



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-GM-INF-05-15

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA VARIACIÓN DEL FACTOR CAMIÓN MEDIANTE EL CONTROL DE SOBREPESO EN EL TRANSPORTE DE CARGA PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA

Preparado por:

Unidad de Gestión Municipal
PITRA-LanammeUCR

San José, Costa Rica
Julio, 2015

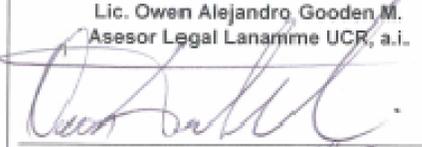
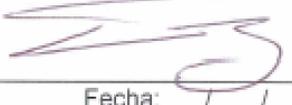
1. Informe LM-PI-GM-INF-05-15		2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA VARIACIÓN DEL FACTOR CAMIÓN MEDIANTE EL CONTROL DE SOBREPESO EN EL TRANSPORTE DE CARGA PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA		4. Fecha del Informe Julio, 2015	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
6. Notas complementarias			
7. Resumen <p><i>Desde la implementación de un mejor control del pesaje para los vehículos pesados que circulan por las carreteras de nuestro país, se ha identificado una tendencia de estabilización en el porcentaje de vehículos pesados que circulan con exceso de carga, y en consecuencia también de los factores camión; excepto en el eje tándem del vehículo T3-S3. Esto se demostró estadísticamente mediante el debido procesamiento de bases de datos recolectadas en diferentes estaciones de pesaje ubicadas en la red vial nacional durante el período 2008-2011.</i></p> <p><i>En el estudio se obtuvo que si se considera un porcentaje constante de incumplimiento en el exceso de las cargas, el factor camión de los vehículos C2, C3 y T3-S2 tiende a valores de 0,20 - 0,66 - 1,19, respectivamente.</i></p> <p><i>Se recomienda realizar controles de pesaje adecuados sobre el exceso de peso en el eje tándem del vehículo T3-S3, pues controlado de forma eficiente se proyecta una disminución de 0,17 en el valor del factor camión.</i></p> <p><i>En futuras investigaciones se analizará con más detalle la tendencia a seguir de los factores camión si se analiza cada una de las estaciones de pesaje de manera individual, tomando en consideración las variaciones temporales que quedaron fuera del alcance del presente estudio.</i></p>			
8. Palabras clave Factor camión, incumplimiento, estación de pesaje, regulación.		9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 61
11. Preparado por: Ing. Jaime Allen Monge, MSc Investigador-PITRA 		12. Colaboración: Efraín Sánchez Solano Ing. Catalina Vargas Sobrado	
13. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 2017/1/15	14. Revisado por: Lic. Owen Alejandro Gooden M. Asesor Legal Lanamime UCR, a.i.  Fecha: 2010/1/2015	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA  Fecha: 1/1	

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	OBJETIVO GENERAL	10
3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
4.	ESQUEMA CONCEPTUAL.....	10
5.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
6.	LIMITACIONES.....	12
7.	ANTECEDENTES	13
7.1.	ENCUESTA DE CARGA.....	13
7.2.	TIPOS DE EJES Y VEHÍCULOS.....	15
7.3.	REGULACIÓN DE PESOS.....	15
8.	MARCO DE REFERENCIA.....	17
8.1.	FACTOR CAMIÓN	17
8.1.1.	CLASES DE FACTOR CAMIÓN POR ANALIZAR.....	18
8.2.	ESTABILIZACIÓN DE DATOS	19
8.2.1.	REGRESIÓN LINEAL.....	19
8.2.2.	GRÁFICAS DE CONTROL / CARTAS DE CONTROL	20
9.	DESARROLLO	22
9.1.	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS QUE INCUMPLEN LA REGULACIÓN DE PESO	22
9.1.1.	TENDENCIA	22
9.1.2.	ESTABILIZACIÓN ESTADÍSTICA.....	25
9.1.2.1.	Vehículo C2	26
9.1.2.1.1.	Eje simple	26
9.1.2.1.2.	Eje dual.....	27
9.1.2.2.	Vehículo C3	29
9.1.2.2.1.	Eje simple	29
9.1.2.2.2.	Eje tándem.....	30
9.1.2.3.	Vehículo T3-S2.....	32
9.1.2.3.1.	Eje simple	32
9.1.2.3.2.	Eje tándem.....	33
9.1.2.4.	Vehículo T3-S3.....	35
9.1.2.4.1.	Eje simple	35

9.1.2.4.2. Eje tándem.....	36
9.1.2.4.3. Eje trídem	38
9.1.3. RESUMEN DE VALORES DE ESTABILIZACIÓN	39
9.2. FACTOR CAMIÓN	40
9.2.1. TENDENCIA	40
9.2.1.1. Vehículo C2.....	40
9.2.1.2. Vehículo C3.....	41
9.2.1.3. Vehículo T3-S2.....	42
9.2.1.4. Vehículo T3-S3.....	43
9.3. RELACIÓN ENTRE EL FACTOR CAMIÓN Y EL PORCENTAJE DE VEHÍCULOS CON INCUMPLIMIENTO DE PESO	43
9.3.1. ANÁLISIS DE REGRESIÓN ENTRE EL FACTOR CAMIÓN Y EL PORCENTAJE DE VEHÍCULOS CON INCUMPLIMIENTO DE PESO.....	44
9.3.1.1. Vehículo C2.....	44
9.3.1.2. Vehículo C3.....	45
9.3.1.3. Vehículo T3-S2.....	46
9.3.1.4. Vehículo T3-S3.....	47
10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
11. CONCLUSIONES.....	51
12. RECOMENDACIONES	52
13. REFERENCIAS.....	53
14. APÉNDICES.....	54
APÉNDICE 1. CARACTERIZACIÓN DEL TRÁNSITO	54
APÉNDICE 2. BASE DE DATOS UTILIZADA.....	56
APÉNDICE 3. SUPUESTOS MODELO DE REGRESIÓN POTENCIAL	58
APÉNDICE 4. REGRESIÓN MÚLTIPLE ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO EN LOS EJES PARA LOS VEHÍCULOS T3-S2 Y T3-S3.	60

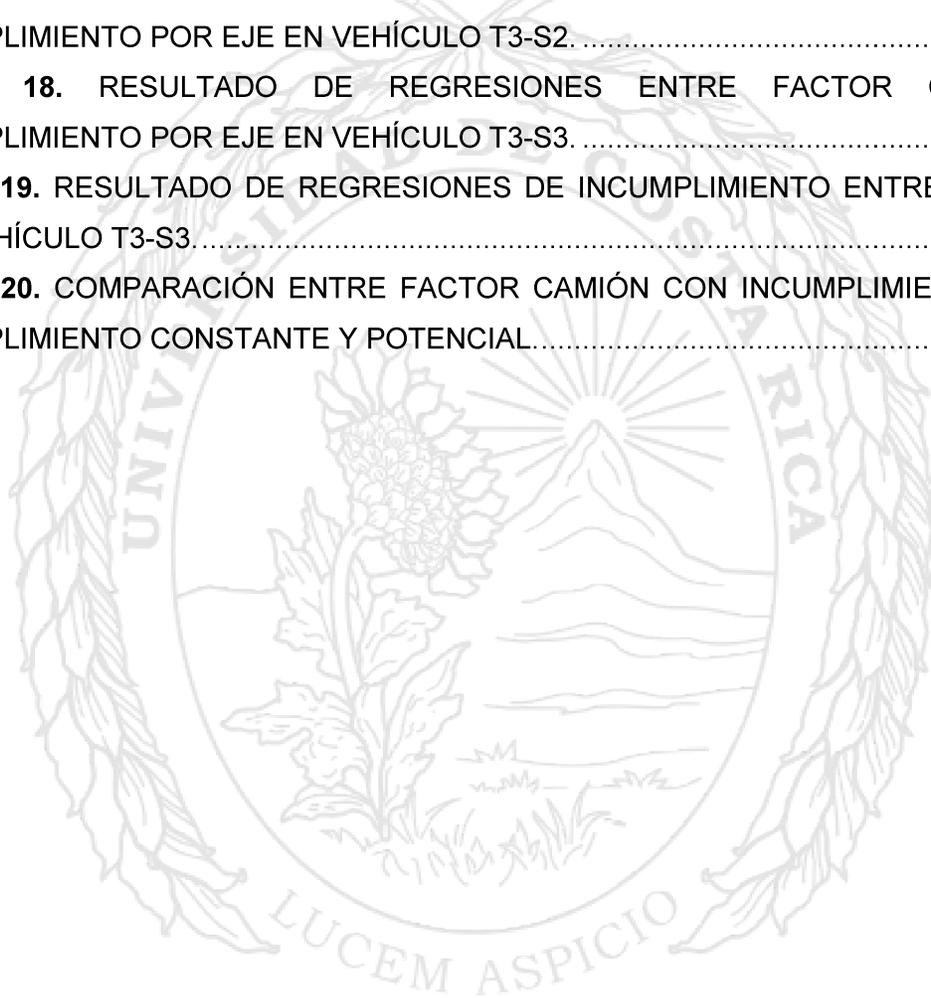


ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FACTORES CAMIÓN OBTENIDOS EN LA ENCUESTA DE CARGA REALIZADA EN EL 2007.	14
TABLA 2. TIPOS DE VEHÍCULOS Y EJES CON SUS RESPECTIVOS PESOS MÁXIMOS SEGÚN LA REGULACIÓN NACIONAL Y NORMATIVAS INTERNACIONALES.	16
TABLA 3. PRUEBAS TÍPICAS APLICADAS A LOS DATOS EN LAS CARTAS DE CONTROL.	21
TABLA 4. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO C2 EN EL EJE SIMPLE.	26
TABLA 5. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO C2 EN EL EJE DUAL.	28
TABLA 6. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO C3 EN EL EJE SIMPLE.	29
TABLA 7. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO VEHÍCULO C3 EN EL EJE TÁNDEM.	31
TABLA 8. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO T3-S2 EN EL EJE SIMPLE.	32
TABLA 9. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO T3-S2 EN EL EJE TÁNDEM.	34
TABLA 10. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO T3-S3 EN EL EJE SIMPLE.	35
TABLA 11. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO T3-S3 EN EL EJE TÁNDEM.	37
TABLA 12. VALORES DE REGRESIONES ANUALES DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL VEHÍCULO T3-S3 EN EL EJE TRÍDEM.	38
TABLA 13. RESUMEN DE LOS HALLAZGOS DE ESTABILIZACIÓN DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO.	40
TABLA 14. RESUMEN DE LOS HALLAZGOS DE ESTABILIZACIÓN DEL FACTOR CAMIÓN.	43
TABLA 15. RESULTADO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO POR EJE EN VEHÍCULO C2.	44



TABLA 16. RESULTADO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO POR EJE EN VEHÍCULO C3.....	45
TABLA 17. RESULTADO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO POR EJE EN VEHÍCULO T3-S2.....	46
TABLA 18. RESULTADO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO POR EJE EN VEHÍCULO T3-S3.....	47
TABLA 19. RESULTADO DE REGRESIONES DE INCUMPLIMIENTO ENTRE LOS EJES DEL VEHÍCULO T3-S3.....	48
TABLA 20. COMPARACIÓN ENTRE FACTOR CAMIÓN CON INCUMPLIMIENTO CERO, INCUMPLIMIENTO CONSTANTE Y POTENCIAL.....	50



