U. Table 11 shows an example sample size calculation for estimating the 85th percentile speed, using this formula.⁴⁴

Table 11. Example Calculation of Sample Size for Study to Determine 85th Percentile Speed

Assumptions:	
The average standard deviation is rounded to 5.0 mph	S = 5.0 mph
The desired confidence level is 95 percent	K = 1.96
The study will determine 85th percentile speed	U = 1.04
The permitted error is 2 mph	E = 2 mph
Calculation:	
Sample Size	N = 37
Analysis:	
Using a sample size of 37, the 85th percentile speed can be determined within 2 mph at a 95 percent confidence level.	

Performing the same calculation with a permitted error of 1 mph (E = 1 mph) results in a sample size of 148. A common sample size for many jurisdictions is 100 vehicles. Assuming a standard deviation of 5 mph, and using a 95 percent level of confidence, the 100 vehicle sample size will yield between a 1 and 2 mph error in the 85th percentile speed, and it makes calculation of the 85th percentile fairly simple (refer to Appendix H).

Table 12 lists the sample sizes and sample periods used by three States. Most States use 100 or more vehicles in each direction for each station. Since meeting the minimum collection data on low-volume roads can be difficult, adjustments on the sample size can be made based on the duration of the collection period. On highways carrying low traffic volumes, the speed checks at any one station are usually discontinued after two hours, even if a minimum of 100 vehicles have not been recorded.

Table 12. Sample Sizes and Data Collection Periods Used by Three States

State	Sample Size	Exceptions
MASSACHUSETTS ⁴⁴	100 or more vehicles in each direction should be checked at each station.	On highways carrying low traffic volumes, the checks at any one station may be discontinued after two hours although a minimum of 100 vehicles have not been timed.
OHIO ⁴⁵	Record speeds of 100 vehicles for each direction of travel.	Observation need not exceed one hour even if less than 100 vehicles are recorded traveling in each direction.
TEXAS ⁴⁶	A minimum of 125 cars in each direction, at each station.	Discontinue after two hours if radar is used, or after four hours if a traffic counter that classifies vehicles by type is used—even if 125 cars have not been timed.

Fuentes:

- Forbes, G. J., T. Gardner, H. McGee, and R. Srinivasan. Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report. Publication FHWA-SA-12-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.

	Vehículos A						Vehículos T3-S2-R4					
	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código
1	96	A	86	A	78	A	38	T3-S2-R4	62	T3-S2-R4		
2	78	A	96	A	74	A	72	T3-S2-R4	33	T3-S2-R4		
3	77	A	93	A	106	A	20	T3-S2-R4	46	T3-S2-R4		
4	75	A	102	A	90	A	20	T3-S2-R4	44	T3-S2-R4		
5	83	A	88	A	98	A	23	T3-S2-R4				
6	112	A	79	A	89	A	45	T3-S2-R4				
7	95	A	86	A	79	A	55	T3-S2-R4				
8	90	A	89	A	89	A	52	T3-S2-R4				
9	83	A	76	A	71	A	49	T3-S2-R4				
10	91	A	78	A	82	A	26	T3-S2-R4				
11	92	A	85	A	90	A	27	T3-S2-R4				
12	84	A	78	A	92	A	35	T3-S2-R4				
13	79	A	95	A	76	A	57	T3-S2-R4				
14	119	A	88	A	84	A	48	T3-S2-R4				
15	106	A	89	A	88	A	27	T3-S2-R4				
16	83	A	117	A	82	A	61	T3-S2-R4				
17	105	A	109	A	84	A	49	T3-S2-R4				
18	68	A	96	A	81	A	53	T3-S2-R4				
19	81	A	83	A	90	A	71	T3-S2-R4				
20	79	A	78	A	100	A	48	T3-S2-R4				
21	89	A	80	A	91	A	22	T3-S2-R4				
22	85	A	83	A	97	A	24	T3-S2-R4				
23	81	A	79	A	86	A	24	T3-S2-R4				
24	74	A	82	A	95	A	45	T3-S2-R4				
25	79	A	80	A	92	A	58	T3-S2-R4				
26	92	A	74	A	100	A	72	T3-S2-R4				
27	81	A	69	A	75	A	31	T3-S2-R4				
28	114	A	96	A	74	A	49	T3-S2-R4				
29	117	A	106	A	86	A	20	T3-S2-R4				
30	95	A	84	A	92	A	65	T3-S2-R4				
31	92	A	80	A	83	A	49	T3-S2-R4				
32	89	A	96	A	85	A	65	T3-S2-R4				
33	84	A	94	A	89	A	21	T3-S2-R4				
34	99	A	82	A	72	A	65	T3-S2-R4				
35	89	A	95	A	89	A	60	T3-S2-R4				
36	93	A	84	A	92	A	61	T3-S2-R4				
37	79	A	91	A	85	A	34	T3-S2-R4				
38	86	A	85	A	89	A	37	T3-S2-R4				
39	83	A	89	A	63	A	30	T3-S2-R4				
40	91	A	93	A	90	A	28	T3-S2-R4				

