



CIATEC

Análisis de la confiabilidad del tiempo de tránsito en sistemas de transporte de carga por carretera: un enfoque de Fluidez.

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

Maestro en Ciencia y
Tecnología
en la Especialidad de
Ingeniería Industrial y de
Manufactura.

PRESENTA:

Ing. Carlos Mario Pérez González.

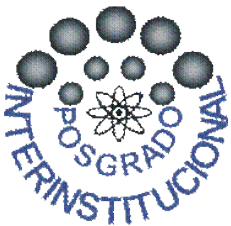
Tutor Académico.

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos.

Tutor en Planta.

Dr. Eric Moreno Quintero.

León, Guanajuato, México, Noviembre del 2017.



León, Gto., a 27 noviembre de 2017.
Ref. No. 09517/Posgrados/PICYT.

Coordinador de Posgrado.
PICYT – CIATEC.
Guanajuato.

Los abajo firmantes miembros del Comité Tutorial del alumno **Carlos Mario Pérez González**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “*Análisis de la confiabilidad del tiempo de tránsito en sistemas de transporte de carga por carretera: un enfoque de fluidez*”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 27 días del mes de noviembre del año dos mil diecisiete.

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos.
Tutor Académico.

Dr. Eric Moreno Quintero.
Tutor en Planta.

EG-850-01-F13

León, Gto., a 06 diciembre de 2017

Dr. Ricardo Jaime Guerra Sánchez.

Guerra Director General.
PICYT – CIATEC.
León, Guanajuato.

Estimado Dr. Guerra:

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **Carlos Mario Pérez González**, una vez leída y revisada su Tesis titulada “*Análisis de la confiabilidad del tiempo de tránsito en sistemas de transporte de carga por carretera: un enfoque de fluidez*”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 06 días del mes de diciembre del año dos mil diecisiete.

Dr. Agustín Bustos Rosales.
Presidente.

Dr. Sergio Alonso Romero.
Secretario.

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos.
Vocal.

EG-850-01-F14

Agradecimientos

“La gratitud es la memoria del corazón” es una frase atribuida al Lao Tse. Hoy que termino esta etapa de mi formación, debo agradecer a todos lo que han estado a mi lado siempre. Aquellos que a pesar de todo han seguido mi desarrollo y han estado pendiente de mí. A todos y cada uno de ellos: Gracias!

Gracias a dios por todo lo que me ha dado y lo que no, porque lo veo en cada una de las personas de mi vida y sé que estás ahí aunque no pueda verte.

Primero que nada me gustaría agradecer a mi familia, la que me ha apoyado en cada una de las etapas de mi vida. A mi madre que me ha demostrado con el producto de su esfuerzo que todo se puede lograr en esta vida. Por soportar mi desarrollo en cada momento y dejarme crecer y “volar” cuando era necesario. Gracias por las noches en vela. Gracias por la confianza que ha demostrado al estar absolutamente segura de que, lo que me ha enseñado me permitirá salir adelante en todas las etapas de mi vida. Gracias

A mi hermano, Russell, por ser una fuente de fuerza y aprendizaje inagotable. Por vivir a mi lado grandes tempestades y ayudarme a soportarme en los peores momentos. Gracias a ti he aprendido el valor del esfuerzo y con tu ejemplo he podido tomar caminos que me han llevado a lo que soy. Hoy puedo decir sin lugar a dudas que si una persona tan grande como tú, no habría llegado hasta donde estoy ahora. Gracias.

A mi abuelita, Esther, quien me ha enseñado el valor del amor y gracias a ella sigo adelante. Por pensar en mí todos y cada uno de los días. Sin duda sin tu cariño y apoyo mi crecimiento no hubiera sido el mismo. Tu sabiduría y experiencia ha guiado mis pasos desde el momento que salí a buscar mi camino. Gracias a todos ustedes y sin lugar a dudas, los amo con todo mi corazón.

Aprovecho este espacio para agradecer a todos aquellos quienes han estado conmigo en este proceso. A mis amigos por su compañía durante dos años, espero conservar su amistad en el futuro.

Gracias a CONACYT por su apoyo económico y su programa sin el cual esto no hubiese sido posible. A mi tutor académico, el Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos, por darme la oportunidad que tuve. Por sus consejos y apoyo. Los cuales me han hecho crecer personal y profesionalmente, gracias.

A todos aquellos que han puesto directa e indirectamente su esfuerzo y apoyo para este proyecto, mis revisores y jueces. A todos los miembros del IMT que han hecho de mi estancia, inolvidable y amena, gracias.

Y para finalizar me gustaría agradecer a mí mismo, por tanta paciencia. Si lees esto en futuro, recuerda que: *“Cuando sientas que la noche es más oscura, no temas, es señal que el sol está por salir”*. A todos ustedes: Gracias! Lo hicimos!

Resumen autobiográfico del autor

Carlos Mario Pérez González, nació en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, el día 20 de Julio de 1987, en una tarde lluviosa y fría. Su madre Isaela González Jiménez y su abuelita Esther Jiménez Córdova criaron de él inculcándole las mejores enseñanzas para sobresalir en la vida.

Se graduó como Ingeniero Industrial por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, obteniendo resultados sobresalientes. Desde temprana edad revelo talento para la escritura y la logística. De grácil palabra y enorme corazón, busca la mejora de la sociedad mediante la ciencia, específicamente la Logística.

El Ing. Carlos Mario tiene una sólida formación en Ingeniería Industrial y manufactura, administración de microempresas y relaciones interpersonales. Se desempeñó como administrador un pequeño micro negocio, llegando a comprender la compleja relación, cliente vendedor. Y fue docente del idioma ingles por 1 año, dejando su puesto para seguir sus sueños, mejorando su formación académica.

Se mudó de su ciudad natal en la búsqueda de nuevas fronteras, puesto que esta ya no era capaz de ofrecerle nuevos retos. Actualmente realiza investigación en el área de cadena de suministro. Se especializa en el análisis de los sistemas de transporte por carretera, desde el punto de vista de la fluidez de carga. Estudia la cadena de suministro como un todo integral y sus partes, interrelacionándolas mediante análisis estadísticos.

Resumen

Los sistemas de transporte son de vital importancia para el desarrollo de la sociedad actual. La economía actual se ve impulsada por el transporte de mercancía, generando competitividad en la región y diversificando las opciones para los consumidores. Por lo tanto el análisis de los sistemas de transporte debería de ser una necesidad para el desarrollo nacional. La evaluación del mismo servirá de punto de referencia para la toma de decisiones en inversión y focalización de esfuerzos. La tarea de la medición del desempeño en sistemas de carga así como la utilización de índices de confiabilidad aún está en desarrollo en nuestro país y la información existen es prácticamente nula.

Contrario a lo que pudiera pensarse, es posible la implementación y puesta en marcha de planes para la medición de confiabilidad y fluidez, sin embargo, existe mucho trabajo por delante. El presente trabajo es evidencia de ese esfuerzo. Dentro de los principales resultados se fue posible identificar un creciente interés en la medición e implementación de medidas de confiabilidad para sistemas de transporte. El interés en el análisis de confiabilidad se basa en la necesidad de los usuarios de planear sus viajes y evadir los gastos relacionados con los retrasos. A pesar que el concepto de fluidez es relativamente nuevo. Los esfuerzos por la medición del desempeño de las cadenas de suministros, conduce paulatinamente a un análisis de fluidez el cual integra varios análisis capaz de dar una representación adecuado del funcionamiento del sistema.

En este sentido, se valida una metodología para el análisis de la confiabilidad en sistemas de transporte de carga por carretera, así como el cálculo de índices relativos a la fluidez de carga. Se busca medir la variabilidad en los tiempos de viaje y establecer medidas de tiempo representativas, para el segmento de un corredor de transporte. Para la evaluación del tiempo de viaje se utiliza las medidas recomendadas por la FHWA así como los estadísticos de sesgo y amplitud para medidas de confiabilidad. Las aportaciones realizadas por esta investigación fueron: se consideró el sesgo en la distribución de los datos para el cálculo de las medidas de fluidez y probaron distribuciones mezcladas para la modelación del conjunto de

datos, ii) Se realizó un análisis de los segmentos utilizando el Índice de fluidez y el Índice de tiempo planificado, iii) Se expusieron líneas futuras de investigación relacionadas a la realización de un estudio de fluidez en sistemas de carga.

Índice

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN BIOGRAFICO

RESUMEN

Índice.....	1
Lista de Tablas.....	5
Lista de Figuras.....	6
1 Introducción.....	8
1.1 Introducción.....	9
1.1.1 Fluidez de carga	10
1.2 Planteamiento del problema.....	13
1.3 Descripción de problema.....	14
1.4 Justificación.....	15
1.5 Preguntas de la investigación	16
1.6 Hipótesis	17
1.7 Contribuciones	17
1.8 Objetivos	18
1.8.1 Objetivo general.....	18
1.8.2 Objetivos específicos.....	19
1.9 Alcances y limitaciones	19
1.10 Resultados e impactos esperados	20
1.10.1 Impactos.....	20
1.10.2 Metas de la Investigación	20
1.11 Organización del informe	21
2 Revisión de literatura.....	23
2.1 Introducción.....	24
2.2 Fluidez en la cadena de suministro.....	25

2.3	Confiabilidad	27
2.3.1	Análisis del tiempo de viaje	28
2.4	Metodologías actuales	29
2.5	Análisis de indicadores comunes para la confiabilidad	33
2.5.1	Escenarios de interés	36
2.5.2	Corredores Logísticos en México	39
2.6	Conclusiones.....	40
3	Metodología	43
3.1	Metodología de investigación.....	44
3.1.1	Justificación de la metodología.....	45
3.1.2	Procedimiento de investigación	46
3.2	Fluidez en la cadena de suministro.....	49
3.3	Confiabilidad	51
3.3.1	Obtención de datos.....	52
3.3.2	Datos atipicos	54
3.4	Pruebas de bondad de ajuste	54
3.4.1	Kolmogorov-Smirnov	55
3.4.2	Anderson-Darling.....	55
3.4.3	Ji-cuadrada.....	56
3.4.4	Log verosimilitud.....	56
3.5	Distribuciones especiales.....	57
3.5.1	Singh Maddala.....	57
3.5.2	Distribuciones Mezcladas	59
3.6	Transformaciones de variables	60
3.6.1	Transformación de Johnson	60
3.7	Confiabilidad en el tiempo de viaje.....	61
3.7.1	Definición del uso de las medidas de confiabilidad.....	63

3.7.2	Desarrollo del plan basado en los usuarios y sus necesidades....	65
3.7.3	Recolección de la información	66
3.8	Conclusiones.....	67
4	Análisis y discusión de resultados.....	68
4.1	Introducción.....	69
4.1.1	Recopilación de la información.....	70
4.1.2	Definición del uso de las medidas de confiabilidad.....	71
4.1.3	Medidas de confiabilidad en sistemas de transporte	73
4.1.4	Desarrollo del plan basado en los usuarios y sus necesidades....	79
4.1.5	Recolección y análisis de la información	79
4.2	Análisis de confiabilidad	79
4.2.1	Caseta 2063- 2065	80
4.2.2	Caseta 2065- 2069	92
4.2.3	Caseta 2069 - 2068	102
4.2.4	PM	112
4.2.5	AM	122
4.3	Conclusiones.....	131
5	Conclusiones.....	133
5.1	Introducción.....	134
5.2	Limitaciones	143
5.3	Líneas futuras	144
5.3.1	Recolección de información.....	144
5.3.2	Distribuciones Mezcladas	145
5.3.3	Análisis de fluidez	145
	Bibliografía	147

Lista de Tablas

Tabla 1 Medidas recomendadas por SHRP	31
Tabla 2 Resumen de ajuste del segmento.	82
Tabla 3 Parámetros de la distribución Singh Maddala.	82
Tabla 4 Resumen de Prueba de bondad de ajuste.	83
Tabla 5 Resumen pruebas de bondad de ajuste.	94
Tabla 6 Resumen prueba de bimodalidad.	94
Tabla 7 Resumen de la mezcla de distribuciones.	95
Tabla 8 Resúmenes de percentiles.	96
Tabla 9 Resumen de percentiles.	100
Tabla 10 Resumen de bondad de ajuste.	103
Tabla 11 Parámetros Distribución Singh-Maddala.	104
Tabla 12 Prueba de bondad de ajuste a Singh Maddala.	105
Tabla 13 Resumen estadístico. Fuente: Elaboración propia	105
Tabla 14 Resumen de medidas de confiabilidad (PM).	112
Tabla 15 Resumen de medidas de confiabilidad (PM) continuación.	113
Tabla 16 Índices más altos del FI.	114
Tabla 17 Resumen de medidas de confiabilidad (AM).	123
Tabla 18 Resumen de medidas de confiabilidad (AM).	124
Tabla 19 Índices FI más altos del tramo.	125
Tabla 20 Comparación del índice de Fluidez y tiempo promedio de ambos segmentos.	136
Tabla 21 Relación Autor vs Distribución de probabilidad.	137

Lista de Figuras

Fig. 1 Proceso de investigación abductiva (Kovács y Spens, 2005).	45
Fig. 2 Metodología propuesta de investigación	48
Fig. 3 Enfoque metodológico para medidas de confiabilidad.	63
Fig. 4 Procedimiento para para establecer el uso y el usuario de las medidas de confiabilidad	65
Fig. 5 Procedimiento para para establecer el uso y el usuario de las medidas de confiabilidad	73

1 Introducción

Resumen

En este capítulo se presenta las principales motivaciones para la realización del presente estudio. La importancia de los estudios de fluidez y confiabilidad. Se compone de 7 secciones. La primera sección da una explicación introductoria sobre la confiabilidad y fluidez. La segunda tercera y cuarta sección, no presentan el planteamiento, la descripción del problema y la justificación de la investigación respectivamente. Consecuentemente, la quinta, sexta y séptima sección, abordan las preguntas de investigación, la formulación de la hipótesis y las contribuciones de la investigación.

1.1 Introducción

En la actualidad, al ser el transporte un facilitador del ajuste entre la oferta y la demanda de productos, tanto los tomadores de decisiones en el gobierno, empresa o bien en los sectores académicos, consideran al transporte como un elemento clave para mejorar la competitividad económica de los países. De acuerdo a O'Rourke et. al. (2015), cuando las estancias gubernamentales hablan sobre como el transporte mejora la competitividad, generalmente están buscando promover la expansión de los negocios dentro de una región en específico. El transporte de carga puede ayudar a este propósito. Mejoras en el mismo propician tiempos de tránsito más cortos o estables, mejorando de esta forma la confiabilidad de llegada de las cargas, reduciendo los costos de la transportación y propiciando una mejor conectividad entre zonas. Estas mejoras ayudan a los negocios a acceder a nuevos suministros, proveedores con precios más competitivos y nuevos mercados emergentes. Si los tiempos de tránsito son representativos y confiables, propiciará un manejo adecuado de los inventarios ya que el ajuste entre la oferta y la demanda se hace sin distorsiones yendo incluso del Justo a Tiempo al Justo en Secuencia, reduciendo el costo logístico total de la producción (Cedillo-Campos et. al., 2017). Al reducir el costo logístico total, estas empresas son capaces de producir "más con menos" y estos ahorros pueden ser transmitidos a los consumidores.

El facilitar el acceso a diferentes mercados, promueve la competencia y con ello su efectividad. De esta forma el transporte favorece a que la efectividad económica de las regiones se aproveche potenciando la competitividad. Mejorando de esta forma la productividad para impulsar oportunidades de crecimiento (O'Rourke et. al., 2015).

Dada la importancia crítica del transporte en el proceso de alineamiento de la oferta con la demanda y con ello, en la competitividad económica de una región o país, la medición de la fluidez de carga se vuelve fundamental para México. Sobre todo, en momentos en los que la renegociación del Tratado de Libre Comercio para América del Norte (TLCAN) está provocando alta incertidumbre con respecto al potencial re-direccionamiento de los flujos de comercio internacional del país.

1.1.1 Fluidez de carga

Un sistema de medición de los tiempos de tránsito que se base solamente en tiempos promedio, no refleja el panorama completo del sistema de flujos de carga. Los tiempos promedio no son en realidad representativos de las condiciones de viaje. Se requiere de información complementaria capaz de proporcionar una visión clara de las necesidades de mejora y que permita a los tomadores de decisiones operar dentro del sistema. Para entender la complejidad del tema aquí abordado, es necesario definir lo que se entiende por “*Fluidez*”. De acuerdo a una de las agencias de transporte más importantes en Estados Unidos, el Instituto de Transporte de Texas cuando se habla de “*Fluidez de Carga*”, se debe entender como un amplio rango de medidas de desempeño de sistema de transporte de carga en un área específica de interés donde cualquier cantidad de medidas de mejora son utilizadas para describir el desempeño que incluyen:

- i) Confiabilidad en los tiempos de viaje expresada en medidas de tiempo y que es el objeto principal de la presente investigación;
- ii) Costos, de transporte y almacenamiento de carga;
- iii) Cantidad de carga movida, incluyendo información sobre el tipo de carga;
- iv) Análisis de riesgo, en tasa de fatalidades, daño y pérdida de carga; y
- v) Resiliencia del sistema, es decir, la capacidad del sistema para recuperarse ante eventos disruptivos.

La medición de la Fluidez de Carga es aún un área en desarrollo. Diferentes equipos de investigadores alrededor del mundo están realizando importantes esfuerzos en la definición de medidas y en el análisis de datos. Así, desde el enfoque carretero, el Ministerio de Transporte de Canadá conocido como “*Transport Canada*” han sentado bases importantes sobre el tema (Eisele et. al., 2011). Por otro lado, desde un enfoque más amplio de cadena de suministro aplicado a la medición de la fluidez para sistemas de transporte intermodal, el Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística ha hecho contribuciones importantes (Cedillo-Campos et. al., 2017).

En todos ellos, la medición del tiempo de viaje es uno de los componentes principales del análisis de fluidez. De ella dependen los dos grandes indicadores propuestos dentro del estudio de fluidez:

- i) El “Indicador de Fluidez” (Fluidity Index); y el
- ii) El “Índice de Tiempo Planificado” (Planning Time Index);

Ambos índices serán explicados más adelante en la sección dedicada al marco teórico de la presente investigación. Es importante señalar que ambos índices fueron diseñados para ser comparados entre sí, enfocándose en la componente de tiempo de los viajes de un punto inicial a un punto final de la cadena de suministro. Con ellos, por ejemplo, es posible medir el impacto en el desempeño de los principales corredores de transporte de carga de un país.

En los más recientes análisis de fluidez, ya se contempla el desempeño de la cadena de suministro con un punto de vista global. Lo cual es de vital importancia para el desarrollo de la economía a nivel regional, impactando en la comprensión de la eficiencia general del sistema. Sin embargo, es correcto señalar que el reto para las actuales técnicas de medición de los tiempos de viaje no es su cálculo, sino más bien el considerar a la cadena de suministro como un sistema completo. Es decir, el no considerar el sistema desde el punto inicial al punto final de la operación y no contar con indicadores adecuados así como medidas de tiempo apegados al comportamiento real en corredores de transporte. Un enfoque sistémico de confiabilidad ayuda a localizar y analizar los puntos críticos del sistema con el propósito de encontrar los factores que ocasionan las congestiones y establecer su relación con la variabilidad (Cedillo-Campos et al., 2014).

De éste modo, para el presente trabajo, fluidez dentro de la cadena de suministro se entiende como: *“El nivel de capacidad para alcanzar de forma continua, confiable, segura y precisa, un continuo flujo financiero, de talento, carga e información, que apoye de forma efectiva los objetivos de cadena de suministro con un balanceado enfoque público-privado.”* (Cedillo-Campos et al., 2017). Por otro lado, el concepto de confiabilidad es entendido como: *“La variación del tiempo de viaje a lo largo del periodo de observación.”* (Systematics, 2002). Además, el concepto de variabilidad se entiende como: *“La cantidad de*

inconsistencia en las condiciones de operación” (Lomax, S. et. al., 2003), la cual, al ser una definición abierta, brinda la posibilidad de extenderla a otros índices o medidas de tiempo. Esta variación en las “*condiciones de operación*” afecta significativamente a la forma en que se desempeña la red, dependiendo de los factores que la causen se requiere de un análisis capaz de captar esas variaciones.

En este sentido, es importante señalar que las redes de transporte son susceptibles a la interrupción del servicio debido a las variaciones en la demanda y la capacidad de la red, las cuales de hecho cambian en periodos cortos de tiempo. La interrupción del sistema de transporte puede llegar a ocasionar en algunos casos extremos, pérdidas cuantiosas y amenazar la integridad de la población debido a desastres naturales o atentados terroristas. Esta variabilidad en los tiempos de recorrido a través de la red es la que se analiza dentro del estudio de confiabilidad para la implementación de medidas de fluidez.

1.1.1.1 Confiabilidad

En este sentido, la confiabilidad en el tiempo de viaje ha sido ampliamente reconocida como uno de los indicadores clave de una red de transporte (Sumalee, et. al., 2013). Una de las ventajas de éste tipo de análisis es la posibilidad de identificar causas de congestión que lleven a reducir costos debido a retrasos. Es por ello que la confiabilidad en los tiempos de viaje especialmente en los sistemas de autotransporte de carga es considerada en la actualidad como indispensable. A su vez, es importante señalar que la variabilidad es inherente a todo sistema (Cedillo-Campos et al., 2014). Considerar cualquier sistema sin tomar en cuenta el valor de la variabilidad no estaría apegado a un comportamiento real.

En países donde la recolección de información referente a confiabilidad/variabilidad en los tiempos de viaje es escasa o totalmente inexistente, los modelos se basan en los tiempos promedio de viaje. Estos tiempos promedio no son representativos de las circunstancias de viaje y tampoco reflejan la percepción del usuario con respecto al tiempo de traslado.

En consecuencia, dicha problemática redundante en una necesidad estratégica tanto para las empresas, como para los gobiernos, de contar con información y análisis que favorezcan la toma de decisiones con base en datos confiables y de preferencia, colectados en tiempo real.

1.2 Planteamiento del problema

Derivado de un análisis crítico de la bibliografía publicada hasta hoy sobre medidas de confiabilidad y fluidez aplicada al transporte, la logística y/o la cadena de suministro, se determinó que específicamente el área relativa a los estudios de confiabilidad es de suma importancia para el desarrollo de las oportunidades de mejora y el desarrollo de estudios posteriores para la medición de la fluidez del sistema de transporte (Muilerman et. al., 2005).

En realidad, en diversos países se ha llevado a cabo estudios de confiabilidad en redes urbanas y autopistas o en su defecto la combinación de ambas, los cuales han arrojado resultados ejemplares para la optimización del servicio que ofertan las redes de transporte (Bhourri et. al., 2012). Dichos estudios han logrado establecer márgenes de tiempo que representan de mejor forma el flujo vehicular real, lo que plantea oportunidades de mejora para el sistema en el proceso de toma de decisiones.

En México, donde el transporte por carretera representa el principal medio de transporte tanto de la carga, como de pasajeros, es de vital importancia el establecimiento de medidas de confiabilidad desde el punto de vista del usuario y su percepción de servicio con respecto a los tiempos de traslado experimentados al transportarse. Los tiempos promedio no son representativos de las operaciones de transporte, y no son capaces de proporcionar una estrategia de planeación eficiente a los transportistas, quienes deben absorber tiempos de espera o retrasos que se traducen en costos o pérdida de oportunidad.

1.3 Descripción de problema

Para el presente estudio se considera que un análisis integral de la cadena de suministro que considere cada uno de los recorridos realizados en el transporte desde el punto inicial al punto final de sus operaciones, favorecerá la pertinente definición de medidas de confiabilidad con miras al establecimiento de índices de fluidez para el análisis de corredores de carga. Sin embargo, con el pleno conocimiento de la alta complejidad que implicaría el coleccionar y analizar toda la información involucrada, se ha seleccionado el contar con información de los desplazamientos en corredores de carga, como ejes integradores de los movimientos dentro de las diferentes cadenas de suministro operando en una región o país.

La principal motivación del presente estudio recae en el interés por probar indicadores relativos a la confiabilidad con la finalidad de mejorar el desempeño en corredores de transporte de carga. Para ello se utilizó un caso específico de prueba, el corredor México-Nuevo Laredo en su segmento México - Querétaro. En realidad, no solo es necesario el cálculo estadístico y económico, se requiere además la consideración de escenarios de operación en el tramo a analizar (fin de semana, días hábiles o días inhábiles) para predecir el impacto de la variabilidad en el tiempo de viaje.

En éste contexto, cabe señalar que el tiempo de viaje se compone del tiempo de viaje con flujo libre y el tiempo adicional de viaje. El primero se refiere al tiempo de viaje en el que el usuario no encuentra obstáculo alguno o encuentra muy poco tráfico, el segundo resulta de cada incremento en el tiempo de viaje por las variaciones en las condiciones de tráfico. Con respecto a las variaciones en las condiciones de tráfico, se pueden catalogar por un lado en predecibles, tal como las congestiones viales para las que los usuarios pueden tomar medidas preventivas y por otro lado, en impredecibles, las cuales están estrechamente relacionadas con la incertidumbre del tiempo de viaje (Carrion y Levinson, 2012).

La medición de la confiabilidad es fundamental para la modelación, análisis de costos y la evaluación de proyectos en general. Es importante por al menos tres razones: i) Para la formulación de políticas de transporte con la finalidad de incrementar la eficiencia en el movimiento de los flujos; ii) Para la comprensión

del comportamiento del consumo entre regiones; y finalmente para la iii) Modelación de la demanda de transporte (A.Small, 2012).

Es así que para el punto de partida del presente estudio, se tomó como base el documento desarrollado por Cedillo-Campos et al., (2017). En él, los autores establecen que para medir la fluidez en la cadena de suministros, se debe partir desde el análisis de los flujos a nivel producto. Los autores plantean un modelo en el cual relacionan el valor y riesgo de la carga, la distancia, el tiempo de recorrido y la confiabilidad en el tiempo de recorrido. Para ello utilizan los costos de diseño, gestión, uso, costo fijo, costo operativo y de riesgo aleatorio de un corredor de transporte intermodal de acuerdo al costo logístico total de una compañía y su factibilidad para el uso de un corredor de transporte de carga intermodal. Concluyendo con el establecimiento de una ecuación de costo logístico total.

En este sentido, el problema tratado en la presente investigación es la medición de la confiabilidad con miras a realizar el estudio de fluidez en el sistema de transporte de carga por carretera en México. La propuesta se basa en analizar la confiabilidad desde el punto de vista del estudio de la fluidez, tomando en cuenta la variabilidad en el proceso. Para ello se utilizó la perspectiva de la técnica de la variación-media considerando el posible sesgo en la distribución de los datos y de esta forma, establecer medidas relativas a la confiabilidad y la fluidez para la medición e interpretación de la variabilidad en la ruta de transporte de carga. De forma específica, se consideraron diferentes escenarios para día, mes o temporada de acuerdo a la disponibilidad de información en un corredor de carga en México.

1.4 Justificación

En México el principal modo de transporte de mercancías corresponde al transporte por carretera, a través del cual se mueve el 81% de carga terrestre, el 56% de carga nacional. En cuanto a pasajeros moviliza el 97% del total nacional. Además de participar con un 56.2% del total de toneladas transportadas en 2016, lo que equivale a 536 millones de toneladas de un total de 953 millones de

toneladas (de acuerdo a las estadísticas básicas de autotransporte de carga 2016 publicadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México). Siendo este medio tan importante para el país, exige un análisis serio capaz de ser usado en los planes a futuro para el desarrollo del país. Sin embargo la integración de algunos de estos conceptos no es una tarea fácil, sobre todo debido a la carencia de datos confiables y actualizados. Es aquí donde se presenta el concepto de confiabilidad y fluidez con la finalidad de evaluar el desempeño.

El aumento en los flujos de tráfico genera un aumento tanto espacial como temporal de las congestiones. Las congestiones no solo aumentan los tiempos de tráfico, también aumentan su variabilidad e incertidumbre, lo que impacta directamente en la fluidez y confiabilidad en la red de transporte. Estas también tienen implicaciones en los costos de operación y transporte de mercancías.

La importancia en la confiabilidad del tiempo de viaje depende del tipo de penalizaciones a las que se hagan acreedores los viajeros al llegar tarde. La confiabilidad es importante porque interviene en la decisión de donde, cuando y como realizar el viaje, además de influir sobre el tiempo extra utilizado para evitar los retrasos o esperas, tiempo que tiene un costo más allá de los tiempos promedio utilizados, aumentando los gastos (Margiotta, 2010). La necesidad de índices de medida para los sistemas de transporte surge de dos tendencias. La primera, la importancia del sistema de transporte de carga se ha incrementado en las últimas décadas tanto a nivel nacional como internacional. Segundo, la urgencia para la medición de la información generada en el final de la cadena de suministro ha crecido (TRB, 2011).

1.5 Preguntas de la investigación

De la revisión documental relativa a la situación problemática, se plantearon los siguientes cuestionamientos que dan lugar al presente trabajo de investigación:

- ¿Cómo puede la confiabilidad ser descrita en función de las condiciones de operación?;

- ¿Cuál es el efecto de la variabilidad en los tiempos de viaje dentro de un corredor logístico?;
- ¿Cuál es el impacto en tiempo de la congestión, en un nodo de conexión principal de un corredor logístico?;
- ¿Cuáles son los retos de la implementación de medidas de confiabilidad en el sistema de carga por carretera en México?

1.6 Hipótesis

Si se desarrolla un método para el análisis de la confiabilidad en sistemas de transporte de carga por carretera que sea capaz de localizar los segmentos que causan mayor variabilidad en los tiempos de tránsito de acuerdo al marco de operación en México, entonces, será posible describir el desempeño del corredor en términos de índices relacionados con la fluidez y la confiabilidad de acuerdo a su escenario de operación.

1.7 Contribuciones

El análisis reveló las aportaciones realizadas por la investigación; éstas son en el aspecto: i) metodológico; ii) al campo de estudio de la fluidez; iii) nacional.

En el aspecto **metodológico**, podemos establecer lo siguiente. En México no se ha realizado estudios para la implementación de medidas de confiabilidad en los tiempos de tránsito con miras a un estudio de fluidez en corredores de transporte. Probar la metodología en las circunstancias que ofrece el sistema mexicano es imperante para conocer las restricciones tanto técnicas como de información existente. Se decidió utilizar un enfoque metodológico abductivo para superar las restricciones encontradas en el desarrollo de la metodología. Se comparó constantemente la información encontrada en el análisis de literatura con la obtenida de las fuentes reales, este proceso generó una retroalimentación en forma de conocimiento de la técnica a partir de las condiciones del estudio.

Con relación al **campo de fluidez**, se destaca la implementación de otro tipo de distribuciones para medir los datos de tiempo de viaje. En la mayoría de los

estudios documentados hasta ahorita se utilizan las distribuciones simétricas siendo la distribución normal la más utilizada. Sin embargo, se ha demostrado mediante pruebas empíricas que este tipo de distribuciones corresponde a las condiciones de flujo libre. Varios autores entre ellos, Taylor y Susilawati (2012), van Lint y Van Zuylen (2005) y Tu (2008), y Arezoumandi (2011) proponen considerar el sesgo existente en los datos para calcular los índices relativos a confiabilidad e intrínsecamente relacionados a las medidas de Fluidez. Se adaptaron distribuciones mencionadas en la literatura con colas superiores más largas de lo habitual, así como el uso de distribuciones mezcladas, demostrando su mejor ajuste y utilizándolas para el cálculo de los índices de fluidez. De esta forma se obtuvieron resultados satisfactorios para la identificación de tramos con variabilidad marcada.

Por último, se ofrece una contribución **nacional**, al demostrar la utilidad para la medición del desempeño en corredores de transporte mediante los indicadores de fluidez obtenidos. La realización del estudio de fluidez en todas sus partes ayudará a analizar la competitividad del país en el transporte de mercancías, generando oportunidades de mejora en la inversión y desarrollo de infraestructura.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación se define como sigue:

Validar para su uso en México una metodología para el análisis de la confiabilidad en sistemas de transporte de carga por carretera, mediante el análisis probabilístico de datos relativos al tiempo de viaje, identificando los segmentos del viaje que generan mayor variabilidad en los tiempos de tránsito.

1.8.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la presente investigación derivados del objetivo general son:

- Definir los segmentos de análisis en los corredores de transporte de carga prioritarios para México y seleccionar uno para su análisis, a través del análisis de los documentos rectores del sector para el establecimiento de medidas de confiabilidad en su operación;
- Calcular los índices de confiabilidad en sistemas de transporte de carga por carretera, mediante el análisis estadístico de los datos empíricos recolectados, para analizar su impacto en los tiempos de recorrido;
- Desarrollar el análisis orientado al estudio de la confiabilidad en diferentes corredores de carga, mediante un enfoque de preferencias reveladas en la colecta de datos, para contribuir a la eficiente medición del desempeño del sistema de transporte por carretera en México.

1.9 Alcances y limitaciones

El presente trabajo de investigación se enfoca en el estudio de confiabilidad en los tiempos de tránsito y su relación con la fluidez para el sistema de autotransporte de carga por carretera en México, analizando la variabilidad y los eventos que interrumpen el flujo normal de la red de transporte, con el objetivo de localizarlos espacial y temporalmente.

No es objeto de estudio en la presente investigación la solución de eventos disruptivos mayores en el flujo de la red (Análisis de los efectos en el desempeño logístico), tales como desastres naturales o actos criminales

Se propone un modelo de confiabilidad basado en un enfoque de fluidez que considere escenarios de flujo libre y pesado en ambos intervalos del día (AM y PM) en un corredor logístico de carga por carretera usando la desviación estándar y varianza como una función de la media de los tiempos de viaje.

Describiendo el comportamiento mediante indicadores que incluyan el sesgo en su análisis.

El mapeo del proceso de carga será para un corredor de transporte de carga y pasajeros por carretera en México, este será definido por los documentos vigentes en la Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC).

1.10 Resultados e impactos esperados

1.10.1 Impactos

La presente investigación tiene cuatro impactos que son definidos como sigue:

Social: Investigar a través de un modelo probabilístico, el desempeño de la ruta de carga mediante el análisis de la variabilidad en los tiempos de tránsito;

Tecnológico: Disponer de indicadores de confiabilidad para los tiempos de viaje y fluidez que apoyen una mejor toma de decisiones;

Económico: Impulsar la toma de decisiones tendiente a mejorar el desempeño de los corredores de carga mediante la medición y comparación de índices. Que permita medir efectivamente la confiabilidad de los tiempos de tránsito en corredores de carga;

Científico: Promover el uso del enfoque cuantitativo en la medición de confiabilidad y fluidez en sistemas de carga por carretera en México.

1.10.2 Metas de la Investigación

La investigación será capaz de calcular los índices de confiabilidad representativa para una red de transporte, indicando las posibles fuentes de variabilidad que generan la poca confiabilidad de la red.

- Cuantificar los índices de confiabilidad de una ruta de transporte;
- Obtener medidas de desempeño relacionadas con la fluidez;

- Ayudar a la toma de decisiones en transporte mediante la identificación de los cuellos de botella en los corredores de transporte;
- Localizar espacial y temporalmente las congestiones viales en el tramo en análisis.

1.11 Organización del informe

El desarrollo de la investigación se llevara acabo de la siguiente forma. En la primer parte se realizó la delimitación del problema, mediante una exhaustiva revisión sobre el conocimiento actual del área en estudio. Esto se llevó a cabo mediante la **revisión de la literatura** comprendida entre los años 2000 y 2016. En ella se identificaron las teorías actuales sobre el análisis de confiabilidad, sus técnicas estadísticas, conclusiones y su relación con la fluidez. A partir de lo anterior se clasificaron por tipo las medidas utilizadas en su análisis, para ello se utilizaron las clasificaciones propuestas por Lomax, Schrank, Turner y Margiotta (2003), además de Van Lint, Van Zuylen y Tu (2008). Dichos autores clasifican los trabajos en confiabilidad de acuerdo a:

- Rango Estadístico (Statistical Range Methods);
- Margen de tiempo extra (Buffer time);
- Indicadores de tiempo tardío (Tardy Trip Measures);
- Medidas probabilísticas (Probabilistic measures).

En la tercera etapa se identificó la **metodología** a utilizar y de la misma forma se determinó el área de análisis. Para ello se hicieron suposiciones pertinentes sobre las condiciones de operación en el sistema de carreteras en México como: i) nivel de servicio; y ii) valores de diseño de los sistemas de transporte. Además de los periodos de análisis de estudio (demanda de servicios mensual y por segmentos del día y el tiempo de flujo libre).

El **análisis y discusión de resultados** se lleva a cabo en la cuarta etapa, realizando un análisis de los datos proporcionados por usuarios de los sistemas de transporte en México, filtrando y segmentado la información de cuerdo a los procedimientos recabados en al análisis bibliográfico.

La parte final reporta las **conclusiones**, retomando los conceptos de análisis a lo largo de la investigación, y finalmente proponiendo nuevas rutas de investigación futura en el campo.