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA METODOLÓGICO	11
FIGURA 2. GRÁFICA DE CONTROL DE DATOS INDIVIDUALES Y RANGOS MÓVILES ..	20
FIGURA 3. PORCENTAJE VEHÍCULOS C2 CON EXCESO DE PESO DESDE NOVIEMBRE DEL 2008 A OCTUBRE 2011.	22
FIGURA 4. PORCENTAJE VEHÍCULOS C3 CON EXCESO DE PESO DESDE NOVIEMBRE DEL 2008 A OCTUBRE 2011.	23
FIGURA 5. PORCENTAJE VEHÍCULOS T3-S2 CON EXCESO DE PESO DESDE NOVIEMBRE DEL 2008 A OCTUBRE 2011.	23
FIGURA 6. PORCENTAJE VEHÍCULOS T3-S3 CON EXCESO DE PESO DESDE NOVIEMBRE DEL 2008 A OCTUBRE 2011.	24
FIGURA 7. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO C2 EN EL EJE SIMPLE.....	26
FIGURA 8. GRÁFICO DE CONTROL DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS C2 EN EL EJE SIMPLE.	27
FIGURA 9. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO C2 EN EL EJE DUAL.	27
FIGURA 10. GRÁFICO DE CONTROL DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS C2 EN EL EJE DUAL.....	28
FIGURA 11. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO C3 EN EL EJE SIMPLE.....	29
FIGURA 12. GRÁFICO DE CONTROL DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS C3 EN EL EJE SIMPLE.	30
FIGURA 13. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO C3 EN EL EJE TÁNDEM.....	30
FIGURA 14. GRÁFICO DE CONTROL DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS C3 EN EL EJE TÁNDEM.	31
FIGURA 15. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO T3-S2 EN EL EJE SIMPLE.....	32
FIGURA 16. GRÁFICO DE CONTROL DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL EJE SIMPLE, VEHÍCULOS T3-S2.	33

FIGURA 17. REGRESIÓN LINEAL ANUAL EN PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DEL EJE TÁNDEM DEL VEHÍCULO T3-S2.....	33
FIGURA 18. GRÁFICO DE CONTROL DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS T3-S2 EN EL EJE TÁNDEM.	34
FIGURA 19. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO T3-S3 EN EL EJE SIMPLE.....	35
FIGURA 20. GRÁFICO DE CONTROL DE PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO EN EJE SIMPLE, VEHÍCULOS T3-S3.	36
FIGURA 21. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO T3-S3 EN EL EJE TÁNDEM.....	36
FIGURA 22. GRÁFICO DE CONTROL I-MR DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS T3-S2 EN EL EJE TÁNDEM.	37
FIGURA 23. REGRESIÓN LINEAL ANUAL PARA EL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DEL VEHÍCULO T3-S3 EN EL EJE TRÍDEM.	38
FIGURA 24. GRÁFICO DE CONTROL I-MR DEL PORCENTAJE DE INCUMPLIMIENTO DE PESO DE VEHÍCULOS T3-S3 EN EL EJE TRÍDEM.....	39
FIGURA 25. FACTOR CAMIÓN PROMEDIO EN EL VEHÍCULO DE CARGA C2.	41
FIGURA 26. FACTOR CAMIÓN PROMEDIO EN EL VEHÍCULO DE CARGA C3.	41
FIGURA 27. FACTOR CAMIÓN PROMEDIO EN EL VEHÍCULO DE CARGA T3-S2.	42
FIGURA 28. FACTOR CAMIÓN PROMEDIO EN EL VEHÍCULO DE CARGA T3-S3.	43
FIGURA 29. GRÁFICO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO EN LOS EJES DEL VEHÍCULO C2.....	44
FIGURA 30. GRÁFICO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO EN LOS EJES DEL VEHÍCULO C3.....	45
FIGURA 31. GRÁFICO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO EN LOS EJES DEL VEHÍCULO T3-S2.....	46
FIGURA 32. GRÁFICO DE REGRESIONES ENTRE FACTOR CAMIÓN E INCUMPLIMIENTO EN LOS EJES DEL VEHÍCULO T3-S3.....	47
FIGURA 33. GRÁFICO DE REGRESIONES DE INCUMPLIMIENTO EN LOS EJES DEL VEHÍCULO T3-S3.....	48

1. INTRODUCCIÓN

La Red Vial de nuestro país corresponde a uno de los principales medios de transporte terrestre tanto de personas como de mercancías, por lo que es de gran importancia mantenerla en buen estado y así brindar condiciones de desplazamiento que sean seguras y confortables para los usuarios.

Actualmente, la mayoría de la carga que es recibida en los puertos marítimos o en las fronteras terrestres es transportada por medio de vehículos pesados a diferentes destinos del país, los cuales en muchas ocasiones viajan con sobrepeso según los pesos máximos permitidos en la legislación costarricense por medio del Decreto Ejecutivo 31363-MOPT y sus respectivas modificaciones.

Los vehículos pesados son el tipo de vehículos que mayor influencia tienen en el deterioro de los pavimentos flexibles, ya que son aquellos que transmiten la mayor cantidad de cargas a una estructura de pavimento (esto aunado a la influencia de otros factores negativos como falta de drenajes adecuados, entre otros); sin embargo, si estas cargas son consideradas en el diseño de la estructura de pavimento, la calzada será resistente al tránsito que se desplace sobre ella.

El mayor inconveniente se encuentra en que el sobrepeso de un vehículo pesado afecta en gran medida el estado de una carretera, *de tal manera que el deterioro de la calzada aumenta de manera exponencial si debe soportar mayores cargas para las cuales fue diseñado (condiciones de sobrepeso)*, razón por la cual un adecuado control de pesaje interviene directamente en la vida útil de los pavimentos, es decir, corresponde a una forma de controlar o mantener en buenas condiciones uno de los activos del Estado.

En estudios anteriores (Allen & Badilla, 2011) se ha demostrado una tendencia a la estabilización del porcentaje de vehículos pesados que exceden los pesos máximos permitidos, en consecuencia del establecimiento de mecanismos que regulan la carga que transita por los principales corredores viales de nuestro país.

Por lo tanto, con este informe se pretende analizar de forma exploratoria si esta regulación de carga por parte del gobierno ha generado alguna variación favorable del factor camión de los tipos de vehículos C2, C3, T3-S2 y T3-S2.

2. OBJETIVO GENERAL

Analizar la variación de los factores camión en rutas nacionales que disponen de sistemas de control del peso de los vehículos pesados, de manera tal que se pueda conocer la carga real que experimentarán los pavimentos en su etapa de operación, y así contribuir con un adecuado diseño de pavimentos.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el efecto que genera la implementación de controles de pesaje en ciertas rutas nacionales, sobre el porcentaje de incumplimiento de peso para cada tipo de vehículo pesado y sus tipos de eje.
- Determinar estadísticamente la tendencia hacia la estabilización en el porcentaje de incumplimiento de peso por vehículo y tipo de eje.
- Identificar el efecto que posee en los valores de factor camión la implementación de control de peso sobre las rutas nacionales.
- Establecer la relación entre el factor camión y el porcentaje de incumplimiento de peso por cada tipo de vehículo y eje.
- Determinar aproximadamente el valor del factor camión de acuerdo con un porcentaje de cantidad de vehículos que exceden la regulación permitida sobre las rutas nacionales que poseen control de pesaje.

4. ESQUEMA CONCEPTUAL

En la Figura 1 se presenta el esquema metodológico conceptual implementado para realizar la investigación referente a la variación del factor camión.

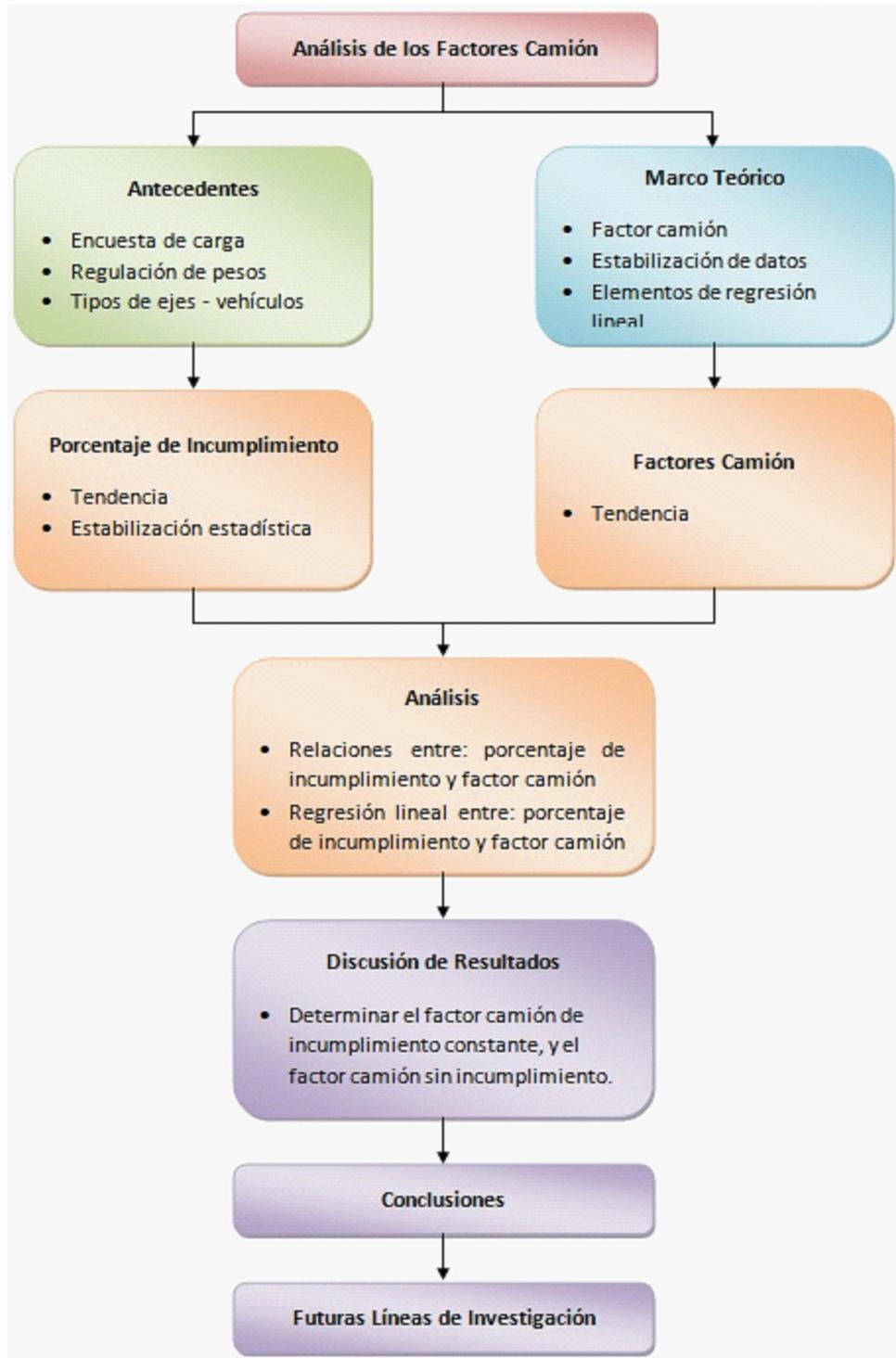


Figura 1. Esquema metodológico.

5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En la investigación realizada por Allen y Badilla (2011), referente a la encuesta de carga en el período 2008-2011 sobre las principales vías a nivel nacional con controles de pesaje, se evidenció la existencia de un porcentaje considerable de vehículos de carga que sobrepasan los niveles máximos de pesos permitidos por la regulación nacional. Además, se infiere un comportamiento de estabilización sobre los porcentajes de vehículos pesados que exceden el peso máximo establecido.