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO	Punto No.:
	Estudio de Velocidad de Punto FORMATO PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES	P5

Vialidad: Carretera México 57
 Tramo: Dirección Querétaro - México
 Sitio: 206+510 km Fecha: 23 de agosto de 2018

Hora de inicio: 10:00 Latitud: 20.577538°
 Hora de término: 10:45 Longitud: - 100.340014°

Operador de JOSÉ JACOB DURAN CASILLAS Firma: _____
 pistola: _____

Observaciones: _____

The speed profile for a particular road section can only be estimated by measuring individual speeds through a spot speed study. Prior to conducting these studies, the minimum number of vehicles for which speed data are needed to sufficiently estimate speed parameters should be estimated. **The minimum number of vehicles required to accurately estimate the speed profile is dependent on the level of confidence required for the statistical analysis of the data. The ITE Manual of Transportation Engineering Studies⁴⁴ presents the following equation to calculate the minimum sample size for estimating the 85th percentile speed.**

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

Where:

N = minimum number of measured speeds

S = estimated sample standard deviation, mph

K = constant corresponding to desired confidence level

U = constant corresponding to the desired percentile speed

E = permitted error in the speed estimate, mph

The *Manual of Transportation Engineering Studies* provides tables for determining the values for S, K, and U. Table 11 shows an example sample size calculation for estimating the 85th percentile speed, using this formula.⁴⁴

Table 11. Example Calculation of Sample Size for Study to Determine 85th Percentile Speed

Assumptions:	
The average standard deviation is rounded to 5.0 mph	S = 5.0 mph
The desired confidence level is 95 percent	K = 1.96
The study will determine 85th percentile speed	U = 1.04
The permitted error is 2 mph	E = 2 mph
Calculation:	
Sample Size	N = 37
Analysis:	
Using a sample size of 37, the 85th percentile speed can be determined within 2 mph at a 95 percent confidence level.	

Performing the same calculation with a permitted error of 1 mph (E = 1 mph) results in a sample size of 148. A common sample size for many jurisdictions is 100 vehicles. Assuming a standard deviation of 5 mph, and using a 95 percent level of confidence, the 100 vehicle sample size will yield between a 1 and 2 mph error in the 85th percentile speed, and it makes calculation of the 85th percentile fairly simple (refer to Appendix H).

Table 12 lists the sample sizes and sample periods used by three States. Most States use 100 or more vehicles in each direction for each station. Since meeting the minimum collection data on low-volume roads can be difficult, adjustments on the sample size can be made based on the duration of the collection period. On highways carrying low traffic volumes, the speed checks at any one station are usually discontinued after two hours, even if a minimum of 100 vehicles have not been recorded.

Table 12. Sample Sizes and Data Collection Periods Used by Three States

State	Sample Size	Exceptions
MASSACHUSETTS ⁴⁴	100 or more vehicles in each direction should be checked at each station.	On highways carrying low traffic volumes, the checks at any one station may be discontinued after two hours although a minimum of 100 vehicles have not been timed.
OHIO ⁴⁵	Record speeds of 100 vehicles for each direction of travel.	Observation need not exceed one hour even if less than 100 vehicles are recorded traveling in each direction.
TEXAS ⁴⁶	A minimum of 125 cars in each direction, at each station.	Discontinue after two hours if radar is used, or after four hours if a traffic counter that classifies vehicles by type is used—even if 125 cars have not been timed.

Fuentes:

- Forbes, G. J., T. Gardner, H. McGee, and R. Srinivasan. Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report. Publication FHWA-SA-12-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.