2 Revisión de literatura

Resumen

En este capítulo se presenta el análisis de la literatura sobre las contribuciones al área de la confiabilidad en sistemas de transporte por carretera y su estrecha relación con el estudio de fluidez. La primera parte del capítulo nos muestra las diferentes definiciones para el concepto de confiabilidad, posteriormente se introduce al lector a la discusión sobre las diferentes medidas empleadas, su aplicación, así como las ventajas y desventajas que estas presentan. Finalmente se establecen conclusiones sobre la aplicación de las metodologías al problema abordado en la investigación a partir de este análisis literario así como su relación con la medición del desempeño en el estudio de fluidez.

2.1 Introducción

Un sistema de transporte de carga eficiente y confiable es una pieza fundamental para el desarrollo económico y social de cualquier país, es ahí donde radica la importancia de la medición del desempeño del mismo como impulsor del desarrollo económico nacional. En la última década, la economía global ha experimentado un dramático cambio, mucho más acelerado que en las últimas tres décadas pasadas. El consumo acelerado de bienes ha propiciado el auge de centros de manufactura alrededor del mundo. De la misma forma el establecimiento de los tratados de libre comercio entre países, ha creado la necesidad de medios eficientes para el transporte de bienes dentro del país productor y países vecinos. Como consecuencia el comercio de productos ha aumentado sustancialmente en un corto periodo de tiempo (Eisele et. al., 2011)

En México, desde el punto de vista de la cadena de suministro, en tanto los volúmenes de carga aumenten, el rol del autotransporte de carga será cada vez más importante. Tan solo en el 2016 el autotransporte federal participo con el 4.9 del PIB del país además contribuye con el 81% en el PIB del sector de Transporte Correo y Almacenamiento (SCT, 2016). Es evidente que el autotransporte de carga es una parte fundamental de la economía del país. Para ello es importante que se formulen políticas basadas en la toma de decisiones, que permitan el correcto movimiento de la carga a través del país, particularmente hacia EEUU uno de los principales socios comerciales de México.

Aunado a lo anterior, el correcto desempeño del autotransporte de carga implica el uso del transporte intermodal, el cual implica el movimiento de carga a través de al menos dos métodos de transporte. De acuerdo a la estadística básica del autotransporte 2016, se reporta que el transporte de carga por ferrocarril participó con el 12.8% del total de cargar en México, superado por el autotransporte con un 56.2% y el transporte por agua con un 30.9%. En total entre los tres modos de transporte se movió el 99.9% de la carga en México representando 952, 047 millones de toneladas. La relación de estos tres medios de transporte de mercancías con la finalidad de migrar a un sistema de transporte

de carga intermodal es imperante para mejorar la competitividad de México en el ámbito global.

En este sentido, el objetivo del presente análisis de la literatura es identificar las condiciones metodológicas que mejor describan la aplicación del análisis de confiabilidad en el sistema de transporte de carga en México, describiendo la información actual disponible y la posible metodología a aplicar de acuerdo a la revisión de literatura desde el punto de vista del usuario de la red de transporte. Para ello, el presente capítulo se organiza en cuatro secciones. En la primera sección se presenta los conceptos de fluidez, sus indicadores y como la variabilidad está íntimamente relacionada con la confiabilidad del tiempo de viaje. Se analizan las definiciones más comunes de confiabilidad y los principales supuestos que cada autor usó sobre el modelo que eligió para describir la confiabilidad en sistemas de carga. En la segunda sección se listan las metodologías más comunes para el análisis de la confiabilidad. La tercera sección es una discusión sobre las ventajas y debilidades de los indicadores más comunes para representar la confiabilidad, de la misma forma se describen someramente las características del sistema de carretera en México. La cuarta sección establece conclusiones de acuerdo al análisis presentado en capítulos anteriores y presenta recomendaciones para la aplicación de la metodología de confiabilidad en México.

2.2 Fluidez en la cadena de suministro

El principal objetivo del estudio de fluidez de acuerdo a Eisele et. al. (2011) es el de generar indicadores de desempeño que sean capaces de representar la eficiencia del sistema de carga a través de sus principales corredores de transporte, comparándolos en un base unitaria, sin comprometer la naturaleza sensible de los datos privados de las empresas. Estos indicadores son:

- El indicador de fluidez, que captura las condiciones promedio de viaje, relacionando el tiempo promedio de viaje con el tiempo de viaje con flujo libre.

- El indicador de Tiempo de Viaje, el cual captura la variación diaria en tiempo de viaje, relacionando el percentil del 95% de los viajes con el tiempo de viaje con flujo libre.

De acuerdo a esta definición de fluidez los indicadores propuestos apoyaran la toma de decisiones tanto en el ámbito privado como en el público, y parten de la idea de que no se puede mejorar lo que no se puede medir. De esta forma se requiere de información pertinente sobre la confiabilidad en los tiempos de viaje, el costo de la carga movida, el riesgo en cuanto a la tasa de accidentes así como de fatalidades y la resiliencia del sistema, la cual es la capacidad del sistema para reponerse a eventos disruptivos, siendo una de las partes más importantes el estudio de confiabilidad, puesto que de este dependen los dos indicadores propuestos.

El estudio de fluidez, mediante el análisis de confiabilidad en sistemas de transporte, ayuda a localizar y analizar los puntos críticos del sistema con el propósito de encontrar los factores que ocasionan las congestiones y establecer su relación con la variabilidad en los tiempos de viaje. El uso de los tiempos promedio de viaje no es suficiente para entender las implicaciones de los índices de fluidez, en realidad es necesario determinar las causas que afectan a los tiempos de viaje. El analista debe de conocer la causa de los tiempos de viaje largos en un segmento del corredor, los cuales podrían ser por una congestión vial o por una salida concurrida de muchos vehículos hacia una ruta alterna. De esta forma se pueden establecer políticas de desempeño mediante la localización de los puntos débiles del sistema (Eisele et. al., 2011).

La confiabilidad en los tiempos de viaje ha sido un tema importante en la última década, prueba de ello es el creciente número de estudios desarrollados en el área. Además de la alta difusión que ha tenido como un indicador del desempeño del sistema de transporte. En países con importantes esfuerzos sobre estudios de confiabilidad como Estados Unidos, Holanda e Inglaterra se ha adoptado la percepción del usuario como punto de partida para la medición del desempeño del sistema de transporte. Así por ejemplo, en la investigación llevada a cabo por Du y Nicholson (1997), se tomaron en cuenta los factores de riesgo “importantes” para la interrupción del flujo de la cadena de suministro. Para ello se basaron en

la degradación de la capacidad de la red debido a diferentes fuentes entre ellas, desastres naturales, incidentes de tráfico y acción industrial, en un contexto intermodal. Los autores también mencionan que existen variaciones día a día, periodo del día o variaciones del tipo estacional que ocasionan variabilidad en los tiempos de viaje.

Una de las consideraciones generales clave tiene que ver con el hecho de que los flujos de tránsito son afectados por la demanda y la capacidad de la red de transporte, las cuales cambian en periodos cortos de análisis. Consideración que es de gran importancia para el estudio de confiabilidad.

2.3 Confiabilidad

Las definiciones de confiabilidad para sistemas de transporte son muchas y variadas, a continuación se presentan las más acordes al propósito de la investigación de acuerdo a la variación en el tiempo de viaje para sistemas de transporte de carga.

Según Sánchez-Silva et. al. (2005), la confiabilidad del tiempo de viaje es la probabilidad que el destino pueda ser alcanzado en un tiempo menor que el establecido por un umbral especificado. De acuerdo a Lomax et al. (2003), la confiabilidad del tiempo de viaje es el nivel de consistencia en el tiempo de traslado por cada modalidad de transporte ruta o corredor. Además, Systematics (2012) define la confiabilidad como la variación del tiempo de viaje a lo largo del periodo de observación (hora - hora o día - día). La Federal Highway Administration (FHWA), en su página web oficial (https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm) define a la confiabilidad como la consistencia en el tiempo de viaje medida a partir de un día a otro y/o en diferentes momentos del día.

Según Álvarez y Hadi (2012), la existencia de distintas definiciones hace que existan una variedad de medidas recomendadas para la medición de la confiabilidad. Algunas de ellas con puntos de vista opuestos, lo que ocasiona que produzcan resultados diferentes aún si se analiza el mismo conjunto de

datos. Sin embargo, se puede observar que todas las definiciones comparten el mismo enfoque en común o sugieren la adopción de una frecuencia de medición. Esto se refiere al estudio de la variabilidad del tiempo de viaje en periodos de tiempo del día a día, semana del mes o por temporadas. Además se pone de manifiesto la relación de las medidas de confiabilidad con la forma de la distribución que las describe. Para este análisis, se toma como referencia la definición de Systematics (2012), la cual establece la variación del tiempo de viaje en un lapso establecido de tiempo (día a día) (Systematics, 2002).

2.3.1 Análisis del tiempo de viaje

De acuerdo a los autores analizados se concluye que los usuarios prefieren un tiempo de viaje confiable, aunque sea largo, pero carente de variabilidad, en lugar de un tiempo de viaje corto con alta variabilidad (Cedillo-Campos et al., 2014; Lei et. al., 2014) (van Lint et. al., 2008). Como es ampliamente aceptado, no existe proceso que no conlleve variabilidad natural, sin embargo en este estudio nos referimos a la variabilidad impredecible. Es decir, aquella que no puede ser planificada como objeto de estudio.

De acuerdo a Bhourri et. al., (2012), existen dos puntos de vista diferentes para considerar la confiabilidad en el tiempo de viaje. Para el controlador de la red, los estudios se enfocan en la calidad del servicio, mientras que desde el punto de vista del usuario del sistema de transporte, los estudios se orientan en como el usuario percibe la variación en el tiempo de viaje y la tolerancia a los retrasos inesperados. Dichos retrasos inesperados generan consecuencias mayores, además que desde el punto de vista del usuario es más probable recordar los peores retrasos en lugar de los tiempos promedio.

El tiempo de viaje puede ser dividido en el tiempo de viaje con flujo libre y el tiempo adicional de viaje. Las variaciones en las condiciones de operación del sistema de transporte son las que ocasionan el tiempo adicional de viaje. Las variaciones pueden ser predecibles e impredecibles. De estas, la variación predecible son las ocasionadas por esquemas comunes o temporales como los patrones diarios de congestión en las denominadas horas pico, para la cual el

usuario puede planificar y de esta forma cumplir con su programa de actividades. La variación impredecible es aquella que no puede ser anticipada y genera retrasos innecesarios (Carrion y Levinson, 2012), esta variación afecta directamente al flujo en la red y por lo tanto a los tiempos de viaje, ya que estos se ven afectados por el flujo de la red, el cual es un producto de la demanda y la capacidad de la red de transporte.

La mayoría de las investigaciones se fundamentan en dos formas diferentes de recolección de los datos empíricos, los estudios de preferencias declaradas (Stated Preferences) y los estudios de preferencias reveladas (Revealed Preferences). En cuanto al estudio de preferencias declaradas, estos que se basan en cuestionarios sobre la decisión del usuario de utilizar una ruta en específico así como de sus patrones de viaje habituales, estos datos generalmente son utilizados para el diseño de la red. En cuanto a los estudios de preferencias reveladas, estos son los más utilizados en la actualidad debido a la explotación de los recursos tecnológicos disponibles (sistemas GPS, detectores de velocidad o detectores de flujo). Estas últimas se basan en observar el comportamiento de los usuarios, sobre todo porque generalmente difiere de lo declarado por ellos mismos. Se trata de estudios que son generados con datos de viaje reales tomados a partir de la observación.

2.4 Metodologías actuales

De acuerdo a Lomax et al. (2003), y Van lint et al. (2008), las medidas de confiabilidad se pueden dividir como se lista a continuación:

- **Rango Estadístico (Statistical Range Methods):** Tiempos de viaje esperados más/menos un número de desviaciones estándar de la distribución de probabilidad;
- **Margen de tiempo extra (Buffer time):** El tiempo extra que debe ser planeado para llegar a tiempo el mayor número de veces. Estas medidas se valen de los percentiles del 90, 95 y 80%;
- **Indicadores de tiempo tardío (Tardy Trip Measures):** Representan la poca confiabilidad mediante el número de viajes que llegan tarde;

- **Medidas probabilísticas (Probabilistic measures):** Se utilizan parámetros estadísticos tales como umbrales para definir cuales viajes presentan retraso o no.

Mahdi (2011), establece que el punto de partida inicial para la utilización de las medidas de confiabilidad es la descripción de la distribución de probabilidad que modela los datos. Partiendo de este punto se puede definir lo siguiente:

En las medidas de rango estadísticos se encuentran aquellos estudios en los que se suponen condiciones de una distribución simétrica, la distribución normal es generalmente usada como función de distribución acumulada. En estos trabajos los autores describieron la variabilidad entre el tiempo de viaje promedio y el tiempo de viaje real de acuerdo a la desviación estándar de la distribución de probabilidad que mejor describe los datos, así como el coeficiente de variación y la media. Conforme a Yao, B., et al. (2014) los autores optan por describir la confiabilidad de acuerdo a los nodos de la red de transporte en la cual la confiabilidad del arco de la red es calculada mediante la desviación del tiempo de viaje del tramo en cuestión. En Chen et. al. (2003). se utilizó la desviación estándar de la distribución de probabilidad de los datos como estadístico que mejor describe la variabilidad de los tiempos de viaje. Además, se concluyó mediante pruebas de correlación que la desviación estándar y la media presenta un alto coeficiente de correlación.

De acuerdo a Cambridge Systematics (2002) en su documento SHRP2, se recomienda la utilización de las siguientes medidas para la representación de los tiempos de viaje (ver tabla 1).

Tabla 1 Medidas recomendadas por SHRP

Fuente: elaboración propia.

Medidas	Definición	Unidades
Buffer Index	Diferencia entre el percentil (95%) y le tiempo de viaje promedio, dividido entre el tiempo de viaje promedio.	%
Viajes en tiempo y viajes extremos	Porcentaje de viajes < 1.1 Tiempo de viaje promedio y < 1.25 del tiempo de viaje promedio	%
Índice de Tiempo Planificado	Percentil del 95%	N/A
Percentile del 80%	Percentil del 80%	N/A
Estadística de sesgo	(Percentil del 90% - Media del tiempo de viaje) / (Media del tiempo de viaje – percentile del 10%)	N/A
Misery Index	Tiempo promedio correspondiente al 5% de los viajes con duración extrema/ Tiempo en flujo libre	N/A

Las medidas de rango estadístico son las utilizadas en el estudio de fluidez cuando aborda el análisis de confiabilidad debido a que el tiempo de viaje varía según el modo de transporte elegido, además de obedecer a los programas de requisitos horarios de entrega. Lo anterior es la razón por la cual los autores deciden utilizar un concepto de normalización en los tiempos de viaje para permitir las comparaciones entre los diferentes modos de transporte y en toda la cadena de suministro.

Las suposiciones de normalidad en los datos es un práctica común sin embargo, a pesar de ser la estrategia de confiabilidad más utilizada ha recibido varias críticas sobre la suposiciones de una distribución simétrica. La evidencia empírica muestra que las distribuciones simétricas son más frecuentes en las condiciones de flujo libre, de igual forma la desviación estándar del conjunto de datos es severamente afectada por los valores atípicos. En consecuencia, varios autores entre ellos Taylor y Susilawati (2012), Van Lint et. al. (2008), y Arezoumandi (2011), proponen considerar el sesgo en la distribución para calcular la confiabilidad.

Debido a lo antes mencionado se considera que los percentiles de la distribución de probabilidad es una manera más realista de representar los tiempos de viaje. Además de ser una mejor forma de relacionar la media y la desviación estándar tanto para su interpretación como para facilitar su medición en cuanto a costos.

Con la propuesta de la utilización de los percentiles para describir el comportamiento de los tiempos de viaje surgen los márgenes de tiempo extra (buffer time). Los cuales utilizan la información proveniente de los percentiles de la distribución. La medida no necesariamente se refiere al tiempo de viaje promedio, pero si a un porcentaje del tiempo de viaje promedio. Usualmente se utilizan las medidas de los percentiles del 80, 90 y 95% así como el índice de tiempo extra (Buffer time index) el cual se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Buffer Time Index} = \frac{\text{Percentil del 95\%} - T_{pv}}{T_{pv}} \quad (1)$$

Donde:

T_{pv}: Tiempo promedio de viaje.

Los indicadores relativos a la Fluidez utilizan los percentiles de la distribución de probabilidad con la finalidad de representar de una mejor forma la realidad de los mismos. Además de evitar la necesidad de suponer condiciones de una distribución de probabilidad específica.

De acuerdo a la FHWA estas son las medidas de interés para el público en general:

- Los percentiles de 90 y 95% los cuales representa el retraso generado en los días más congestionados indicando que tan grave será la demora en los días con flujo más pesado.
- El índice de tiempo de viaje (Travel Time Index) que es la relación entre el tiempo de viaje medio y el tiempo de viaje con flujo libre.

Las medidas de tiempo tardío representan la poca confiabilidad mediante el número de viajes que llegan tarde. Un ejemplo de esto es el Misery Index el cual toma la relación entre el tiempo del 5% de los viajes más tardados y el promedio de los viajes con flujo libre.

$$\text{Misery Index} = \frac{\text{TpV del percentil del 5\%}}{\text{TpV con flujo libre}} \quad (2)$$

Las medidas probabilísticas se caracterizan por utilizar valores umbrales para representar la poca confiabilidad, ocasionando que su funcionalidad dependa de forma importante en la correcta elección de estos parámetros, que obedecen a las finalidades de su aplicación y contexto. Kouwenhoven y Warffemious (2016), propone la eliminación de los valores que están más allá de tres desviaciones estándar o bien si estos valores superan el 150% de la media de los datos. Obviamente cada decisión depende de los objetivos y políticas que se busca en cada proyecto.

2.5 Análisis de indicadores comunes para la confiabilidad

Existe discusión sobre las medidas más populares para la descripción de los tiempos de viaje mediante la desviación estándar y sobre todo por las distribuciones utilizadas para representar el conjunto de datos. Algunos autores como Siu y Lo (2008), Clark y Wantling (2005) así como Lomax (2003), suponen normalidad de acuerdo al número de muestra y la independencia de los nodos de la red. Por otra parte, Taylor and Susilawati (2012) utilizan la distribución con sesgo llamada Distribución de Burr para representar las medidas de confiabilidad de una distribución con colas superiores más grandes de lo habitual. Se propone la utilización de la distribución de Burr para la representación de las medidas que utilizan a los percentiles del 90 y 95% como base, además de índice de tiempo extra (Buffer Index) y los estadísticos de sesgo y amplitud (Skew-Width Methods).

Esto es debido a que la distribución de Burr es flexible para la descripción de colas superiores muy largas de la distribución de los tiempos de viaje, además de que posibilita la obtención de las medidas de confiabilidad más utilizadas actualmente como los percentiles, buffer time y los parámetros de sesgo. Los

autores presentan las siguientes fórmulas del índice de tiempo extra (Buffer Index) y las medidas de amplitud y sesgo como se muestran a continuación:

$$BI = \frac{\sqrt[c]{20^k - 1}}{\frac{k\Gamma\left(k - \frac{1}{c}\right)\Gamma\left(\frac{1}{c} + 1\right)}{\Gamma(k+1)}} \quad (3)$$

$$\lambda^{\text{skew}} = \frac{\sqrt[c]{10^{1/k} - 1} - \sqrt[c]{2^{1/k} - 1}}{\sqrt[c]{10^{1/k} - 1} - \sqrt{\left(\frac{10}{9}\right)^{1/k} - 1}} \quad (4)$$

$$\lambda^{\text{skew}} = \frac{\sqrt[c]{10^{1/k} - 1} - \sqrt{\left(\frac{10}{9}\right)^{1/k} - 1}}{\sqrt[c]{2^{1/k} - 1}} \quad (5)$$

Donde:

Γ = función Gamma

k, c = parámetros de la distribución Burr mayores a 0

Mahdi (2011), citando al SHRP2 Report describe que mediante pruebas empíricas por segmentos del tramo de análisis el índice de tiempo extra (Buffer Time Index) incrementa, causando el decremento del Índice de Tiempo planificado (Planning Time Index). Esto genera dudas sobre el uso de las medidas de margen de tiempo extra (Buffer time) como medida primaria, sin embargo como medida de uso secundario provee de información importante al análisis. De acuerdo con Álvarez y Hadi (2012), la mayoría de los enfoques han usado las medidas a un nivel de agregación muy pobre, esto implicaría que los parámetros de la distribución seleccionada se mantengan constantes durante largos periodos de tiempo. Lo cual es poco real, de tal forma que proponen

comprobar las diferentes medidas de confiabilidad utilizando niveles de agregación más precisos para aumentar el número de aplicaciones posibles. Además, concluye que se requiere de al menos un año de observaciones para obtener valores estables de los índices de confiabilidad. De la misma forma se propone un nivel de agregación de 30 minutos como máximo.

En este sentido Madhi (2011) realizó estudios para determinar cuál es la distribución que mejor se adapta a los tiempos de viaje. Así, utilizando un sistema de límite de velocidad variable, se probaron las distribuciones Gamma, Valor extremo más grande, Log Logística, Log Normal, Weibull entre otras más, utilizando las pruebas de Anderson Darling, Ji cuadrada y Kolmogorov Smirnov. Como resultado se encontró que la distribución Log Normal es la que mejor se adecua a los datos de viaje. Comparando los resultados con la distribución normal, no se encontró una diferencia significativa. Chen et al. (2003), en el documento "*Travel Time Reliability as a Measure of Service*" mencionan que un sistema de información avanzada para el usuario ayudaría a mejorar la confiabilidad del sistema al prevenir sobre los posibles incidentes dentro de la red. Un ejemplo de la utilización de este sistema de información fue realizado en Sun, et. al. (2014).

Algunos otros autores analizaron la adecuación de las medidas de desviación media encontrándolas insatisfactorias. Lo anterior debido a que entre más amplia o sesgada se presenta la distribución del tiempo de viaje los datos de tiempos de viaje se vuelven menos confiables. En consecuencia, proponen el uso de medidas de amplitud y sesgo de la distribución, basados en los percentiles de la información. En la ec. 6, el índice de amplitud (Width) o λ^{var} indica que entre más grande es la amplitud de la distribución, el tiempo de viaje es relativamente grande con respecto a su media, mientras el sesgo (skew) es una medida de la asimetría en la distribución del conjunto de datos, de tal forma que en la ec. 7 entre más grande es el indicador λ^{skew} mayor es la posibilidad de encontrar valores extremos en los tiempos de viaje con respecto a la media.

$$\lambda^{var} = \frac{\text{percentil 90\%}-\text{percentil 10\%}}{\text{percentil 50\%}} \quad (6)$$

$$\lambda^{skew} = \frac{\text{percentil 90\%}-\text{percentil 50\%}}{\text{percentil 50\%} - \text{percentil 10\%}} \quad (7)$$

$$UI_r \begin{cases} \frac{\lambda^{var} \ln(\lambda^{skew})}{L_t} & \lambda^{skew} > 1 \\ \frac{\lambda^{var}}{L_t} & \text{de cualquier otra forma} \end{cases} \quad (8)$$

Por último, en algunos estudios se dividió el recorrido por sus diferentes niveles de servicios, considerando los efectos dinámicos de las ondas de choque generadas por la demanda múltiple. De esta forma se generaron distribuciones diferentes para cada tramo o bien la mismas distribuciones con diferentes parámetros. A partir de lo anterior, se calculó la confiabilidad del tramo completo mediante la convolución de las distribuciones en los tramos (Chen et.al., 2003) (Lei et.al., 2014).

2.5.1 Escenarios de interés

Los indicadores mencionados en la sección anterior fueron desarrollados tomando en cuenta las condiciones de operación e información disponible para cada estudio en particular. Tomando en cuenta esto, se hace necesario la descripción del sistema de medición aplicable al transporte de carga en México.

En México el principal medio de transporte de mercancías corresponde al autotransporte federal, a través del cual se mueve: El 81% de carga terrestre, el 56% de carga nacional y moviliza el 97% del total nacional de los pasajeros. Además de participar con un 56.2% del total de toneladas transportadas en 2016, equivalente a 536 millones de toneladas de un total de 953 millones de toneladas, de acuerdo a las estadísticas básicas de autotransporte de carga 2016 de la SCT (SCT, 2016). Cabe resaltar que México cuenta con 378,923

kilómetros de carreteras divididos en rutas troncales o primarias (autopistas, vías rápidas), vías secundarias, alimentadoras, colectoras, locales y brechas. De la misma forma se pueden clasificar por:

- Volumen vehicular de demanda por tramo;
- Número de carriles por tramo;
- Nivel de servicio.

Para un país cuyo principal medio de transporte de mercancías es el autotransporte de carga, un análisis que identifique y exprese de forma concisa el desempeño del sistema es esencial para el desarrollo económico. Actualmente se cuenta con información completa dentro de la página oficial de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en ella se describen los niveles de servicio de las carreteras en cada estado, clasificándolas como:

- **Nivel de servicios A:** La velocidad de los vehículos es la que elige libremente cada conductor;
- **Nivel de servicios B:** La velocidad de los vehículos más rápidos se ve influenciada por otros vehículos;
- **Nivel de servicios C:** La velocidad y maniobra se hallan más reducidas, formándose grupos;
- **Nivel de servicios D:** Velocidad reducida y regulada en función de la de los vehículos precedentes;
- **Nivel de servicios E:** Velocidad reducida y uniforme para todos los vehículos, del orden de 45-50km/h;
- **Nivel de servicios F:** Formación de largas y densas colas.

Los datos anteriores son esenciales para subdividir el tramo de estudio, en sub-tramos con demanda y longitud similar como primer paso para determinar las medidas de confiabilidad. Los objetivos de estudio obedecen al interés por

validar las teorías aplicables al sistema de transporte en México buscándose como objetivo la implementación de la metodología seleccionada para el análisis.

Cabe señalar que las metodologías encontradas basan su información en datos recogidos de detectores de velocidad y posicionamiento geográfico, instalado permanentemente en los servicios del sistema de carreteras. En México no se cuenta con un sistemas de monitoreo de flujo vehicular en tiempo real, por lo cual se debe hacer uso de los dispositivos de posicionamiento global por unidad de transporte para determinar los tiempos de tránsito de cualquier tipo de vehículos. De igual forma es posible utilizar la teoría de las funciones Volumen-Demora descritas en Moreno Quintero (2016). Ahí se plantean que la funciones volumen demora son representaciones matemáticas del comportamiento de flujos y ayudan a calcular el recorrido en tiempo como una función del volumen vehicular en dicha ruta. La propuesta se basa en obtener flujos de los registros de aforos vehiculares existentes en la SCT (<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/>) para alimentar a la función BPR de volumen demora (ver ec. 9) y de esta forma obtener una muestra significativa de los tiempos de viaje con la finalidad de identificar la distribución que representa a esos datos (TRB, Highway capacity Manual , 2000).

$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C} \right) \right] \quad (9)$$

En teoría las distribuciones de probabilidad presentadas son representativas de muchos de los sistemas de transporte, sin embargo, el análisis de los tiempos de viaje del tramo en cuestión revelará la necesidad de utilizar alguna distribución de probabilidad específica. Ante ello, se propone la utilización de distribuciones con sesgo en la cola superior, realizando una análisis tanto por segmento, como nivel de servicios y hora del análisis. Se propone la utilización de medidas tanto de margen de tiempo extra (Buffer Time) utilizando los percentiles de la distribución así como medidas de sesgo y amplitud ($\lambda^{\text{skew}}, \lambda^{\text{var}}$). De esta forma se

evitan los riesgos de representar la distribución utilizando solo la media y la desviación estándar.

2.5.2 Corredores Logísticos en México

De acuerdo al Plan nacional de desarrollo 2013-2018 en el programa sectorial del Comunicaciones y transportes se establece que México cuenta con 14 corredores de transporte a lo largo del territorio nacional. Los cuales son:

1. México-Guadalajara-Hermosillo-Nogales, con ramal a Tijuana
2. México-San Luis Potosí-Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras
3. Querétaro-Aguascalientes-Zacatecas-Cd. Juárez
4. Acapulco-México
5. Puebla-Progreso
6. Mazatlán-Durango-Salttillo-Monterrey-Matamoros
7. Manzanillo-Guadalajara-San Luis Potosí-Tampico, con ramal a Lázaro Cárdenas
8. Acapulco-Puebla-Veracruz
9. Veracruz-Monterrey, con ramal a Matamoros
10. Transpeninsular de Baja California
11. Corredor del Altiplano
12. Puebla-Cd. Hidalgo
13. Circuito Transístmico
14. Circuito Turístico de la Península de Yucatán

Tan solo los corredores de Mexico - Nogales, Mexico - Nuevo Laredo, y el Altiplano, mueven aproximadamente el 45% de la carga carretera razon por la cual se selecciono el corredor de Queretaro - Aguscalientes - Zacatecas - Cd. Juarez. Este corredor tiene una longitud de 3 074.5 km, siendo el mayor de los 14 corredores. El segmento seleccionado fue el tramo Mexico-Qro. Además la conexión de este segmento con una de las zona urbana mas importante del país y a su vez una de las tres entidades que genera mas flujos de carga (DF, Monterrey y Guadalajara), ocasiona problemas de tránsito, accidentes viales y altos costos tanto de transporte como logísticos. Lo anterior lo convierte en un

candidado ideal para el análisis de fluidez en el segmento de un corredor de transporte de carga, con le objetivo de validar la metodología propuesta en la investigación. Uno de los principales problemas para este segmento del corredor es el flujo lento y cortado, así como la falta de continuidad en los viajes de largo itinerario, de acuerdo a los descrito en el programa sectorial de comunicaciones y transportes en el plan nacional de desarrollo 2013 – 2018, consultado en la pagina web de la SCT (http://www.sct.gob.mx/fileadmin/banners/Programa_Sectorial_de_Comunicaciones_y_Transportes.pdf). Este problema sera analizado mediante el analisis de los flujos con escenario posibles de acuerdo a la informacion disponible.

2.6 Conclusiones

Derivado del amplio análisis de la literatura, se concluyó que el método más utilizado en la actualidad para la recolección de los datos en el análisis de la confiabilidad son las preferencias reveladas (Revealed Preferences) utilizadas principalmente en autopistas de cuota. A pesar de ser un método que requiere tiempo y recursos financieros también es el método que mejor refleja la percepción del usuario con respecto a la confiabilidad (Bogers , Van Lint , & Van Zuylen, 2008).

De la misma forma se pudo establecer que los métodos de variación media (mean-variance) son el método más recurrente en los diferentes estudios. Esto debido a que toman la variabilidad en periodos de tiempo cortos (día a día, semana del mes o del tipo estacional) y su facilidad para ser aplicados a los estudios de costo beneficio (Systematics, 2002).

Las medidas de margen de tiempo que consideran a los percentiles de la distribución de probabilidad han sido mayormente utilizadas en la práctica, sin embargo en estudios recientes, el uso de percentiles así como medidas de sesgo y amplitud ha ido en aumento, seguido por los métodos probabilísticos, de tiempo tardío y de rango estadístico.

Al no haber un consenso tanto de la definición de confiabilidad como de las medidas apropiadas para la confiabilidad, existen diversas medidas propuestas por diferentes autores. Sin embargo la mayoría coincide en el análisis de variación día a día, día de semana o por temporada.

De la misma forma la revisión de texto reveló que los tramos a elegir deben de ser iguales en longitud, nivel de demanda y con un nivel de agregación que permita medidas estables, también se debe de tener en cuenta la diferenciación por niveles de servicios (Lei et. al., 2014). De acuerdo a la revisión de literatura, se recomienda representar los tiempos de viaje mediante distribuciones sesgadas que son las más apegadas a la realidad.

Algunos sistemas pueden ser utilizados para mitigar los efectos de las congestiones. De estos los encontrados en el análisis de la literatura son: sistemas de regulación en el flujo, como los sistemas avanzados de información del viajero, sistemas de velocidad variable o la apertura de los carriles de seguridad ayudan a reducir los tiempos de viaje y regular el flujo en la demanda del sistema de transporte (Chen et.al., 2003).

Derivado del análisis de metodologías y su aplicación al caso de México, se recomienda la utilización del punto de vista del usuario como el inicio del estudio de confiabilidad. Es recomendable utilizar la información oficial disponible mediante la SCT para el cálculo de los niveles de servicio y demanda por periodo del día. Sin embargo como menciona Chen et. al. (2003), los niveles de servicio no son capaces de representar la variabilidad de los tiempos de viaje. Estos son utilizados para el diseño y análisis corto de tramos homogéneos, por ello recomienda utilización de medidas de demora y percentiles.

La información disponible mediante sistemas GPS o bien los tiempos obtenidos mediante las funciones BPR sería la empleada como tiempos de viaje, subdividiendo el tramo en segmentos con características homogéneas entre ellos. Cabe resaltar que es necesario la toma de medidas en diferentes tiempos de día para representar los disímiles horarios pico del sistema de transporte de carga analizado. Así, se propone utilizar medidas de tiempo de viaje con una diferencia máxima de 30 minutos por toma de tiempos. De esta forma se podrán

comparar los niveles de servicio establecidos por tramo de carretera con las diferentes distribuciones presentadas en Van Lint, et. al. (2008), en el que se presentan diferentes formas de la distribución de los tiempos de viaje dependiendo del estado de la congestión en el sistema. Para la adecuación a la distribución de probabilidad se recomienda la utilización de metodologías que consideren el sesgo de la distribución para representar las medidas mediante percentiles de tiempo tal y como se realizó en Bhourri et. al. (2012), Taylor y Susilawati (2012).

Por último, es importante mencionar que el estudio de Fluidez adopta la utilización de medidas tanto de márgenes de tiempo y percentiles para realización del análisis de confiabilidad, así como la suposición de normalidad de los tiempos de viaje. La primera característica coincide con los resultados obtenidos del análisis de la literatura, siendo la segunda característica, la utilización de una distribución normal, la cual ha sido ampliamente discutida de acuerdo a la información recolectada, por lo cual se concluyó que la utilización de distribuciones con sesgo sería un área de oportunidad para la realización de estudios de Fluidez en México.

3 Metodología

Resumen

En este capítulo se expone el paradigma principal de investigación que sostiene el análisis de los tiempos de viaje. Se presenta a la investigación abductiva, la cual soporta la idea del continuo desarrollo de conocimiento, y como esta se relaciona con el tema de investigación. Además, se detalla la metodología de análisis para el estudio de confiabilidad, sus implicaciones para la fluidez, así como las diferentes técnicas que serán utilizadas en el análisis de los datos.

3.1 Metodología de investigación

La logística como disciplina científica se desarrolló en la década de los 60's (Kovács y Spens, 2005) y desde entonces varios métodos han sido implementados para su estudio. Entre ellos los modelos matemáticos, modelos de simulación y la investigación por encuestas. Sin embargo, de acuerdo a Arlbjørn y Halldorsson (2002) se han dejado de lado los enfoques cualitativos e interpretativos. En la actualidad existen dos enfoques comunes para la investigación científica en el área de logística. El **enfoque inductivo**, el cual comienza desde una parte específica de la situación y genera leyes u observaciones generales para el problema (Wigblad, 2003), y el **enfoque deductivo**, el cual parte de conocimiento general y forma conocimiento específico del fenómeno estudiado, examinando la teoría actual y generando conclusiones razonadas sobre ella. El enfoque deductivo es adecuado para estudiar conocimiento existente y no así tanto para la generación del conocimiento nuevo.

En muchas ocasiones los grandes avances científicos son obtenidos mediante intuición en lugar de seguir un proceso lógico establecido (Taylor et. al., 2002) no obstante, no se puede negar la necesidad de contar con un método flexible que permita establecer un ciclo de generación de conocimiento, para guiar los actos del investigador. Este método existe como un enfoque extra a los ya mencionados, el cual combina aspectos teóricos y empíricos. El **enfoque abductivo** inicia con la observación de la realidad, sin embargo la retroalimentación es constante durante el proceso de recolección de la información teórica. El enfoque abductivo de esta forma puede clasificar el conocimiento obtenido en generalizaciones de la observación y conocimiento específico al problema.

El uso más común de este enfoque es cuando se recolecta información de fuentes primarias de información y se contrasta con fuentes secundarias, generando de este modo el nuevo conocimiento con un proceso similar a la investigación por acción (Wigblad, 2003). En el momento en que la observación empírica del fenómeno no encaja en el conocimiento existente, es el momento en el que el razonamiento abductivo empieza (Dubois y Gadde, 2002).

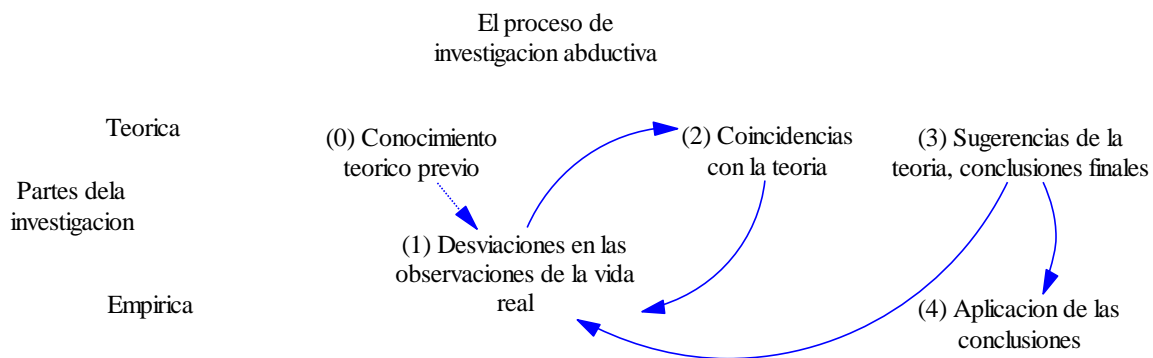


Fig. 1 Proceso de investigación abductiva (Kovács y Spens, 2005).