Producto de lo anterior, surge la necesidad de estudiar el comportamiento de variación del factor camión de forma más detallada, analizando las relaciones existentes entre los factores camión y el porcentaje de vehículos de carga que excede la regulación.

En la presente investigación se expone el impacto que el exceso de carga produce en las vías nacionales; por lo tanto, se establece una comparación entre los **factores camión con incumplimiento 0%** y los **factores camión con incumplimiento constante** (calculados mediante la estabilización del porcentaje de aquellos vehículos que exceden la regulación).

En la actualidad no existe ninguna investigación que demuestre estadísticamente la estabilización del porcentaje de vehículos que exceden la regulación nacional de transporte de carga, ni su relación con los factores camión, por ende se considera un aporte considerable para el diseño de pavimentos y la caracterización de las cargas que circulan realmente sobre la red vial nacional. La estabilidad mencionada es una consecuencia de la regulación estatal de pesos, donde se espera que la convergencia sea cercana al límite de peso máximo permitido, en el marco teórico se explica con mayor detalle los valores de peso máximo permitidos por tipo de eje y vehículo.

6. LIMITACIONES

El análisis de los factores camión, con y sin incumplimiento, se limita a los valores obtenidos para cada tipo de vehículo y eje a nivel nacional, es decir, no se detalla el comportamiento por cada estación de pesaje.

Se consideran únicamente los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3 (más adelante se definen estas categorías), debido a que estas cuatro categorías son las que representan más

del 95% de todos los vehículos de carga inspeccionados en las estaciones de pesaje (Allen & Badilla, 2011).

En el Apéndice 1, se presenta la caracterización gráfica de los tipos de vehículos analizados, así como su distribución y frecuencia por estación de pesaje y año. Además, el estudio se limita a los datos suministrados por las estaciones de pesaje en un período que se extiende desde noviembre del 2008 hasta octubre del 2011.

La base de datos utilizada comprende aproximadamente el pesaje y control de 5,2 millones de vehículos en el período de análisis (en el Apéndice 2, se muestra un resumen de la base de datos utilizada).

7. ANTECEDENTES

7.1. Encuesta de carga

Una encuesta de carga constituye una herramienta para determinar el efecto tangible de las cargas aplicadas sobre las estructuras de pavimento. Existen 3 niveles de precisión para estimar las características del tráfico (Ulloa, Allen, Badilla & Sibaja, 2008).

- *Nivel 1:* Se dispone de un muy buen conocimiento de las características del tráfico (intensidad, composición y velocidad) tanto en el pasado como en el futuro. Requiere un registro y análisis histórico del volumen y carga específica de cada zona en particular.
- *Nivel 2:* Se dispone de un conocimiento medio de las características del tráfico tanto en el pasado como en el futuro. Se debe conocer cualquier variación en el volumen y cargas de tráfico a nivel estacional (temporal).
- *Nivel 3:* Se dispone de un conocimiento pobre de las características del tráfico tanto en el pasado como en el futuro. Se tiene muy poca información del volumen y las cargas.

En el caso de Costa Rica se determinó la necesidad de aplicar la herramienta de evaluación de encuestas de carga debido a la Guía de Diseño de la AASHTO en 1993, donde se planteó la necesidad de tomar en cuenta las cargas reales a las cuales será sometido el pavimento. Por otra parte, en la implementación de la guía de diseño MEPGD 2002

(*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) se utilizan las encuestas para el diseño de pavimentos.

En el año 2007, se realizó el primer acercamiento al estudio de las cargas a las cuales estaban sometidos los pavimentos nacionales mediante encuestas de carga (Ulloa, Allen, Badilla, & Sibaja, 2008). En este documento los autores establecen que el exceso de peso en los vehículos de carga tiene un impacto negativo sobre el desempeño de los pavimentos, y contribuyen al deterioro prematuro de las vías nacionales. Producto de la investigación se logró inferir los factores camión típicos por tipo de vehículo, eje, y ruta, (más adelante se explica la terminología empleada), a los cuales están sometidas las vías nacionales. En la Tabla 1, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1. Factores camión obtenidos en la encuesta de carga realizada en el 2007.

Ruta	Tipo de vehículo					
	Pickup	C2+	C2	Bus-C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (peaje)	0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)	0,011	0,016	0,902	3,68	1,971	3,701
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)	0,011	0,233	0,723	2,911	2,834	4,153
Ruta 2 - Florencio del Castillo (peaje)	0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
Ruta 2 - Pérez Zeledón (tránsito)	0,012	0,014	0,446	1,858	3,33	2,08
Ruta 27 - Próspero Fernández (peaje)	0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
Ruta 32 - Braulio Carrillo (peaje)	0,011	0,022	0,695	3,692	2,271	4,229
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-	0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
Promedio	0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,23
Desviación estándar	0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Fuente: (Ulloa, Allen, Badilla, & Sibaja, 2008).

Además, Allen & Badilla (2011) realizaron un estudio más detallado sobre las cargas reales de los pavimentos nacionales, evidenciando en series de tiempo, el porcentaje de vehículos que excede el peso reglamentario máximo. Analizaron el comportamiento de las cargas de los vehículos en el período que comprende de noviembre del 2008 y hasta octubre del 2010, en las estaciones de pesaje. De la investigación realizada, los autores concluyeron que existía una tendencia hacia la baja y estabilización en los porcentajes de vehículos que excedían la regulación de peso, esto producto de la toma de conciencia por parte de los conductores debido a la reglamentación que se les aplicaba.

7.2. Tipos de ejes y vehículos

La clasificación oficial de tipos de ejes y vehículos es dictada por la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), la cual consiste en lo siguiente.

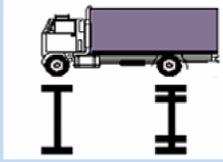
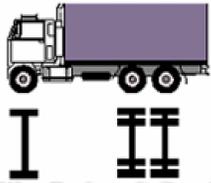
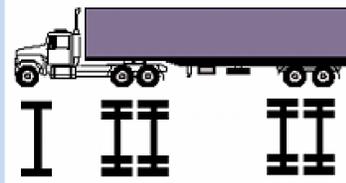
- Liviano: automóviles para personas, jeeps, busetas livianas.
- Buses: todos los buses que tienen doble llanta en el eje trasero.
- Carga liviana: pick-ups, carros acondicionados para cargas pequeñas. No se refiere necesariamente a vehículos con placa de carga liviana.
- Tándem (2 ejes): incluye todos los camiones con dos ejes doble llanta en la parte posterior.
- Trídem (3 ejes): incluye todos los camiones con tres ejes, tres ejes de doble llanta en la parte posterior.
- 5 ejes: incluye tracto-camiones (furgones), dos parejas de dos ejes con doble llanta.

7.3. Regulación de pesos

La regulación de pesos oficial en Costa Rica se rige según lo dispuesto en el Decreto 31363 denominado *"Reglamento de Circulación por Carretera en base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga"*. En dicho documento se presenta la configuración de ejes y pesos legales para los diferentes tipos de vehículos que circulan en el país.

Conforme a lo expuesto por Allen y Badilla (2011), en la Tabla 2 se detalla la regulación por peso para cada tipo de vehículo y eje en estudio, así como su comparación con normativas internacionales.

Tabla 2. Tipos de vehículos y ejes con sus respectivos pesos máximos según la regulación nacional y normativas internacionales.

Tipo	Configuración del vehículo y peso por eje (Ton)	PVB ⁽¹⁾ (Ton)
C2		
México (Nom 2008)	6,5 11	17,5
Estados Unidos	5,5 9	14,5
Costa Rica (2005)	6,0 10	16,0
C3		
México (Nom 2008)	6,5 18,0	24,5
Estados Unidos	5,5 15,5	21,0
Costa Rica (2005)	6,0 16,5	22,5
T3-S2		
México (Nom 2008)	6,5 18 17	41,5
Estados Unidos	5,5 15,5 15,5	36,5
Costa Rica (2005)	6,0 16,5 16,5	39,0
T3-S3		
México (Nom 2008)	6,5 18 23,5	48
Estados Unidos	5,5 15,5 19,0	40
Costa Rica (2005)	6,0 16,5 23,0	45,5

⁽¹⁾ **PVB:** Peso vehicular bruto.

Fuente: Allen & Badilla (2011)

8. MARCO DE REFERENCIA

8.1. Factor camión

El factor camión se determina según lo establecido en la Guía de diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993, y corresponde a un índice de daño que se transfiere al pavimento (relación esfuerzo-deformación); su cálculo se basa en los factores de equivalencia de carga (LEF, por sus siglas en inglés) calculados según la Ecuación 1 (Ulloa, Allen, Badilla & Sibaja, 2008).

$$\text{Factor equivalencia de carga} = \left(\frac{\text{Peso del eje medido}}{\text{Peso del eje patrón}} \right)^4 \quad [1]$$

Los LEF expresan el daño que produce cada eje sobre un pavimento, y depende básicamente de: peso y tipo de eje (simple, tándem, tridem), tipo de estructura (rígido o flexible) y capacidad estructural. Para el caso particular de esta investigación, en los cálculos de los factores camión, se emplearon los factores equivalentes de daño usados por el *Asphalt Institute* para pavimentos flexibles, un Índice de Serviciabilidad Final (pt) = 2,5 y un Número estructural (SN) = 5.

Una vez obtenido el factor de equivalencia de carga, es posible determinar el factor camión por medio de la Ecuación 2. En síntesis, el factor camión es la suma de los LEF de cada vehículo, y representa el daño aproximado en términos del deterioro que produce el vehículo.

$$\text{Factor camión promedio} = \frac{\sum(\text{Número de ejes} * \text{Factor de equivalencia de carga})}{\text{Número de vehículos encuestados}} \quad [2]$$

En la guía de diseño AASHTO 1993, los factores camión se utilizan para determinar los ejes equivalentes de carga simples (ESALs). Los ESALs permiten determinar el daño relativo del paso de un tipo de eje y carga cualquiera, en relación con el daño que produce un eje simple estándar (Badilla & Molina, 2009).

En general, en Costa Rica se utiliza un eje estándar de 80 kN (18,000 lb.), es decir 1 ESAL (1 eje estándar de diseño). El daño estructural se calcula dependiendo de la cantidad de veces que los ejes estándar atraviesan una sección de carretera, de esta forma los ESALs para cada tipo de vehículo se calculan basados en la Ecuación 3.

$$ESALS_{(\text{por vehículo})} = \sum TPDA * \% \text{Distribución por vehículo} * \text{Factor camión}_{\text{por vehículo}} \quad [3]$$

8.1.1. Clases de factor camión por analizar

Para analizar la variación de los factores camión en las principales rutas nacionales del país, en la presente investigación se definen dos tipos de factores camión:

- **Factor camión con incumplimiento constante ($FC_{INC.CTE}$):** Este factor camión es aquel que se determina de acuerdo con el porcentaje de vehículos que exceden las cargas máximas permitidas legalmente. Es decir, considera las cargas reales que transitan diariamente sobre los pavimentos de la red vial nacional, registradas mediante las encuestas de carga provenientes de las estaciones de pesaje.