	Vehículos A						Vehículos T3-S2-R4					
	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código
1	86	A	97	A	92	A	20	T3-S2-R4	68	T3-S2-R4		
2	79	A	89	A	83	A	43	T3-S2-R4	30	T3-S2-R4		
3	88	A	79	A	87	A	41	T3-S2-R4	33	T3-S2-R4		
4	88	A	102	A	81	A	70	T3-S2-R4	48	T3-S2-R4		
5	79	A	98	A	94	A	41	T3-S2-R4				
6	119	A	99	A	88	A	63	T3-S2-R4				
7	74	A	99	A	75	A	34	T3-S2-R4				
8	79	A	89	A	82	A	22	T3-S2-R4				
9	95	A	72	A	74	A	33	T3-S2-R4				
10	93	A	94	A	69	A	52	T3-S2-R4				
11	86	A	76	A	86	A	52	T3-S2-R4				
12	92	A	90	A	91	A	26	T3-S2-R4				
13	97	A	95	A	96	A	62	T3-S2-R4				
14	92	A	90	A	84	A	72	T3-S2-R4				
15	84	A	93	A	96	A	68	T3-S2-R4				
16	86	A	89	A	110	A	20	T3-S2-R4				
17	91	A	104	A	108	A	25	T3-S2-R4				
18	103	A	98	A	98	A	27	T3-S2-R4				
19	104	A	95	A	79	A	34	T3-S2-R4				
20	86	A	86	A	99	A	30	T3-S2-R4				
21	101	A	89	A	85	A	42	T3-S2-R4				
22	97	A	83	A	92	A	24	T3-S2-R4				
23	98	A	91	A	113	A	65	T3-S2-R4				
24	101	A	74	A	89	A	35	T3-S2-R4				
25	102	A	103	A	82	A	33	T3-S2-R4				
26	86	A	77	A	90	A	49	T3-S2-R4				
27	87	A	105	A	74	A	40	T3-S2-R4				
28	85	A	86	A	94	A	52	T3-S2-R4				
29	82	A	101	A	81	A	64	T3-S2-R4				
30	86	A	98	A	79	A	57	T3-S2-R4				
31	106	A	93	A	90	A	52	T3-S2-R4				
32	95	A	94	A	72	A	56	T3-S2-R4				
33	82	A	104	A	85	A	42	T3-S2-R4				
34	66	A	78	A	75	A	62	T3-S2-R4				
35	89	A	77	A	92	A	42	T3-S2-R4				
36	86	A	104	A	94	A	43	T3-S2-R4				
37	84	A	94	A	104	A	34	T3-S2-R4				
38	87	A	95	A	108	A	60	T3-S2-R4				
39	101	A	99	A	85	A	31	T3-S2-R4				
40	98	A	101	A	103	A	25	T3-S2-R4				

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO	Punto No.:
	Estudio de Velocidad de Punto FORMATO PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES	P6

Vialidad: Carretera México 57
 Tramo: Dirección Querétaro - México
 Sitio: 205+300 km Fecha: 23 de agosto de 2018

Hora de inicio: 16:00 Latitud: 20.574274°
 Hora de término: 16:45 Longitud: - 100.330695°

Operador de JOSÉ JACOB DURAN CASILLAS Firma: _____
 pistola: _____

Observaciones: _____

The speed profile for a particular road section can only be estimated by measuring individual speeds through a spot speed study. Prior to conducting these studies, the minimum number of vehicles for which speed data are needed to sufficiently estimate speed parameters should be estimated. **The minimum number of vehicles required to accurately estimate the speed profile is dependent on the level of confidence required for the statistical analysis of the data. The ITE Manual of Transportation Engineering Studies⁴⁴ presents the following equation to calculate the minimum sample size for estimating the 85th percentile speed.**

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2}$$

Where:

N = minimum number of measured speeds

S = estimated sample standard deviation, mph

K = constant corresponding to desired confidence level

U = constant corresponding to the desired percentile speed

E = permitted error in the speed estimate, mph

The *Manual of Transportation Engineering Studies* provides tables for determining the values for S, K, and U. Table 11 shows an example sample size calculation for estimating the 85th percentile speed, using this formula.⁴⁴

Table 11. Example Calculation of Sample Size for Study to Determine 85th Percentile Speed

Assumptions:	
The average standard deviation is rounded to 5.0 mph	S = 5.0 mph
The desired confidence level is 95 percent	K = 1.96
The study will determine 85th percentile speed	U = 1.04
The permitted error is 2 mph	E = 2 mph
Calculation:	
Sample Size	N = 37
Analysis:	
Using a sample size of 37, the 85th percentile speed can be determined within 2 mph at a 95 percent confidence level.	