3.1.1 Justificación de la metodología

El análisis de confiabilidad no debe ser considerado dentro un simple patrón, se requiere de múltiples consideraciones y contrastes de observaciones empíricas sobre escenarios (día, mes, temporada, etc.), con la finalidad de conseguir un modelo representativo. Este modelo generara retroalimentación constante para mejorar la comprensión de la situación problemática. El proceso conlleva la recolección, análisis y adecuación del conjunto de datos a una distribución de probabilidad. Dicha distribución de probabilidad ha sido estudiada por varios autores (Arezoumandi y Bham, 2010, Wout Dullaert y Zamparini, 2013 y Fangshu, et. al., 2014) con la finalidad de establecer la mejor representacion de los datos.

Sin embargo, a pesar del esfuerzo de muchos investigadores no existe una sola opcion que sea capaz de ajustarse a la mayoría de los casos. Es decir esta no puede ser considerada como una constante de investigación, lo que provoca diferentes puntos de vista en los procedimientos de análisis de los datos. Entre las múltiples posibilidades mencionadas en la literatura se encuentran las distribuciones; normal, Log normal, Singh-Maddala entre otras presentadas en el capítulo anterior. El correcto análisis dependerá en gran manera de las características de los datos observados empíricamente y su contraste con los modelos presentes en la literatura, así como de las consideraciones pertinentes sobre la calidad de la información existente en México. Es debido a esto que el enfoque de investigación abductiva resulta particularmente apropiado para el

desarrollo del estudio de confiabilidad confinado dentro de un concepto de análisis de fluidez de la cadena de suministros.

3.1.2 Procedimiento de investigación

El proceso metodológico por el cual se guio esta investigación consistió en cinco etapas:

- I. **Definición del problema e identificación preliminar de las estrategias de solución.** En esta etapa se realizó lo referente a la formalización del problema de estudio, delimitándolo en un área de estudio;
- II. **Identificación de las medidas a analizar.** Es aquí donde se comienza el contraste de los modelos propuestos en la literatura con la información recolectada;
- III. **Identificación del proceso de análisis y procedimientos.** Después de la revisión crítica y exhaustiva el estado del arte, se procedió a adoptar las medidas acordes a las condiciones del análisis;
- IV. **Análisis y evaluación (medición del desempeño).** Es aquí en donde se presenta el análisis formal del comportamiento de los datos;
- V. **Resultados y conclusiones.** En esta sección se reportan los hallazgos más importantes relativos al análisis de la información.

A continuación se muestra la estructura del documento mediante un diagrama organizado de las cinco etapas antes mencionadas.

1. Definición del problema e identificación preliminar de las estrategias de solución.
 - Identificar la situación problemática;
 - Identificar a los involucrados y sus necesidades;
 - Revisión exploratoria de la literatura;
 - Formulación de preguntas de investigación;
 - Información de campo exploratoria;

- Contraste entre la información obtenida de la revisión de la literatura y la información de campo;
 - Determinación de objetivos de acuerdo al contraste;
 - Identificación de la estrategia a seguir;
 - Planeación de la investigación;
 - Definición del corredor a analizar;
 - Comparar las características del corredor con la estrategia seleccionada.
2. Identificar las medidas a analizar.
- Identificación del tipo de transporte (pasajeros o de carga);
 - Identificar la zona de estudio, ruta, viaje, día, hora de interés;
3. Identificar el proceso de análisis y procedimientos.
- Subdividir la red de acuerdo a los puntos a analizar;
 - Consideraciones de ubicación de los puntos de toma de muestra;
 - Dividir el tramo seleccionado en porciones homogéneas en términos de tráfico y condiciones geométricas o de acuerdo a las características de la información disponible (casetas de encuestas vehiculares);
 - Representación de las secciones críticas del viaje o en su defecto representar los puntos de toma de muestras que conecten al tramo consecutivo;
 - Recolectar los datos (datos de flujos vehiculares o información georreferenciada).
4. Análisis y evaluación de escenarios (medición de desempeño)
- Análisis de flujos vehiculares horarios;
 - Cálculo de las medidas estadísticas fundamentales de los tiempos de viaje;
 - Eliminación de valores atípicos, atendiendo a las necesidades del estudio y criterio establecidos;
 - Determinar la distribución de probabilidad de los datos utilizando pruebas de bondad de ajuste;
 - Cálculo de medidas de dispersión y pruebas de ajuste;
 - Realizar los cálculos de tiempo de viaje.

5. Resultados y conclusiones.

- Validación del modelo, mediante la comparación con los flujos vehiculares y mediante la utilización de software de análisis estadístico;
- Organización de las medidas para la presentación;
- Informar y reportar los resultados;
- Definición de líneas de investigación futura.

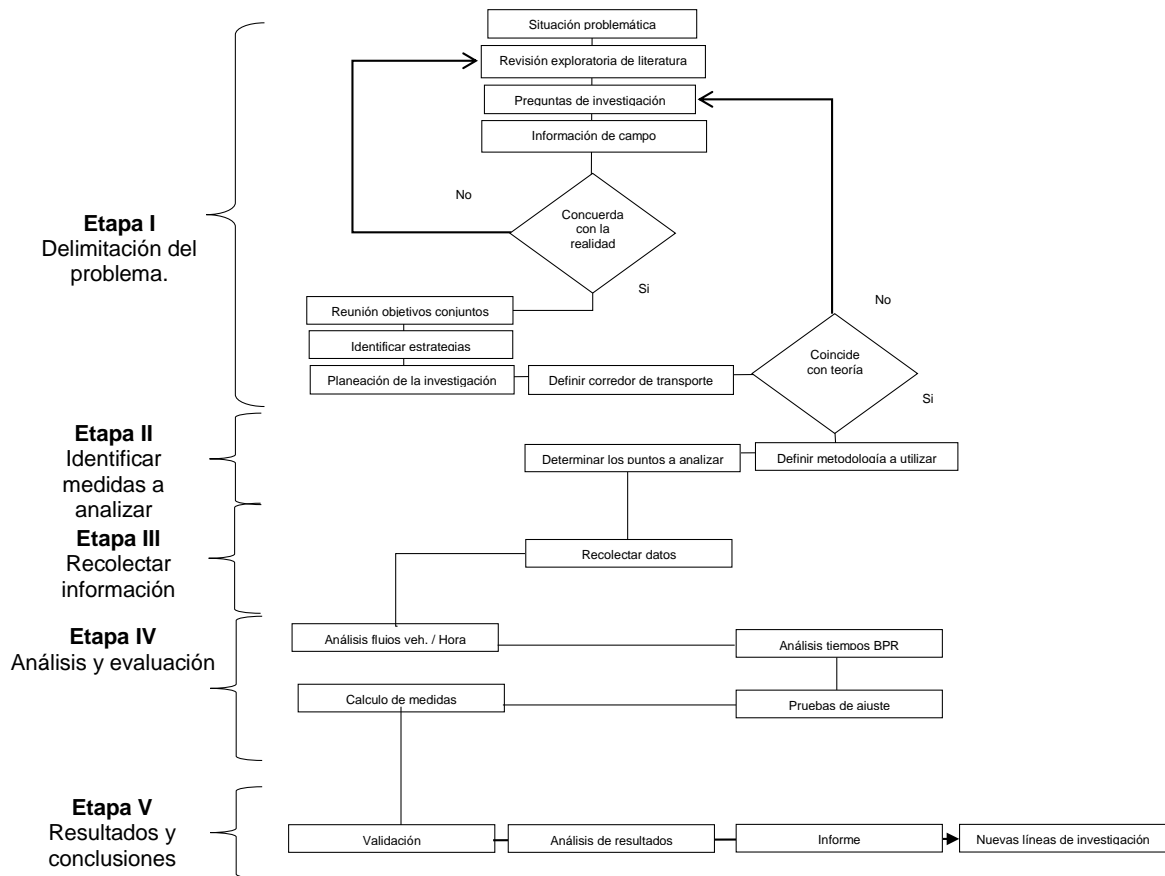


Fig. 2 Metodología propuesta de investigación

Fuente: elaboración propia

Como resultado de la revisión bibliográfica, se identificaron las principales metodologías empleadas actualmente para la realización del estudio de confiabilidad en sistemas de transporte de carga. Para ello se exploraron tanto estudios realizados en zonas urbanas como en autopistas o la combinación de ellas. Puesto que se trata de un tema nuevo y existen pocas referencias, para el

estudio de fluidez se utilizaron todas las referencias disponibles. Las conclusiones de estos apuntan a una metodología aún en desarrollo y con áreas de oportunidad.

Una importante área de oportunidad es la relacionada con la descripción del conjunto de datos mediante una distribución de probabilidad; sin embargo como fue mencionado anteriormente esto depende del comportamiento de los datos y la finalidad del análisis. La presente investigación se basa en la identificación de los componentes principales para la aplicación del estudio de confiabilidad en el sistema de carga por carretera en México en el marco de los estudios de fluidez como medida de desempeño. Así como el desarrollo de un método replicable para su aplicación en cualquier corredor de carga.

La principal característica de las investigaciones consultadas es el análisis de la variabilidad que forman en variaciones día a día (Alvarez y Hadi, 2012) (Chen et. al., 2003), (Bogers et.al., 2008). Ellos contemplan patrones de alto flujo como lo son los picos matutinos y vespertinos.

Otro de los pasos más importantes para el análisis de confiabilidad es la elección de la distribución de probabilidad que representa al conjunto de datos (Mahdi, 2011). Para ello, se considera de vital importancia la elección de una distribución con sesgo hacia la derecha y el uso de percentiles para la descripción del conjunto de datos tal y como se explicará más adelante.

3.2 Fluidez en la cadena de suministro

El estudio de fluidez en la cadena de suministro es un área con mucho potencial. Con su ayuda es posible determinar cuáles políticas e inversiones tienen un impacto sobre el comercio.

De acuerdo a Eisele et. Al. (2011), los autores reunieron una gran cantidad de información sobre tiempos de viaje, con los cuales desarrollaron el indicador de fluidez (Fluidity Index, FI) y el Índice de Tiempo de planificación (Planning Time Index, PTI) cuyas fórmulas se listan a continuación:

$$\text{Indice de Fluidez} = \frac{\text{Tiempo promedio de viaje}}{\text{Tiempo de viaje con flujo libre}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Indice de tiempo planificado} & \quad (11) \\ &= \frac{\text{Tiempo de viaje con el percentil 95\%}}{\text{Tiempo de viaje con flujo libre}} \end{aligned}$$

Mientras el **FI** captura las condiciones medias de operación, el **PTI** captura las variaciones diarias en el tiempo de viaje. Estas dos medidas son planeadas como indicadores de la eficiencia total del sistema y se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Proveer de información específica relativa a la toma de decisiones;
- Identificar espacial y temporalmente los cuellos de botella del sistema;
- Mejorar la competitividad y la relación de intercambio con países vecinos.

La principal ventaja del análisis de fluidez es la exploración de inicio a final de la cadena de suministro considerando sus cruces representativos. En el estudio realizado por consultores del Texas A&M Transport Institute (TTI), se enfocaron en el estudio de las condiciones de paso en la frontera entre México y EEUU. En este estudio se emplearon las mediciones de los tiempos de cruce en esta frontera. Dicho estudio de fluidez consta de 5 partes esenciales:

- Confiabilidad en los tiempos de viaje;
- Costos de transportación y almacenaje;
- Cantidad de carga movida;
- Análisis de riesgo;
- Resiliencia del sistema de transporte.

De acuerdo con los autores, el estudio y las medidas pueden ser trasladados de un modo de transporte a otro y se diseñó para permitir comparación de índices entre segmentos de diferente longitud. Motivo por el cual estos índices se proponen como una herramienta general para determinar la competitividad de la estructura y el sistema.

Para los efectos de este trabajo nos enfocaremos en una de las partes del estudio de fluidez: la confiabilidad en los tiempos de viaje. La confiabilidad al igual que la fluidez son variables estocásticas, pues no pueden ser estimadas o predichas con exactitud.

Ambos estudios, tanto el estudio de fluidez realizado en Canadá, así como el llevado a cabo en los EEUU presentan ligeras diferencias. Especialmente en cuanto a las partes que los conforman, siendo el estudio de la resiliencia una adición más concreta en el realizado en la frontera México-EEUU. Sin embargo, ambos consideran al estudio de los tiempos de viaje así como de su confiabilidad, como una parte importante para el desarrollo de medidas de fluidez para corredores de transporte.

3.3 Confiabilidad

La confiabilidad en sistemas de transporte no cuenta actualmente con una metodología propuesta y específica para su desarrollo y cálculo de los índices. Muchos autores la resumen en la adaptación del conjunto de datos y el cálculo de los índices. Se identifican pasos comunes encontrados en la revisión de literatura para esta investigación, siendo ellos los más importantes:

- Identificación de la ruta a analizar;
- Consideraciones sobre los horarios de toma de medidas (pico de operación en la mañana, así como el pico de operación en la tarde, días festivos, fines de semana, etc.);
- Obtención de datos; para los detectores de bucles (detectores de flujo) estos datos corresponden a las velocidades y flujo, y en los dispositivos de GPS la información completa sobre las rutas y tiempos de tránsito;

- Eliminación o consideración especial para los datos atípicos observados, no existe una regla especial de eliminación para los estudios de tiempos;
- Adaptación a una distribución de probabilidad mediante métodos estadísticos, pruebas de bondad de ajuste y/o pruebas no paramétricas;
- Determinación de las medidas de confiabilidad, en algunos casos también las medidas que consideran el sesgo en los datos.

La confiabilidad se ha expresado casi unánimemente como un atributo más de las redes de transporte, sin embargo como se mencionó en la revisión de literatura para este trabajo se adoptó la siguiente definición: “*La variación del tiempo de viaje a lo largo del periodo de observación.*” (Systematics, 2002). Como puede observarse la definición propuesta para la investigación, adopta la variabilidad de los datos dentro de sí.

Esta variabilidad debe ser medida en periodos cortos de tiempo con la finalidad de ser representativa de los múltiples estados de la operación del sistema ya que es esta misma variabilidad la que influye significativamente en la representación de los datos recolectados y su análisis. La razón anterior justifica el estudio de la confiabilidad en un esquema sistemático de fluidez en función de escenarios de operación de las redes de transporte. Se espera que una red de transporte confiable provea a los usuarios de niveles de servicios adecuados y constantes.

3.3.1 Obtención de datos

La obtención de datos se debe realizar mediante la toma de muestras en autopistas federales o bien en zonas urbanas dependiendo de los propósitos de la investigación. Para el presente estudio, se desarrolla en autopistas federales.

Como se hizo mención anteriormente la información presentada está directamente relacionada con el propósito de la investigación y sus alcances. Cabe resaltar que el estado de confidencialidad de datos recabados de empresas particulares, debe ser siempre una prioridad para este tipo de investigaciones.

En Eisele, et. al., 2011, se analizó el corredor de carga Canada Highway 1, que va desde Vancouver, British Columbia hasta Toronto, Ontario. Se recolectaron 3.5 millones de datos y se tomaron los datos de dispositivos GPS colocados en las unidades de carga. Debido al compromiso de confidencialidad, no es posible consultar la base de datos real. La información usada es la siguiente:

- Origen del viaje, junto con la información de la dirección, día, hora y la posición del dispositivo GPS;
- Destino del viaje, junto con la información de la dirección, día, hora y la posición del dispositivo GPS;
- Número de piezas de carga;
- Total de la carga transportada;
- Distancia recorrida;
- Tipo de unidad de carga;
- Información relevante sobre si se trata de un viaje largo o corto.

En Kouwenhoven y Warffemious (2016), usaron datos reales de las autopistas federales en Holanda. Para ello utilizaron información proporcionada por detectores de bucle automáticos, los cuales miden la velocidad media y el volumen de tráfico en periodos por minuto. Los puntos de toma de muestras fueron en segmento de conexión con una autopista en particular de las 250 rutas en toda la red de carreteras del sistema Holandés. De la misma forma en Chen et. al. (2003), se utilizaron los detectores de bucle con tiempos de 30 segundos entre medición y medición.

Los detectores de bucle (loop detectors) son dispositivos electrónicos colocados de forma permanente en un punto de inicio de la autopista, ellos constan de un cableado por debajo de la autopista. Éste genera un campo electromagnético que detecta cambios en el momento que un vehículo pasa sobre él, ocasionando una medición.

El método seleccionado dependerá enteramente de los recursos y esfuerzos destinados a la investigación. Con el auge de dispositivos GPS, se ha optado recientemente por la recolección de información mediante ellos. Esto implica la utilización de los métodos de preferencias reveladas del usuario, es decir, la

observación del comportamiento real del usuario usado principalmente en estudios de fluidez en sistemas de transporte.

3.3.2 Datos atípicos

Los datos atípicos afectan al desempeño de la media como representación del comportamiento de los datos, es por ello que se recomienda la eliminación o consideración especial de los datos que se consideren atípicos dentro de los análisis estadísticos generales. En el caso del análisis de confiabilidad en sistemas de transporte, se debe de poner especial importancia al análisis de los datos atípicos. Estos pueden revelar patrones de comportamiento que escapan a la interpretación singular de segmentos, aportando información que ayuda a esclarecer la descripción de los tiempos.

Estos patrones de comportamiento necesitan ser delimitados dentro de un horizonte temporal. Los estudios de confiabilidad se basan en un análisis de la variabilidad en periodos cortos de tiempo. Esto con la finalidad de evitar suponer que los mismos patrones permanecen estables durante largos periodos de tiempo.

El análisis de la variabilidad por lo tanto se propone para el presente estudio, en un patrón horario que comprende los segmentos Am y Pm de toda la información, puesto que existen pocos datos y la subdivisión no arroja muestras representativa si es segmentada (Carrion y Levinson, 2012). Se recomienda la pronta estructuración de un sistema que permita monitorear en un tasa diaria por horas, el tiempo de viaje en diferentes puntos del corredor, mediante dispositivos GPS (Systematics, 2002).

3.4 Pruebas de bondad de ajuste

De acuerdo a Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar (2013), existen muchas pruebas para verificar la distribución de probabilidad que siguen los datos recolectados. La mayoría de ellas se encuentran presentes en muchos de los programas estadísticos computacionales de aplicación general. Una vez que se

cuenta con una distribución asociada con el conjunto de datos, es posible aplicar alguna técnica como la estimación mediante máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros que describen esa distribución (B. S., 1999). Las más usuales son presentadas en las siguientes sub-secciones.

3.4.1 Kolmogorov-Smirnov

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica de los datos de su muestra con la distribución acumulada esperada. Si la diferencia observada es suficientemente grande, la prueba rechazará la hipótesis nula de la suposición de una distribución específica en la población.

Si el valor p de esta prueba es menor que su nivel α de significancia elegido, se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que la población no tiene un comportamiento normal. De acuerdo a W. Lilliefors (1967), el estadístico Kolmogorov-Smirnov tiene al menos dos grandes ventajas sobre la prueba Ji-cuadrada.

- Puede ser utilizada con muestras pequeñas en donde los resultados de las pruebas de Ji-cuadrada podrían ser cuestionables;
- Regularmente se considera una prueba más poderosa que la prueba de Ji-cuadrada para cualquier tamaño de muestra.

Esta prueba tiende a ser más sensible cerca del centro de la distribución que en las colas, para ello se recomiendan otras pruebas de bondad de ajuste. Sin embargo, esta prueba solo puede ser aplicada para distribuciones estadísticas continuas.

3.4.2 Anderson-Darling

Esta prueba mide qué tan bien un conjunto de datos sigue a una distribución dada de probabilidad. Si el estadístico Anderson-Darling es pequeño los datos tendrán una mejor adecuación a la distribución dada. En el caso de esta prueba si el valor p es inferior al nivel de significancia seleccionado (los más usuales son

0.05 y 0.10) es seguro concluir que los datos no siguen la distribución probada. Otra forma del estadístico AD es el estadístico AD ajustado, la diferencia radica en que el estadístico AD utiliza la función escalonada no paramétrica basada en el método de Kaplan-Meier de calcular puntos de la gráfica, mientras que el estadístico AD ajustado utiliza otros métodos para calcular los puntos graficados.

3.4.3 Ji-cuadrada

Se considera como una prueba paramétrica para determinar la diferencia entre la distribución teórica y la observada. Comúnmente se utiliza para una significancia estadística con nivel del 5%, para:

- Probar el ajuste de una muestra a una distribución de probabilidad;
- Probar la independencia entre variables categóricas.

3.4.4 Log verosimilitud

De acuerdo a B. S. Dhillon (1999), el método de la Máxima Verosimilitud es uno de los métodos más flexibles y aceptados para la estimación de parámetros. La base de este enfoque es partir de una muestra aleatoria con $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ tomados de una población con una densidad de probabilidad $f(t; \theta)$; de donde t es el tiempo y θ es el parámetro de la distribución a ser estimado. La función de densidad conjunta de estas n variables se denomina función de verosimilitud, L , y se define por:

$$L = f(t_1; \theta) f(t_2; \theta) f(t_3; \theta) \dots f(t_n; \theta) \quad (12)$$

El valor de θ que maximiza el logaritmo \ln representado como L se le conoce como estimador de máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés) de θ . Para un conjunto de datos de observación completa, la función de verosimilitud es un producto de la función de la densidad de probabilidad, con un elemento respectivo para cada punto de los datos. Generalmente θ es estimado resolviendo la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta} = 0$$

(13

Este método procura encontrar los valores más probables de los parámetros de la distribución para un conjunto de datos. Se plantea como un método asintótico consistente, eficiente e imparcial. Sin embargo se requiere de un número de muestra grande de otra forma puede llegar a ser sesgada la generación de parámetros. La propuesta general en la literatura conduce a la corroboración de resultados mediante graficas de probabilidad junto a la utilización del método de la máxima verosimilitud.

3.5 Distribuciones especiales

La principal razón de probar el ajuste a diferentes familias de distribuciones de probabilidad, es para saber si esos datos siguen esa distribución de probabilidad. En caso contrario, las medidas de confiabilidad pueden ser inadecuadas y sesgadas (Yang y Wu, 2016). En el análisis de la literatura se identificaron dos 2 tipos de distribuciones utilizadas en estudio de confiabilidad. La evidencia de estas distribuciones se ha puesto de manifiesto en distintos estudios, donde se señala que las condiciones son mejor descritas por distribuciones mezcladas y distribuciones con colas superiores más largas de lo habitual (Guessousa et. al., 2014). Mientras que otros estudios establecen la presencia de distribuciones mezcladas en una muestra. En estas muestras el uso de una distribución de probabilidad única puede llevar a un ajuste bajo del set de datos, y por lo tanto a una medición inexacta de la confiabilidad en el tiempo de viaje.

3.5.1 Singh Maddala

Investigaciones recientes indican que la distribución Log normal una de las distribuciones mas utilizadas para el modelado de tiempos de viaje, no proporciona un ajuste adecuado debido a las pronunciadas colas de los datos observados. Taylor y Susilawati (2012), utilizan la distribución Singh Maddala,

una distribución muy utilizada en la actuaria. De acuerdo a Guessousa (2014), las propiedades de estas distribuciones y sus parámetros ayudan a ajustar de una mejor forma la distribución de los tiempos de viaje, dependiendo del número de mezclas y el número de muestra utilizada. La familia de distribuciones propuesta por Singh y Maddala (1976) tiene como origen la distribución beta generalizada. Se volvió popular para ajustar la distribución del ingreso y egreso. También es conocida por algunos otros nombres, tales como, Burr XII o simplemente la distribución Burr, Pareto IV, Beta-P, o distribución generalizada Log logística. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{aqx^{a-1}}{b^a \left(1 + \left(\frac{x}{b}\right)^a\right)^{q+1}} \quad (14)$$

Donde:

a: Parametro de forma > 0

b: Parametro de escala > 0

q: Parametro de forma > 0

La función de densidad acumulada es:

$$F(x) = \left[1 - \left(1 + \left(\frac{x}{b}\right)^a\right)^{-q}\right] \quad (15)$$

La media de la distribución es:

$$E(x) = \frac{\text{gamma}\left(1 + \frac{1}{a}\right) \text{gamma}\left(q - \frac{1}{a}\right)}{\text{gamma}(q)} \quad (16)$$

Donde:

gamma: Función gamma

El *i* – esimo momento con media 0, esta expresado por:

$$E(x^r) = \frac{b^r \text{gamma}\left(1 + \frac{r}{a}\right) \text{gamma}\left(q - \frac{r}{a}\right)}{\text{gamma}(q)} \quad (17)$$

3.5.2 Distribuciones Mezcladas

Los conjuntos de datos pueden ser ajustados a modelos de probabilidad mixta, esto se describe como sigue:

$$p(x|\Sigma) = \sum_{k=1}^K w_k p_i(x|\Sigma_i) = w_1 p_1(x|\Sigma_1) + \dots + w_k p_k(x|\Sigma_k) \quad (18)$$

Donde:

p(x|\Sigma): Es una distribución de probabilidad continua

w_i: Es el peso de la distribución p(x|\Sigma)

k: Es el número de la distribución

\Sigma_i: Son parámetros de la i – esima distribución

Para la utilización de las distribuciones mezcladas la forma de la distribución $p(x|\Sigma)$ necesita ser especificada. Para motivos de esta investigación se utilizó la distribución simétrica Gaussiana, se presenta la expresión matemática de la distribución.

$$\text{Gaussiana}(T|\mu, \sigma) = \sum_{k=1}^K w_i \text{Gaussiana}_i(t|\mu_i, \sigma_i) \quad (19)$$

Donde:

T: Tiempo de viaje

w_i: Peso de la i – esima distribución

\mu_i, \sigma_i: Media y desviación estándar de la i – esima distribución

Se utilizó el paquete estadístico R con la librería mixtools. De esta forma se hizo uso del algoritmo de máxima-expectativa. A diferencia de los valores iniciales seleccionados arbitrariamente para los pesos y parámetros en las distribuciones individuales, el método K-media se utilizó para inicializar estos parámetros de manera que los pesos y parámetros óptimos se pudieran estimar de manera eficiente (Yang y Wu, 2016).

3.6 Transformaciones de variables

La finalidad del estudio de confiabilidad en el marco del estudio de fluidez es la de proporcionar algunos indicadores que ayuden a medir el desempeño del sistema; uno de los más importantes es el **PTI**, el cual captura las variaciones diarias en el tiempo de viaje. Este y otros indicadores buscan ser predictores acerca del comportamiento del proceso en este caso, el tiempo de viaje. La naturaleza de los datos puede seguir una distribución específica o simplemente seguir una distribución aleatoria o cambiante a lo largo del periodo de análisis. La importancia de la descripción de la forma de la distribución radica en que esta proporciona información sobre el proceso generador de datos. Conociendo las características de la distribución que describe los datos es posible inferir características de la población.

Muchos procesos estadísticos tienen como condiciones el comportamiento normal de los datos en análisis. Si la suposición de normalidad no es satisfecha entonces los resultados de dichos procesos estadísticos pueden ser incorrectos. En el caso del estudio de Fluidez se suponen condiciones de una distribución normal y se desarrollan indicadores con base a esta distribución. De acuerdo al Teorema central del límite, cuando un gran número de procesos son llevados a cabo sucesivamente, el conjunto completo tiende a presentar un comportamiento normal. Sin embargo en realidad los procesos pueden tomar múltiples formas y no es posible decir a ciencia cierta la forma de la distribución que caracteriza los datos. Para ello se aplican transformaciones a las variables en estudio con el fin de realizar análisis con base a la distribución normal.

A continuación se presenta una de las formas más comunes para la transformación de una variable con un comportamiento aleatorio a una variable con comportamiento normal.

3.6.1 Transformación de Johnson

Una de las transformaciones con mayor complejidad son las llamadas familia de transformaciones de Johnson. Existen tres familias de distribución de Johnson:

$$\text{Se refiere a } x \text{ no acotada: } SU < -Y = \gamma + \eta \sinh^{-1} \left(\frac{x - \epsilon}{\lambda} \right) \quad (20)$$

$$\text{Se refiere a } x \text{ acotada: } SB < -Y = \gamma + \eta \log \left(\frac{x - \epsilon}{\lambda + \epsilon - x} \right) \quad (21)$$

$$\text{Se refiere a } x \text{ acotada por debajo o Log normal: } SL < -Y = \gamma + \eta \log \left(\frac{x - \epsilon}{\lambda} \right) \quad (22)$$

Generalmente se prefiere una distribución simétrica sobre una distribución con sesgo positivo o negativo. Estas distribuciones son más fáciles de interpretar y generar inferencias. Además existen muchas técnicas de modelado y análisis que requieren de una distribución normal simétrica, de aquí surge la necesidad de aplicar transformaciones a las variables para reducir las condiciones de asimetría

Actualmente las transformaciones son realizadas mediante software estadístico, debido a la cantidad de parámetros posibles, es una herramienta de transformación de variables muy potente y ampliamente utilizada.

3.7 Confiabilidad en el tiempo de viaje

Tal y como se ha mencionado, el estudio de la confiabilidad en los tiempos de viaje y por lo tanto de Fluidez de Carga ha atraído considerablemente la atención en los últimos años. La confiabilidad en los tiempos de viaje es de suma importancia para todos los usuarios del sistema de transporte. Especialmente para los transportistas quienes requieren de condiciones predecibles para permanecer competitivos. Además los profesionales en manejo de tráfico requieren de medidas especializadas para cuantificar las mejoras en la red de transporte (FHWA, 2014). Siendo el tiempo de viaje una variable continua, la mayoría de los investigadores utilizan distribuciones de probabilidad continua

(Yang y Wu, 2016). La gran mayoría de los estudios realizan el estudio de la confiabilidad en 2 pasos:

1. Construir una distribución del tiempo sobre la base de los tiempos de viaje dados;
2. Calcular indicadores estadísticos a partir de estas distribuciones.

Los anteriores pasos resumen a grandes rasgos la tarea del estudio de la confiabilidad, sin embargo debido a la simplicidad de la explicación se omiten pasos importantes para el desarrollo de las medidas. A continuación se presenta una serie de pasos comunes identificados en el cálculo de las medidas de confiabilidad.

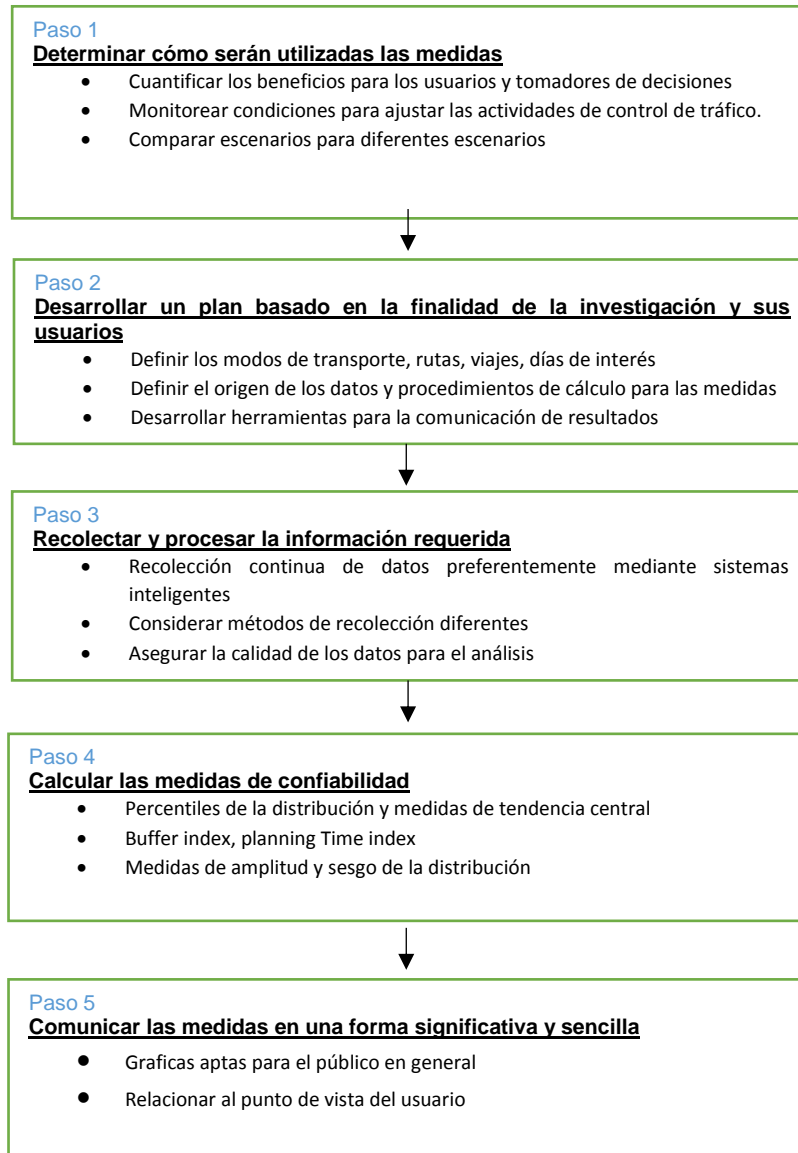


Fig. 3 Enfoque metodológico para medidas de confiabilidad.
(https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/long_descriptions/Figure7.htm)

De acuerdo a la FHWA en su página web (https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm), existen 5 pasos básicos para la determinación de las medidas de confiabilidad, se definen a continuación.

3.7.1 Definición del uso de las medidas de confiabilidad

La mayoría de los estudios se han realizado utilizando sistemas inteligentes de transporte (ITS) o bien sistemas de posicionamiento geográfico (GPS). La

disponibilidad de la información almacenada permite el cálculo de las diferentes medidas de confiabilidad así como su comparación entre estudios de diferentes años. De esta forma se catalogan como estudios de preferencias reveladas, en los cuales se observa el comportamiento del usuario. La definición de los periodos bajo análisis dependen de los objetivos a alcanzar, así como del segmento de la población a la que se encuentra dirigido el estudio, dependiendo de la finalidad del estudio, tal y como dice la FHWA, "*Entender cómo serán utilizadas y quién las utilizará proveerá de los fundamentos para la creación del programa de medida del confiabilidad*" (FHWA, 2014). Algunos de los objetivos encontrados en la revisión de literatura son; i) entender las razones que causan los cuellos de botella en arterias principales de tráfico; ii) la obtención de modelos de tráfico que representen adecuadamente el flujo en el segmento (Guessousa et. al., 2014) (Clark y Watling, 2005). La FHWA explica la aplicación de las medidas de acuerdo a niveles involucrados. Las aplicaciones presentadas por la FHWA son:

- **Nivel 1.** Este nivel está diseñado para ser usado en la alta dirección y los planeadores para determinar las condiciones del viaje;
- **Nivel 2.** En este nivel pueden ser identificadas las demoras por el tipo de fuente, es utilizada por la gerencia media, operadores, planeadores y puede ser utilizada para determinar las causas de la poca confiabilidad;
- **Nivel 3.** En esta etapa los operadores y controladores en conjunto son capaces de desarrollar políticas, procedimientos y actividades, que sean capaces de mejorar la operación.