Para encontrar este valor, se sigue el siguiente procedimiento:

- Determinar regresiones de ajuste entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso. Este análisis se realiza en periodos mensuales.
- Determinar si existe un valor de estabilización de vehículos que exceden el peso regulatorio permitido, y en caso de que exista, se calculará.
- Finalmente, se calcula el factor camión con incumplimiento constante mediante la sustitución del porcentaje de vehículos con exceso estabilizado en la ecuación de regresión entre factor camión y porcentaje de vehículos que exceden el peso regulatorio.

Este valor del factor camión con incumplimiento constante corresponde a un indicador del daño que los vehículos ejercen sobre el pavimento, en caso de existir un porcentaje estabilizado de vehículos que exceden la regulación de peso estatal.

- **El factor camión con incumplimiento 0%,** se determina al considerar nula la cantidad de vehículos que exceden el peso permitido, en la ecuación de regresión entre factor camión y el porcentaje de vehículos que exceden el peso regulatorio.

El valor del factor camión con incumplimiento 0%, corresponde a un indicador del daño que los vehículos ejercen sobre el pavimento en caso de existir un 100% de cumplimiento en la regulación de peso por eje.

8.2. Estabilización de datos

Tal y como se ha mencionado en el documento, es de importancia para la investigación determinar el porcentaje de vehículos en el que se estabiliza la excedencia de pesos permitidos. En la presente sección se detallan las técnicas utilizadas para la evaluación de la estabilidad de los datos.

8.2.1. Regresión lineal

La regresión lineal consiste en una técnica estadística para determinar la relación entre dos o más variables, y es representada algebraicamente como se muestra en la Ecuación 4.

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad [4]$$

Donde se tiene que (Battelle Memorial Institute, 2012):

- x : variable independiente
- y : variable dependiente
- α : intercepto de la ecuación
- β : pendiente de la regresión
- ε : error experimental.

Principios básicos de la regresión lineal

- La extrapolación de resultados fuera del rango analizado no es necesariamente válida.
- Debe existir una relación real de los datos.

Pendiente

La pendiente β es de fundamental interés en el análisis de regresión dado que brinda el cambio promedio en y por una unidad de cambio en x .

Coficiente de determinación

El coeficiente de determinación R^2 , indica el nivel lineal de ajuste de la regresión en un conjunto determinado de datos; sus valores varían entre 0 y 1, siendo 1 cuando el modelo de regresión describe el comportamiento de los datos perfectamente (Montgomery & Runger,

2006). Cuando el valor R^2 es igual a cero, se tiene que la relación entre ambas variables no es de tipo lineal.

8.2.2. Gráficas de control / Cartas de control

Las cartas de control son una herramienta para analizar la variación en la mayoría de los procesos, y han sido difundidas exitosamente en países dentro de una amplia variedad de situaciones para el control de procesos.

Las cartas de control se enfocan en la detección de variaciones especiales o atribuibles en los procesos, llamadas *variaciones especiales* y son ajenas a la variabilidad natural del proceso. Un proceso se puede determinar estable cuando en su variación solo existen causas naturales o aleatorias. En este caso el comportamiento del proceso es predecible. Las gráficas de control pueden detectar la existencia de causas especiales de variación.

Existen diversos tipos de cartas de control, por ejemplo, por variables o atributos. En el caso de las cartas de control por variables, se puede realizar por medias, rangos, desviación estándar y muestras individuales. En el caso de los atributos, se puede realizar gráficas por proporciones, y número o promedio de defectos por unidad.

En esta investigación se hace énfasis en las cartas de control por variables individuales con rango móvil. En la Figura 2, se muestra un ejemplo de gráfica de control.

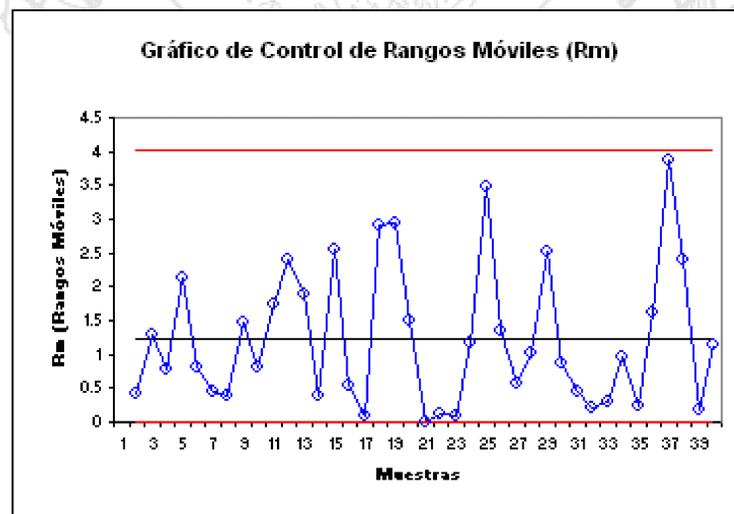


Figura 2. Gráfica de control de datos individuales y rangos móviles.

Como se muestra en la figura anterior, se calculan los límites de control basados en tres desviaciones estándar (o cualquier medida aceptada) de los datos. Una de las pruebas consiste en rechazar cualquier muestra que se encuentre fuera de estos límites de control. Se muestra además, una línea central la cual represente el promedio de los datos analizados.

En general, las gráficas de control evalúan pruebas para analizar la estabilidad de los datos, por lo que en la Tabla 3 se muestran las pruebas típicas evaluadas.

Tabla 3. Pruebas típicas aplicadas a los datos en las cartas de control.

Prueba	K
1 punto más que K desviaciones estándar desde la línea central	3
K puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central	9
K puntos consecutivos, todos ascendentes o todos descendentes	6
K puntos consecutivos, alternando hacia arriba y hacia abajo	14
K de K + 1 puntos > 2 desviaciones estándar desde la línea central (mismo lado)	2
K de K + 1 puntos > 1 desviación estándar desde la línea central (mismo lado)	4
K puntos consecutivos dentro de 1 desviación estándar de la línea central (cualquier lado)	15
K puntos consecutivos > 1 desviación estándar desde la línea central (cualquier lado)	8

Fuente: (Montgomery & Runger, 2006).

Montgomery (2006), establece que en las gráficas de control los límites representan la variabilidad natural o inherente del proceso. Se espera que en un proceso estable, los datos deban oscilar de forma aleatoria alrededor de la línea central y al menos deben encontrarse dentro de los límites de control.

Dentro de las bandas o límites de control se captura o incorpora en su rango el comportamiento aleatorio del error, e identifican los cambios no aleatorios del proceso. Para el caso específico de esta investigación, desviarse de los rangos de control corresponde a la no estabilización de los datos, ya que intervienen variaciones no aleatorias en el comportamiento de los datos.

9. DESARROLLO

9.1. Porcentaje de vehículos que incumplen la regulación de peso

En la presente sección se estudia el comportamiento del porcentaje de vehículos de carga que excede la regulación nacional de peso. Para esto, se realizan análisis mensuales detallados por tipo de eje de cada tipo de vehículo, como análisis de la pendiente de regresión lineal y gráficas de control, descritas en el marco teórico.

9.1.1. Tendencia

En las siguientes gráficas, se muestra la tendencia del porcentaje de incumplimiento con su variación temporal para los tipos de vehículos: C2, C3, T3-S2 y T3-S3. Además, se realiza un análisis del comportamiento de la variación temporal utilizando el modelo de regresión potencial mostrado en la Ecuación 5, cuando mejor se ajuste a la serie de datos disponibles.

$$y = \alpha x^\beta \quad [5]$$

La variable y corresponde al porcentaje de incumplimiento de peso promedio de determinado vehículo, y la variable x corresponde al mes en el cual se realizó la medición, iniciando con valor de $x = 1$ en noviembre del 2008.

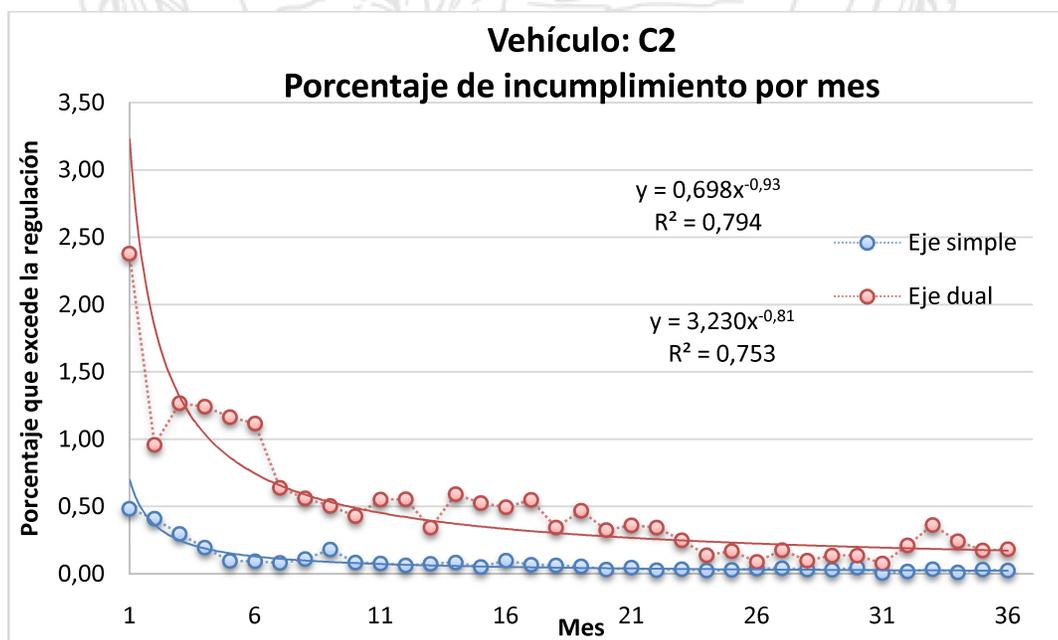


Figura 3. Porcentaje vehículos C2 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011.

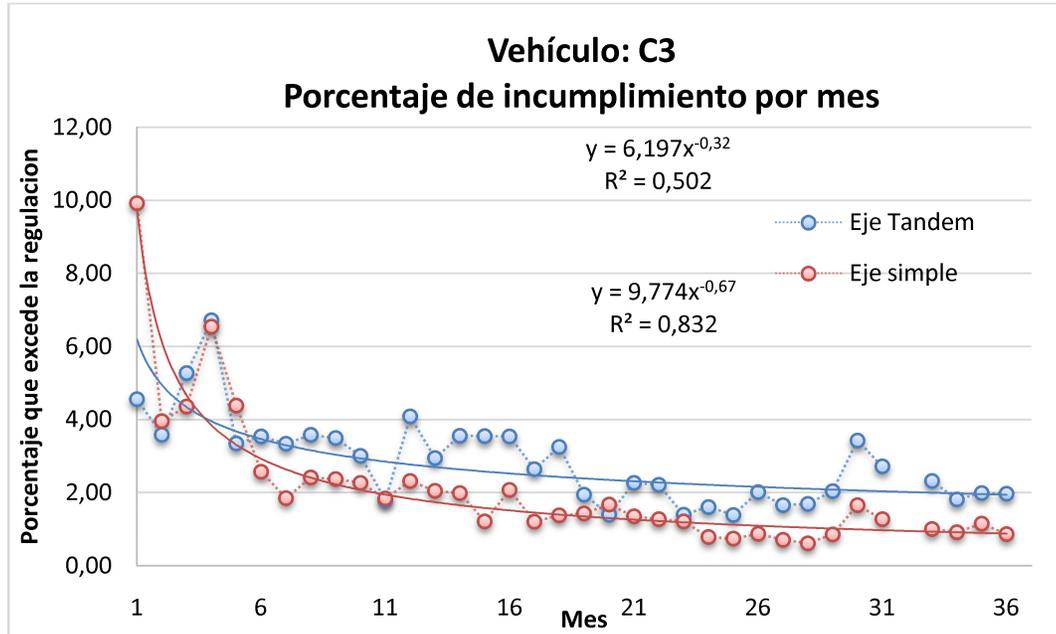


Figura 4. Porcentaje vehículos C3 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011.