Performing the same calculation with a permitted error of 1 mph (E = 1 mph) results in a sample size of 148. A common sample size for many jurisdictions is 100 vehicles. Assuming a standard deviation of 5 mph, and using a 95 percent level of confidence, the 100 vehicle sample size will yield between a 1 and 2 mph error in the 85th percentile speed, and it makes calculation of the 85th percentile fairly simple (refer to Appendix H).

Table 12 lists the sample sizes and sample periods used by three States. Most States use 100 or more vehicles in each direction for each station. Since meeting the minimum collection data on low-volume roads can be difficult, adjustments on the sample size can be made based on the duration of the collection period. On highways carrying low traffic volumes, the speed checks at any one station are usually discontinued after two hours, even if a minimum of 100 vehicles have not been recorded.

Table 12. Sample Sizes and Data Collection Periods Used by Three States

State	Sample Size	Exceptions
MASSACHUSETTS ⁴⁴	100 or more vehicles in each direction should be checked at each station.	On highways carrying low traffic volumes, the checks at any one station may be discontinued after two hours although a minimum of 100 vehicles have not been timed.
OHIO ⁴⁵	Record speeds of 100 vehicles for each direction of travel.	Observation need not exceed one hour even if less than 100 vehicles are recorded traveling in each direction.
TEXAS ⁴⁶	A minimum of 125 cars in each direction, at each station.	Discontinue after two hours if radar is used, or after four hours if a traffic counter that classifies vehicles by type is used—even if 125 cars have not been timed.

Fuentes:

- Forbes, G. J., T. Gardner, H. McGee, and R. Srinivasan. Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report. Publication FHWA-SA-12-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.

	Vehículos A						Vehículos T3-S2-R4					
	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código
1	79	A	91	A	89	A	23	T3-S2-R4	20	T3-S2-R4		
2	88	A	112	A	105	A	39	T3-S2-R4	23	T3-S2-R4		
3	106	A	119	A	85	A	76	T3-S2-R4	55	T3-S2-R4		
4	97	A	87	A	90	A	30	T3-S2-R4	69	T3-S2-R4		
5	95	A	95	A	79	A	67	T3-S2-R4				
6	94	A	96	A	72	A	72	T3-S2-R4				
7	89	A	79	A	103	A	65	T3-S2-R4				
8	88	A	79	A	87	A	70	T3-S2-R4				
9	83	A	86	A	90	A	27	T3-S2-R4				
10	90	A	83	A	88	A	24	T3-S2-R4				
11	89	A	92	A	96	A	20	T3-S2-R4				
12	86	A	92	A	82	A	43	T3-S2-R4				
13	85	A	79	A	99	A	51	T3-S2-R4				
14	92	A	78	A	93	A	26	T3-S2-R4				
15	109	A	69	A	92	A	26	T3-S2-R4				
16	89	A	80	A	81	A	66	T3-S2-R4				
17	79	A	86	A	99	A	31	T3-S2-R4				
18	71	A	87	A	85	A	46	T3-S2-R4				
19	90	A	92	A	89	A	27	T3-S2-R4				
20	91	A	73	A	88	A	49	T3-S2-R4				
21	89	A	84	A	97	A	64	T3-S2-R4				
22	85	A	82	A	93	A	36	T3-S2-R4				
23	81	A	94	A	98	A	25	T3-S2-R4				
24	79	A	80	A	72	A	75	T3-S2-R4				
25	86	A	73	A	97	A	65	T3-S2-R4				
26	92	A	83	A	84	A	62	T3-S2-R4				
27	85	A	90	A	93	A	63	T3-S2-R4				
28	91	A	79	A	89	A	29	T3-S2-R4				
29	96	A	76	A	79	A	51	T3-S2-R4				
30	111	A	110	A	89	A	30	T3-S2-R4				
31	82	A	83	A	98	A	59	T3-S2-R4				
32	92	A	90	A	85	A	42	T3-S2-R4				
33	73	A	96	A	84	A	64	T3-S2-R4				
34	82	A	79	A	82	A	20	T3-S2-R4				
35	82	A	93	A	92	A	50	T3-S2-R4				
36	91	A	100	A	95	A	65	T3-S2-R4				
37	83	A	94	A	91	A	49	T3-S2-R4				
38	90	A	75	A	89	A	61	T3-S2-R4				
39	72	A	88	A	82	A	20	T3-S2-R4				
40	85	A	89	A	90	A	25	T3-S2-R4				