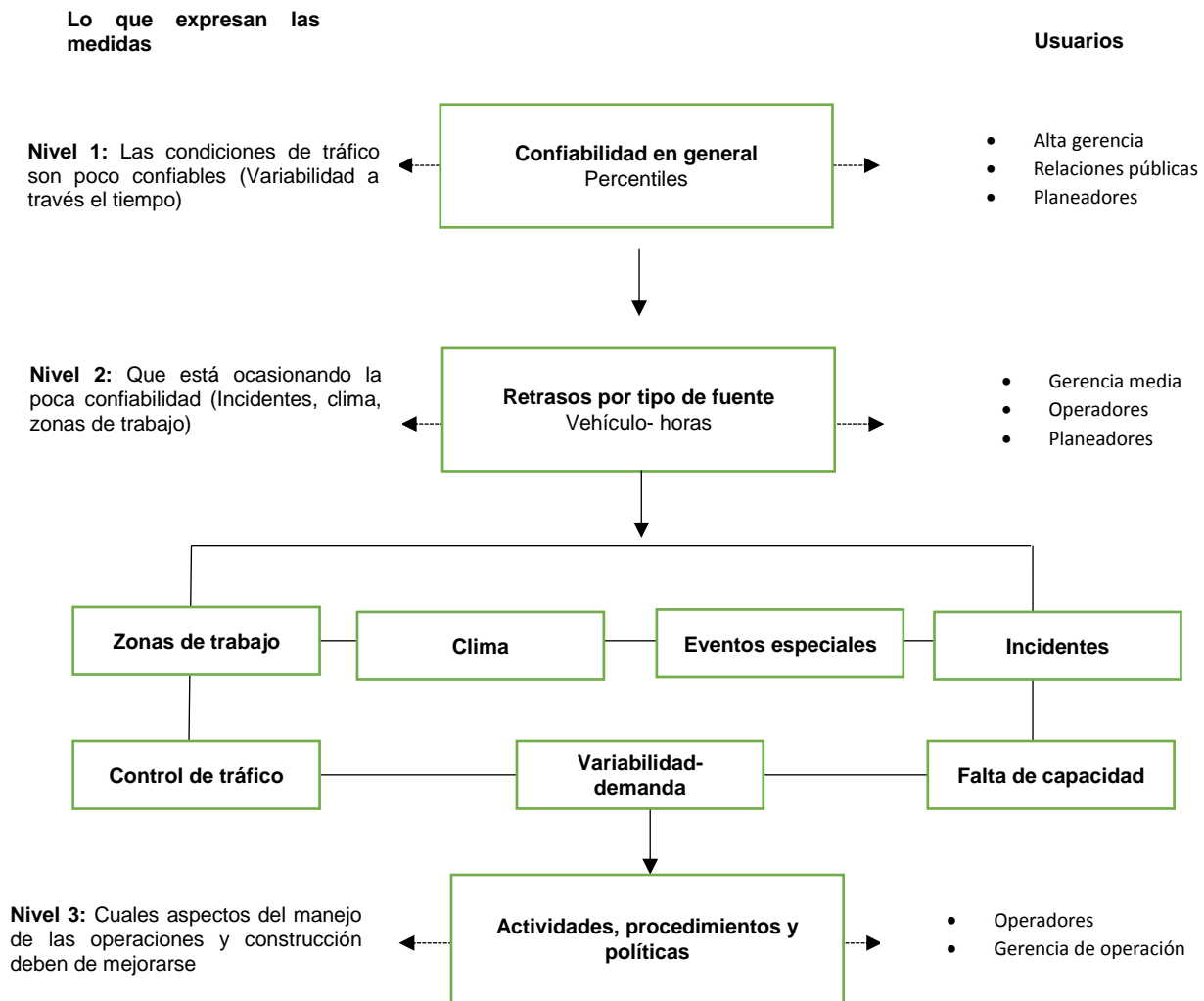


Fig. 4 Procedimiento para para establecer el uso y el usuario de las medidas de confiabilidad (https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/long_descriptions/Figure7.htm)

3.7.2 Desarrollo del plan basado en los usuarios y sus necesidades

El siguiente paso es definir determinar un plan de acción con respecto al uso que se le dará a las medidas de confiabilidad obtenidas en el estudio. Se requiere pensar en las preguntas adecuadas para la determinación del plan de acción.

Las preguntas pertinentes son las siguientes (FHWA, 2014):

- ¿Cuáles son los modos de transporte involucrados en el análisis?
- ¿Cuáles son las rutas, viajes o tramos analizados?
- ¿Cuáles son los días o periodos de tiempo de interés para el estudio?
- ¿Cómo serán recolectados los datos?

- ¿Será necesario algún procedimiento de depuración sobre los datos una vez recolectados?
- ¿Cuáles son las medidas de confiabilidad utilizadas en el estudio?
- ¿Qué técnicas o software serán utilizados en el análisis?
- ¿Cómo se comunicarán las medidas de confiabilidad?
- ¿Cómo se obtendrá la retroalimentación del usuario en las medidas?

3.7.3 Recolección de la información

Los estudios de confiabilidad se basan en la recolección de medidas de tiempo en una ruta de punto inicial a punto final. Las técnicas más comunes para la obtención de estas son las siguientes:

- Obtenidos mediante vehículos equipados con sondeo continuo
- Estimación mediante detectores en puntos cuidadosamente seleccionados
- Estudios periódicos, especiales (datos viales de la SCT)
- Simulación de modelos

La técnica de recolección de la información seleccionada deberá llevarse a cabo, enfocándose en la razón principal del estudio así como de los usuarios de la misma, la proyección del estudio y su frecuencia. Múltiples técnicas pueden ser utilizadas, sin embargo, se debe de poner especial cuidado en la comparación entre diferentes conjuntos de información recolectados mediante diferentes técnicas, esto implica los tiempos de recogida de la información y el posible sesgo que podría significar prepara los datos para el análisis final de confiabilidad. Se debe de ejercer un juicio adecuado para la preparación de los datos para el análisis, desde la eliminación de los datos que sean sospechosos de una recolección deficiente o la elección del periodo de recolección para su presentación. (FHWA, 2014).

Esta metodología propuesta por la FHWA fue la adoptada como base para la realización de esta investigación.

3.8 Conclusiones

En este capítulo se presentó la metodología de investigación utilizada para desarrollar un modelo de análisis de la confiabilidad con miras en el desarrollo de un estudio de fluidez en el desempeño del sistema de carga por carretera en México. El enfoque abductivo fue seleccionado para la realización del contraste de los datos empíricos con la información de las metodologías encontradas en la literatura. De la misma forma se presentaron las técnicas de ajuste y posibilidades para el ajuste de los datos

La metodología seleccionada para la construcción del estudio fue la presentada por la FHWA y mencionada con anterioridad. Lo anterior debido a que ésta considera explícitamente el involucramiento de varios estratos en la toma de decisiones, la construcción de los modelos de análisis se llevará a cabo simultáneamente en software de análisis estadístico para la optimización de los parámetros necesarios. De igual forma se seleccionó a los estudios de preferencias reveladas mediante GPS para la recolección de la información ya que permiten conocer el punto de vista del usuario del sistema de transporte. Asimismo se presentaron las medidas de confiabilidad que se utilizaran en el análisis formal de la información.

4 Análisis y discusión de resultados

Resumen

En este capítulo se presenta el proceso de análisis y construcción de los indicadores de confiabilidad así como de los índices de fluidez y tiempo planificado de viaje. En la primera se presenta la introducción del plan de recolección de los datos, la finalidad de las medidas, se presenta el plan de trabajo y más medidas propuestas. En la segunda sección se procede al cálculo de las medidas de confiabilidad para tres ejemplos de segmentos del corredor. Además, se relaciona a estas medidas con los índices de fluidez y finalmente en la cuarta etapa se presentan las conclusiones.

4.1 Introducción

La confiabilidad en los tiempos de viaje ha sido considerada como una de las principales características para medir el desempeño de los sistemas de transporte. La importancia reside en que influye sobre la decisión de dónde, cuándo y cómo realizar el viaje; información por demás importante para la agendar la planeación de los viajes catalogados como urgentes para su entrega. Con la finalidad de ayudar a la medición del desempeño y proporcionar un índice que apoye la toma de decisiones en el sector transporte, el Ministerio de Transporte de Canadá conocido como “*Transport Canada*”, desarrolló los indicadores denominados **PTI** (Planning Time Index) y el **FI** (Fluidity Index). El primero de ellos captura la variación en el tiempo de viaje, el segundo captura la condiciones promedio de viaje (Eisele et. al., 2011). Ambos indicadores están estrechamente relacionados al análisis de los tiempos de viaje, puesto que requieren de un análisis de la confiabilidad en los tiempos de traslado para ser calculados. La necesidad de la medición de la información surgió con la finalidad de utilizar la información obtenida al final de la cadena de suministros y una necesidad imperante de apoyar en la toma de decisiones en materia de inversión financiera (Margiotta, 2010).

La confiabilidad afecta en la decisión para realizar el viaje, además de influir sobre el tiempo planificado para evitar los retrasos, impactando directamente a los costos operativos en la cadena de suministros. La confiabilidad analiza la variabilidad en los tiempos de viaje, ofreciendo información más precisa sobre las condiciones de operación de la misma, de esta forma se pueden tomar decisiones sobre las estrategias de mejora para la red de transporte. Una red de transporte puede ser confiable y tener tiempos de viaje bastantes largos, o bien puede presentar tiempos de viaje cortos pero con extrema variación a lo largo de un periodo de tiempo. Sin embargo, de acuerdo a varios estudios los usuarios prefieren un tiempo de viaje largo pero confiable, en lugar de un tiempo de viaje corto pero con alta variabilidad; de ahí la importancia del estudio de confiabilidad como una parte fundamental del estudio de fluidez. El presente análisis de confiabilidad en sistemas de transporte se divide en tres secciones: la primera describe la información, su origen, características y consideraciones especiales así como el proceso de preparación para ser utilizada en el análisis. En la

segunda sección se calculan las medidas de tiempo de viaje con respecto a la metodología seleccionada. Finalmente se discuten y presentan los resultados dentro de un concepto de fluidez utilizando la información del análisis de confiabilidad.

4.1.1 Recopilación de la información

La información utilizada en este análisis fue obtenida mediante dispositivos GPS instalados en unidades de transporte de carga de empresas privadas, razón por la cual no se proporciona información que la empresa considera confidencial. La información utilizada corresponde a la autopista federal número 57, en el segmento que parte de la Ciudad de México hacia la ciudad de Querétaro, a partir de la caseta de cobro Tepetzotlán con coordenadas latitud: -99.207587 y longitud: 19.715358 ubicada en el kilómetro 43.1 con número de referencia 2053, hasta la caseta de cobro denominada T. der. Libramiento de Querétaro a San Luis Potosí con coordenadas latitud: -100.343115 y longitud: 20.584826 ubicada en el kilómetro 207. Los datos utilizados corresponden a las fechas de 01-enero al 31-julio del año 2017. Se analizaron 555 vehículos cuyas características y tipo de vehículo son desconocidas, correspondientes a cuatro compañías diferentes.

Los registros incluían la información relacionada a la latitud, longitud y un identificador único para cada unidad. Los intervalos de toma de información están sujetos a las limitantes del acceso y señal de la red. Razón por el cual no se presenta un intervalo definido de toma de muestra. Ninguna de las muestras supera los 30 minutos entre cada observación. No se cuenta con puntos establecidos para la toma de muestras, por lo cual los puntos de información no son equidistantes, pudiendo variar tanto por un intervalo de un segundo como por minutos dependiendo de la calidad de la conexión al servidor y los intervalos definidos por la empresa transportista. Con ayuda de la Red Nacional de Caminos de México, se dispusieron las ubicaciones de las diferentes casetas de cobro que están presentes a lo largo de las autopistas federales en México.

Se procedió a calcular la distancia entre punto a punto utilizando la librería “geosphere” en el software estadístico R, así como la diferencia en tiempo entre

cada uno de ellos, de esta forma se cuenta con un tiempo de recorrido (t_i) y una distancia inicial (d_i), obteniendo 2 de los 3 componentes para derivar la velocidad con la siguiente ecuación (v_i).

$$v = \frac{d}{t} \quad (23)$$

Al conocer la distancia entre el punto seleccionado y la caseta más cercana fue posible calcular los tiempos en los que la misma unidad estaría en la caseta seleccionada. Se realizó el mismo procedimiento para el siguiente punto que estuviera más cercano a la caseta siguiente y correspondiera a la continuidad del registro, mismo año, mes, día, hora y dirección.

La disponibilidad de la información permite el análisis y obtención de los diferentes índices relacionados a la confiabilidad, sin embargo, debido a la calidad y características de la información obtenida, se le catalogó como una “muestra de conveniencia”. En este tipo de muestras el investigador hace uso de la información debido a la disponibilidad de la misma y su facilidad para obtenerla, ante la dificultad de obtener información de mejor calidad. La finalidad de la investigación tal y como fue planeada al inicio del documento es la de obtener medidas de confiabilidad para diferentes secciones de tiempo, con base en escenarios a lo largo del día. Las muestras obtenidas por segmentos de hora a hora, día a día, semana a semana y mes a mes no superaron las 30 observaciones, razón por la cual se decidió utilizar la información en su totalidad para realizar el análisis de la información subdividiéndola únicamente en horarios de operación, de 00:00 hrs a 12:59 hrs y de 13:00hrs a 23:59 hrs.

4.1.2 Definición del uso de las medidas de confiabilidad

Esta ruta fue seleccionada por su participación en el flujo de uno de los 14 principales corredores carreteros para México, definidos por SCT y la Dirección General de Desarrollo Carretero. Se analizaron segmentos definidos de los

corredores. Las rutas serán definidas en el análisis correspondiente de cada segmento.

1. Caseta de Tepotzotlán km 43 (2053) – Caseta Jorobas km 56 (2054)
2. Caseta de Jorobas km 56 (2054) – Caseta Tepeji del Río km 69 (2058)
3. Caseta de Tepeji de Río km 69 (2058) – Caseta Jilotepec km 83 (2060)
4. Caseta de Jilotepec km 83 (2060) – Caseta Jilotepec-Maravillas km 107 (2063)
5. Caseta de Jilotepec-Maravillas km 107 (2063) – Caseta Aculco km 125 (2065)
6. Caseta de Aculco km 125 (2065) – Caseta Toluca km 148 (2069)
7. Caseta de Toluca km 148 (2069) – Caseta Palmillas km 145 (2068)
8. Caseta de Palmillas km 145 (2068) – Caseta San Juan del Río km 164 (2072)
9. Caseta de San Juan del Río km 164 (2072) – Caseta Acámbaro km 170 (2073)
10. Caseta de T. Izq. Acámbaro km 170 (2073) – Caseta T. Der. Libramiento de Querétaro a San Luis Potosí km 207 (2074)

El público al que irá dirigido el estudio es al usuario en general de los sistemas de transporte por carretera, en este caso en específico a los usuarios del transporte de carga por carretera. Por lo cual se determinó que el enfoque desde el **punto de vista del usuario** es el más adecuado para el presente estudio, ya que éste analiza la forma en que le usuario percibe la variabilidad en el tiempo de viaje.

Las medidas serán utilizadas en el nivel uno; en éste se determinan las condiciones generales del viaje, de acuerdo a esta definición, el estudio también abarcará la posible identificación de las fuentes que ocasionan las demoras intentando determinar las causas de la poca confiabilidad.

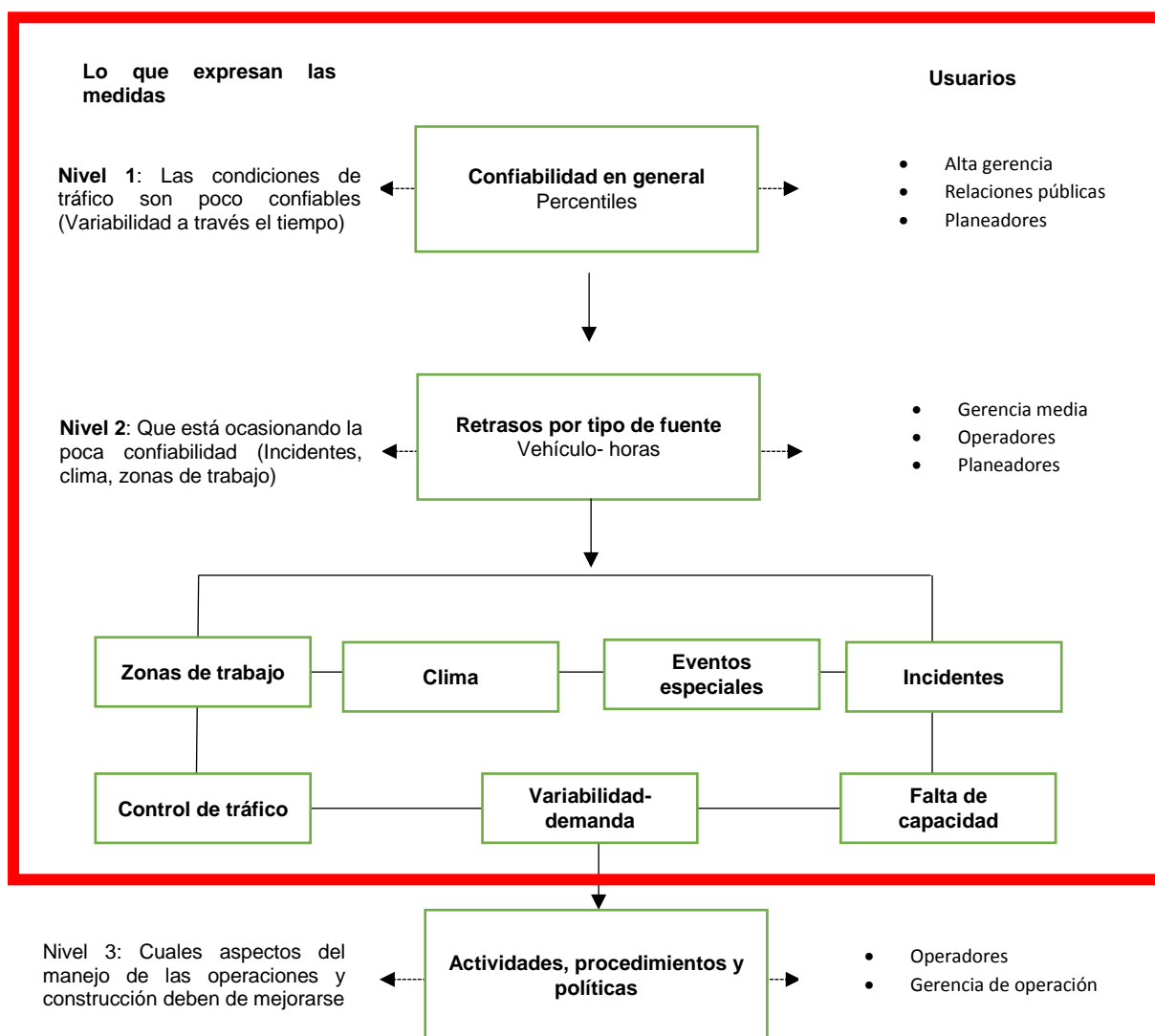


Fig. 5 Procedimiento para para establecer el uso y el usuario de las medidas de confiabilidad (https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/long_descriptions/Figure7.htm)

4.1.3 Medidas de confiabilidad en sistemas de transporte

La siguiente tarea consiste en el cálculo de las medidas de confiabilidad elegidas. De acuerdo al análisis de la literatura se determinó la utilización de las medidas tendencia central y dispersión de la muestra, con intervalos día a día desde el punto de vista del usuario del sistema de transporte puesto que refleja cómo el usuario percibe la variación en el tiempo de viaje, además de ser las medidas de confiabilidad más extendidas para su uso en la actualidad. Las siguientes medidas son las más comunes para su uso.

4.1.3.1 Percentiles de la distribución de probabilidad

Se considera como el método más simple para medir la confiabilidad, incluye los percentiles del 95%, 90%, 80%, 75%, 50%, 25%, 10% y 5% de los tiempos de viaje. Los percentiles del 90 y 95% nos dicen qué tan grande será el retraso en el peor de los viajes. De acuerdo a la FWHA, la variabilidad es mejor expresada considerando valores de los percentiles de la distribución de los tiempos de viaje, tales como el percentil 95%, el cual refleja una medida lógica de la expresión “llegando tarde”. El percentil 95% implica una probabilidad que uno de cada 20 viajes exceda el valor de tiempo de viaje representado por el mismo percentil, lo que significa que se llegará tarde una vez al mes. En el caso del percentil del 95%, es reportado como el tiempo total planeado el cual incluye el buffer time o mejor conocido como el tiempo planeado de viaje (Planning Time).

Sin embargo tiene la desventaja de que no pueden ser fácilmente comparadas entre viajes de diferente duración, especialmente en las áreas urbanas o con urbanas. Razón por la cual se derivan medidas basadas en los percentiles de la distribución, tales como el buffer time. Los percentiles nos dicen qué porcentaje de datos tienen un valor menor al referido.

4.1.3.2 Índice de Tiempo Planificado (Planning Time Index)

Es un índice para determinar qué tan largo es el tiempo de viaje comparado con el tiempo de viaje con flujo libre. Se utiliza el percentil del 95% puesto que este representa la peor situación incluyendo retardos atípicos y esperados. Por su construcción este índice puede compararse directamente con el **Planning Time**, el cual es una medida de la congestión promedio que se calcula como sigue:

$$\text{Índice de Tiempo Planificado} = \frac{\text{Percentil del 95\%}}{\text{Tiempo de viaje con flujo libre}} \quad (24)$$

4.1.3.3 Índice de tiempo de amortiguación (**Buffer Index**)

El índice de amortiguación se expresa como un porcentaje y su valor aumenta a medida que empeora la fiabilidad. Por ejemplo, un índice de amortiguación del 40 por ciento significa que, durante un tiempo medio de viaje de 20 minutos, el viajero debe presupuestar otros 8 minutos (20 minutos × 40 por ciento = 8 minutos) para asegurar la llegada puntual la mayor parte del tiempo. En este ejemplo, los 8 minutos adicionales se denominan tiempo de búfer el cual será explicado en el apartado siguiente (FHWA, 2014) y que se calcula como sigue:

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{\text{Percentil del 95\%} - \text{Tiempo promedio de viaje}}{\text{Tiempo promedio de viaje}} \right) \quad (25)$$

4.1.3.4 Tiempo de amortiguamiento (**Buffer Time**)

Se define como el tiempo extra expresado en minutos que necesita ser planeado con respecto al tiempo medio para asegurar llegar a tiempo el 95% de las ocasiones, la estadística está diseñada para tener en cuenta cualquier retraso inesperado. En el ejemplo anterior, los 8 minutos adicionales se denominan tiempo de amortiguación. Esta formulación del índice de amortiguación utiliza un percentil 95% de tiempo de viaje para representar un peor momento de viaje. De esta forma y ara clarificar el concepto; el **Buffer Index** expresa el porcentaje de tiempo extra necesario para llegar a tiempo, mientras el **Buffer Time** expresa en unidades de tiempo el tiempo extra necesario a partir de la media. Ya sea expresado como un porcentaje o en minutos, representa el tiempo extra que un viajero debe planificar para llegar a tiempo a 95 por ciento de todos los viajes. Una analogía simple es que un viajero o conductor que utiliza un indicador de confiabilidad del 95 por ciento llegaría tarde sólo un día laborable por mes (FHWA, 2014). Se calcula como sigue:

$$\text{Buffer Time (Minutos)} = \text{Percentil del 95\%} - \text{PTiempo promedio de viaje} \quad (26)$$

4.1.3.5 Misery Index

El *MI* mide la cantidad de retraso de los peores viajes. La confiabilidad puede ser analizada con base al tiempo promedio del 5% de los viajes que exceden el Percentil del 95%. (Lomax et. al., 2003). Representa el porcentaje de minutos por el cual los peores viajes superan al promedio y se calcula como sigue:

$$\text{Misery Index} = \frac{\text{Tiempos mayores al P97.5\%}}{\text{Tiempo promedio de viaje}} \quad (27)$$

4.1.3.6 Estadísticos de sesgo (λ skew)

Como se comentó en el análisis de literatura, la mayoría de los autores proponen el uso de medidas de tendencia central y dispersión para la representación de los tiempos de viaje, tales como la media y la desviación estándar. Sin embargo, existe discusión sobre el tema ya que lo apropiado de esta decisión contrasta con la evidencia de que la distribución de la variabilidad en los tiempos de viaje se muestran significativamente sesgada hacia la derecha (Taylor y Susilawati, 2012). Sin la suposición de alguna distribución en particular, no existe una relación directa de la desviación estándar y los percentiles, por lo cual se plantea lo siguiente como una medida más “robusta” para describir la asimetría de la distribución.

Según van Lint y van Zuylen (2005), el estadístico de sesgo, es una medida de la asimetría en la distribución del conjunto de datos, indicando de esta forma el nivel y dirección del sesgo de la distribución. En el caso de valores grandes del estadístico, estos indican que existe una mayor posibilidad de encontrar valores mayores a la mediana de la distribución, además de revelar que la forma de la distribución está fuertemente sesgada hacia la izquierda, lo cual debe ser interpretado como poca confiabilidad en el tiempo de viaje, indicando que al menos el 10% de los tiempos será significativamente mayores a la mediana. Valores superiores a 1 significan que los viajeros considerados como desafortunados por tener tiempos de viaje altos perderán más tiempo que los viajeros con tiempos de viaje cercanos a la mediana. De acuerdo a Alvarez y

Hadi (2012), valores grandes también indican que una alta proporción de la confiabilidad es debido a eventos no recurrentes, tales como incidentes, zonas de trabajo, clima o eventos especiales. Valores muy pequeños indican que la distribución está fuertemente sesgada hacia la derecha. Si el estadístico es igual a **1** la distribución es simétrica y por lo tanto se debe recurrir al estadístico de amplitud para concluir algo sobre la confiabilidad. (van Lint y van Zuylen, 2005).

Es importante hacer una aclaración en este punto. Este estadístico representa la asimetría de la concentración de los datos con respecto a la mediana de la distribución. Es por ello que se representa como la razón de la mitad superior de los datos entre la mitad inferior de los mismos. Dependiendo de su valor representará la dirección de la acumulación de los datos en la parte derecha o izquierda de la distribución. No está relacionado con el estadístico de sesgo comúnmente descrito en estadística, el cual puede tomar valores positivos o negativos, dependiendo de la dirección del sesgo.

Se expresa como sigue:

$$\lambda_{skew} = \frac{P90 - P50}{P50 - P10} \quad (28)$$

4.1.3.7 Estadístico de amplitud (λ var)

Esta medida representa la proporción del rango de tiempos de viaje en los que cae el 80% de las observaciones alrededor de la mediana y el tiempo medio de viaje. Valores grandes significan que la amplitud de la distribución que representa a los tiempos de viaje es grande con respecto a su valor medio, por lo tanto la confiabilidad en el tiempo de viaje puede ser catalogada como baja. El estadístico de amplitud se acerca a **0** si el rango de los posibles valores de los tiempos de viaje son pequeños comparados con el valor de su mediana (Bogers et. al., 2014). Se expresa como sigue:

$$\lambda \text{ var} = \frac{P90 - P10}{P50} \quad (29)$$

Ambos estadísticos son índices diseñados por los autores para dar una medida de la ubicación de la mayor cantidad de datos dentro de la muestra con respecto a la mediana, para este estudio se tomara en cuenta a ambos índices y se definirán en lo consecutivo como los índices de sesgo y amplitud de la distribución.

4.1.3.8 Coeficiente de variación

Coeficiente de variación se refiere a una medida de dispersión la cual describe la cantidad de variabilidad en relación con la media. Dado que no presenta unidades puede ser utilizado en lugar de la desviación estándar para comparar la dispersión de los conjuntos de datos con diferentes medias. Al analizar los tiempos de viaje se puede tener una idea más clara de las tendencias y características del desempeño de mejor forma, que simplemente utilizando la desviación estándar, sin tomar en cuenta la longitud del viaje. De esta forma es una medida que nos permite comparar y discutir entre una variedad de viajes con diferentes longitudes (Lomax et. al., 2003). Desde un punto de vista del recorrido en una cadena de suministro los tiempos de viaje pueden variar. Por lo tanto los tiempos de tránsito pueden ser analizados como la relación entre la desviación estándar y el tiempo medio de viaje, conocida como el coeficiente de variación. Un alto valor en el CV significa que existe heterogeneidad en los valores de la variable en cuestión. Valores pequeños, reflejan homogeneidad en los valores de la variable. El CV se calcula como sigue:

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Tiempo promedio de viaje}} \right) 100 \quad (30)$$

4.1.4 Desarrollo del plan basado en los usuarios y sus necesidades

Los medios de transporte involucrados en el análisis fueron unidades de transporte de carga de los cuales no se especifica su tipo, de cuatro compañías diferentes. Las rutas fueron especificadas con anterioridad, así como el origen y periodo de análisis.

Las medidas de la confiabilidad más utilizadas en los estudios desde el punto de vista del usuario de acuerdo al análisis de literatura son:

- Buffer Index.
- Índice del tiempo de viaje (Travel Time Index).
- Índice de tiempo planificado (Planning Time Index).
- Desviación estándar.
- Coeficiente de variación
- Media.
- Percentiles del 95, 90, 80, 70, 50, 10%
- Tiempo de tránsito (Transit Time).
- λ var
- λ skew

Se utilizará principalmente los software Minitab® y el software Estadístico Libre R versión 3.3.1 (2016-06-21) -- "Bug in Your Hair"

4.1.5 Recolección y análisis de la información

La recolección de la información se llevará a cabo mediante vehículos equipados con sistema de georreferencia.

4.2 Análisis de confiabilidad

A continuación, se comienza con el cálculo de los índices con respecto a la metodología de confiabilidad revisada. Se presentan únicamente los casos de las casetas:

1. Caseta de Jilotepec-Maravillas km 107 (2063) – Caseta Aculco km 125 (2065)
2. Caseta de Aculco km 125 (2065) – Caseta Toluca km 148 (2069)
3. Caseta de Toluca km 148 (2069) – Caseta Palmillas km 145 (2068)

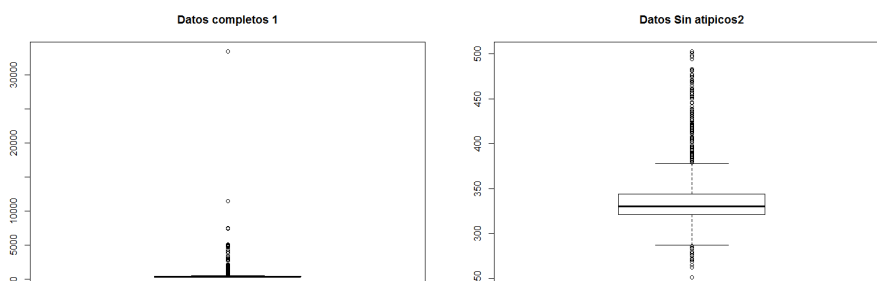
Esto con la finalidad de mostrar el análisis propuesto y por características de análisis en dichos tramos, uno de ellos hace uso de la transformación de Johnson

con la finalidad de adaptarlos a la distribución normal. El segundo ejemplo utiliza la mezcla de dos distribuciones normales para describir al conjunto de datos. En el tercer segmento bajo análisis se utiliza la distribución Singh-Maddala para la descripción del tiempo de viaje, haciendo uso de la función de Log verosimilitud. Finalmente se analizan los valores tanto del Índice de fluidez y el PTI como indicadores de desempeño del segmento, evidenciando la información que se puede obtener de ambos índices.

4.2.1 Caseta 2063- 2065

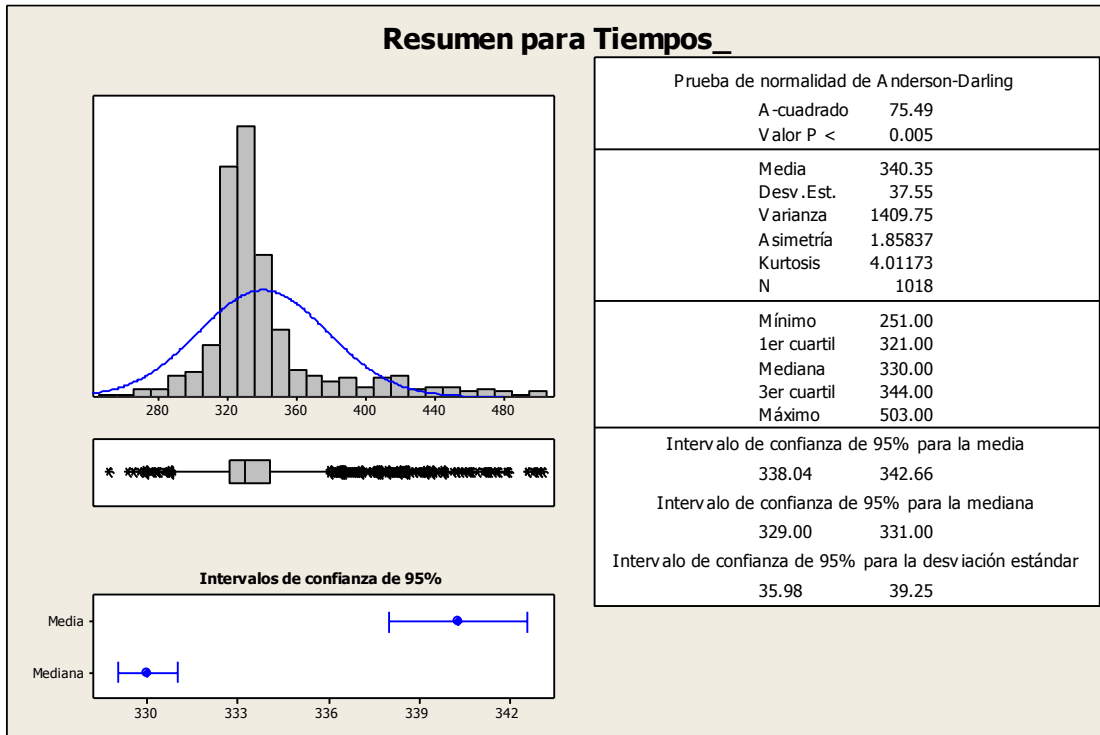
Se analizaron en total 1224 datos correspondientes a viajes que comenzaran en la caseta de Jilotepec-Maravillas en el km 107 de la Autopista México-Querétaro identificada con el número 2063 y con punto final de análisis en la caseta de Aculco perteneciente a la autopista antes mencionada en el km 125, identificada con el número 2065. Como fue mencionado en el capítulo anterior el análisis de datos fue realizado en el Software de análisis estadístico R y fueron validados en Minitab 16. En lo sucesivo se muestran los resultados mostrados por Minitab 16 y los casos que así se requiera se presentaran gráficas elaboradas a través de R.

De un total de 1224 datos se elaboraron los gráficos de caja para los datos completos así como para los datos después de la eliminación de datos atípicos, los cuales después de la eliminación fueron un total de 1018 datos (ver gráfica 1)



Gráfica 1 Diagrama de caja con datos completos (izq.) y sin atípicos (der.)
Fuente: Elaboración propia.

Un análisis general de los datos generó las siguientes respuestas:



Gráfica 2 Resumen estadístico
Fuente: Elaboración propia

El primer paso consistió en ajustar el conjunto de datos a una distribución de probabilidad; Utilizando el software de análisis estadístico Minitab 16 se obtuvo la siguiente información, como puede observarse los valores-p indican que ninguna de esas opciones tiene buen ajuste, debido a lo cual se procedió a ensayar otras distribuciones encontradas en el análisis de la literatura, como se menciona enseguida (ver tabla 2):

Tabla 2 Resumen de ajuste del segmento.
Fuente: Elaboración propia.

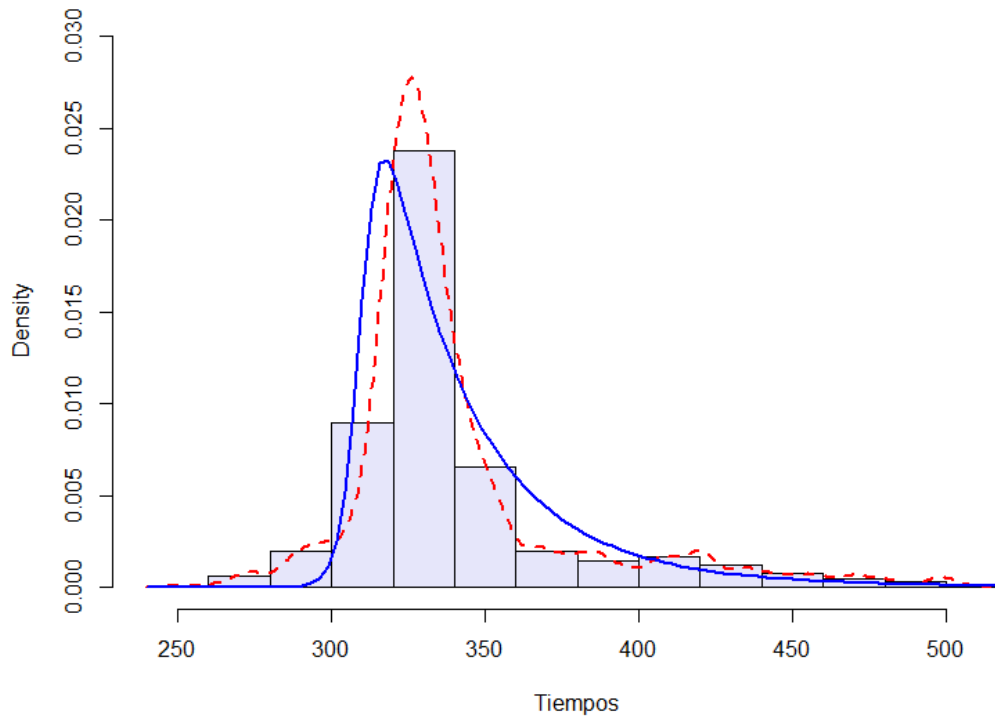
Distribución	AD	P	LRT P
Normal	75.491	<0.005	
Transformación Box-Cox	27.863	<0.005	
Log normal	60.282	<0.005	
Log normal de 3 parámetros	38.656	*	0,000
Exponencial	389.339	<0,003	
Exponencial de 2 parámetros	216.955	<0,010	0,000
Weibull	106.662	<0,010	
Weibull de 3 parámetros	68.243	<0.005	0,000
Valor extremo más pequeño	124.944	<0,010	
Valor extremo más grande	33.995	<0,010	
Gamma	65.184	<0,005	
Gamma de 3 parámetros	46.175	*	0,000
Logística	47.082	<0,005	
Log logística	38.081	<0,005	
Log logística de 3 parámetros	23.257	*	0,000

Se puede observar que no existe un valor p, que menor al nivel de significancia, por lo cual se concluye que no existe un ajuste a las distribuciones probadas. La evidencia presente en el análisis de la literatura muestra que una de las distribuciones en desarrollo para la adecuación de los tiempos de viaje es la distribución Burr Tipo XIII o simplemente distribución Burr, la cual es también conocida como distribución Singh-Maddala (Alvarez y Hadi, 2012) (Taylor y Susilawati, 2012) (Guessousa et. al., 2014). Lo siguiente es un desarrollo de la adaptación a la distribución antes mencionada utilizando el software de análisis estadístico R, el algoritmo se desarrolló siguiendo la lógica de la técnica de Log Verosimilitud suponiendo parámetros iniciales para alimentar a la función de (1, 1, 2). Los parámetros estimados para esta información son los siguientes.