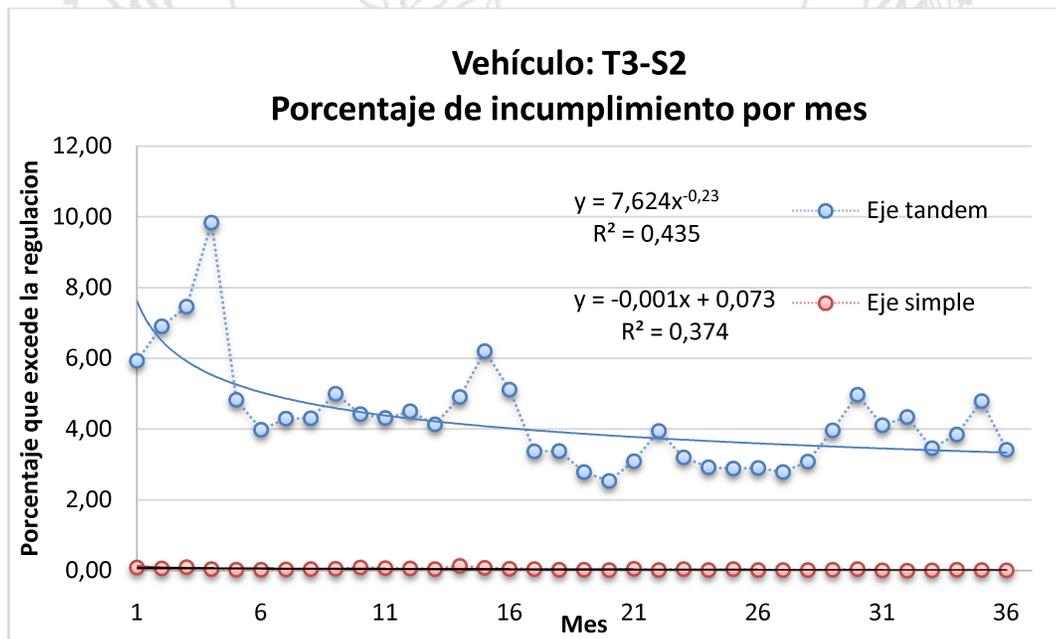


Figura 5. Porcentaje vehículos T3-S2 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011.

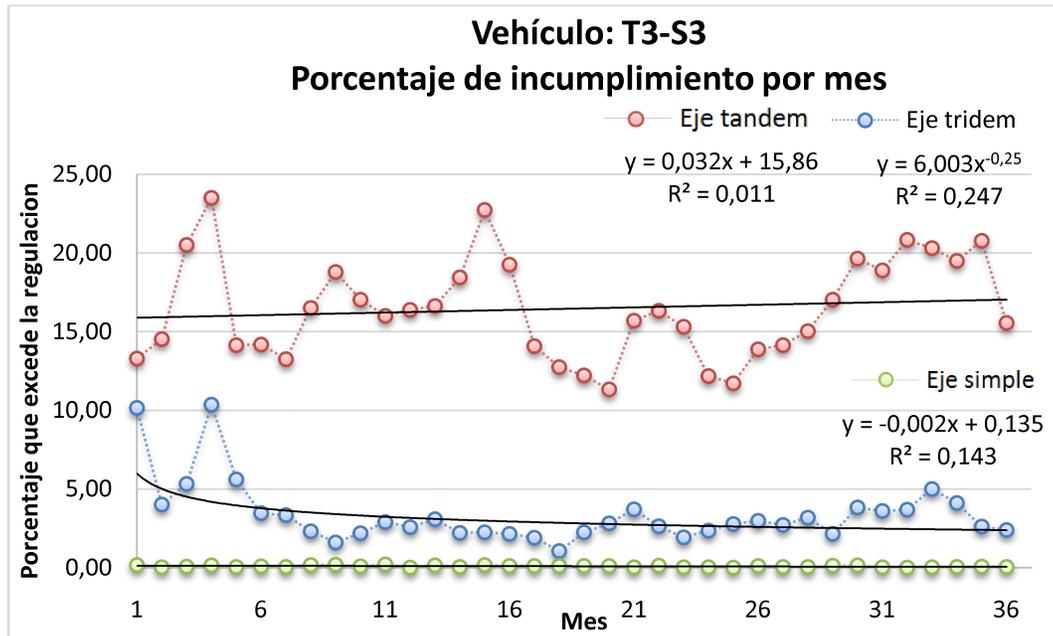


Figura 6. Porcentaje vehículos T3-S3 con exceso de peso desde noviembre del 2008 a octubre 2011.

En la Figura 3, se evidencia en el vehículo tipo C2 una disminución marcada en el porcentaje de vehículos con exceso de carga a lo largo del período analizado; en ambos ejes (simple y dual), además, en el último año el porcentaje de exceso tiende a la estabilización.

De acuerdo con la Figura 4, el comportamiento del vehículo tipo C3 es similar al evidenciado para el vehículo C2, se da una marcada disminución en el porcentaje que excede la regulación y se alcanza un porcentaje de vehículos con exceso estabilizado en el mes 36. Para el mes 32 (junio del 2011), se obtuvo un comportamiento inesperado de incumplimiento de 7,41%, el cual por motivo de análisis fue excluido para estudiar el comportamiento típico de los datos. Para este caso se presenta un comportamiento cíclico del porcentaje de incumplimiento.

Por otro lado, según la gráfica de la Figura 5, el vehículo T3-S2 posee un comportamiento diferente para ambos ejes; en el caso del eje tándem, se da una disminución en el porcentaje de incumplimiento, y en el eje simple, siempre se mantuvo constante en todo el período de análisis, con valores cercanos al 0% de exceso.

Por último, en el caso del vehículo T3-S3 mostrado en la Figura 6, se obtienen comportamientos diferentes para cada uno de sus tres ejes: simple, tándem y tridem. En el eje tridem se evidencia una disminución en el porcentaje de exceso durante los primeros 9 meses del análisis, luego, el comportamiento se mantiene constante con una mínima tendencia a la baja.

En el eje tándem no se evidencia ningún efecto de estabilización, por el contrario, se evidencia una tendencia mínima al aumento del porcentaje de incumplimiento. Muchos de estos casos corresponden al hecho de que los transportistas deciden hacer caso omiso a la regulación de carga establecida legalmente.

Finalmente, al igual que el eje simple del vehículo T3-S2, el incumplimiento en el eje simple del vehículo T3-S3 se mantuvo constante durante el período de análisis con valores cercanos al 0% de exceso.

9.1.2. Estabilización estadística

Como análisis adicional y con el propósito de determinar si los valores tienden hacia un valor específico y si se da una variación anual de este comportamiento, para cada eje de cada tipo de vehículo se estudiará el efecto de la estabilización de los datos mediante regresiones lineales y gráficas de control anuales.

La división del análisis anual se realiza debido a la disponibilidad de los datos suministrados de las estaciones de pesaje, de manera que se analiza en un rango de noviembre a octubre del año siguiente. En este análisis de estabilización estadística se utiliza el procedimiento explicado en el punto 7.1.1 donde se analiza mediante regresión lineal la significancia del modelo utilizando el mes como regresor del porcentaje de vehículos con exceso de peso.

9.1.2.1. Vehículo C2

9.1.2.1.1. Eje simple

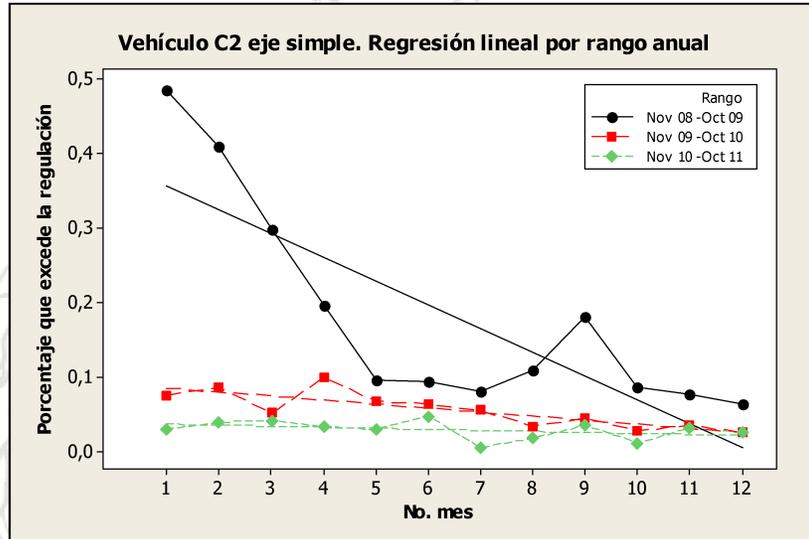


Figura 7. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo C2 en el eje simple.

Tabla 4. Valores de regresiones anuales del porcentaje de incumplimiento del vehículo C2 en el eje simple.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	0,1818	$y = -0,032x + 0,3895$ $R^2 = 0,6591$
	Desv. Est.	0,1420	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	0,0560	$y = -0,0054x + 0,0912$ $R^2 = 0,6836$
	Desv. Est.	0,0236	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	0,0295	$y = -0,0014x + 0,0385$ $R^2 = 0,1614$
	Desv. Est.	0,0124	

Mediante el análisis de regresión anual por rangos, se evidencia una estabilización marcada de los porcentajes de vehículos que exceden la regulación por mes, ya que la pendiente del rango analizado disminuye con respecto al anterior.

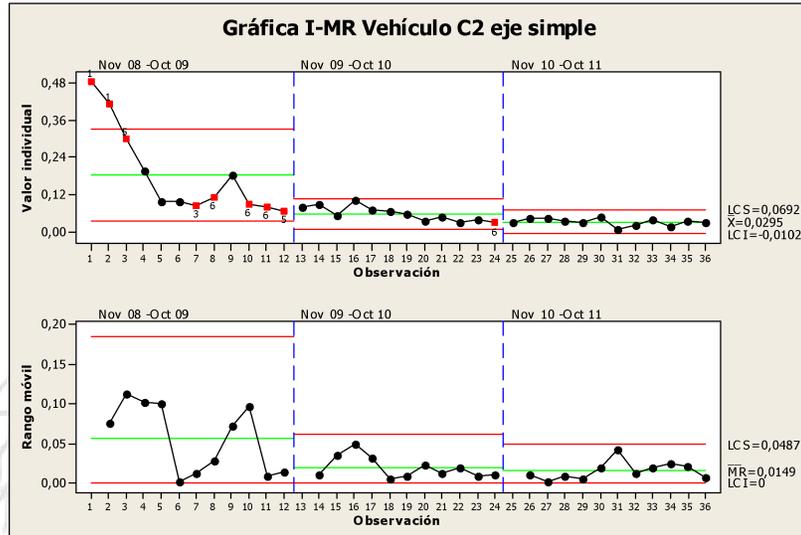


Figura 8. Gráfico de control del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos C2 en el eje simple.