Tabla 3 Parámetros de la distribución Singh Maddala.
Fuente: Elaboración propia.

Distribución	Escala(b)	Forma(a)	Forma(q)
Singh Maddala	310.213707063948	91.9514774943786	0.117746969359974

El siguiente diagrama muestra la función de densidad de los datos recogidos y la función de densidad de la distribución estimada Singh-Maddala, en ella podemos observar con una línea punteada la densidad empírica de los datos recolectados y con una línea azul continua la forma de la distribución Singh-Maddala, con los parámetros antes mencionados (Ver figura 3).



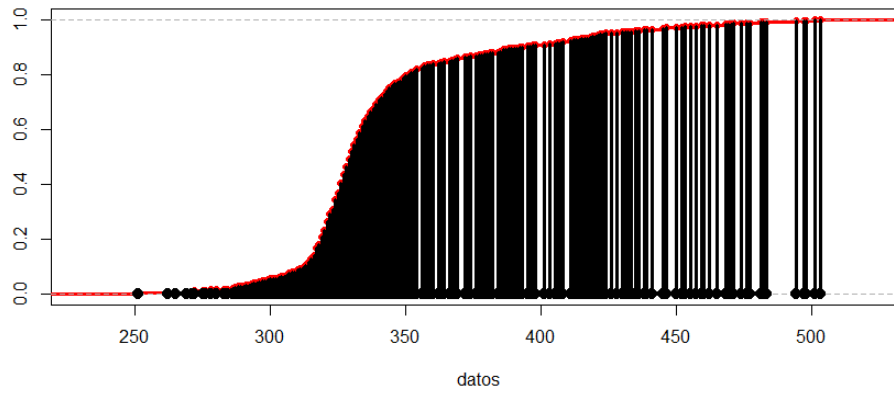
Gráfica 3 Curva de adaptación a la distribución Singh Maddala.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para la prueba de bondad de ajuste para esta distribución aparecen en la siguiente tabla:

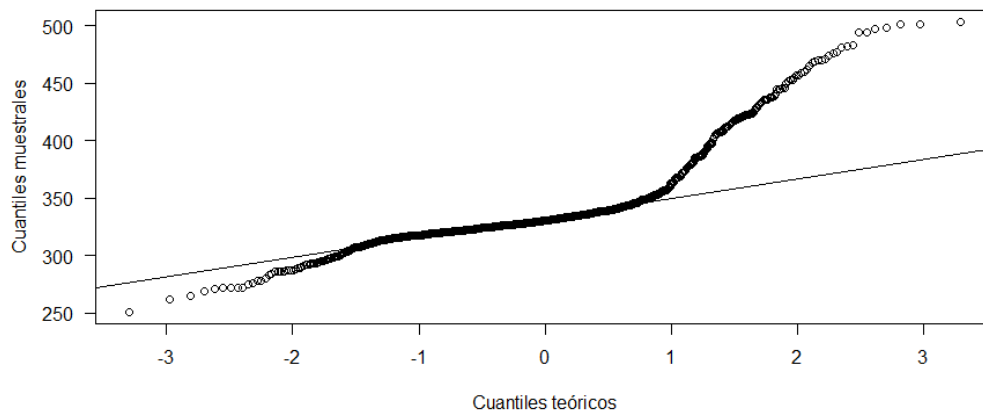
Tabla 4 Resumen de Prueba de bondad de ajuste.
Fuente: Elaboración propia.

One-sample Kolmogorov-Smirnov test				
Alternative hypothesis: two-sided				
with parameters		scale	shape1.a	shape3.q
data:	Tiempos	310.213707063948	91.9514774943786	0.117746969359974
D	p-value			
0.086608	4.661e-07			

Como puede observarse el valor p fue inferior al nivel de significancia de 0.05. Ninguna de las distribuciones o transformaciones analizadas resulto satisfactoria, por lo tanto se procedió a utilizar la distribución empírica de probabilidad. A continuación, se presentan la comparación entre los cuartiles teóricos y empíricos del conjunto de datos como la gráfica de distribución empírica.



Gráfica 4 Gráfica de distribución empírica.
Fuente: Elaboración propia.



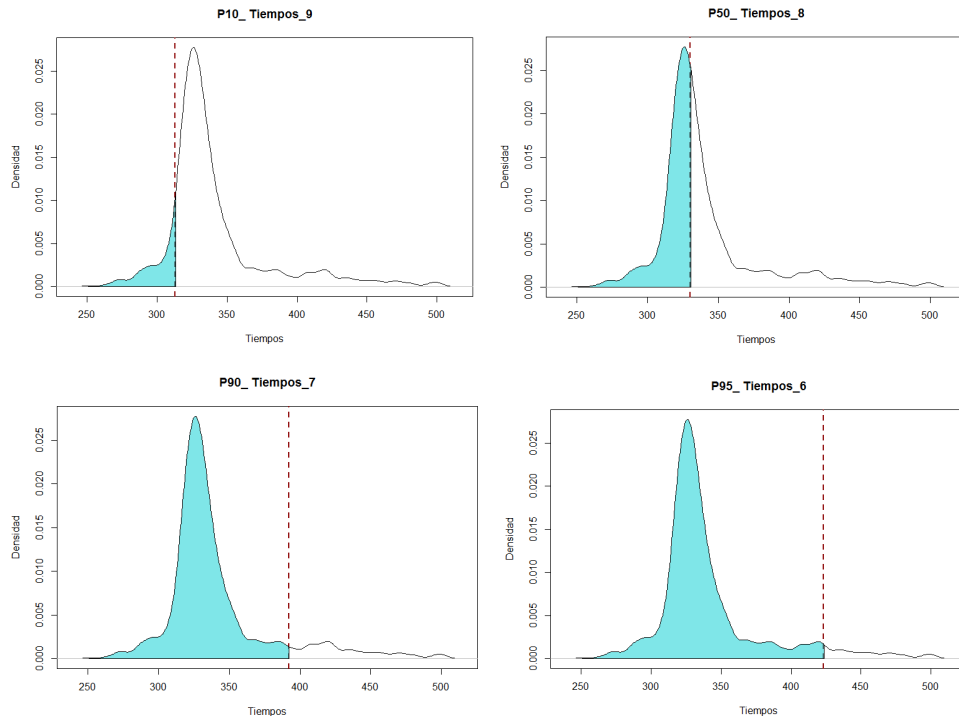
Gráfica 5 Comparación cuartiles distribución normal vs Cuartiles muestrales.
Fuente: elaboración propia

El resumen estadístico básico para los datos de tiempos se presenta a continuación:

Medida	Min	1er Qu	Mediana	Media	3er Qu	Max	Ds	Var
Valor	251	321	330	340.3497	344	503	37.54666	1409.752

4.2.1.1 Resumen estadístico de las medidas de confiabilidad

4.2.1.1.1 Percentiles del 95%, 90%, 80%, y 10%



Percentil	P10	P50	P90	P95	P>95
Valor	313	330	392.3	423.15	457.3725

4.2.1.1.2 Desviación estándar.

La desviación estándar reportada por el software libre R, es la siguiente:

Unidad	Ds
Valor	37.54666

4.2.1.1.3 Coeficiente de variación

De acuerdo a Cedillo-Campos, et al. (2017), el tiempo de viaje debe de ser estimado como una variable aleatoria, utilizando una de las medidas de dispersión propuestas. La relación entre la desviación estándar y la media de los datos de viaje, esta razón es conocida como el coeficiente de variación.

Medida	Media	Ds
Valor	340.3497	37.54666

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{\text{Desviación estandar}}{\text{Media}} \right) 100 \quad (31)$$

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{37.54666}{340.3497} \right) 100 = 11.03179 \%$$

Como puede observarse, la muestra presenta un nivel de homogeneidad considerable, la mayoría de los datos se encuentran en la parte derecha de la distribución. Se presenta una cola derecha larga que almacena al 5% de los datos restantes.

4.2.1.1.4 Buffer Index

De acuerdo a FHWA, el porcentaje de tiempo extra necesario que se debe de añadir al tiempo de viaje promedio de acuerdo a las variaciones presentes en el viaje es:

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{\text{Percentil del 95\%} - \text{Media}}{\text{Media}} \right) \quad (32)$$

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{423.15 - 340.3497}{340.3497} \right) * 100 = 24.32801\%$$

Lo anterior significa que debe de planificar un 24.32801% más del tiempo promedio para asegurar llegar a tiempo el 95% de las ocasiones.

4.2.1.1.5 Buffer Time.

De acuerdo a FHWA, es la cantidad de tiempo extra necesario con respecto al tiempo de viaje medio, para asegurar llegar a tiempo.

$$\text{Buffer Time (Minutos)} = \text{Percentil del 95\%} - \text{media} \quad (33)$$

$$\text{Buffer Time} = 423.15 - 340.3497 = 82.80029$$

De acuerdo a las medidas utilizadas en (Lomax et.al., 2003) la anterior cantidad significa que el viajero tendrá que planear 82.80029 segundos extras en su viaje. El equivalente a 1.380005 min extra en su viaje para llegar a tiempo el mayor número de ocasiones. Como podemos intuir si multiplicamos 340.3497 que corresponde al tiempo promedio por 24.32801 obtendremos un valor muy cercano al Buffer Time, se obtiene 82.8006.

4.2.1.1.6 Misery Index

El Misery Index mide la cantidad de retraso en los viajes más tardados y los relaciona con la media del conjunto de datos, se tomó la media de los peores viajes, refiriéndose a los viajes que superaron el percentil del 95%.

$$\text{Misery Index} = \frac{\text{Promedio} > 95\%}{\text{Media}} \quad (34)$$

$$\text{Misery Index} = \frac{457.3725}{340.3497} = 1.343831$$

El MI calculado representa la cantidad extra de tiempo que necesitarán los viajeros cuyos tiempos de viaje sean mayores al percentil del 95%. Estos desafortunados viajeros necesitarán de $1.343831 * 340.3497 = 457.3725$ segundos (7.622876 minutos).

4.2.1.1.7 Tiempo planeado de viaje (*Planning Time*)

El tiempo planeado de viaje corresponde al percentil del 95% de la distribución de los datos observados.

$$Planning\ Time = P95\%$$

$$Planning\ Time = 423.15$$

Percentil	P95
Valor	423.15

4.2.1.1.8 Índice de tiempo planificado (*Planning Time Index*).

La ruta en análisis es la siguiente:

- Caseta de Jilotepec-Maravillas km 107 (2063) – Caseta Aculco km 125 (2065).

Se analizaron en total 221 datos correspondientes a viajes que comenzaran en la caseta de Jilotepec-Maravillas en el km 107 de la Autopista México-Querétaro identificada con el número 2063 y con punto final de análisis en la caseta Aculco perteneciente a la autopista antes mencionada en el km 125 identificada con el número 2065. De acuerdo a distancias calculadas mediante el paquete “geosphere” cargado mediante R, se tiene una distancia de caseta a caseta de 7.280142 km. De acuerdo a la metodología citada en Lomax et. al., (2003) el tiempo de flujo libre se calcula utilizando la velocidad de diseño de la carretera. En el caso en estudio, la velocidad de diseño del segmento de la carretera Federal 57 es de 110 km/hr. Se infiere una velocidad de operación máxima de las unidades en análisis de 90 km/hr, razón por la cual se utilizará tal velocidad para el cálculo del Índice de tiempo de viaje. Suponiendo un flujo libre donde el usuario no se encuentra con intervenciones en su viaje, se puede obtener el siguiente tiempo.

$$Tiempo\ de\ viaje\ con\ flujo\ libre = \frac{7.280142\ km}{90\ km/hr} = 291.2057\ seg = 4.8534\ min$$

El Índice de tiempo planificado compara el peor de los casos con el tiempo de viaje con flujo libre de acuerdo a la FHWA es:

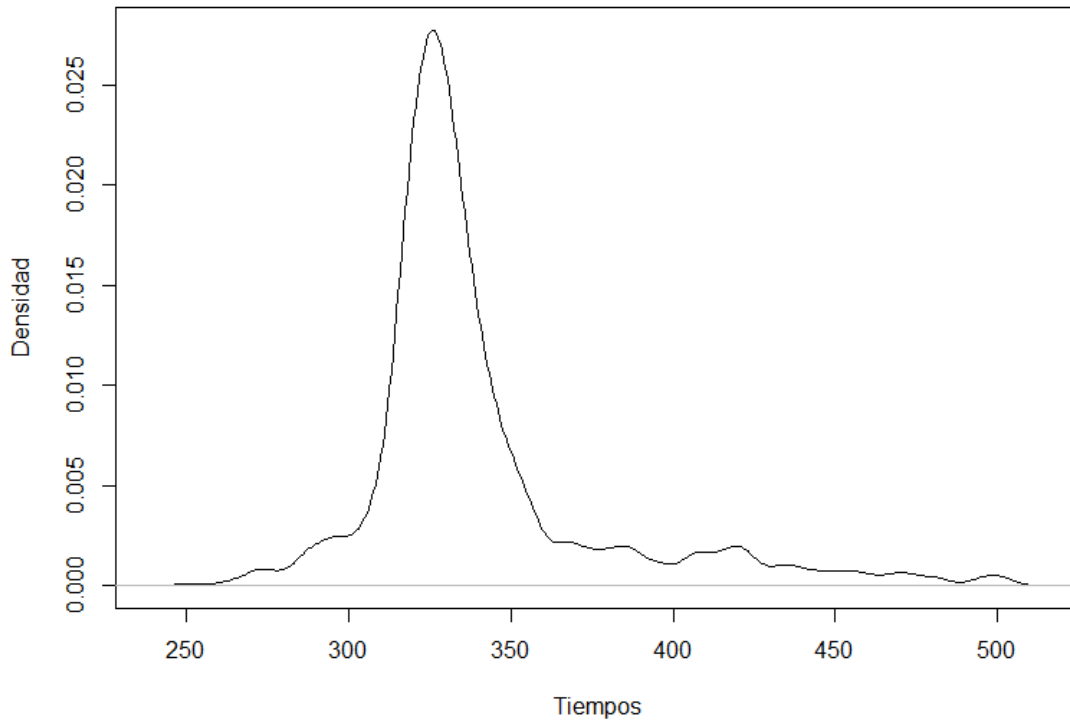
$$\text{Índice de Tiempo Planificado} = \frac{\text{Percentil del 95\%}}{\text{Tiempo de viaje con flujo libre}} \quad (35)$$

$$\text{Índice de Tiempo Planificado} = \frac{423.15}{291.2057} = 1.453097$$

El Índice de tiempo planificado, es un factor aplicado al tiempo de viaje con flujo libre, se distingue del Buffer Index, debido a que incorpora los retrasos no habituales. El índice anterior nos dice que un viajero tendrá que planear un viaje total de $1.453097 \times 291.2057 = 423.150129$ segundos (7.0525 minutos) con respecto al tiempo de viaje en flujo libre para asegurar llegar a tiempo.

4.2.1.2 Estadísticos de amplitud y sesgo

4.2.1.2.1 Estadístico de sesgo ($\lambda skew$)



Gráfica 6 Densidad de probabilidad de los datos.
Fuente: elaboración propia.

Percentil	P10	P50	P90	P95	P>95
Valor	313	330	392.3	423.15	457.3725

$$\lambda skew = \frac{P90 - P50}{P50 - P10} \quad (36)$$

$$\lambda skew = \frac{392.3 - 330}{330 - 313} = \frac{62.3}{17} = 3.664705$$

El estadístico de sesgo mayor a uno, nos indica que la mayor cantidad de datos se encuentra en la parte izquierda de la gráfica. La distribución está sesgada hacia la izquierda, esto se puede observar en la gráfica de densidad. De acuerdo a van Lint & van Zuylen, 2014, valores grandes en el estadístico de sesgo deben

de ser interpretados como poco confiables, esto implica que al menos el 10% de los casos los tiempos de viaje son significativamente más largos que la media.

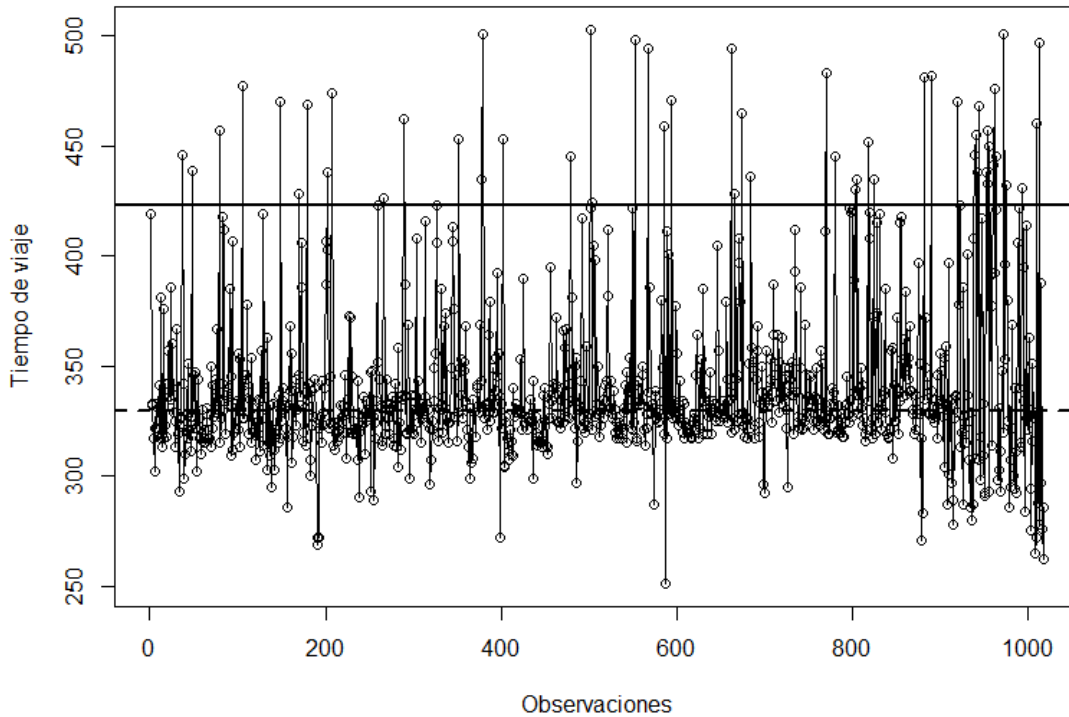
4.2.1.2.2 Estadístico de amplitud (λvar)

$$\lambda var = \frac{P90 - P10}{P50} \quad (37)$$

$$\lambda var = \frac{392.3 - 313}{330} = \frac{79.3}{330} = 0.2403$$

Esta medida representa la relación del rango donde el 80% de las observaciones alrededor de la mediana caen de la mediana y la media del tiempo de viaje. Un valor como el antes dado nos indica que el rango de valores de los tiempos de viaje es relativamente pequeño con respecto a la mediana y por lo tanto se puede decir que la confiabilidad en el tiempo de viaje es adecuada.

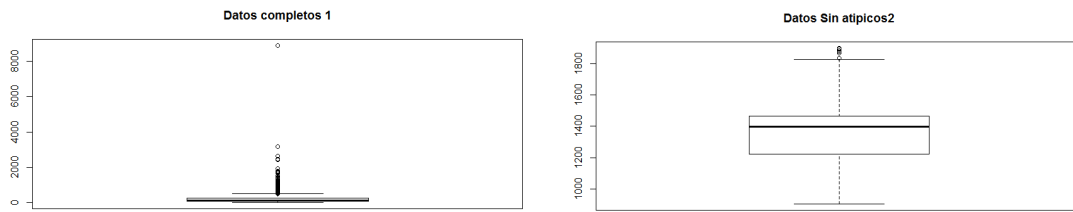
Como conclusión se puede decir de acuerdo a Van Lint y van Zuylen (2014), para valores del estadístico de sesgo mayor a 1 y valores del estadístico de amplitud mayor a 0.1, la congestión muy probablemente se encuentre en formación (o desvaneciéndose). Eso quiere decir que ambos, tanto tiempos de tránsito con flujo libre, así como grandes tiempos de tránsito pueden esperarse. Entre mayor sea el estadístico de sesgo mayor será la poca confiabilidad de los tiempos de viaje



Gráfica 7 Grafica de variabilidad de los datos.
Fuente: elaboración propia.

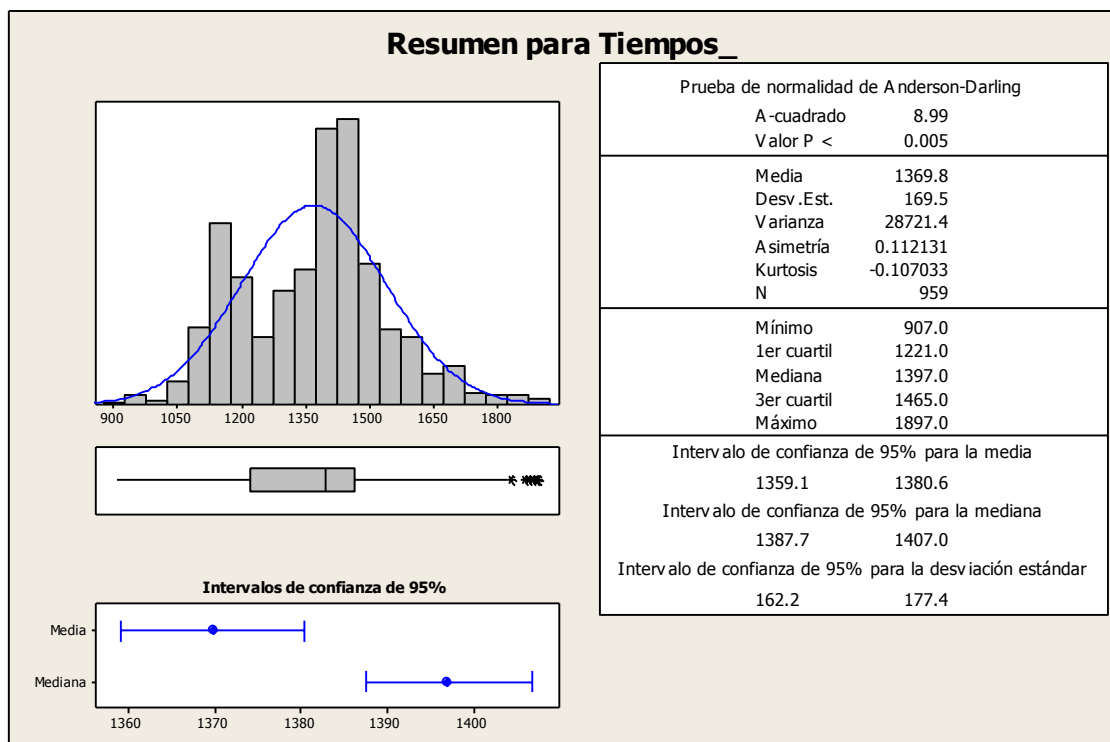
4.2.2 Caseta 2065- 2069

Se analizaron en total 1079 datos correspondientes a viajes que comenzaron en la caseta de Aculco en el km 125 de la Autopista México-Querétaro identificada con el número 2065 y con punto final de análisis en la caseta Toluca perteneciente a la autopista antes mencionada en el km 148 identificada con el número 2054. Como fue mencionado en el capítulo anterior el análisis de datos fue realizado en el Software de análisis estadístico R y fueron validados en Minitab 16. En lo sucesivo se muestran los resultados mostrados por Minitab 16 y los casos que así se requiera se presentarán gráficas elaboradas a través de R.



Gráfica 8 Diagrama de caja con datos completos (izq.) y sin atípicos (der.)
Fuente: Elaboración propia

De un total de 1079 datos se elaboraron los gráficos de caja para los datos completos así como para los datos después de la eliminación de datos atípicos, los cuales después de la eliminación fueron un total de 959 datos (ver gráfica 8). Un análisis general de los datos generó el siguiente resumen estadístico básico que se presenta en la gráfica 9.



Gráfica 9 Resumen estadístico gráfico.
Fuente: Elaboración propia.

El primer paso consistió en ajustar el conjunto de datos a una distribución de probabilidad; como puede observarse los valores-p indican que ninguna de esas opciones tiene buen ajuste (ver tabla 5):

Tabla 5 Resumen pruebas de bondad de ajuste.
Fuente: Elaboración propia

Distribución	AD	P	LRT P
Normal	8.987	<0.005	
Transformación Box-Cox	10.278	<0.005	
Log normal	12.182	<0.005	
Log normal de 3 parámetros	9.823	*	0,005
Exponencial	340.851	<0,003	
Exponencial de 2 parámetros	175.559	<0,010	0,000
Weibull	11.049	<0,010	
Weibull de 3 parámetros	8.844	<0.005	0,000
Valor extremo más pequeño	18.206	<0,010	
Valor extremo más grande	19.993	<0,010	
Gamma	10.856	<0,005	
Gamma de 3 parámetros	10.282	*	0,243
Logística	9.842	<0,005	
Log logística	12.851	<0,005	
Log logística de 3 parámetros	9.849	*	0,000

La evidencia mostrada en el análisis de la literatura muestra que una de las metodologías para la adaptación a los tiempos de viaje se refiere al uso de distribuciones mezcladas (Yang y Wu, 2016). Por simple inspección al histograma de los datos se puede observar un par de campanas traslapadas una sobre la otra. Se procedió a realizar la prueba de Hartigan (Hartigan y Hartigan, 1985) utilizando el software de análisis estadístico R.

Tabla 6 Resumen prueba de bimodalidad.
Fuente: Elaboración propia

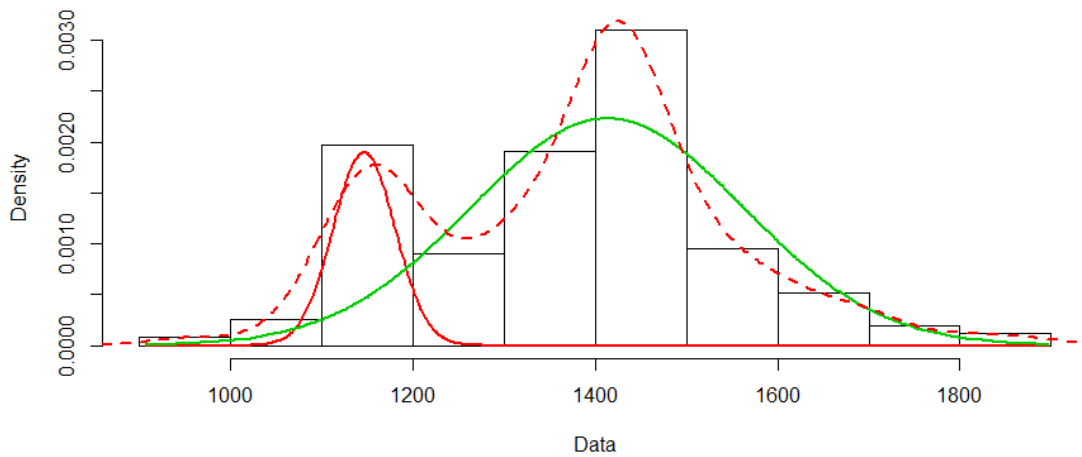
Hartigans' dip test for unimodality / multimodality			
alternative hypothesis: non-unimodal, i.e., at least bimodal			
data:	Tiempos	544.148117	27.4436038
D	p-value		0.09831995
0.030757	4.095e-06		

De acuerdo a su autor, con un rango desde 0 hasta 1

- Valores menores a 0.05 indican bimodalidad significativa.
- Valores mayores a 0.05 pero menores que 0.10, sugieren la existencia de bimodalidad con significancia marginal.

Nuestro estadístico $p = 0.0000004095$ no indica que no se rechaza la hipótesis de que existe bimodalidad. A continuación, se presenta el histograma de los

datos con las líneas de densidad del set de datos así como una representación de las distribuciones mezcladas en la muestra.



Gráfica 10 Gráfica densidad de la muestra vs densidad estimada.
Fuente: Elaboración propia

Se observa en la gráfica 10, las líneas punteadas representan la distribución empírica de los datos y las líneas continuas de color rojo representan la mezcla de dos distribuciones normales. El siguiente es un resumen de las características de la mezcla encontrada dentro de la muestra.

Tabla 7 Resumen de la mezcla de distribuciones.
Fuente: Elaboración propia

summary of normalmixEM object:		
	Comp 1	Comp 2
Lambda	0.162517	0.837483
MU	1146.625180	1413.124043
Sigma	34.161599	149.968137
Loglik at estimate	-6224.243	

El resumen estadístico básico para los datos de tiempos utilizando una mezcla de dos distribuciones normales con las características que se estimaron anteriormente se presenta a continuación

Medida	Min	1er Qu	Mediana	Media	3er Qu	Max	Ds	Var
Valor	907	1225.794997	1376.0175708	1369.813415	1492.227614	1897	149.673856	28721.387880

4.2.2.1 Resumen estadístico de las medidas de confiabilidad

4.2.2.1.1 Percentiles del 95%, 90%, 80%, y 10%

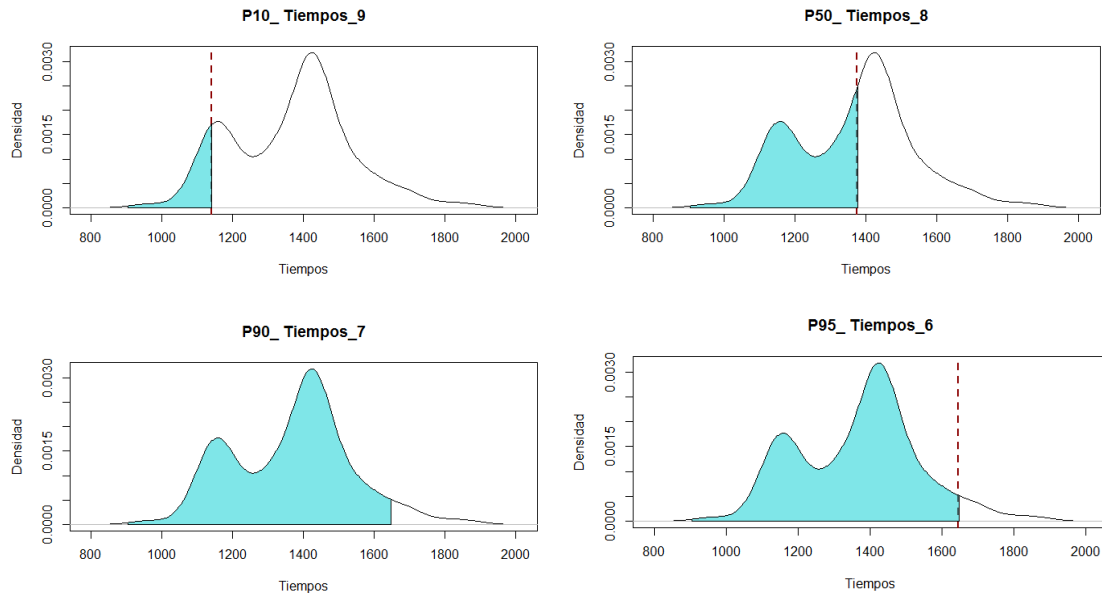


Tabla 8 Resumen de percentiles.
Fuente: Elaboración propia

Percentil	P10	P50	P90	P95	P>95
Valor	1141.280753	1376.017570	1589.642814	1646.547581	1735.568627

4.2.2.1.2 Desviación estándar.

La desviación estándar reportada por el software libre R, es la siguiente:

Unidad	Ds
Valor	169.473856

4.2.2.1.3 Coeficiente de variación

De acuerdo a Cedillo-Campos, et al. (2017), el tiempo de viaje debe de ser estimado como una variable aleatoria, utilizando una de las medidas de

dispersión propuestas. La relación entre la desviación estándar y la media de los datos de viaje, esta razón es conocida como el coeficiente de variación.

Medida	Media	Ds
Valor	1369.813415	169.473856

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Media}} \right) 100 \quad (38)$$

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{169.4738}{1369.8134} \right) 100 = 12.372039 \%$$

4.2.2.1.4 Buffer Index

De acuerdo a FHWA, el porcentaje de tiempo extra necesaria que se debe de añadir al tiempo de viaje promedio de acuerdo a las variaciones presentes en el viaje es:

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{\text{Percentil del 95\%} - \text{Media}}{\text{Media}} \right) \quad (39)$$

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{1646.547581 - 1369.813415}{1369.813415} \right) * 100 = 20.202325 \%$$

4.2.2.1.5 Buffer Time.

De acuerdo a FHWA, la cantidad de tiempo extra necesaria con respecto al tiempo de viaje medio, para asegurar llegar a tiempo.

$$\text{Buffer Time (Minutos)} = \text{Percentil del 95\%} - \text{media} \quad (40)$$

$$\text{Buffer Time} = 1646.547581 - 1369.813415 = 276.734166$$

De acuerdo a las medidas utilizadas en (Lomax, Schrank, Turner, & Margiotta, 2003) la anterior cantidad significa que el viajero tendrá que planear 276.734166 segundos el equivalente a 4.61 min extra en su viaje para llegar a tiempo el mayor número de ocasiones.

4.2.2.1.6 Misery Index

El Misery Index mide la cantidad de retraso en los viajes más tardados y los relaciona con la media del conjunto de datos, se tomó la media de los peores viajes, refiriéndose a los viajes que superaron el percentil del 90%.

$$Misery\ Index = \frac{Promedio > 95\%}{Media} \quad (41)$$

$$Misery\ Index = \frac{1735.5686}{1369.813415} = 1.267010$$

El MI calculado representa la cantidad extra de tiempo que necesitaran los viajeros cuyos tiempos de viaje sean mayores al percentil del 95%. Estos desafortunados viajeros necesitarán de $1.267010 * 1369.813415 = 1735.5686$ segundos (28.9261 minutos).

4.2.2.1.7 Tiempo planeado de viaje (Planning Time)

El tiempo planeado de viaje corresponde al percentil del 95% de la distribución de los datos observados.

$$Planning\ Time = P95\%$$

$$Planning\ Time = 1646.5475$$

Percentil	P95
Valor	1646.5475

4.2.2.1.8 Índice de tiempo planificado (*Planning Time Index*).

La ruta en análisis es la siguiente:

- Caseta de Aculco km 125 (2065) – Caseta Toluca km 148 (2069)

Se analizaron en total 959 datos correspondientes a viajes que comenzaran en la caseta de Aculco en el km 125 de la Autopista México-Querétaro identificada con el número 2065 y con punto final de análisis en la caseta Toluca perteneciente a la autopista antes mencionada en el km 148 identificada con el número 2069. De acuerdo a distancias calculadas mediante el paquete “geosphere” cargado mediante R, se tiene una distancia de caseta a caseta de 32.188257 km. De acuerdo a la metodología citada en Lomax et. al., 2003 el tiempo de flujo libre se calcula utilizando la velocidad de diseño de la carretera. En el caso en estudio la velocidad de diseño del segmento de la carretera Federal 57 es de 95 km/hr, se supone una velocidad de operación máxima de las unidades en análisis de 90 km/hr, razón por la cual se utilizará tal velocidad para el cálculo del Índice de tiempo de viaje. Suponiendo un flujo libre donde el usuario no se encuentra con intervenciones en su viaje podemos obtener el siguiente tiempo.

$$Tiempo\ de\ viaje\ con\ flujo\ libre = \frac{32.188257\ km}{90\ km/hr} = 1287.5302\ seg = 21.4588\ min$$

El Índice de tiempo planificado compara el peor de los casos con el tiempo de viaje con flujo libre de acuerdo a la FHWA es:

$$Indice\ de\ Tiempo\ Planificado = \frac{Percentil\ del\ 95\%}{Tiempo\ de\ viaje\ con\ flujo\ libre} \quad (42)$$

$$\text{Índice de Tiempo Planificado} = \frac{1646.5475}{1287.5302} = 1.278841$$

El Índice de tiempo planificado, es un factor aplicado al tiempo de viaje con flujo libre, se distingue del Buffer Index, debido a que incorpora los retrasos no habituales. El índice anterior nos dice que un viajero tendrá que planear un viaje total de $1.278841 \cdot 1287.5302 = 1646.5475$ segundos (27.4424 min) con respecto al tiempo de viaje en flujo libre para asegurar llegar a tiempo.

4.2.2.2 Estadísticos de amplitud y sesgo

4.2.2.2.1 Estadístico de sesgo ($\lambda skew$)

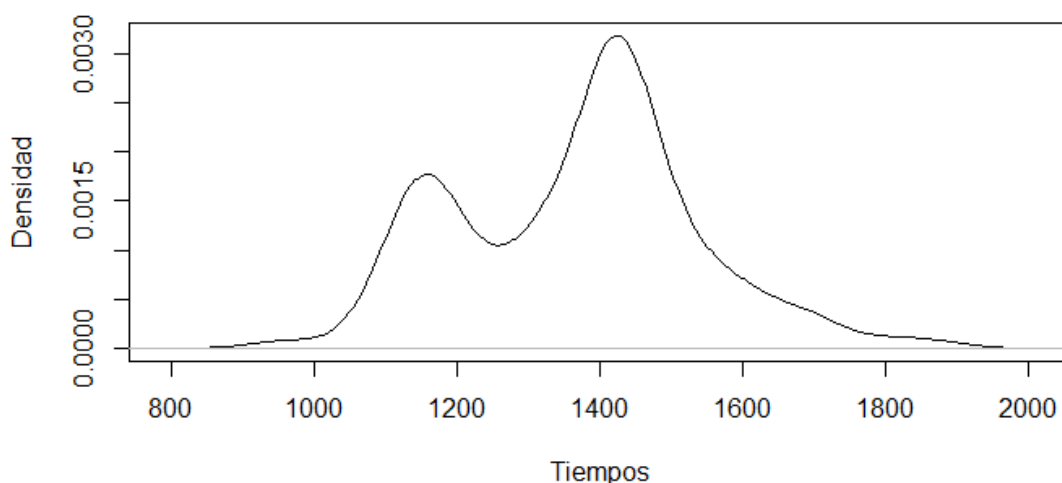


Tabla 9 Resumen de percentiles.
Fuente: Elaboración propia

Percentil	P10	P50	P90	P95	P>95
Valor	1141.280753	1376.017570	1589.642814	1646.547581	1735.568627

$$\lambda skew = \frac{P90 - P50}{P50 - P10} \quad (43)$$

$$\lambda_{skew} = \frac{1589.642814 - 1376.017570}{1376.017570 - 1141.2807} = \frac{213.6252}{234.73687} = 0.9100$$

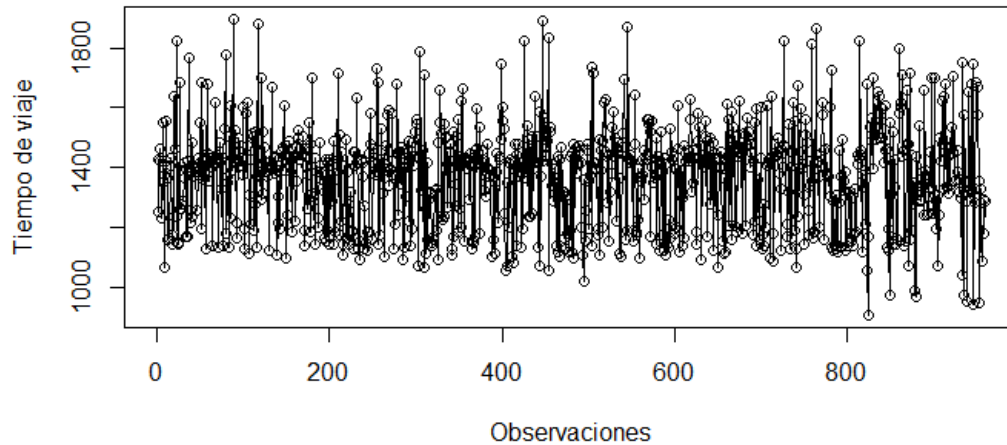
El estadístico de sesgo mayor a uno, nos indica que la distribución está fuertemente sesgada hacia la izquierda, esto se puede observar en la gráfica de densidad. De acuerdo a van Lint & van Zuylen, 2014, valores grandes en el estadístico de sesgo deben de ser interpretados como poco confiables, esto implica que **al menos** el 10% de los casos los tiempos de viaje son significativamente más largos que la media.

4.2.2.2 Estadístico de amplitud (λ_{var})

$$\lambda_{var} = \frac{P90 - P10}{P50} \quad (44)$$

$$\lambda_{var} = \frac{1589.6428 - 1141.2807}{1376.0175} = \frac{448.3621}{1376.0175} = 0.3258$$

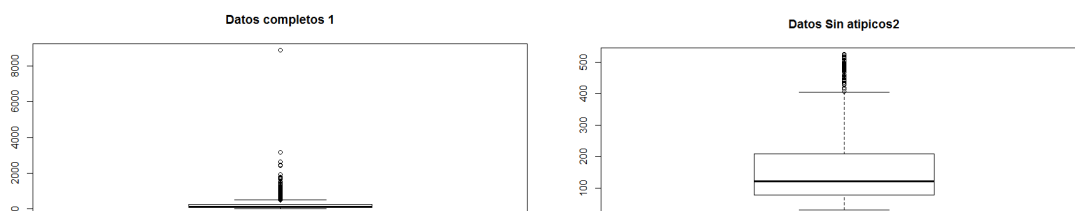
Esta medida representa la relación donde el 80% de las observaciones caen dentro del rango de la mediana y el tiempo medio de viaje. Un valor como el antes dado nos indica que el rango de valores de los tiempos de viaje es relativamente pequeño con respecto a la mediana y por lo tanto se puede decir que la confiabilidad en el tiempo de viaje es adecuado, sin embargo se observa la existencia de una mezcla de distribuciones normales con parámetros propios, este tipo de distribuciones han sido poco documentadas para los análisis de confiabilidad sin embargo de acuerdo a algunos autores concluyen que son más adecuadas para describir los tiempos de viaje (Yang y Wu, 2016)



Gráfica 11 Variabilidad de los tiempos de viaje.
Fuente: elaboración propia.

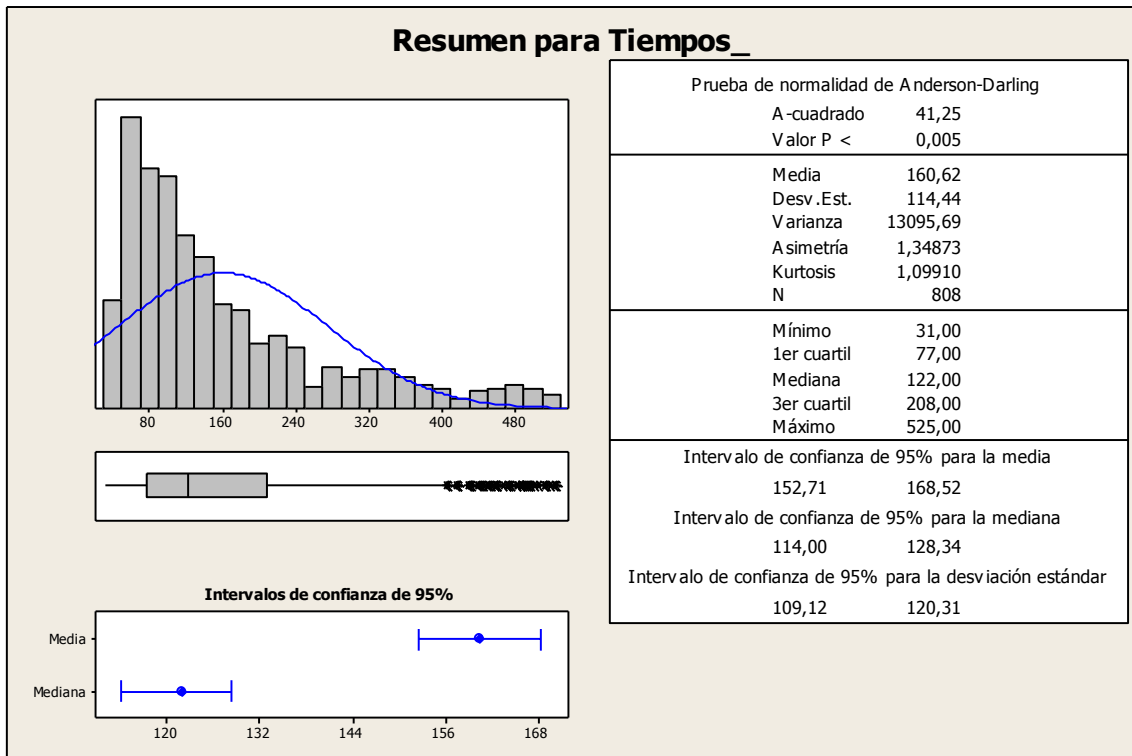
4.2.3 Caseta 2069 - 2068

Se analizaron en total 892 datos correspondientes a viajes que comenzaron en la caseta de Toluca en el km 148 de la Autopista México-Querétaro identificada con el número 2069 y con punto final de análisis en la caseta de Palmillas perteneciente a la autopista antes mencionada en el km 145 identificada con el número 2068. De un total de 892 datos se elaboraron los gráficos de caja para los datos completos así como para los datos después de la eliminación de atípicos, los cuales después de la eliminación fueron un total de 808 datos (ver gráfica 12)



Gráfica 12 Diagrama de caja Datos completos vs Datos sin atípicos.
Fuente: Elaboración propia

Un análisis general de los datos generó las siguientes respuestas:



Gráfica 13 Resumen estadísticos.
Fuente: Elaboración propia

El primer paso consistió en adaptar el conjunto de datos a una distribución de probabilidad, se obtuvo la siguiente información:

Tabla 10 Resumen de bondad de ajuste.
Fuente: Elaboración propia

Distribución	AD	P	LRT P
Normal	41.246	<0.005	
Transformación Box-Cox	2.889	<0.005	
Log normal	4.542	<0.005	
Log normal de 3 parámetros	1.554	*	0,000
Exponencial	49.018	<0,003	
Exponencial de 2 parámetros	8.568	<0,010	0,000
Weibull	15.299	<0,010	
Weibull de 3 parámetros	4.504	<0.005	0,000
Valor extremo más pequeño	66.399	<0,010	
Valor extremo más grande	18.422	<0,010	
Gamma	11.898	<0,005	
Gamma de 3 parámetros	3.851	*	0,000
Logística	30.661	<0,005	
Log logística	5.111	<0,005	
Log logística de 3 parámetros	2.371	*	0,000

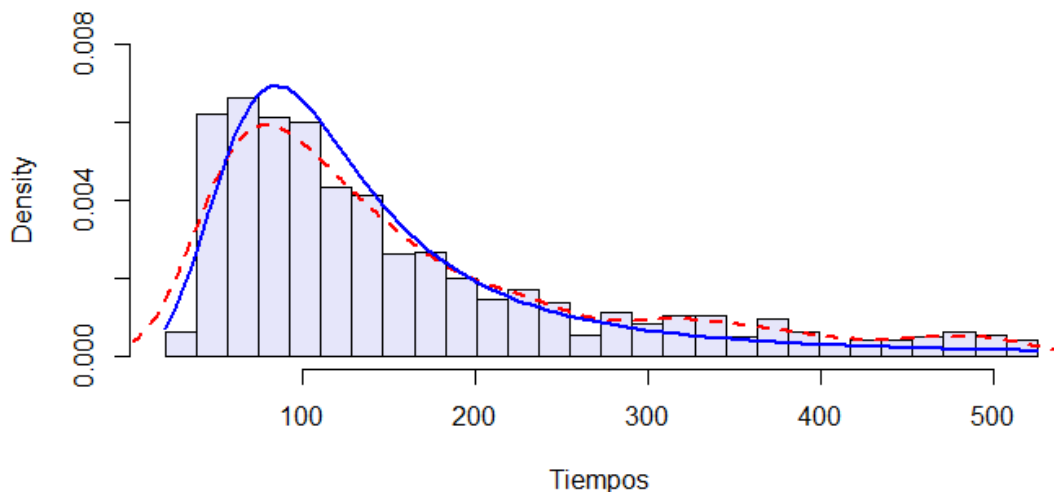
De acuerdo a las distribuciones utilizadas ninguno de los valores p son satisfactorios. La evidencia mostrada en el análisis de la literatura muestra que

una de las distribuciones en desarrollo para la adecuación de los tiempos de viaje es la distribución Burr Tipo XIII o simplemente distribución Burr la cual es también conocida como distribución Singh-Maddala (Alvarez y Hadi, 2012; Taylor y Susilawati, 2012; Guessousa et. al., 2014). Lo siguiente es un desarrollo de la adaptación a la distribución antes mencionada utilizando R, el algoritmo se desarrolló siguiendo la lógica de la técnica de la LogVerosimilitud suponiendo parámetros iniciales para alimentar a la función de (1, 3, 1). Los parámetros estimados para esta información son los siguientes.

Tabla 11 Parámetros Distribución Singh-Maddala.
Fuente: Elaboración propia

Distribución	Escala(b)	Forma(a)	Forma(q)
Singh Maddala	91.50666	3.277207	0.568074

El siguiente diagrama muestra la función de densidad de los datos recogidos mediante líneas punteadas y la función de densidad de la distribución estimada Singh Maddala utilizando una línea continua:



Gráfica 14 Comparación Densidad de la muestra vs Singh Maddala.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados para la prueba de bondad de ajuste aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 12 Prueba de bondad de ajuste a Singh Maddala.
Fuente: Elaboración propia

One-sample Kolmogorov-Smirnov test				
alternative hypothesis: two-sided				
with parameters		Scale.b	shape1.a	shape3.q
data:	Tiempos	91.50666	3.277207	0.568074
D	p-value			
0.046468	0.06104			

Como puede observarse el valor p fue superior al nivel de significancia de 0.05, por lo cual se concluye que no se puede rechazar la hipótesis que la distribución Singh-Maddala describe al conjunto de datos.

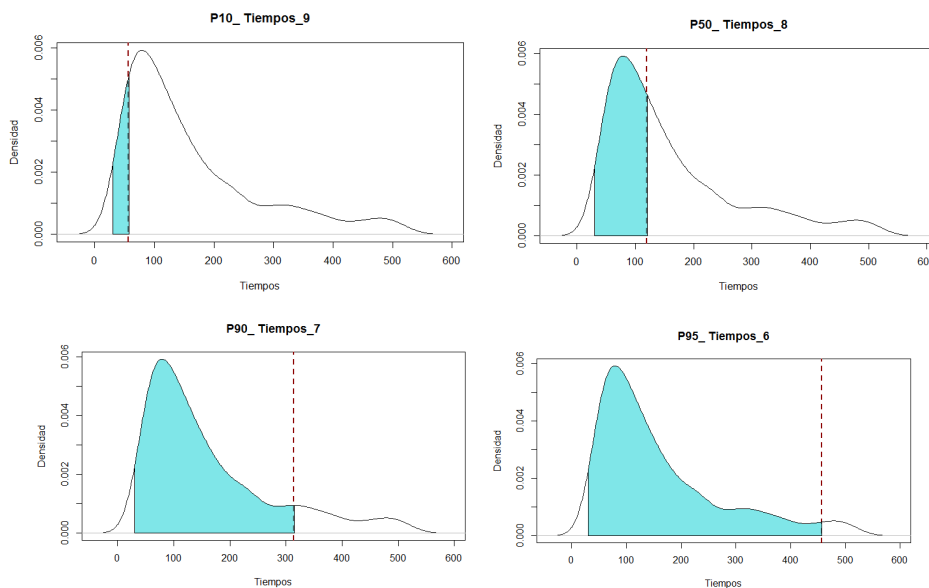
El resumen estadístico básico para los datos de tiempos se presenta a continuación.

Tabla 13 Resumen estadístico. Fuente: Elaboración propia

Medida	Min	1er Qu	Mediana	Media	3er Qu	Max	Ds	Var
Valor	31	80.5851	119.3417	179.9687	187.3980	525	114.4364	13095.69

4.2.3.1 Resumen estadístico de las medidas de confiabilidad

4.2.3.1.1 Percentiles del 95%, 90%, 80%, y 10%



Percentil	P10	P50	P90	P95	P>95
Valor	56.3189	119.3417	313.5277	456.6809	489.5172

4.2.3.1.2 Desviación estándar.

La desviación estándar reportada por el software libre R, es la siguiente:

Unidad	Ds
Valor	114.4364

4.2.3.1.3 Coeficiente de variación

De acuerdo a Cedillo-Campos, et al. (2017), el tiempo de viaje debe de ser estimado como una variable aleatoria, utilizando una de las medidas de dispersión propuestas. La relación entre la desviación estándar y la media de los datos de viaje, esta razón es conocida como el coeficiente de variación.

Medida	Media	Ds
Valor	179.9687	114.4364

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{\text{Desviacion estandar}}{\text{Media}} \right) 100 \quad (45)$$

$$\text{Coeficiente de variación} = \left(\frac{114.4364}{179.9687} \right) 100 = 63.5868 \%$$

4.2.3.1.4 Buffer Index

De acuerdo a FHWA, el porcentaje de tiempo extra necesaria que se debe de añadir al tiempo de viaje promedio de acuerdo a las variaciones presentes en el viaje es:

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{\text{Percentil del 95\%} - \text{Media}}{\text{Media}} \right) \quad (46)$$

$$\text{Buffer Index} = \left(\frac{456.6809 - 179.9687}{179.9687} \right) * 100 = 153.7556\%$$

Lo anterior significa que debe de planificar un 153.7556 % más del tiempo promedio para asegurar llegar a tiempo el 95% de las ocasiones.

4.2.3.1.5 Buffer Time.

De acuerdo a FHWA, la cantidad de tiempo extra necesaria con respecto al tiempo de viaje medio, para asegurar llegar a tiempo.

$$\text{Buffer Time (Minutos)} = \text{Percentil del 95\%} - \text{media} \quad (47)$$

$$\text{Buffer Time} = 456.6809 - 179.9687 = 276.7122$$

De acuerdo a las medidas utilizadas en (Lomax, Schrank, Turner, & Margiotta, 2003) la anterior cantidad significa que el viajero tendrá que planear 276.7122 segundos el equivalente a 4.6118 min extra en su viaje para llegar a tiempo el mayor número de ocasiones. Como podemos intuir si multiplicamos 179.9687 que corresponde al tiempo promedio por 1.537556 obtendremos un valor muy cercano al Buffer Time, se obtiene 276.6711.

4.2.3.1.6 Misery Index

El Misery Index mide la cantidad de retraso en los viajes más tardados y los relaciona con la media del conjunto de datos, se tomó la media de los peores viajes, refiriéndose a los viajes que superaron el percentil del 90%.

$$\text{Misery Index} = \frac{\text{Promedio} > 95\%}{\text{Media}} \quad (48)$$

$$\text{Misery Index} = \frac{489.5172}{179.9687} = 2.72001$$

El MI calculado representa la cantidad extra de tiempo que necesitaran los viajeros cuyos tiempos de viaje sean mayores al percentil del 95%. Estos

desafortunados viajeros necesitaran de $2.72001 \cdot 179.9687 = 489.51$ segundos (8.1586 minutos).

4.2.3.1.7 Tiempo planeado de viaje (*Planning Time*)

El tiempo planeado de viaje corresponde al percentil del 95% de la distribución de los datos observados.

$$\text{Planning Time} = P95\%$$

$$\text{Planning Time} = 456.6809$$

Percentil	P95
Valor	456.6809

4.2.3.1.8 Índice de tiempo planificado (*Planning Time Index*).

La ruta en análisis es la siguiente:

- Caseta de Toluca km 148 (2069) – Caseta Palmillas km 145 (2068)

Se analizaron en total 808 datos correspondientes a viajes que comenzaran en la caseta de Toluca en el km 148 de la Autopista México-Querétaro identificada con el número 2069 y con punto final de análisis en la caseta Palmillas perteneciente a la autopista antes mencionada en el km 145 identificada con el número 2068. De acuerdo a distancias calculadas mediante el paquete “geosphere” cargado mediante R, se tiene una distancia de caseta a caseta de 0.8779946 km. De acuerdo a la metodología citada en Lomax, Schrank, Turner, & Margiotta, 2003 el tiempo de flujo libre se calcula utilizando la velocidad de diseño de la carretera. En el caso en estudio la velocidad de diseño del segmento de la carretera Federal 57 es de 95 km/hr. Se infiere una velocidad de operación máxima de las unidades en análisis de 90 km/hr, razón por la cual se utilizará tal velocidad para el cálculo del Índice de tiempo de viaje. Suponiendo un flujo libre donde el usuario no se encuentra con intervenciones en su viaje podemos obtener el siguiente tiempo.

$$\text{Tiempo de viaje con flujo libre} = \frac{0.8779946 \text{ km}}{90 \text{ km/hr}} = 35.11978 \text{ seg} = 0.5853 \text{ min}$$

El Índice de tiempo planificado compara el peor de los casos con el tiempo de viaje con flujo libre de acuerdo a la FHWA es:

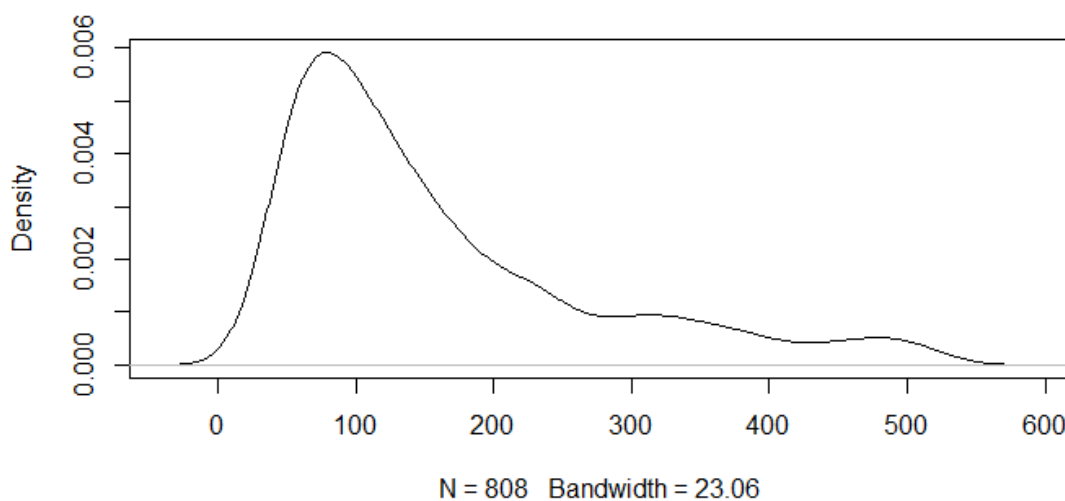
$$\text{Indice de Tiempo Planificado} = \frac{\text{Percentil del 95\%}}{\text{Tiempo de viaje con flujo libre}} \quad (49)$$

$$\text{Indice de Tiempo Planificado} = \frac{456.6809}{35.11978} = 13.00352$$

El Índice de tiempo planificado, es un factor aplicado al tiempo de viaje con flujo libre, se distingue del Buffer Index, debido a que incorpora los retrasos no habituales. El índice anterior nos dice que un viajero tendrá que planear un viaje total de $13.00352 \times 35.11978 = 456.6809$ segundos (7.6113 minutos) con respecto al tiempo de viaje en flujo libre para asegurar llegar a tiempo.

4.2.3.2 Estadísticos de amplitud y sesgo

4.2.3.2.1 Estadístico de sesgo (λ skew)



Gráfica 15 Densidad de probabilidad de la muestra.
Fuente: Elaboración propia

Percentil	P10	P50	P90	P95	P>95
Valor	56.3189	119.3417	313.5277	456.6809	489.5172

$$\lambda skew = \frac{P90 - P50}{P50 - P10} \quad (50)$$

$$\lambda skew = \frac{313.5277 - 119.3417}{119.3417 - 56.3189} = \frac{194.186}{63.0228} = 3.08120$$

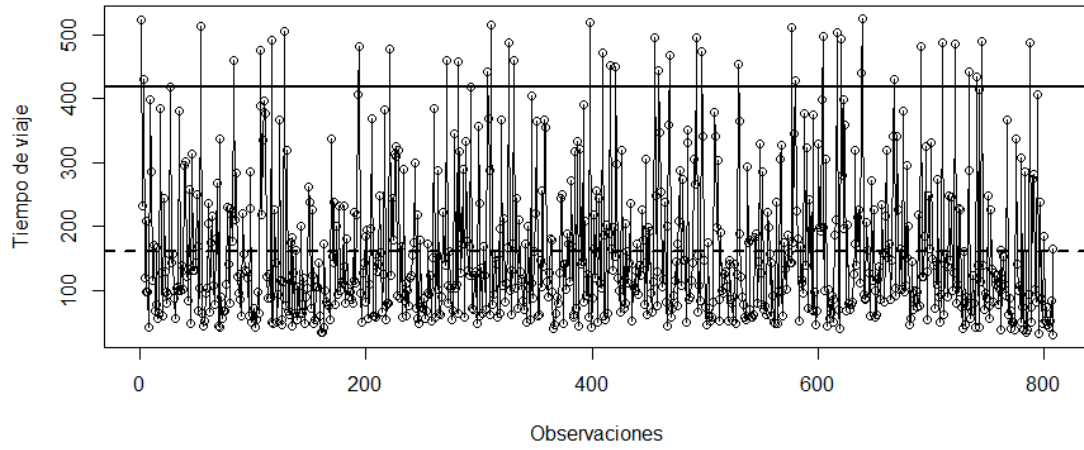
El estadístico de sesgo mayor a 1, nos indica que la distribución esta sesgada hacia la izquierda, esto se puede observar en la gráfica de densidad. De acuerdo a van Lint y van Zuylen, 2014, valores grandes en el estadístico de sesgo deben de ser interpretados como poco confiables, esto implica que al menos el 10% de los casos los tiempos de viaje son significativamente más largos que la media.

4.2.3.2.2 Estadístico de amplitud (λvar)

$$\lambda var = \frac{P90 - P10}{P50} \quad (51)$$

$$\lambda var = \frac{313.5277 - 56.3189}{119.3417} = \frac{257.2088}{119.3417} = 2.1552$$

Esta medida representa la relación del rango donde el 80% de las observaciones alrededor de la mediana caen de la mediana y la media del tiempo de viaje. Un valor como el antes dado nos indica que el rango de valores de los tiempos de viaje es relativamente pequeño con respecto a la mediana y por lo tanto se puede decir que la confiabilidad en el tiempo de viaje es adecuado, esto es debido a que los valores de la media y la mediana se encuentran próximos y aproximadamente el 10% de los datos conforman la cola superior.



Gráfica 16 Variabilidad de los tiempos de viaje.
Fuente: elaboración propia.

4.2.4 PM

A continuación, a manera de resumen se presenta los índices calculados para los 10 diferentes trayectos en el segmento de 13:00 a 23:59, se seleccionarán los índices de fluidez más altos puesto que estos indican importantes retrasos con respecto al tiempo promedio y se reportarán análisis para esos tramos en cuestión.

Tabla 14 Resumen de medidas de confiabilidad (PM).
Fuente: Elaboración propia

X	A2053_2054	A2054_2058	A2058_2060	A2060_2063	A2063_2065	
1	N	188.00	142.00	381.00	642.00	1018.00
2	Min_	494.00	379.00	466.10	735.00	251.00
3	P25_	589.93	484.98	636.03	993.00	321.00
4	Mediana_	657.47	505.00	670.83	1053.00	330.00
5	Media_	666.65	506.24	672.02	1159.39	340.35
6	P75_	897.26	539.15	703.80	1148.75	344.00
7	Max_	3196.00	765.00	804.16	2378.00	503.00
8	Ds_	1141.01	561.55	720.88	303.28	37.55
9	Var_	1190.96	566.14	726.27	91979.69	1409.75
10	P10_	561.63	466.85	592.43	930.10	313.00
11	P50_	666.65	506.24	672.02	1053.00	330.00
12	P90_	1494.32	592.34	735.56	1641.00	392.30
13	P95_	2275.45	643.51	758.76	1865.05	423.15
14	Peores2_	2750.22	697.25	807.27	2109.06	457.37
15	CV_	1.71	1.11	1.07	0.26	0.11
16	BI_	2.41	0.27	0.13	0.61	0.24
17	BT_	1608.80	137.27	86.74	705.66	82.80
18	MI_	4.13	1.38	1.20	1.82	1.34
19	PT_	2275.45	643.51	758.76	1865.05	423.15
20	Distancia	12.57	11.23	15.12	23.05	7.28
21	TVFL_operacion	502.95	449.04	604.96	921.90	291.21
22	PTI_operacion	4.52	1.43	1.25	2.02	1.45
23	IF	1.33	1.13	1.11	1.26	1.17
24	Esesgo	7.88	2.19	0.80	4.78	3.66
25	Eamplitud	1.40	0.25	0.21	0.68	0.24
	Origen	Tepotztlán	Ent. Jorobas	T. Der. Tepeji del Rio	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas
	Destino	Ent. Jorobas	T. Der. Tepeji del Rio	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas	T. Izq. Aculco

Tabla 15 Resumen de medidas de confiabilidad (PM) continuación.
Fuente: Elaboración propia

X	A2065_2069	A2069_2072	A2069_2068	A2072_2073	A2073_2074	
N	959.00	718.00	808.00	1170.00	989.00	
Min_	907.00	373.00	31.00	447.00	1137.00	
P25_	1225.79	495.71	80.59	531.25	1423.00	
Mediana_	1376.02	539.50	119.34	547.00	1468.00	
Media_	1369.81	538.48	179.97	551.64	1529.55	7514.09
P75_	1492.23	593.69	187.40	569.00	1576.00	
Max_	1897.00	840.00	525.00	677.00	2208.00	
Ds_	169.47	624.07	114.44	35.68	178.21	
Var_	28721.39	622.74	13095.69	1273.40	31757.94	
P10_	1141.28	465.33	56.32	515.00	1386.00	
P50_	1376.02	538.48	119.34	547.00	1468.00	
P90_	1589.64	657.24	313.53	599.00	1811.20	
P95_	1646.55	703.08	456.68	619.00	1927.20	
Peores2_	1735.57	771.06	489.52	637.72	2047.76	
CV_	0.12	1.16	0.64	0.06	0.12	
BI_	0.20	0.31	1.54	0.12	0.26	
BT_	276.73	164.60	276.71	67.36	397.65	
MI_	1.27	1.43	2.72	1.16	1.34	
PT_	1646.55	703.08	456.68	619.00	1927.20	
Distancia	32.19	10.71	0.88	12.23	31.55	
TVFL_operacion	1287.53	428.21	35.12	489.23	1262.14	6272.30
PTI_operacion	1.28	1.64	13.00	1.27	1.53	2.94
IF	1.06	1.26	5.12	1.13	1.21	1.52
Esesgo	0.91	1.62	3.08	1.63	4.19	
Eamplitud	0.33	0.36	2.16	0.15	0.29	
	T. Izq. Aculco	T. Izq. Toluca	T Izq Toluca	San Juan del Río	T. Izq. Acámbaro	
	T. Izq. Toluca	T der. Poniente SJR	Palmillas	T. Izq. Acámbaro	Libramiento de Querétaro a San Luis Potosí	

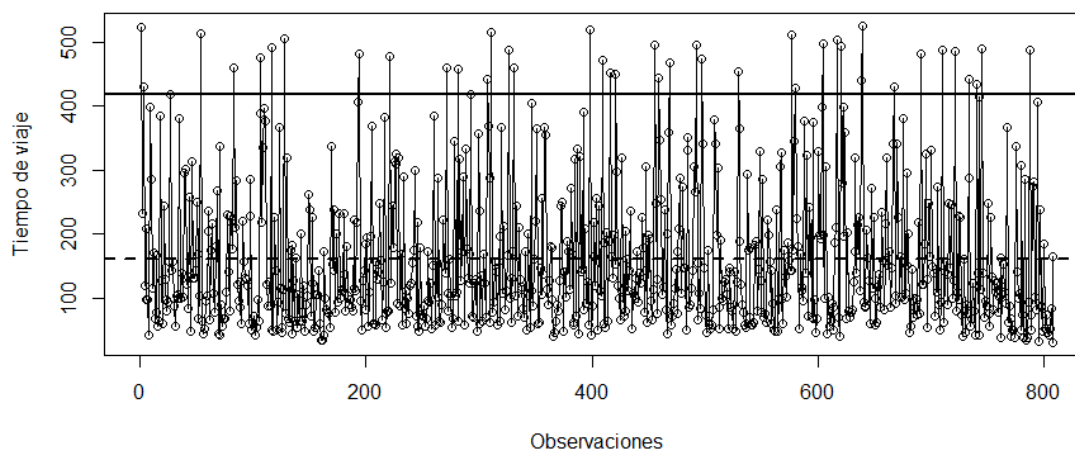
En un principio la utilidad de los Índice de fluidez y el índice de tiempo planificado es para realizar comparaciones a la capacidad de satisfacer las demandas del flujo. El índice de fluidez para el segmento completo es de 1.58. De acuerdo a lo anterior se requiere de $1.58 \times 6272.30 = 9894.75$ segundos (164.91 minutos o 2.74 hrs). El tiempo de recorrido de un viaje medio es de 7514.09 segundos (125.23 minutos o 2.08 hrs) existe una diferencia de 39.67 minutos y los segmentos que más contribuyen al aumento en tiempo son:

Tabla 16 Índices más altos del FI.
Fuente: Elaboración propia

Id	Tramol	TramoF	FI	PTI
A2069_2068	T. Izq. Toluca	Caseta de Cobro Palmillas	5.12	13.00
A2053_2054	Tepotzotlán	Ent. Jorobas	1.33	4.52
A2060_2063	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas	1.26	2.02

De acuerdo a esto se puede suponer que son los que presentan mayor variabilidad de acuerdo al índice de Fluidez. En comparación con los demás segmentos éstos son los que muestran un rendimiento menor de acuerdo a la información recolectada, razón por la cual se procede a una descripción que aunque limitada por los datos muestra una gran utilidad del cálculo de los índices de confiabilidad relacionada con el estudio de fluidez.

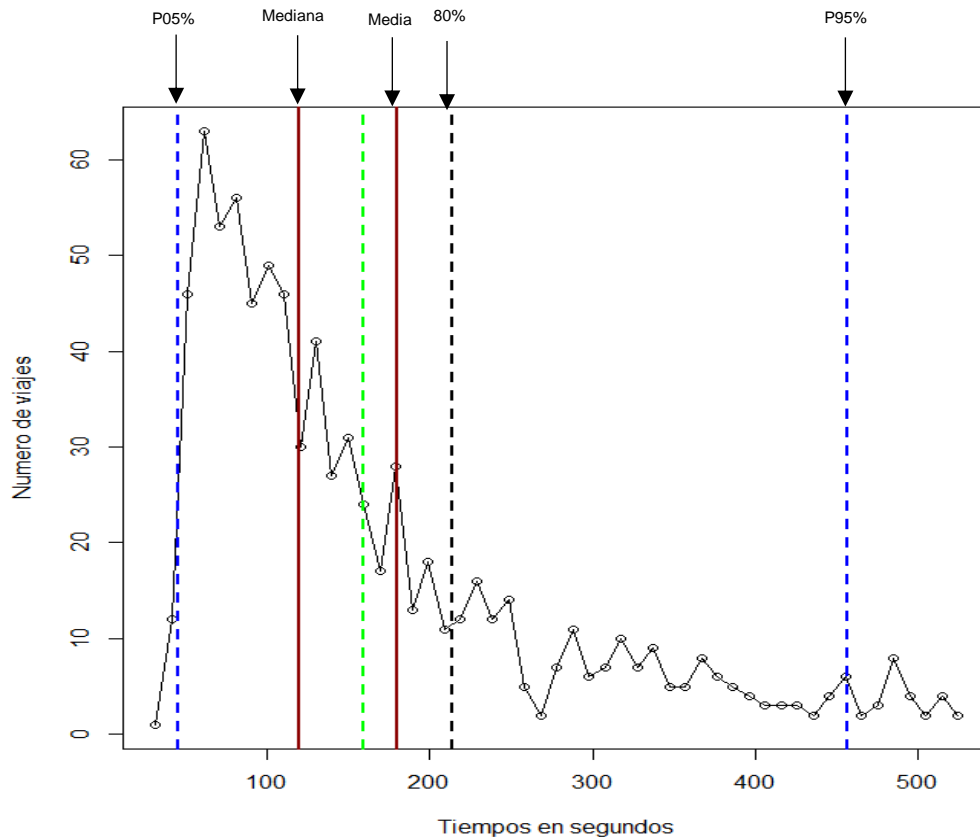
4.2.4.1 A2069_2068



Gráfica 17 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar su variabilidad en los tiempos de viaje, muchos de los viajes superan inclusive el P95. Y un valor del Índice de fluidez de 5.12, un valor extremadamente alto considerando que el índice de Fluidez compara el tiempo promedio de viaje con respecto al tiempo de viaje con flujo libre. Lo anterior no indica que el tiempo promedio de viaje puede llegar a ser 5.12 veces más grande

que el tiempo promedio. Además, presenta un PTI de 13.00 lo cual significa que para los viajes que requieren ser entregados de forma urgente se requiere de $13 \times 35.11 = 456.43$ segundos (7.60 minutos) el cual al ser comparado con el tiempo promedio 179.97 (2.99 minutos), ofrece la posibilidad de ilustrar el desempeño del segmento del corredor.