En el gráfico de control de valores individuales y rango móvil, se evidencia una disminución en el promedio anual del porcentaje de incumplimiento, alcanzando su valor mínimo en el rango “Nov 10-Oct 11”. El valor estabilizado oscila naturalmente alrededor del 0,0295% de exceso anual, sin la evidencia de variaciones atípicas o atribuibles.

9.1.2.1.2. Eje dual

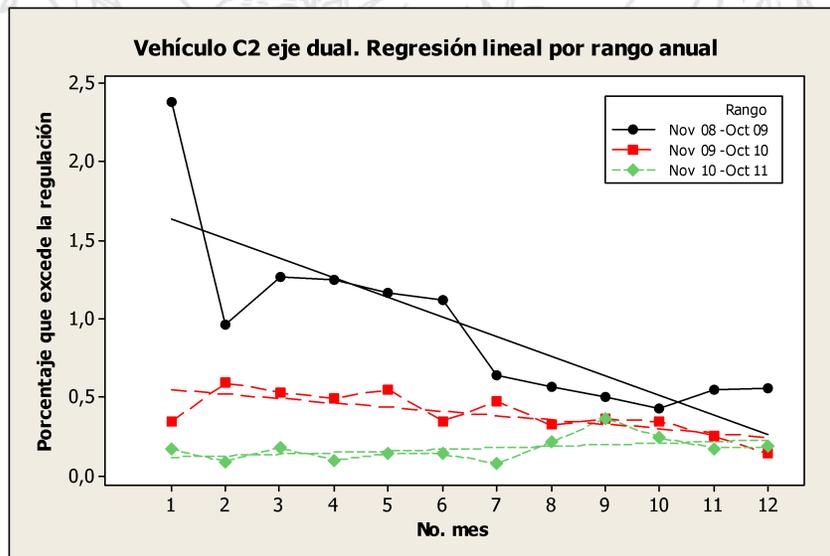


Figura 9. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo C2 en el eje dual.

Tabla 5. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo C2 en el eje dual.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	0,9485	$y = -0,1244x + 1,7572$ $R^2 = 0,6636$
	Desv. Est.	0,5506	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	0,3958	$y = -0,0273x + 0,5734$ $R^2 = 0,5456$
	Desv. Est.	0,1334	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	0,1725	$y = 0,01x + 0,1076$ $R^2 = 0,2129$
	Desv. Est.	0,0780	

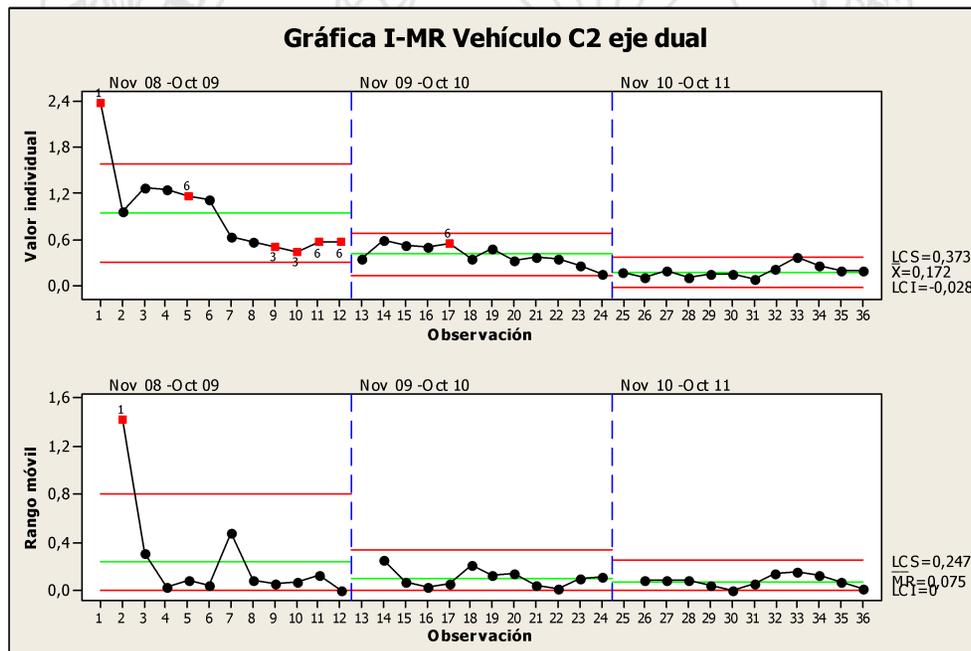


Figura 10. Gráfico de control del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos C2 en el eje dual.

Al igual que el eje simple del vehículo C2, el eje dual posee una disminución en la pendiente de cada regresión lineal en cada rango respecto al anterior. Además, en el gráfico de control se afirma el comportamiento de estabilización en el último año, no se evidencian variaciones atípicas en el porcentaje de exceso, y se encuentran alrededor de 0,172% de vehículos que exceden la regulación.

9.1.2.2. Vehículo C3

9.1.2.2.1. Eje simple

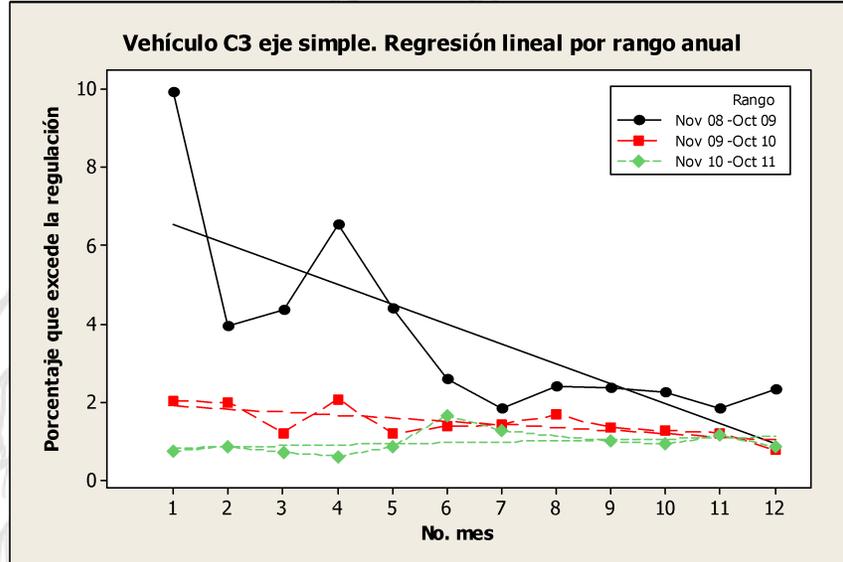


Figura 11. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo C3 en el eje simple.

Tabla 6. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo C3 en el eje simple.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	3,7395	$y = -0,5063x + 7,0307$ $R^2 = 0,5791$
	Desv. Est.	2,3990	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	1,4748	$y = -0,079x + 1,9882$ $R^2 = 0,5123$
	Desv. Est.	0,3979	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	0,9744	$y = 0,0151x + 0,7948$ $R^2 = 0,0186$
	Desv. Est.	0,2975	

En el caso del eje simple del vehículo C3, se muestra una marcada estabilización en el porcentaje de exceso debido a que la pendiente de la regresión lineal en el último rango anual posee valores cercanos a cero. Por otro lado, en el gráfico de control de la Figura 12, no se evidencian variaciones atípicas en los valores de incumplimiento durante el último año, y los datos varían alrededor de un 0,97% de incumplimiento.

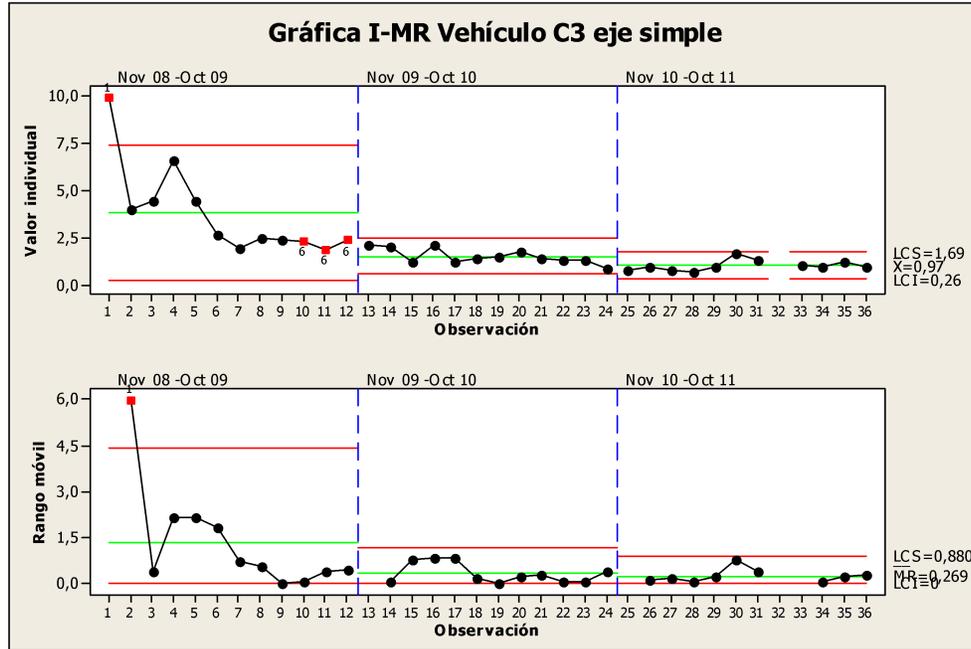


Figura 12. Gráfico de control del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos C3 en el eje simple.

9.1.2.2. Eje tándem

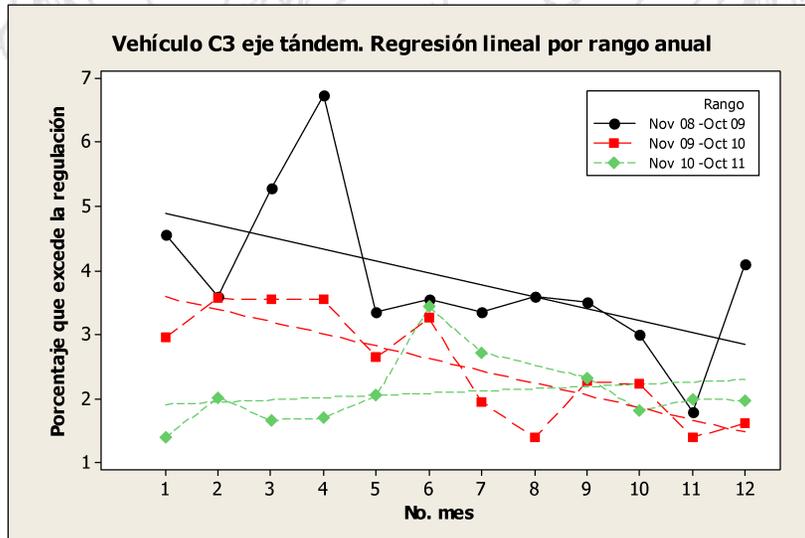


Figura 13. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo C3 en el eje tándem.

Tabla 7. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento vehículo C3 en el eje tándem.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	3,8646	$y = -0,185x + 5,0668$ $R^2 = 0,2938$
	Desv. Est.	1,2303	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	2,5312	$y = -0,1918x + 3,7777$ $R^2 = 0,6798$
	Desv. Est.	0,8386	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	2,0995	$y = 0,0121x + 1,8461$ $R^2 = 0,0029$
	Desv. Est.	0,5640	

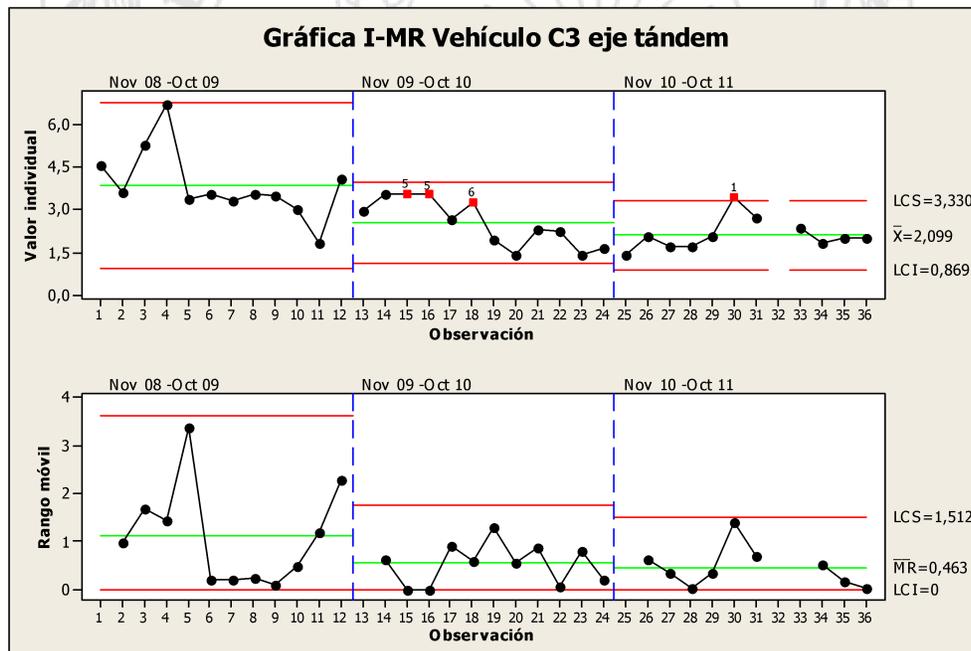


Figura 14. Gráfico de control del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos C3 en el eje tándem.

En el análisis de regresión anual, se muestra una disminución en el porcentaje de vehículos que excede la normativa de pesos. Sin embargo, a pesar de que la variación se reduce con el tiempo, se observan comportamientos cíclicos para el eje tándem del vehículo C3.

En el gráfico de control se hace evidente la estabilización a partir de mediados del año 2010; sin embargo, se evidencia un punto atípico en la variación de los datos (abril del 2011 con 3,43% de incumplimiento), pues se encuentra por fuera de las tres desviaciones estándar

permitidas. De tal manera, este comportamiento da indicios de que se debe analizar la variación temporal o un comportamiento temporal con mayor detalle.

9.1.2.3. Vehículo T3-S2

9.1.2.3.1. Eje simple

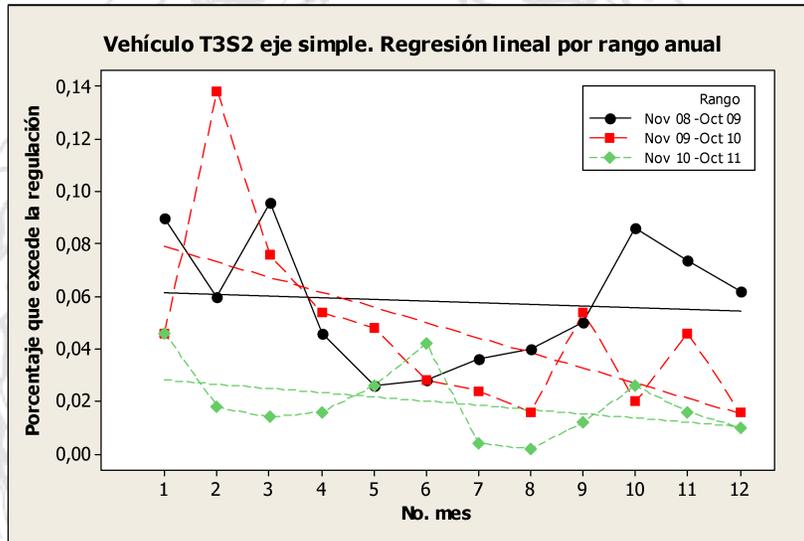


Figura 15. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo T3-S2 en el eje simple.

Tabla 8. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S2 en el eje simple.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	0,0578	$y = -0,0006x + 0,062$ $R^2 = 0,009$
	Desv. Est.	0,0242	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	0,0472	$y = -0,0058x + 0,0847$ $R^2 = 0,3729$
	Desv. Est.	0,0341	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	0,0193	$y = -0,0016x + 0,0298$ $R^2 = 0,1811$
	Desv. Est.	0,0136	

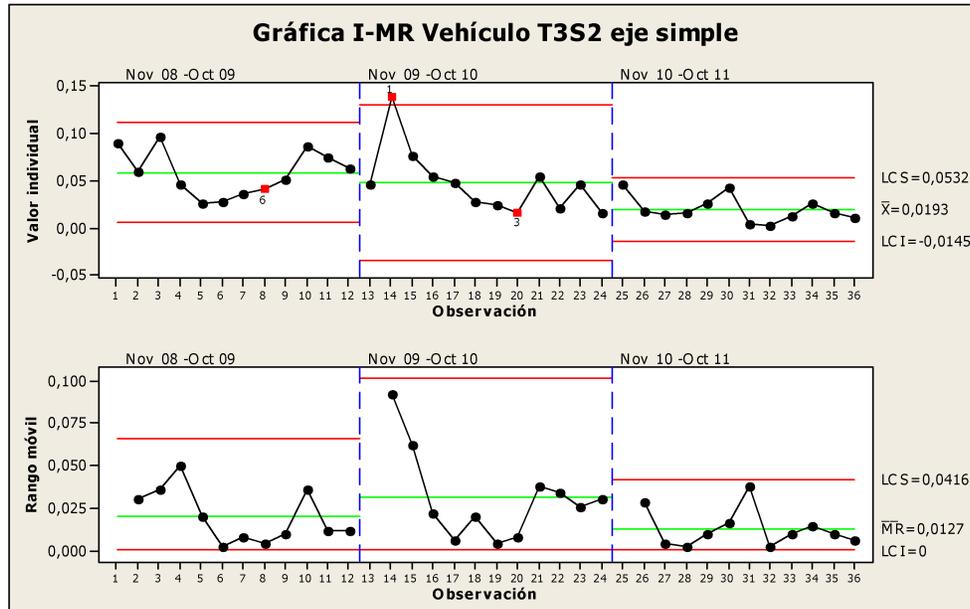


Figura 16. Gráfico de control de porcentaje de incumplimiento de peso del eje simple, vehículo T3-S2.

Para el caso del vehículo T3-S2 en su eje simple, se evidencian variaciones grandes que presentan indicios de comportamientos temporales; por lo tanto, no es posible definir que los datos sean estables y se disminuya continuamente el porcentaje de incumplimiento de vehículos con exceso de carga.

9.1.2.3.2. Eje tándem

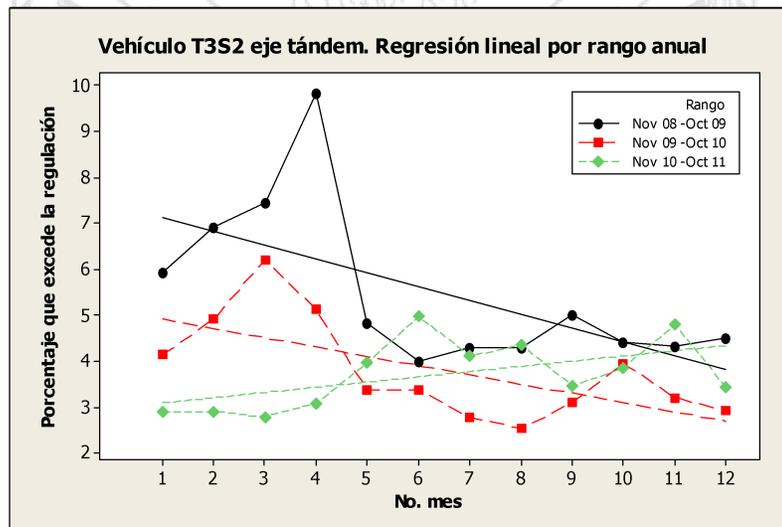


Figura 17. Regresión lineal anual en porcentaje de incumplimiento del eje tándem del vehículo T3-S2.

Tabla 9. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S2 en el eje tándem.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	5,4844	$y = -0,3003x + 7,4363$ $R^2 = 0,3757$
	Desv. Est.	1,7664	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	3,8028	$y = -0,2016x + 5,1134$ $R^2 = 0,4302$
	Desv. Est.	1,1083	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	3,7163	$y = 0,1137x + 2,9772$ $R^2 = 0,3005$
	Desv. Est.	0,7480	

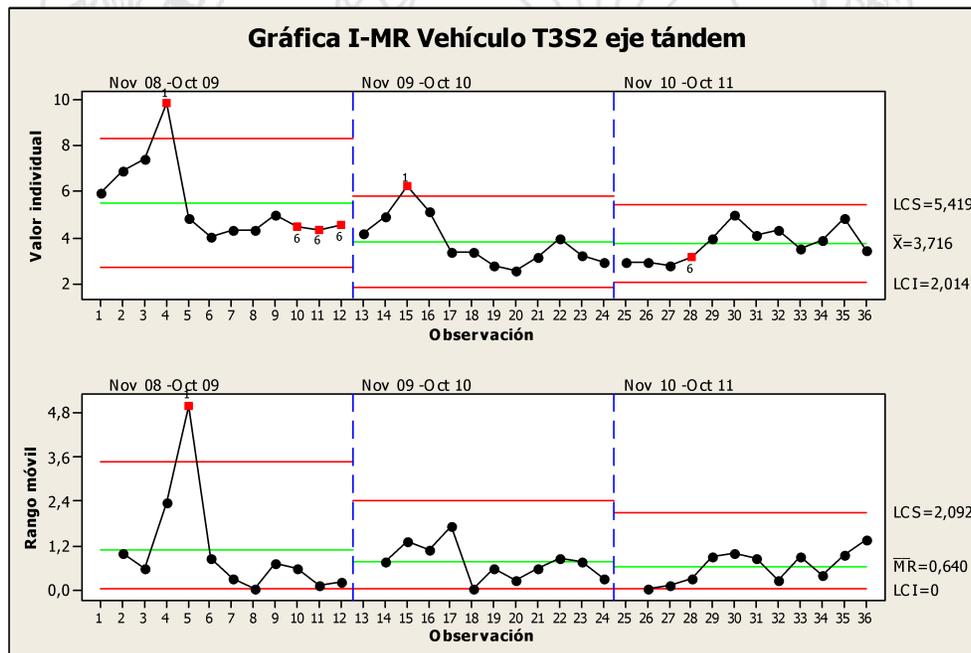


Figura 18. Gráfico de control del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos T3-S2 en el eje tándem.

En el caso del eje tándem, se evidencia un punto atípico en el último rango, ya que, existen 4 de 5 puntos a más de una desviación estándar a un mismo lado de la línea central; por último, se evidencia estabilidad en los datos alrededor de un 3,716% de excedente.