Gráfica 18 Distribución de los tiempos de viaje.
Fuente: Elaboración propia

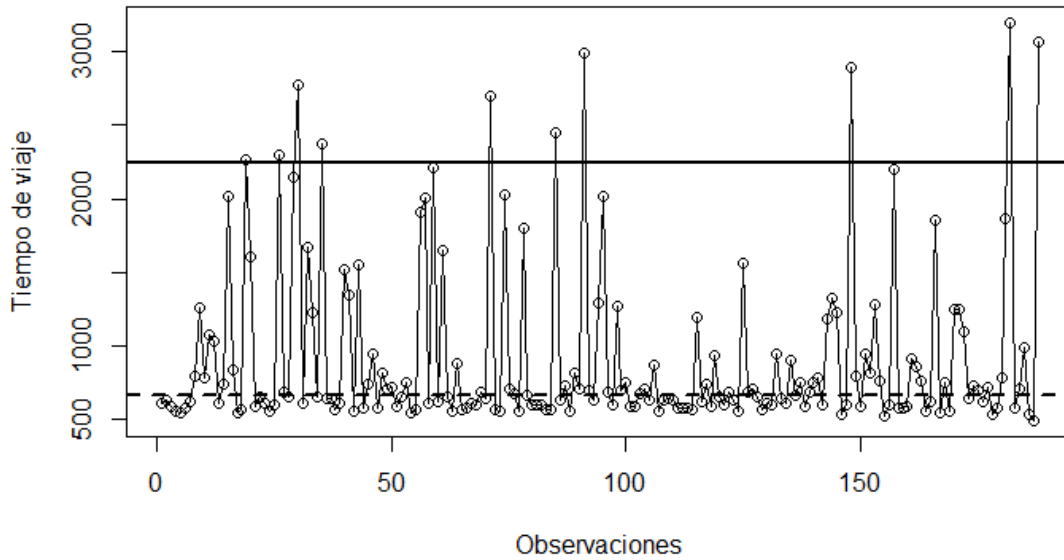
Como puede observarse de acuerdo a la figura se muestra que aproximadamente el 80% (646) viajes son menores a 213 segundos (3.55 minutos). De acuerdo a este porcentaje, uno de cada cinco viajes se encuentra en un rango de valores mayores que aumentan tanto a la desviación estándar como los percentiles. La media (179.9) se encuentra considerablemente alejada de la mediana (119.9), sugiriendo un estudio a fondo de los datos típicos por encima de estos para identificar la causa de los tiempos de viaje más largos de lo habitual ya que estos son los que “empujan” empujan los valores de la media hacia límites más altos.

Al realizar un análisis de los tiempos que sobrepasan el P80% se revelaron los siguientes patrones de conducta:

Para los viajes más allá del P95% se observan colas en la caseta correspondiente a la caseta 2068 (Caseta de Cobro Palmillas), aunque no se cuenta con suficientes datos para proporcionar una hipótesis sobre los horarios más concurridos; para los tiempos de viaje más grandes en esta sección corresponden a las 18-23 hrs.

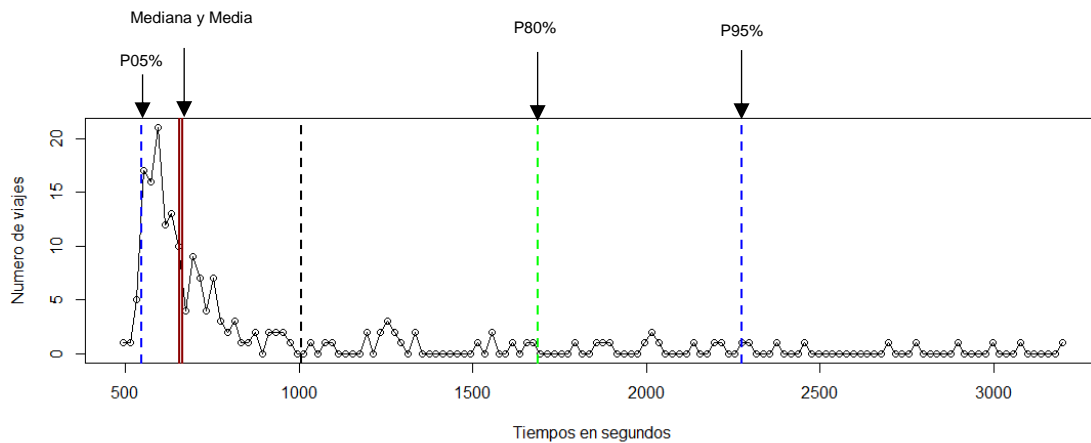
En el caso de los viajes que se encuentran entre el P80% y el P95% de la misma forma se observa un total de 98 ocasiones en un total de 167 oportunidades que coinciden en que el periodo de tiempo con mayores tiempos de viaje corresponde al horario de las 17-23hrs, sin embargo no se detectaron patrones concurrentes en las congestiones, por lo cual se requiere de un estudio más a fondo con información aún más específica sobre el viaje.

4.2.4.2 A2053_2054



Gráfica 19 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia

Existe como puede observarse una gran variabilidad para este segmento, con al menos 10 viajes que superan el P95% (2272.4 segundos o 11.11 minutos). El tramo en cuestión tiene un índice de fluidez de 1.33 lo que significa que un viaje que tomara 502.95 segundos (8.38 minutos) en condiciones de tiempo de viaje con flujo libre tardara hasta $1.33 \times 502.94 = 666.65$ segundos o 11.11 minutos.



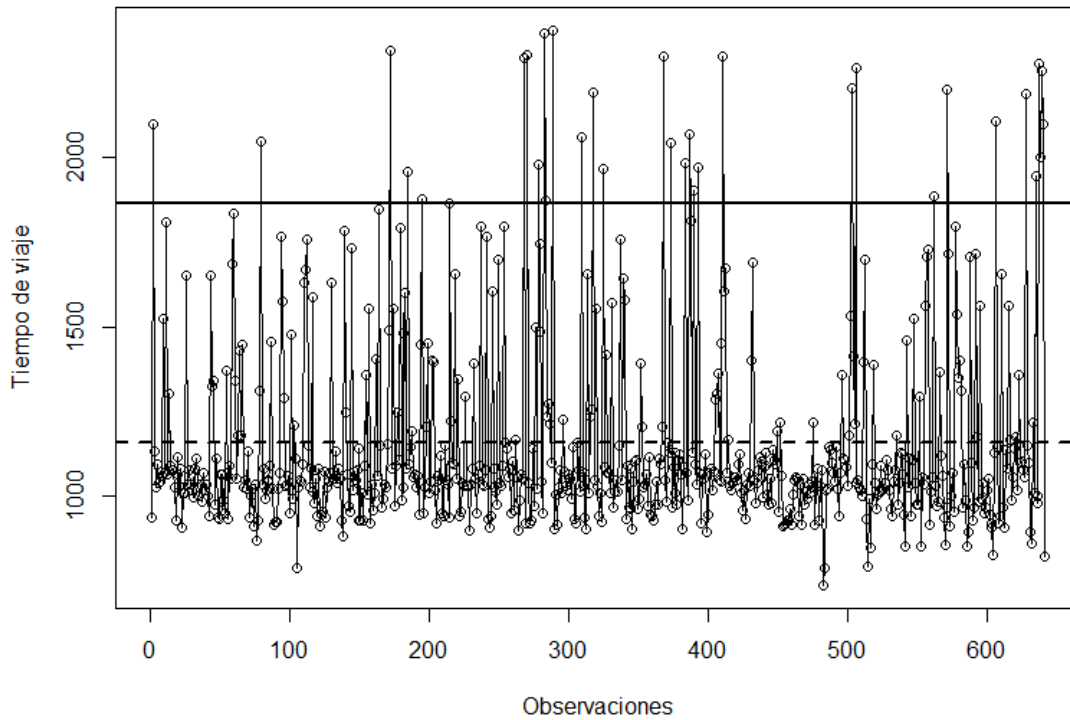
Gráfica 20 Distribución de los tiempos de viaje.
Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse de acuerdo a la figura 20, se muestra que aproximadamente el 80% (150) viajes son menores a 1006 segundos (16.76 minutos). De acuerdo a este porcentaje, uno de cada 5 viajes se encuentra en un rango de valores mayores que aumentan tanto a la desviación estándar como los percentiles. La media (666.653118) no se encuentra considerablemente alejada de la mediana (657.4706), sin embargo 38 viajes se encuentran fuera del rango de P80%. Siendo esta cantidad casi un quinto de la muestra se sugiere un estudio a fondo de los datos típicos por encima de éstos para identificar la causa de los tiempos de viaje más largos de lo habitual ya que estos son los que “empujan” empujan los valores de la media hacia límites más altos.

Al realizar un análisis de los tiempos que sobrepasan el P80% se revelaron los siguientes patrones de conducta.

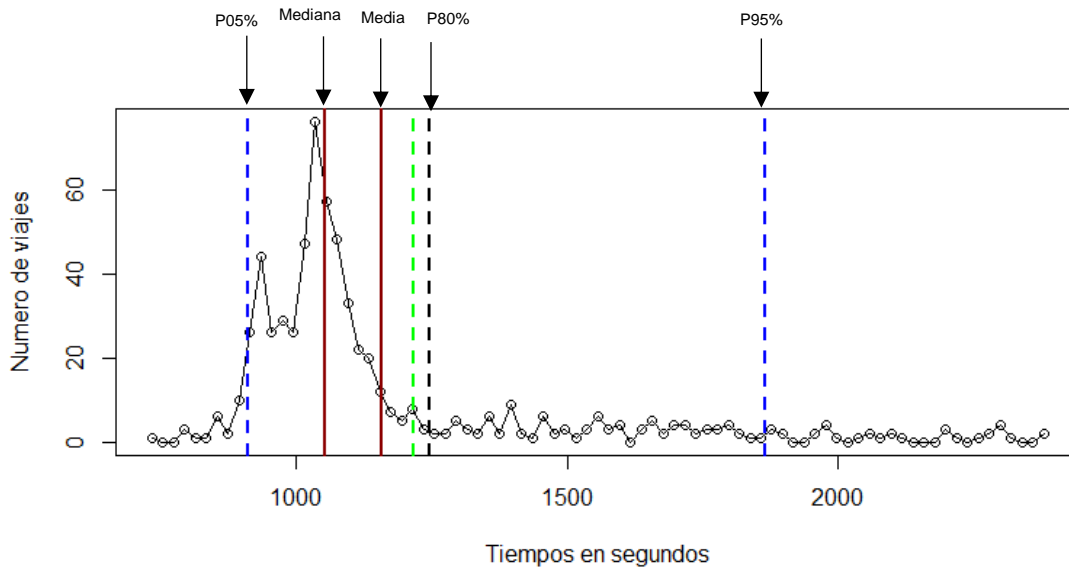
De aquellos viajes que superan el P80% (1006.8), 28 están agrupados en un horario de 17-22 hrs. Los viajes muestran congestiones similares a la mostradas en las imágenes en el paso a la segunda caseta con número 2054 (Ent. Jorobas). Los viajes superiores al P95% presentan congestionamientos importantes en la caseta 2054 (Ent. Jorobas), aunque no es posible definir las causas con la información disponible. Sin embargo, se recomienda un estudio de valores atípicos con una mayor cantidad de información.

4.2.4.3 A2060_2063



Gráfica 21 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia

De un total de 642 datos se observa una gran variabilidad para este segmento, con al menos 30 viajes que superan el P95% (1865.05 segundos o 31.08 minutos). El tramo en cuestión tiene un índice de fluidez de 1.257 lo que significa que un viaje que tomara 921 segundos (15.35 minutos) en condiciones de tiempo de viaje con flujo libre tardara hasta $(1.257 \times 921.90 = 1158.82)$ 1158.82 segundos o 19.31 minutos.

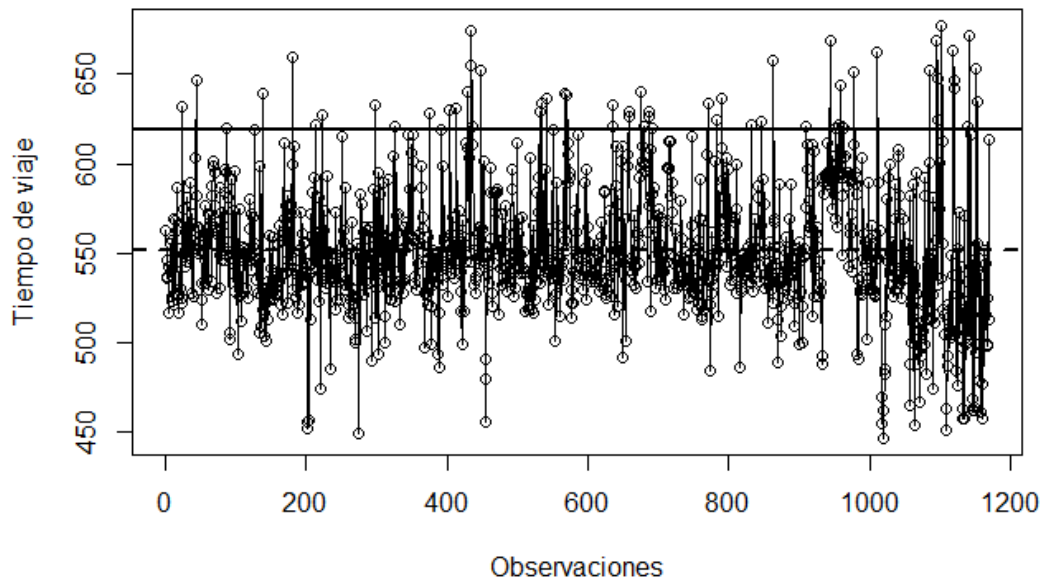


Gráfica 22 Distribución de los tiempos de viaje.
Fuente: Elaboración propia

Del total de viajes que superan tanto el P80% y P95%, 68 de los 129 viajes se encuentran en el rango de las 18 a 22 hrs. Como puede observarse de acuerdo a la gráfica 22 se muestra que aproximadamente el 80% (513) viajes son menores al 1247.4 segundos (20.7 minutos). De acuerdo a este porcentaje, uno de cada cinco viajes se encuentra en un rango de valores mayores que aumentan tanto a la desviación estándar como los percentiles. La media (1159.3) no se encuentra considerablemente alejada de la mediana (1053), sin embargo 129 viajes se encuentran fuera del rango de P80%. Siendo esta cantidad casi un quinto de la muestra se sugiere un estudio a fondo de los datos típicos por encima de estos para identificar la causa de los tiempos de viaje más largos de lo habitual ya que éstos son los que desvían los valores de la media hacia límites más altos.

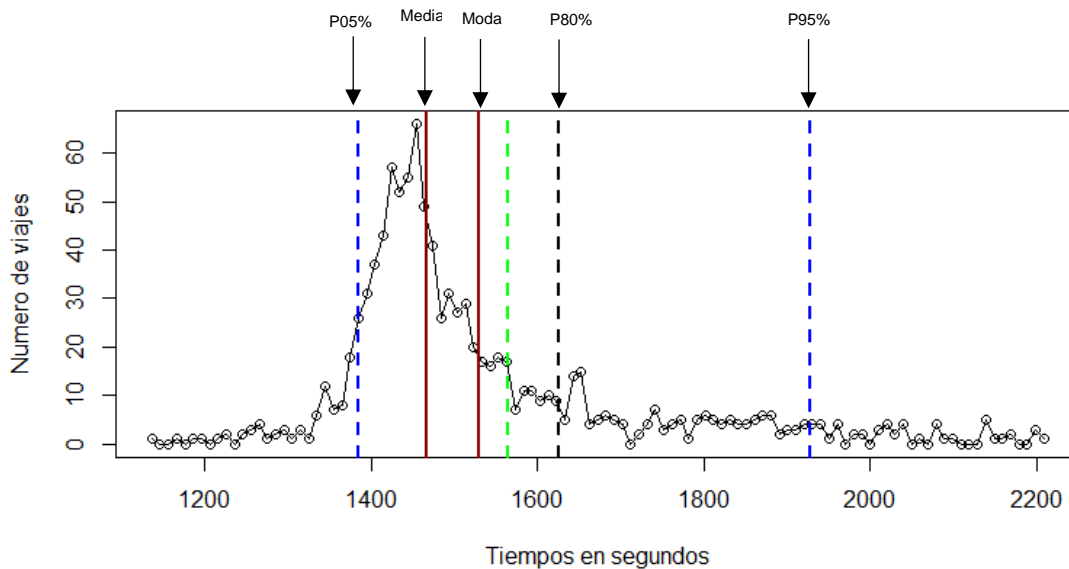
Al realizar un análisis de los tiempos que sobrepasan el P80% no se revelaron patrones de conducta de las unidades en cuestión, se requiere de una cantidad mayor de información para evaluar el desempeño en este segmento.

4.2.4.4 A2073_2074



Gráfica 23 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia

Como se pudo observar en el análisis anterior se observa demasiada variabilidad en la muestra, por lo cual se procedió a realizar un análisis de los datos que se encuentren por encima del P95%



Gráfica 24 Distribución de los tiempos de viaje.
Fuente: Elaboración propia

La gráfica anterior nos muestra que aproximadamente el 80% (791) de los viajes son menores a 1626 segundos (27.1 minutos); los restantes 20% (207) incrementan el valor del P95 y de la desviación estándar. De la misma forma 95% (948) de los viajes son menores a 1927 segundos y el restante 5% (40) son mayores a este.

En resumen, un viaje que toma 1262 segundos (21.03 minutos) en las condiciones ideales, tomará $1.52 \times 1262.14 = 1918.45$ segundos o 31.97 minutos para los viajes cuya importancia en el tiempo de llegada sea mayor.

4.2.5 AM

A continuación, a manera de resumen, se presentan los índices calculados para los 10 diferentes trayectos en el segmento de 00:00 a 12:59, se seleccionarán los índices de fluidez más altos puesto que estos indican importantes retrasos con respecto al tiempo promedio y se reportarán análisis para esos tramos en cuestión.

Tabla 17 Resumen de medidas de confiabilidad (AM).
Fuente: Elaboración propia

X	A2053_2054	A2054_2058	A2058_2060	A2060_2063	A2063_2065	
1	N	54	39	79	174	270
2	Min_	470	400	574	848	260
3	P25_	566.32	464.42	663.00	969.25	316.75
4	Mediana_	645.438	497	687	1036.5	346.35
5	Media_	632.49	501.93	688.29	1239.83	374.47
6	P75_	895.57	570.67	715.81	1259	384.44
7	Max_	7433	939	1031	3251	650
8	Ds_	1185.87	623.62	736.61	484.81	93.97688885
9	Var_	1428.73	636.06	732.21	235044.579	8831.65
10	P05_	525.39	418.79	576.80	908.9	277.30
11	P10_	542.70	437.57	622.01	924.6	291.86
12	P50_	632.49	501.93	688.29	1036.5	346.35
13	P80_	1041.45	596.838	725.730	1440.4	400.30
14	P90_	1790.54	694.43	764.29	1864.4	563.01
15	P95_	3213.77	821.19	818.67	2550.65	588.06
16	Peores2_	5642	872.66	926	2840	612
17	CV_	1.87	1.24	1.07	0.391	0.25
18	BI_	4.08	0.63	0.18	1.05	0.570
19	BT_	2581.27	319.26	130.37	1310.81	213.58
20	MI_	8.92	1.73	1.34	2.29	1.63
21	PT_	3213.77	821.19	818.67	2550.65	588.06
22	Distancia	12.57	11.22	15.12	23.047	7.280
23	TVFL_operacion	502.9	449.04	604.96	921.90	291.20
24	PTI_operacion	6.38	1.82	1.35	2.76	2.01
25	IF	1.25	1.11	1.13	1.344	1.28
26	Esesgo	12.89	2.99	1.146	7.39	3.97
27	Eamplitud	1.97	0.51	0.20	0.90	0.78
	Origen	Tepotztlán	Ent. Jorobas	T. Der. Tepeji del Río	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas
	Destino	Ent. Jorobas	T. Der. Tepeji del Río	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas	T. Izq. Aculco

Tabla 18 Resumen de medidas de confiabilidad (AM).
Fuente: Elaboración propia

X	A2065_2069	A2068_2072	A2069_2068	A2072_2073	A2073_2074
N	223	166	200	374	300
Min_	744	384	94	449	1205
P25_	1180.35	481.25	74.225	531	1405.917
Mediana_	1323.55	529	105.230	546.5	1445.499
Media_	1333.65	718.01	161.145	550.748	1446.45
P75_	1456.40	598.5	162.172	570.25	1495.55
Max_	1902	4464	75	671	1756
Ds_	172.56	698.95	94.241	37.721	1529.57
Var_	29777.18	488544.30	8881.494	1422.93	1531.96
P05_	1105.95	447.25	45.354	491.3	1337.85
P10_	1147.93	459.5	54.948	509.3	1366.64
P50_	1323.55	529	105.230	546.5	1446.458
P80_	1487.37	635	184.453	576.8	1510.651
P90_	1567.06	759	272.867	598	1559.194
P95_	1631.58	2150.75	402.036	622.35	1612.414
Peores2_	1751.87	3462	424.25	641.631	1679.187
CV_	0.129	0.97	0.584	0.068	1.05
BI_	0.223	1.99	1.494	0.130	0.1147
BT_	297.92	1432.73	240.891	71.601	165.956
MI_	1.31	4.821	2.632	1.165	1.160
PT_	1631.58	2150.75	402.036	622.35	1612.41
Distancia	32.18	10.705	0.877	12.230	31.55
TVFL_operacion	1287.53	428.211	35.119	489.231	1262.141
PTI_operacion	1.267	5.022	11.447	1.272	1.277
IF	1.035	1.676	4.588	1.125	1.146
Esesgo	1.386	3.309	3.333	1.384	1.412
Eamplitud	0.316	0.566	2.070	0.162	0.133
Origen	T. Izq. Aculco	Palmillas	T. Izq. Toluca	T. Der. Poniente San Juan del Rio	T. Izq. Acámbaro
Destino	T. Izq. Toluca	T. Der. Poniente San Juan del Rio	Caseta de Cobro Palmillas	T. Izq. Acámbaro	T. Der. Libramiento de Querétaro a San Luis Potosí

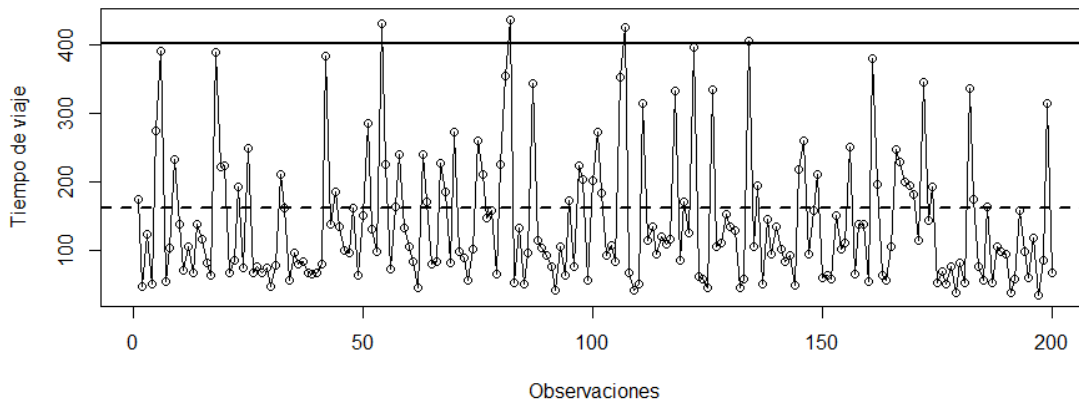
En un principio la utilidad de los índices de fluidez y el índice de tiempo planificado es para realizar comparaciones a la capacidad de satisfacer las demandas del flujo. El índice de fluidez para el segmento completo es de 1.57. De acuerdo a lo anterior se requiere de $1.57 \times 6272.29 = 9858.03$ segundos (164.30 minutos o 2.73 hrs). El tiempo de recorrido de un viaje medio es de 7647.07 segundos (127.45 minutos o 2.12 hrs) existe una diferencia de 36.84 minutos y los segmentos que más contribuyen al aumento en tiempo son:

Tabla 19 Índices FI más altos del tramo.
Fuente: Elaboración propia

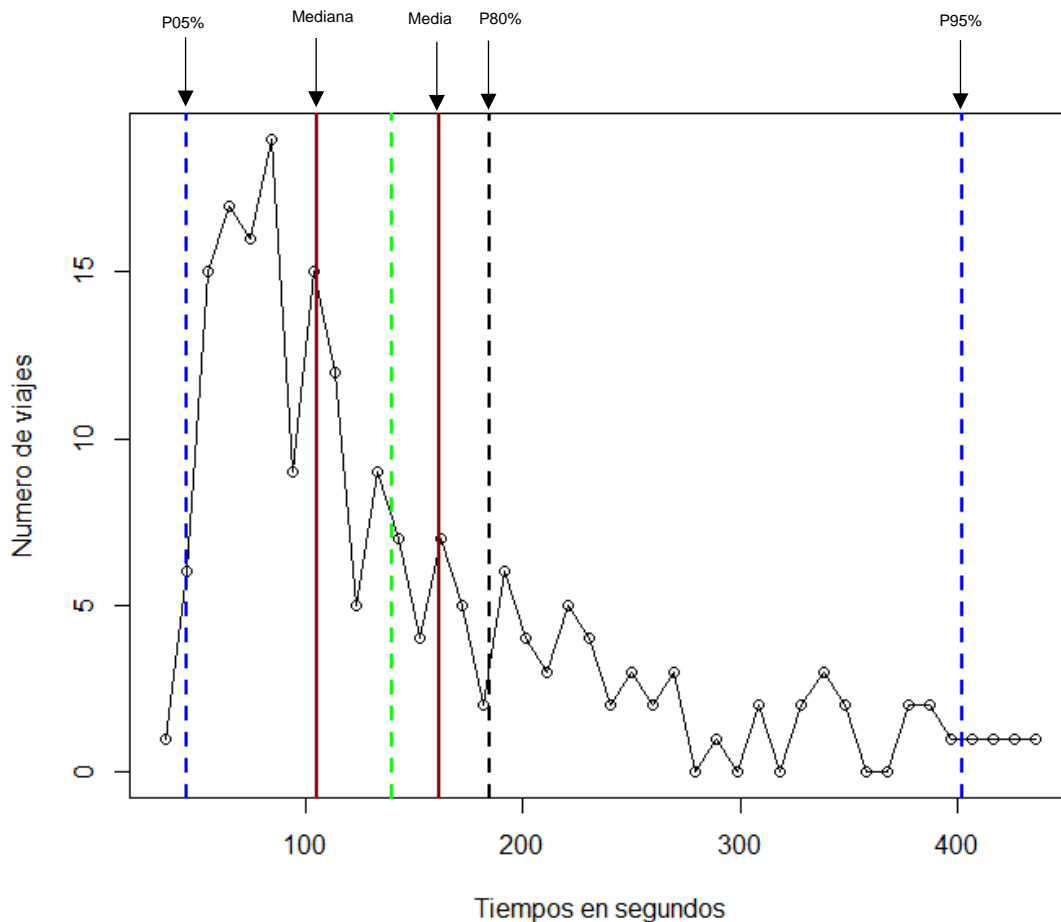
Id	Tramol	TramoF	FI	PTI
A2069_2068	T. Izq. Toluca	Caseta de Cobro Palmillas	4.588	11.44
A2068_2072	Caseta de cobro Palmillas	T. Der. Poniente SJR	1.676	5.02
A2060_2063	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas	1.344	2.766

De acuerdo a esto se puede suponer que son los que presentan mayor variabilidad de acuerdo al índice de Fluidez. En comparación con los demás segmentos estos son los que muestran un rendimiento menor de acuerdo a la información recolectada, razón por la cual se procede a una descripción, que aunque limitada por los datos, muestra una gran utilidad del cálculo de los índices de confiabilidad relacionada con el estudio de fluidez.

4.2.5.1 A2069_2068



Gráfica 25 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 26 Comportamiento de los tiempos de viaje.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar una variabilidad ligeramente menor en cuanto a su homólogo en la tarde, paso de un CV de 0.64 a 0.58. Sin embargo, tiene un índice de fluidez de 4.58 también menor al índice de la tarde de 5.12. Este índice nos dice que el tiempo promedio de viaje puede llegar a ser 4.58 más grande que el tiempo promedio. Presenta un PTI de 11.44. Esto significa que los viajes que requieren ser entregados urgentemente se requiere de $11.44 \times 161.14 = 1843$ segundos (30.72), comparando este valor con el tiempo promedio de viaje nos ofrece una idea del desempeño del segmento.

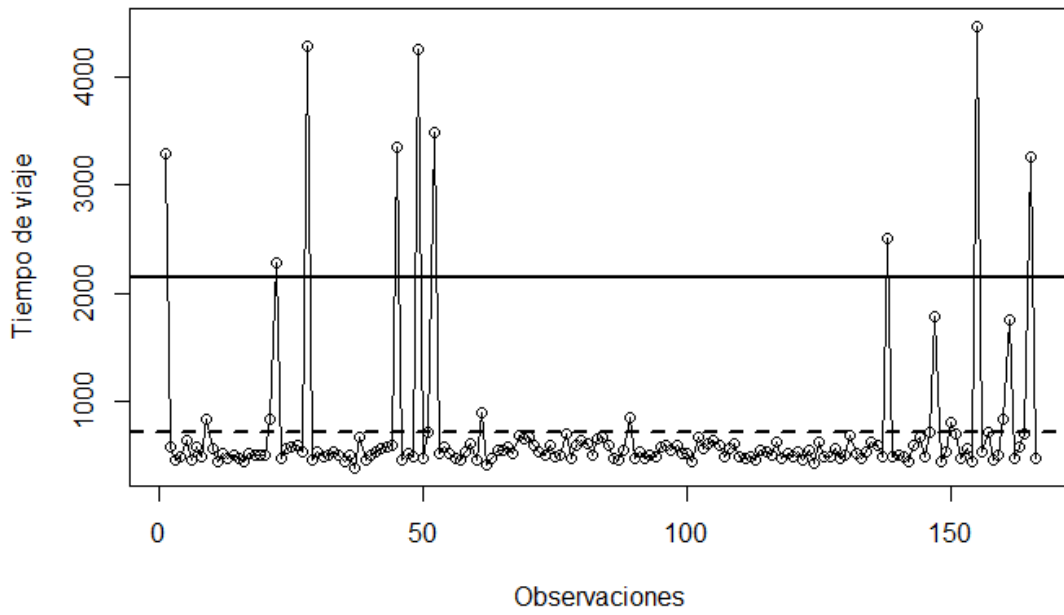
Las estadísticas son:

EL 80% de los viajes (160) son menores a los 184.45 segundos (3.07 minutos). La media se encuentra ligeramente alejada de la mediana, lo que sugiere que los datos atípicos están afectando negativamente a la media, un análisis de esos datos revelara el porqué del comportamiento de la media.

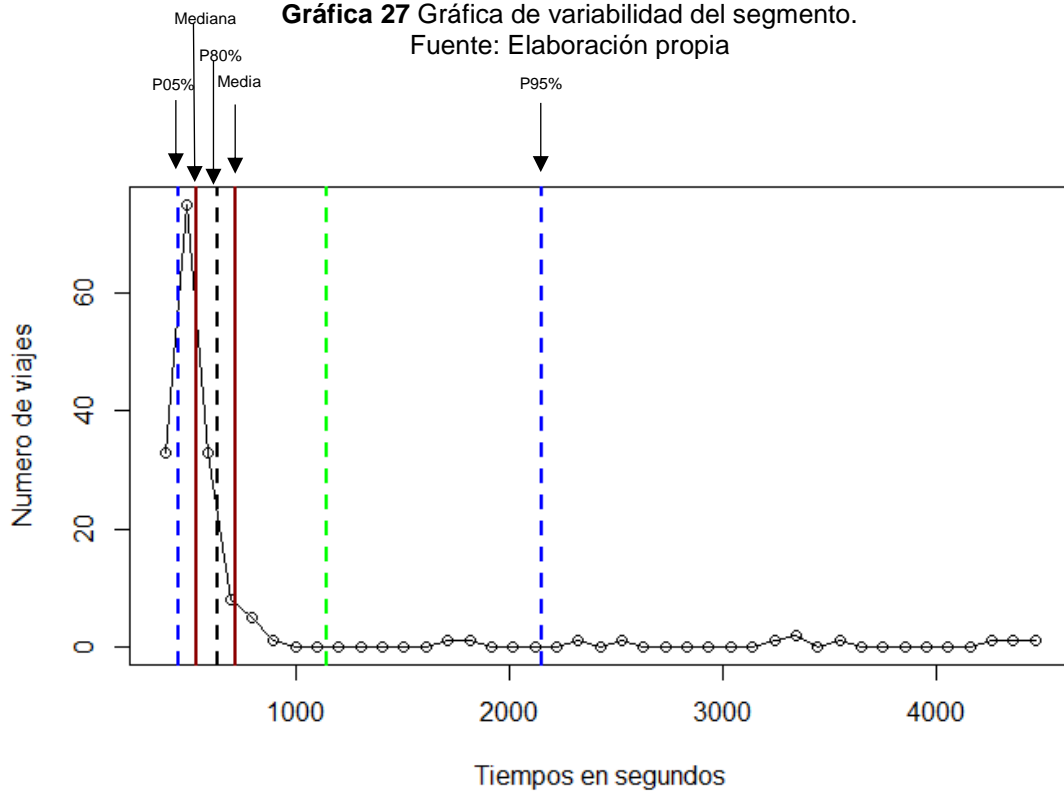
Al realizar un análisis de los tiempos que sobrepasan el P80% se revelaron los siguientes patrones de conducta. De los 51 datos fuera del P80%, 34 de ellos

están en los horarios de 0-1 hrs y de 10-11 hrs, revelando que son las horas en las que el tiempo de tránsito aumenta. La inspección visual de los datos no reveló alguna conducta especial en los datos.

4.2.5.2 2068-2072



Gráfica 27 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 28 Comportamiento de los tiempos de viaje.
Fuente: Elaboración propia

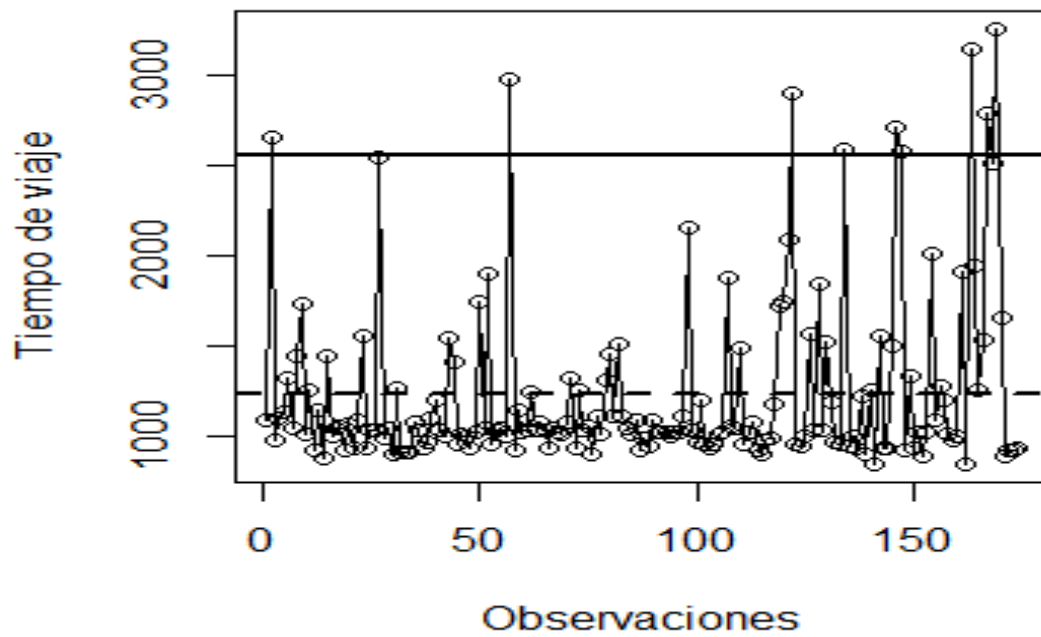
Se puede observar una variabilidad mayor en cuanto a su homólogo en la tarde, paso de un CV de 1.16 a 0.97. Sin embargo, tiene un índice de fluidez de 1.67 también mayor al índice de la tarde de 1.26. Presenta un PTI de 5.02. Esto significa que los viajes que requieren ser entregados urgentemente se requiere de $5.02 \times 718.01 = 2149.61$ segundos (35.82 minutos), comparando este valor con el tiempo promedio (718.01 segundos o 11.96 minutos) de viaje nos ofrece una idea del desempeño del segmento.

Las estadísticas son:

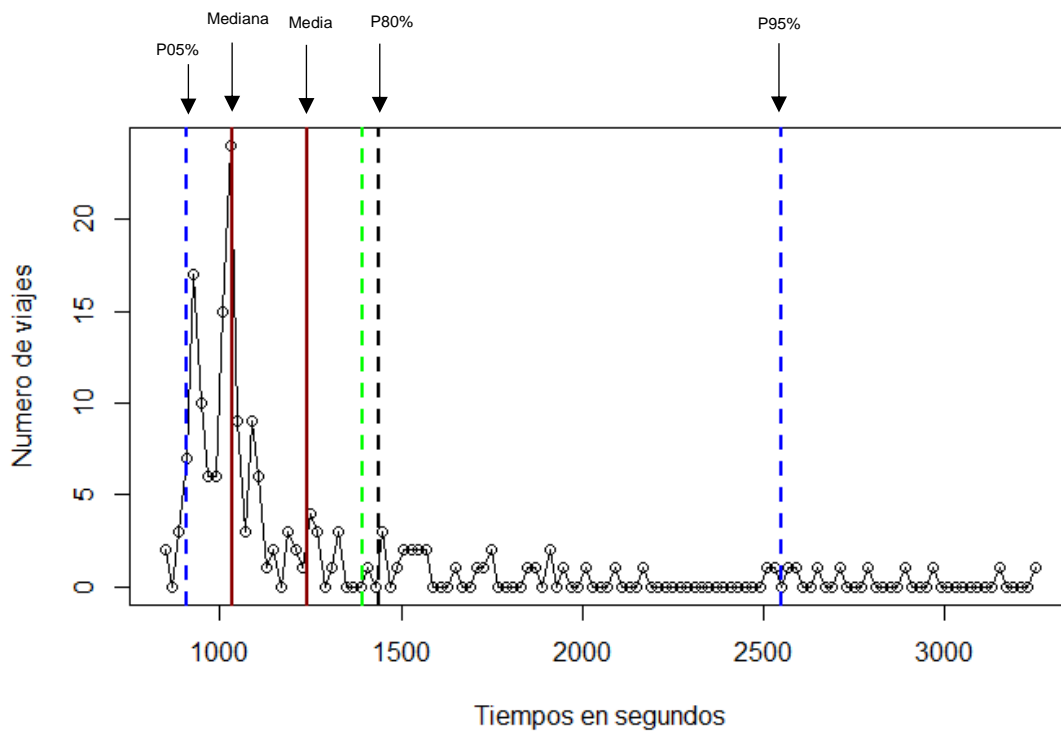
El 80% de los viajes (132) son menores a los 635 segundos (10.58 minutos). La media (718.01) se encuentra ligeramente alejada de la mediana (529.00), lo que sugiere que los datos atípicos están afectando negativamente a la media, un análisis de esos datos revelara el porqué del comportamiento de la media.

Al realizar un análisis de los tiempos que sobrepasan el P80% se revelaron los siguientes patrones de conducta. De los 34 datos fuera del P80%, 18 de ellos están en los horarios de 8-10 hrs, revelando que son las horas en las que el tiempo de tránsito aumenta. La inspección visual de los datos reveló una importante congestión el día 07 de Julio entre las 8 y las 10 am. Se requiere de información adicional para realizar conjeturas sobre la causa de la congestión.

4.2.5.3 2060-2063



Gráfica 29 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 30 Comportamiento de los tiempos de viaje.
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar un índice de fluidez de 1.34 mayor al índice que fue obtenido en el segmento que se analizó bajo el concepto de PM de 1.26. Este índice nos dice que el tiempo promedio de viaje puede llegar a ser 1.34 más grande que el tiempo promedio. Presenta un PTI de 2.76. Esto significa que los viajes que requieren ser entregados urgentemente se requiere de $2.76 * 921.9022 = 2544.45$ segundos (42.40 minutos), comparando este valor con el tiempo promedio (1239.83 segundos o 20.66 minutos) de viaje no ofrece una idea del desempeño del segmento.

Las estadísticas son:

EL 80% de los viajes (139) son menores a los 1440 segundos (24 minutos). Al realizar un análisis de los tiempos que sobrepasan el P80% se revelaron los siguientes patrones de conducta. De los 36 datos fuera del P80%, 14 de ellos están en los horarios entre las 9-10 hrs, revelando que son las horas en las que el tiempo de tránsito aumenta. La inspección visual de los datos no reveló alguna condición que favoreciera la creación de alguna congestión. Se requiere de información adicional para realizar conjeturas sobre la causa de la congestión.

4.3 Conclusiones

La confiabilidad en el tiempo de viaje se ha convertido en una de las medidas de desempeño más eficaces a nivel mundial (Muilerman, Toon y Rob , 2005). Se han planteado diferentes formas de obtenerla y la mayoría de los autores se ha decantado por las técnicas de variación media, técnica utilizada en este estudio. Es importante recordar que la obtención de medidas de confiabilidad está estrechamente relacionada con el análisis de fluidez en sistemas de transporte. Los estadísticos de fluidez más importantes son obtenidos mediante un estudio de confiabilidad, siendo éstos los encargados de dar una imagen general del rendimiento del sistema de transporte.

En este capítulo se presentaron los cálculos necesarios para la obtención de las medidas de confiabilidad, con respecto a las distribuciones de los datos que modelan los tiempos de viaje. Se comprobaron las distribuciones más comunes y presentes en los paquetes estadísticos comunes, se probaron la utilización de

distribuciones presentes en la literatura y se determinaron con respecto a ellas las medidas correspondientes, su explicación así como lo que significan para el usuario de la red de transporte. En los casos en estudio se demostró la utilidad del índice de fluidez y el índice de tiempo planificado como una medida de las condiciones de operación de la red, dirigiendo la atención hacia los sub-tramos que presentan una mayor variabilidad y por lo tanto son importantes de analizar por separado. Se probaron los estadísticos de sesgo y amplitud con información empírica y se analizaron datos fuera de los percentiles del 80 y 90% de acuerdo a la información revelada por el Índice de fluidez.

Los resultados de la aplicación de una metodología al caso de México fueron satisfactorios lográndose el objetivo de la aplicación de una metodología a los sistemas mexicanos, sin embargo es latente la necesidad de mayor información pertinente al tiempo de viaje con un mayor detalle en la información proporcionada.

5 Conclusiones

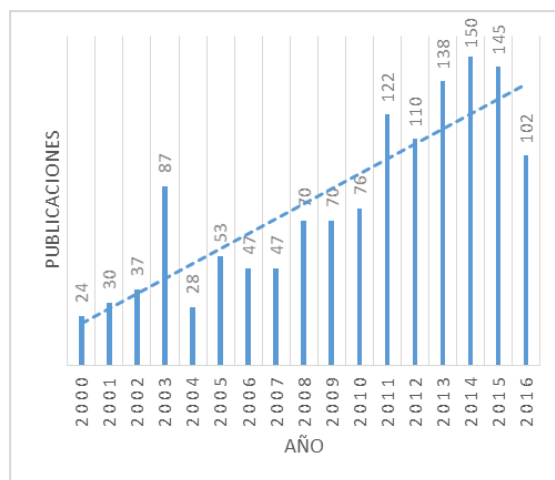
Resumen

El presente capítulo resume los hallazgos más importantes en la investigación. El capítulo se divide en tres secciones. La primera sección, responde a las preguntas de investigación, planteadas al inicio de esta investigación. La segunda sección, trata sobre las limitantes encontradas dentro de la investigación y finalmente la tercera sección, muestra las líneas futuras de investigación.

5.1 Introducción

Los sistemas de transporte son susceptibles a la variación en las condiciones de operación ocasionando tiempos de traslado mayores a los tiempos promedio, estas variaciones afectan directamente el flujo de la red, el cual es un producto de la demanda y la capacidad de la misma. Las variaciones pueden ocasionar interrupciones. Las cuales pueden ser totales o parciales, en la red de transporte. Esta degradación de la capacidad de la red puede venir de las variaciones debido a la demanda del servicio (Nicholson y Du, 1997). El estudio de esta variabilidad en los sistemas de transporte es de suma importancia para medir su desempeño y generar estrategias tanto de mitigación de eventos disruptivos, así como de mejora de los puntos débiles de la red. El presente proyecto se basó en un análisis de las variaciones en el flujo de un corredor de transporte importante para México, se llevó a cabo el análisis de tiempos de viajes de unidades de transporte de carga mediante un estudio de confiabilidad. Se propuso un enfoque de desarrollo de medidas de fluidez en sistemas de transporte desde un punto de vista de análisis del desempeño.

La información relativa al cálculo de medidas de confiabilidad es amplia y variada. Del análisis de la literatura se determinó que existe un interés creciente en el estudio de la confiabilidad, esto puede observarse en la gráfica 31 donde se muestra una tendencia positiva en las publicaciones sobre confiabilidad en sistemas de transporte de carga.



Gráfica 31 Número de publicaciones por año.
Fuente: Elaboración propia

No existe evidencia de la utilización o propuestas para la utilización de medidas de confiabilidad y fluidez en México. Dentro del país se utilizan los tiempos promedio de recorrido para la planeación del servicio de carga. Existe un desconocimiento de la técnica, aplicación de metodologías existentes y sus beneficios en general dentro del país. Las preguntas de investigación planteadas en la introducción del documento ayudan a visualizar el alcance de la metodología propuesta. Es por ello que se procede a resolverlas con la información recolectada a través del desarrollo de la investigación.

¿Cómo puede la confiabilidad se descrita en función de las condiciones de operación? La congestión en el flujo de tráfico impacta directamente sobre la velocidad de circulación en una red de transporte; si el flujo crece y se alcanza la capacidad límite, las condiciones pueden tornarse inestables y sobre todo susceptibles a interrupciones de índole parcial o total, ocasionando variabilidad en los tiempos de recorrido (Guessous et. al., 2014). Cuando esto sucede se considera que existe poca confiabilidad en los tiempos de viaje, de esta forma la confiabilidad puede ser descrita mediante la consideración de las condiciones de operación del sistema de transporte. En general, la confiabilidad en el tiempo de viaje se relaciona con las variaciones día a día, día de la semana y mes del año, de la misma forma factores tales como eventos climáticos, sociales, criminales o festivos afectan al desempeño de la red. La mayoría de los enfoques comparte el mismo punto de vista, la variación del tiempo de viaje medido día a día y su relación con la forma de la distribución que describe los datos (van Lint et. al., 2008). Siguiendo el mismo razonamiento se decidió utilizar las variaciones del día a día dentro del presente estudio, sin embargo, las características de la muestra de conveniencia que fue obtenida no permitió la segmentación de los datos. Razón por la cual se utilizó el set completo para el cálculo preliminar de las medidas de confiabilidad, así como de los índices de fluidez. Los índices de confiabilidad describen al tramo en análisis utilizando variaciones de acuerdo a los segmentos correspondientes al AM (antes meridiano) y PM (pasado meridiano). Estas secciones del día, presentan condiciones de operación similares aunque distintas, lo que pudo comprobarse al comparar tanto su índice de fluidez como el tiempo de recorrido total por segmento del día (Ver tabla 20). Para el análisis que cubre el segmento PM, el tramo Caseta de Tepetzotlán km

43 (2053) – Caseta Jorobas km 56 (2054) es uno de los tres principales generadores de variabilidad en la ruta, siendo el segundo en cuanto a la magnitud del IF (ver tabla 16). Al analizar el segmento AM este tramo no se encuentra dentro de los índices de fluidez más alto. En el segmento AM el segmento Tepotztlán-Jorobas es sustituido por tramo T. Izq. Toluca (2068) –T. Der. Poniente San Juan del Río (2072). Demostrando que los índices de confiabilidad y fluidez están en función del horario y condiciones de operación del segmento en análisis. De la misma forma existen índices que disminuyen de acuerdo al horario de análisis. Experimentándose menor variabilidad en relación al segmento del día en análisis.

Tabla 20 Comparación del índice de Fluidez y tiempo promedio de ambos segmentos.
Fuente elaboración propia.

		A2053_2054	A2054_2058	A2058_2060	A2060_2063
	Media_	666.65	506.24	672.02	1159.39
PM	IF	1.33	1.13	1.11	1.26
AM	IF	1.25	1.11	1.13	1.34
	Media_	632.49	501.93	688.29	1239.83

		A2063_2065	A2065_2069	A2068_2072	A2069_2068	A2072_2073	A2073_2074
	Media_	340.35	1369.81	538.48	179.97	551.64	1529.55
PM	IF	1.17	1.06	1.26	5.12	1.13	1.21
AM	IF	1.28	1.03	1.67	4.58	1.12	1.14
	Media_	374.47	1333.65	718.01	161.14	550.74	1446.45

De esta forma se describe a la confiabilidad utilizando índices estadísticos que son obtenidos al evaluar condiciones específicas de operación del sistema de transporte, modelando los datos con distribuciones de probabilidad y concluyendo sobre ellos. De acuerdo a Mahdi (2011), quien establece que el primer y más importante paso para el cálculo de medidas de confiabilidad es la descripción de la distribución que modela los datos. Se procedió a identificar las distribuciones del comportamiento de los datos; esta distribución no podría ser especificada en general y por lo tanto debe de ser revelada en cada análisis. De acuerdo al análisis de la literatura las distribuciones de probabilidad más comunes corresponden a las mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 21 Relación Autor vs Distribución de probabilidad.
Fuente: Elaboración propia

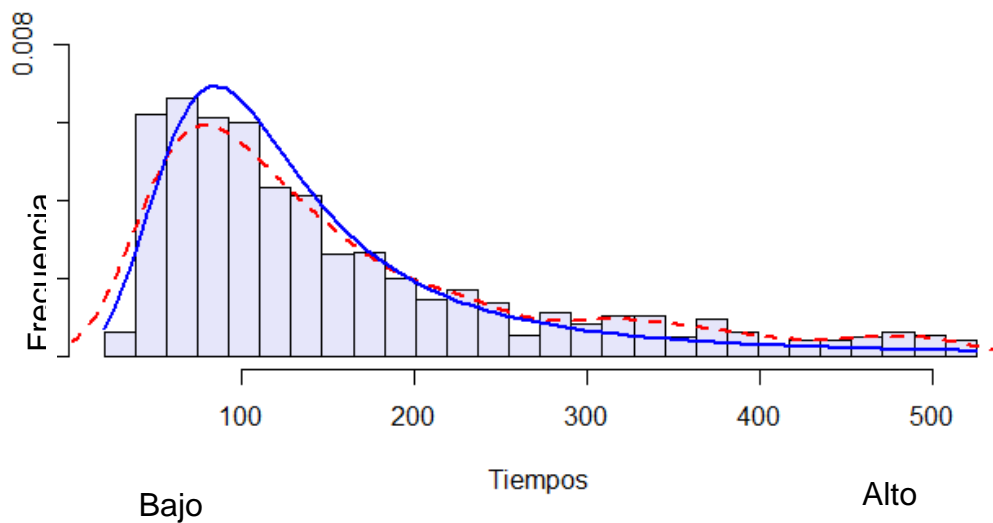
Autores		Distribución
Guessous, Aron, Bhourri & Cohen	2014	Singh y Maddala
Taylor y Susilawati	2012	Burr
Susilawati et al	2012	Burr
Al-Deek, Eman E.B.	2006	Log Normal
AREZOUMANDI Y Bham	2009	Log Logística, Log Normal
Mahdi AREZOUMANDI	2011	Log normal y Normal
Lei, Wang, Lu y Sun	2014	Pareto, Valor extremo Generalizado
Lomax	2003	Normal
Kouwenhoven y Pim	2016	Normal
Chen, Skabardonis y Varaiya	2003	Normal
Siu y Lo	2008	Normal
Clark y Watling	2005	Normal
Mcleod	2012	Normal

En consecuencia, se decidió utilizar una variedad de distribuciones presentes en paquetes estadísticos de uso generalizado, y otras tales como la distribución Singh-Maddala y mezclas de distribuciones para su descripción. Encontrando dichos casos entre los ejemplos analizados. Se determinó mediante el análisis que las distribuciones con colas derechas más largas de lo habitual son de vital importancia para el análisis de la fluidez y confiabilidad, entre ellas la distribución Singh-Maddala, con colas flexibles, así como la posibilidad de modelar los distintos datos por su forma. Casos especiales encontrados en algunas de las casetas, determinó que también es posible modelar los datos con mezclas de distribuciones, dando como resultado una descripción de la variabilidad más apegada a la realidad. Tal es el caso del estudio realizado por Yang y Wu (2016). Si bien en la revisión de literatura se documentó la utilización de estas distribuciones, se puede acordar que las metodologías no fueron ampliamente explicadas y se concretó con el presente estudio el ajuste de tales distribuciones con ayuda del software de análisis estadístico R. Además, se optó por la utilización del punto de vista del usuario como punto de partida para el análisis de la confiabilidad, puesto que es este quien se ve afectado directamente debido al desempeño de la red de transporte.

La segunda pregunta de investigación fue: **¿Cuál es el efecto de la variabilidad en los tiempos de viaje dentro de un corredor logístico?** Debido a que el transporte de carga en México es una parte integral de la economía del país se hace necesario el desarrollo de indicadores que sean capaces de reflejar el estado de operación de los mismos. Este desempeño depende de la variabilidad en las condiciones del recorrido. Las congestiones impactan sobre las velocidades de operación, y por consecuencia en los tiempos de viaje y desempeño del corredor. Al incrementar el tráfico se satura la red, en ocasiones llegando a alcanzar o sobrepasar la capacidad del segmento, haciendo que el flujo se torne inestable y vulnerable a incidentes que pueden interrumpir el funcionamiento en forma parcial o total. De esta forma se incrementa la variabilidad del tiempo de viaje haciéndolos extremadamente largos, fenómeno manifestado en la colas superiores de las distribuciones de probabilidad comentadas anteriormente, afectando a los usuarios del sistema y provocando retrasos importantes (Guessous et. al., 2014). Continuando con el ejemplo del segmento, T. Izq. Toluca (2069) –T. Der. Poniente San Juan del Río (2072), se puede observar que este tramo presenta un índice de fluidez mayor en el segmento AM observándose mayor variabilidad en él. De tal forma que esta variabilidad genera un tiempo de recorrido mayor, con respecto al presente en el segmento PM, pasando de 538.48 segundos (8.96 minutos) a 718.01 segundos (11.96 minutos). Aunque se puede considerar que la diferencia en tiempos no es grande, si la carga se moviera por días de tránsito podría significar pérdidas de mercancía o de oportunidad por el tiempo extra necesario para alcanzar el destino.

¿Cuál es el impacto en tiempo de la congestión, en un nodo de conexión principal en un corredor logístico? Según van Lint y van Zuylen (2005), basados en la observación empírica, se identifican cuatro fases dentro de las observaciones de tiempo de viaje en un periodo día a día. Los autores las enlistan como: i) Tráfico con flujo libre; ii) Congestión en formación; iii) Tráfico congestionado; iv) Congestión disuelta; El fenómeno de la formación ofrece una imagen de las consecuencias de la congestión con respecto a los nodos de conexión; la siguiente figura corresponde al nodo, caseta T. Izq. Toluca (2069) -

Caseta de cobro Palmillas (2068), esta presenta una forma similar a la formación de la congestión o bien la disolución de la misma.

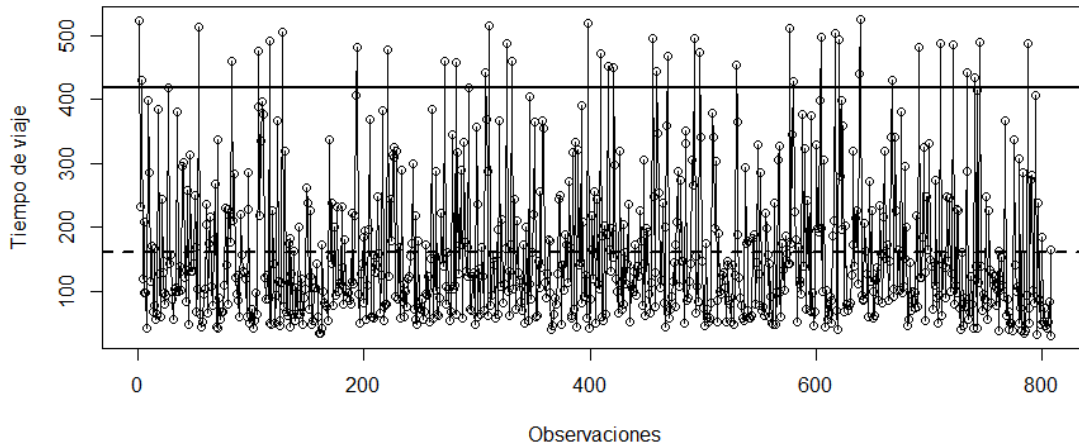


Gráfica 32 Adaptación a una distribución Singh-Maddala.
Fuente: Elaboración propia

Los efectos de las conexiones impactan directamente sobre los tiempos de viaje, llevándolos a los extremos de la cola de la distribución. Esta es la razón por la cual muchos autores señalan la necesidad del ajuste de distribuciones con colas más largas de lo habitual para describir los tiempos. Esta variabilidad en los tiempos genera un impacto en los índices de fluidez del corredor. Para establecer la relación con un ejemplo numérico, se muestran nuevamente los resultados correspondientes al segmento T. Izq. Toluca (2069) – Caseta de cobro Palmillas (2068). La tabla presenta los valores para el segmento del corredor con los valores de los índices de fluidez y de tiempo planificado más altos de todo el recorrido.

	Id	TramoI	TramoF	FI	PTI
PM	A2069_2068	T. Izq. Toluca	Caseta de Cobro Palmillas	5.12	13.00
AM	A2069_2068	T. Izq. Toluca	Caseta de Cobro Palmillas	4.58	11.44

Este recorrido presenta la siguiente gráfica de variabilidad.



Gráfica 33 Gráfica de variabilidad del segmento.
Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse, el impacto en tiempo depende de las características del tramo, sin embargo, la mayoría de las ocasiones lo llevan a los valores máximos de recorrido superando inclusive el percentil del 95% para ese recorrido. Para el caso particular de este segmento se observa que el tiempo de recorrido en el segmento PM es de $5.12 \times 35.12 = 179.96$ y para el segmento AM es de $4.58 \times 35.11 = 161.14$. La diferencia aunque no significativa depende del escenario de la medición, para este caso en específico fue de solo 18.82 segundos.

De esta forma la investigación se alineó con su objetivo general, el cual se estableció de la siguiente forma:

Validar para su uso en México una metodología para el análisis de la confiabilidad en sistemas de transporte de carga por carretera, mediante el análisis probabilístico de datos relativos al tiempo de viaje, identificando los segmentos del viaje que generan mayor variabilidad en los tiempos de tránsito.

En este sentido, el análisis valida la utilidad del modelo para la identificación de segmentos en el tramo que presenten mayor variabilidad. Se identificaron en el segmento PM los tramos:

- T. Izq. Toluca (2069) Caseta de cobro Palmillas (2068)

- Tepetzotlán (2053) – Ent. Jorobas (2054)
- T. Izq. Jilotepec (2060) – X.C. Jilotepec – Maravillas (2063)

Y para el segmento AM, se identificaron los tramos:

- T. Izq. Toluca (2069) Caseta de cobro Palmillas (2068)
- T. Izq. Toluca (2068) – T. Der. Poniente San Juan del Río (2072)
- T. Izq. Jilotepec (2060) – X.C. Jilotepec – Maravillas (2063)

Se probó la metodología expuesta por la FHWA (2014) en su página web (https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm)

añadiéndose la posibilidad de análisis de otras distribuciones diferentes a la distribución normal. Con la información actual no es posible determinar la causa exacta del retraso, sin embargo, sí se pudieron seguir patrones que demuestran congestiones en los segmentos analizados. Esto coincide con lo expuesto por Taylor y Susilawati (2012), quienes desarrollaron el análisis con base en la distribución de Burr, argumentando que una distribución de probabilidad que presente colas superiores más largas, sería de gran ayuda en el análisis de los tiempos de viaje.

Por último, **¿Cuáles son los retos de la implementación de medidas de confiabilidad en el sistema de carga por carretera en México?** De acuerdo al análisis de datos, se determinaron dos problemas principales;

- i) La falta de datos para el análisis de fluidez y por ende el estudio de confiabilidad;
- ii) La calidad de la información existente;

El primer problema fue establecido en el análisis de la literatura. Inclusive en países desarrollados el acceso a los datos de transporte es sumamente restringido, debido a que son propiedad de empresas privadas las cuales no están dispuestas a compartir su información. Si bien es cierto que la información es delicada se podría intentar llegar a un acuerdo de confidencialidad para compartir información y beneficiarse mutuamente del análisis realizado con empresas privadas. Por otro lado, las distintas dependencias gubernamentales tales como el Ministerio de Transporte de Canadá conocido como “*Transport Canada*” o el Texas Department of Transportation, han iniciado esfuerzo

conjuntos con entidades privadas para el estudio de los casos de fluidez en sus respectivos países. Será necesario plantear la urgencia de este tipo de análisis para lograr apoyo gubernamental en materia de datos.

El segundo problema, tiene que ver con la información proporcionada, la mayoría de los estudios cuentan con sistemas de monitoreo posicionados en partes específicas para la recolección de información. Si bien esa necesidad puede ser cubierta con los dispositivos GPS en las unidades, es recomendable la especificación de algunos detalles.

La información mencionada, es por supuesto deseada, sin embargo, es necesario recalcar los beneficios de tal análisis y los posibles acuerdos de confidencialidad para generar un vínculo con flujos tanto en el sector empresarial como en el gubernamental.

La hipótesis de investigación fue la siguiente:

Si se desarrolla un método para el análisis de la confiabilidad en sistemas de transporte de carga por carretera que sea capaz de localizar los segmentos que causan mayor variabilidad en los tiempos de tránsito de acuerdo al marco de operación en México, entonces, será posible describir el desempeño del corredor en términos de índices relacionados con la fluidez y la confiabilidad de acuerdo a su escenario de operación.

En este sentido, como resultado del análisis de los tiempos se pudo confirmar positivamente la hipótesis de investigación mediante la cual se propone la calificación del desempeño de corredor de transporte mediante índices de fluidez y confiabilidad con base en el tiempo de viaje con flujo libre. Como pudo observarse el índice de fluidez para el segmento completo en un segmento del día "AM" es de 1.58, lo que significa que se requiere de $1.58 \times 6272.30 = 9894.75$ segundos (164.91 minutos o 2.74 hrs). El tiempo de recorrido de un viaje medio es de 7514.09 segundos (125.23 minutos o 2.08 hrs) existe una diferencia de 39.67 minutos y los segmentos que más contribuyen al aumento en tiempo son:

Id	Tramol	TramoF	FI	PTI
A2069_2068	T. Izq. Toluca	Caseta de Cobro Palmillas	5.12	13.00
A2053_2054	Tepotzotlán	Ent. Jorobas	1.33	4.52
A2060_2063	T. Izq. Jilotepec	X. C. Jilotepec - Maravillas	1.26	2.02

Por lo cual se analizaron para determinar algún patrón de comportamiento que justifique la variabilidad en los tiempos de viaje. Debido a la limitada información dentro de la muestra no fue posible identificar una causa específica, sin embargo se detectaron los segmentos del corredor que están causando puntos de congestión dentro del tramo bajo análisis.

Finalmente, se puede afirmar que el constante cambio en la economía se debe de afrontar con estrategias dirigidas a mejorar el desempeño de nuestros recursos y focalizar los esfuerzos en la inversión apropiada para ello, de esto dependerá la competitividad a nivel nacional. El análisis de fluidez y confiabilidad apoya ambas tareas identificando los puntos débiles del sistema y se recomienda su implementación como medidas de uso común en el país.

5.2 Limitaciones

De acuerdo a la evidencia mostrada, se concluyó que este tipo de estudios es útil para la identificación de zonas en las que se pueden generar congestiones. El enfoque de índices facilita la comunicación de la información hacia los prestadores de servicios y los usuarios en general, de igual forma este enfoque permite identificar los factores y problemas, comunicar los beneficios de la inversión y cambio de políticas. Finalmente, ayuda a priorizar las posibles decisiones que afecten directamente las operaciones del transporte público y de carga (Eisele et. al., 2011). Sin embargo, la realidad nos muestra que tal y como fue descrito al responder a las preguntas de investigación, la información disponible es una de las mayores limitantes para el desarrollo de los análisis de fluidez y confiabilidad. Las reservas en cuanto a la cantidad y calidad de la información, restringen las posibilidades de desarrollo de los índices. A pesar de que los índices calculados son representativos, se requiere de una mayor cantidad de información de tiempos de viaje para generar las medidas en un nivel

de agregación, capaz de revelar a gran detalle el desempeño del corredor. Lo anterior sería deseable para enriquecer al modelo y de esta forma promoverlo como una medida de uso común México.

5.3 Líneas futuras

Debido al posible impacto potencial de la aplicación de la metodología, es deseable proponer las siguientes líneas de trabajo futuro, todas enfocadas a promover el posterior desarrollo de una metodología propia para el análisis de confiabilidad en el marco de un estudio de fluidez en sistemas de transporte.

5.3.1 Recolección de información

La información es el factor preponderante para el desarrollo de los análisis planteados, se propone la recolección de la siguiente información con al menos seis meses o un año deseablemente de datos almacenados recolectado día a día:

- Información sobre el origen, punto de partida, fecha y hora, posición GPS;
- Información sobre el destino, punto de partida, fecha y hora, posición GPS;
- El tipo de vehículo;
- Urgencia del viaje;
- Tipo carga;
- Total de carga transportada;
- Distancia de viaje;
- Información relacionada al costo de transporte;
- Información relativa a las tasas de accidentes y fatalidades;
- Información sobre eventos inusuales en durante el viaje;

También se requerirá preferentemente del establecimiento de puntos definidos para la toma de mediciones, o en su defecto establecer intervalos de toma de medidas por intervalos de menos de tres minutos entre cada toma de medidas. Las medidas utilizadas en esta investigación fueron derivadas de las distancias

entre casetas y entre puntos utilizando la fórmula general de la velocidad. La información propuesta facilitaría enormemente el trabajo ayudando a la mejor recepción de las medidas como índices de medición. Esta información puede generar nueva información capaz de dar una imagen más detallada del manejo de cargas en México.

5.3.2 Distribuciones Mezcladas

La evidencia empírica señala cada vez mayor incidencia en la forma de las distribuciones modelan los datos de tiempos con respecto a la existencia de distribuciones mezcladas en el análisis de confiabilidad y por lo tanto de fluidez (Yang y Wu, 2016). Es de vital importancia la consideración frecuente de las mismas en el análisis del tiempo de viaje. Especialmente en los periodos que son identificados por van Lint y van Zuylen (2005). Es qui donde existe una oportunidad de mejora y trabajo futuro en la línea de investigación de fluidez. La posible utilización de estas y otras distribuciones colas superiores mas largas de lo habitual, supondri auna mejorar a la metodología del analisis de la confibilidad y fluidez.

5.3.3 Análisis de fluidez

Como se mencionó desde un principio, el análisis de fluidez comprende cinco estudios interrelacionados que aportan información para evaluar el desempeño de un corredor de transporte, estas partes son:

- La confiabilidad en los tiempos de viaje;
- Costos;
- La cantidad de carga movida;
- Análisis de riesgo;
- Resiliencia del sistema;

Es importante continuar el esfuerzo de la realización del análisis de fluidez en su totalidad para motivar el uso las medidas a lo largo de todos los corredores del país y en diferentes cadenas de clase intermodal. Una de las partes primordiales

junto al análisis de confiabilidad es el análisis de resiliencia, la cual es la capacidad del sistema para recuperar a eventos disruptivos y el análisis de riesgo basado en estadísticas de accidentes y fatalidades. Estos tres estudios proporcionan una visión más completa del sistema de transporte y proporcionan ayuda a la toma de decisiones tanto en situaciones de emergencia por desastres naturales como ataques políticos, generando información no solo importante para el sector de transporte. Este análisis puede ser trasladado a una multitud de cadenas siendo una de las más importantes y en donde existe un trabajo precedente de los EUA, sobre el cruce en la frontera México-EUA. De la misma forma la calificación del desempeño en tiempo puede llevar a una escala numérica con la finalidad de proporcionar comparaciones entre tramos de diferente longitud.

Bibliografía

- O'Rourke , L., Beshers , E., & Stock , D. (2015). *Report: Measuring the Impacts of Freight Transportation Improvements on the Economy and Competitiveness*. Report FHWA-HOP-15-034.
- A.Small, K. (2012). Valuation of travel time. *ELSEVIER*, 2-14.
- Alvarez, P., & Hadi, M. (2012). Time-Variant Travel Time Distributions and Reliability Metrics and Their Utility in Reliability Assessments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 450--459.
- B. S. , D. (1999). *DESIGN RELIABILITY Fundamentals and Applications*. Washington, D.C.: CRC Pres.
- Bhourri , N., Aron, M., & Kauppila, J. (2012). Relevance of Travel Time Reliability Indicators: A Managed Lanes Case Study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 450--459.
- Bogers , E., Van Lint , H., & Van Zuylen, H. (2008). Reliability of Travel Time: Effective Measures from a Behavioral Point of View. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 27--34.
- Carrion, C., & Levinson, D. (2012). Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Elsevier*, 720-741.
- Cedillo-Campos, M. G., Lizarraga-Lizarraga, G., & Martner-Peyrelongue, C. D. (2017). MiF3 method: Modeling intermodal fluidity freight flows. *Research in Transportation Economics*, pp. 1-10.
- Cedillo-Campos, M., Morones-Ruelas, D., Lizarraga-Lizarraga, G., Gonzalez-Feliu, J. & Garza-Reyes, J. (2017). Decision Policy Scenarios for Just-in-Sequence Deliveries. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, Vol. 10 No. 4, pp. 581-603.
- Cedillo-Campos, M., Sanchez, C., Vadali, S., Villa, J. & Menezes, M. (2014). Supply chain dynamics and the "cross-border effect": The U.S.–Mexican border's case. *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier, Volume 72, June, Pages 261–273.
- Chen , C., Skabardonis , A., & Var, P. (2003). Travel-Time Reliability as a Measure of Service. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 74--79.
- Clark, S., & Watling, D. (2005). Modelling network travel time reliability under stochastic demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, ELSEVIER, 119-140.
- Dubois , A., & Gadde, L.-E. (2002). Systematic combining: an abductive approach to case research. *Journal of Business Research*, 553--560.

- Eisele, W. L., Tardif, L.-P., Villa, J., Schrank, D., & Lomax, T. (2011). Evaluating Global Freight Corridor Performance for Canada. *JOURNAL OF TRANSPORTATION of the Institute of Transportation Engineers volume 1, ISSUE 1*, 39-58.
- FHWA. (2014). Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time<http://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm>.
- Guessous, Y., Aron, M., Bhourri, N., & Cohen, S. (2014). Estimating Travel Time Distribution Under Different Traffic Conditions. *Transportation Research Procedia 3* , 339 – 348 .
- Jong, G. C., & C.J. Bliemer, M. (2015). On including travel time reliability of road traffic in appraisal. *ELSEVIER*, 80-95.
- Kovács , G., & Spens, K. (2005). Abductive reasoning in logistics research. *International Journal of Physical Distribution {&} Logistics Management*, 132-144.
- Lei , F., Wang , Y., Lu , G., & Sun, J. (2014). A travel time reliability model of urban expressways with varying levels of service. *Transportation Research Part C, ELSEVIER*, 453-467.
- Lomax, T., S., T., Schrank, D., Turner, S., & Margiotta, R. (2003). Selecting Travel Reliability Measures. Texas Transportation Institute Monograph.
- Mahdi, A. (2011). Estimation of Travel Time Reliability for Freeways Using Mean and Standard Deviation of Travel Time. *JOURNAL OF TRANSPORTATION SYSTEMS ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 74-84.
- Margiotta, R. e. (2010.). Analytic Procedures for Determining the Impacts of Reliability Mitigation Strategies. SHRP-2 L03 Final Report. *Cambridge Systematics, Inc.*
- MUILERMAN, G.-J., TOON , V., & ROB , V. (2005). Determining the impacts of time-based logistics strategies in the Dutch food industry. *International Journal of Logistics: Research and Applications, Taylor & Francis*, 1-11.
- NICHOLSON, A., & DU, Z.-P. (1997). DEGRADABLE TRANSPORTATION SYSTEMS: AN INTEGRATED EQUILIBRIUM MODEL. *University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, New Zealand, ELSEVIER*, 2019-223.
- Sanchez-Silva , M., Daniels, M., & Llera, G. (2005). A transport network reliability model for the efficient assignment of resources. *Transportation Research Part B: Methodological*, 47--63.
- SCT. (2016). *Estadísticas de Autotransporte Federal 2016*. Mexico: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

- Sumalee, A., Pan , T., & Zhong an, R. (2013). Dynamic stochastic journey time estimation and reliability analysis using stochastic cell transmission model: Algorithm and case studies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 263--285.
- Systematics, C. (2002). Analytical procedures for determining the impacts of reliability mitigation strategies, report for NCHRP SHRP 2 project <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/f-shrp/f-shrp_webdoc_3.pdf> Techreport. *International Journal of Pavement Engineering*, 261- 268.
- Taylor, M. A., & Susilawati. (2012). Modelling travel time reliability with the Burr distribution. *Procedia- Social and Behavioral Sciences* 54, Science Direct, 75 - 83.
- Taylor, S., Fisher, D., & Dufresne, R. (2002). The Aesthetics of Management Storytelling: A Key to Organizational Learning. *Management Learning*, 313--330.
- TRB. (2000). Highway capacity Manual .
- TRB. (2011). Performance Measures for Freight Transportation. *Nationan Cooperative Freight Research Program*, 19.
- van Lint , J., & van Zuylen, H. (2005). Monitoring and Predicting Freeway Travel Time Reliability: Using Width and Skew of Day-to-Day Travel Time Distribution. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 54--62.
- van Lint , J., van Zuylen, H., & Tu, H. (2008). Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 258--277.
- Yang, S., & Wu, Y.-J. (2016). Mixture Models for Fitting Freeway Travel Time Distributions and Measuring Travel Time Reliability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 2594*, 95 - 106.