9.1.2.4. Vehículo T3-S3

9.1.2.4.1. Eje simple

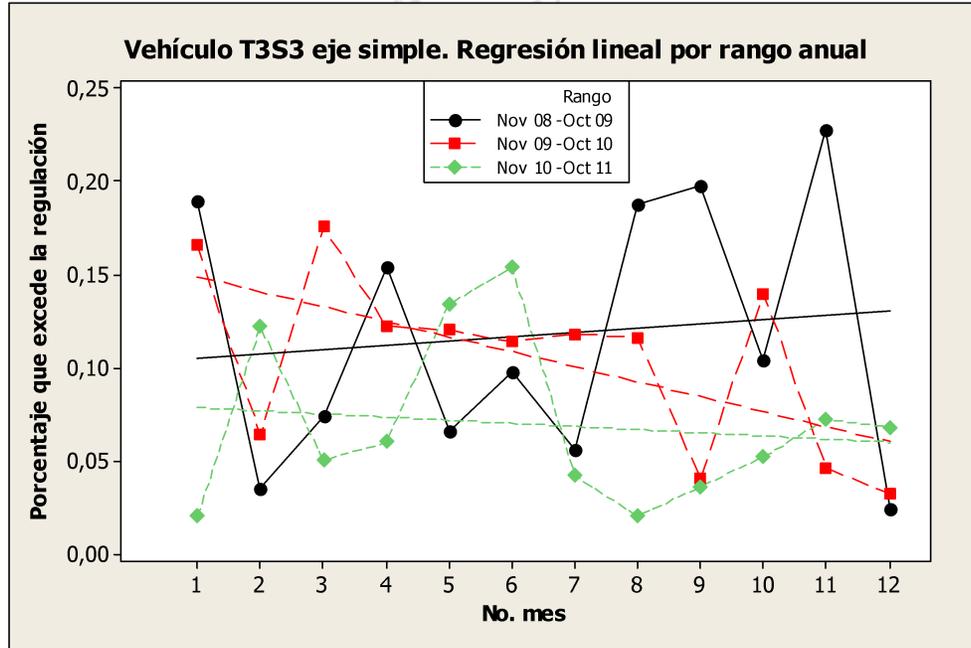


Figura 19. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo T3-S3 en el eje simple.

Tabla 10. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S3 en el eje simple.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	0,1179	$y = 0,0023x + 0,1028$ $R^2 = 0,0141$
	Desv. Est.	0,0705	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	0,1045	$y = -0,0081x + 0,1569$ $R^2 = 0,3634$
	Desv. Est.	0,0482	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	0,0692	$y = -0,0017x + 0,0801$ $R^2 = 0,0188$
	Desv. Est.	0,0443	

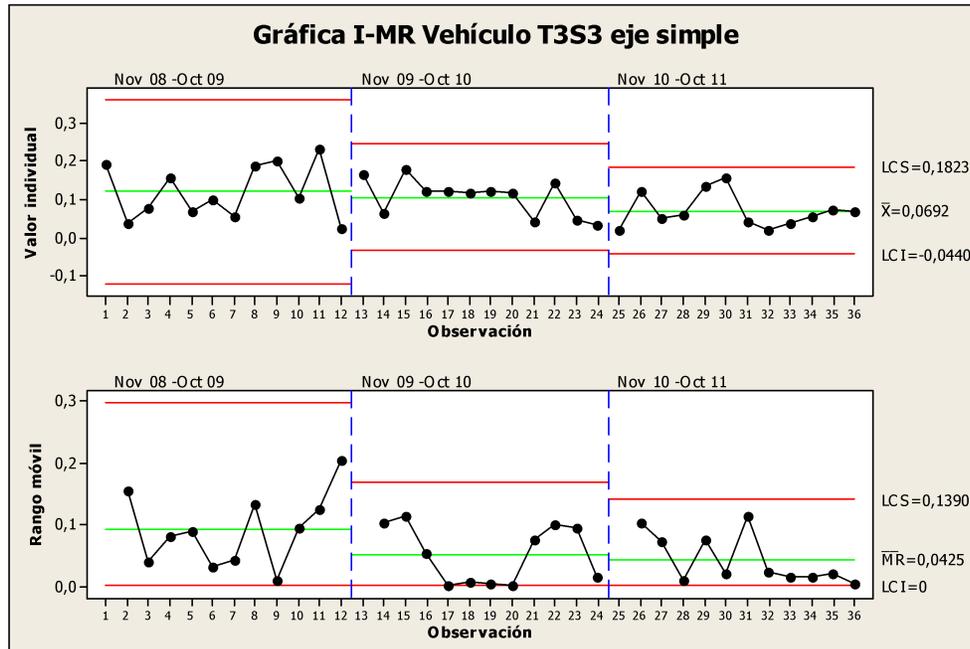


Figura 20. Gráfico de control de porcentaje de incumplimiento de peso en eje simple, vehículos T3-S3.

Mediante el análisis del gráfico de control, no se evidencian puntos atípicos, por lo que se considera que la estabilización es marcada alrededor de un 0,0692% de incumplimiento.

9.1.2.4.2. Eje tándem

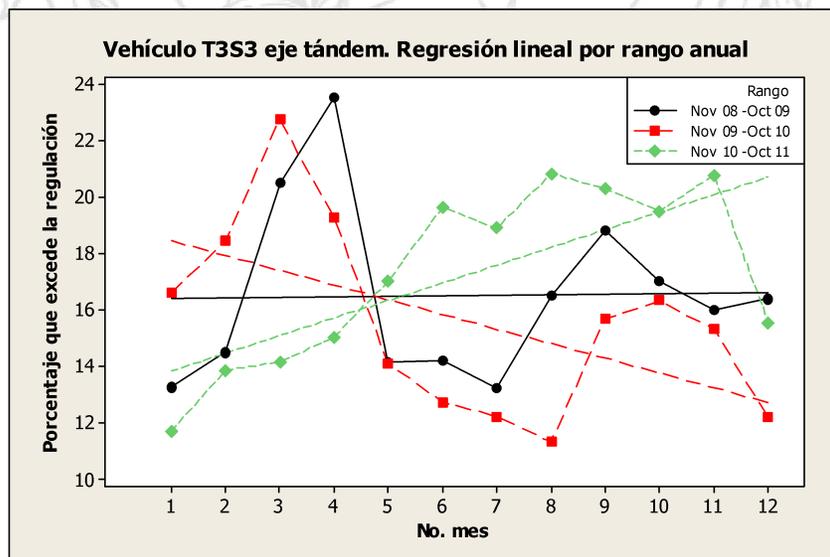


Figura 21. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo T3-S3 en el eje tándem.

Tabla 11. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S3 en el eje tándem.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	16,5259	$y = 0,0192x + 16,401$ $R^2 = 0,0005$
	Desv. Est.	3,1140	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	15,5908	$y = -0,52x + 18,971$ $R^2 = 0,3069$
	Desv. Est.	3,3839	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	17,2859	$y = 0,6254x + 13,221$ $R^2 = 0,52$
	Desv. Est.	3,1268	

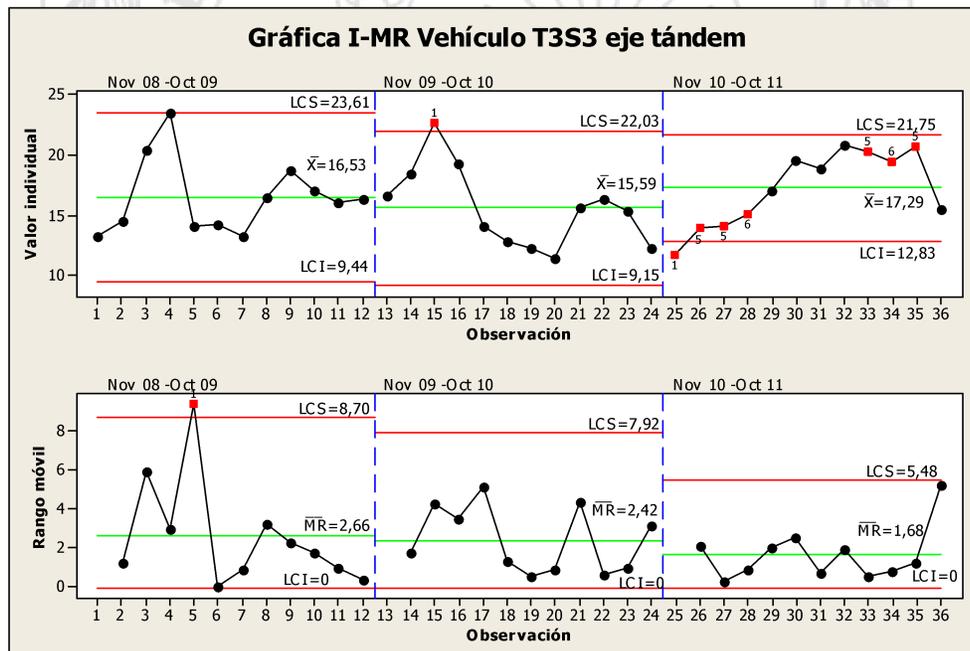


Figura 22. Gráfico de control I-MR del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos T3-S2 en el eje tándem.

Tal y como se mencionó en el análisis de tendencia, el eje tándem no posee un comportamiento de estabilización, ya que la pendiente de las regresiones lineales por rangos anuales no convergen hacia cero ni tienen una tendencia hacia la baja. Además, en el gráfico de control se evidencia un crecimiento considerable de 11% de incumplimiento promedio en el último año respecto al anterior. En el gráfico de control se evidencia que en el

último rango no se puede concluir una variabilidad natural debido a puntos atípicos observados.

9.1.2.4.3. Eje trídem

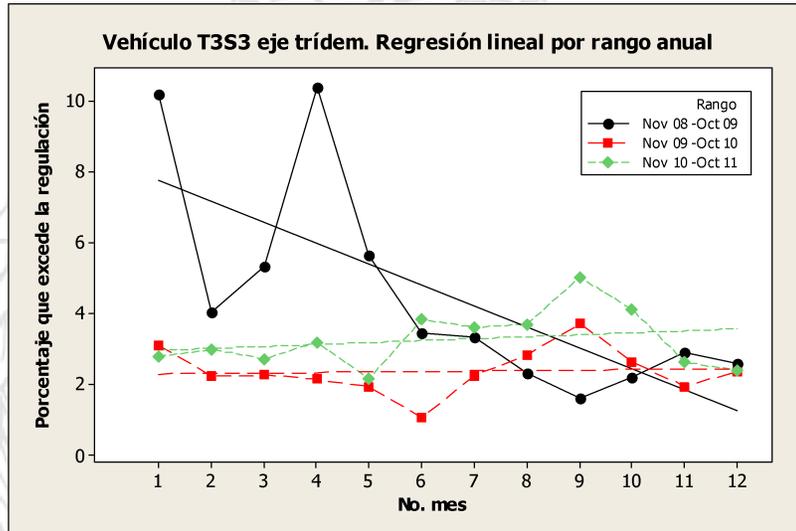


Figura 23. Regresión lineal anual para el porcentaje de incumplimiento de peso del vehículo T3-S3 en el eje trídem.

Tabla 12. Valores de regresiones anuales de porcentaje de incumplimiento del vehículo T3-S3 en el eje trídem.

Rango	Tipo	Valor	Ecuación
Nov 08 -Oct 09	Promedio	4,4990	$y = -0,5904x + 8,3367$ $R^2 = 0,522$
	Desv. Est.	2,9465	
Nov 09 -Oct 10	Promedio	2,3713	$y = 0,0138x + 2,2818$ $R^2 = 0,0057$
	Desv. Est.	0,6593	
Nov 10 -Oct 11	Promedio	3,2654	$y = 0,0548x + 2,9091$ $R^2 = 0,058$
	Desv. Est.	0,8207	

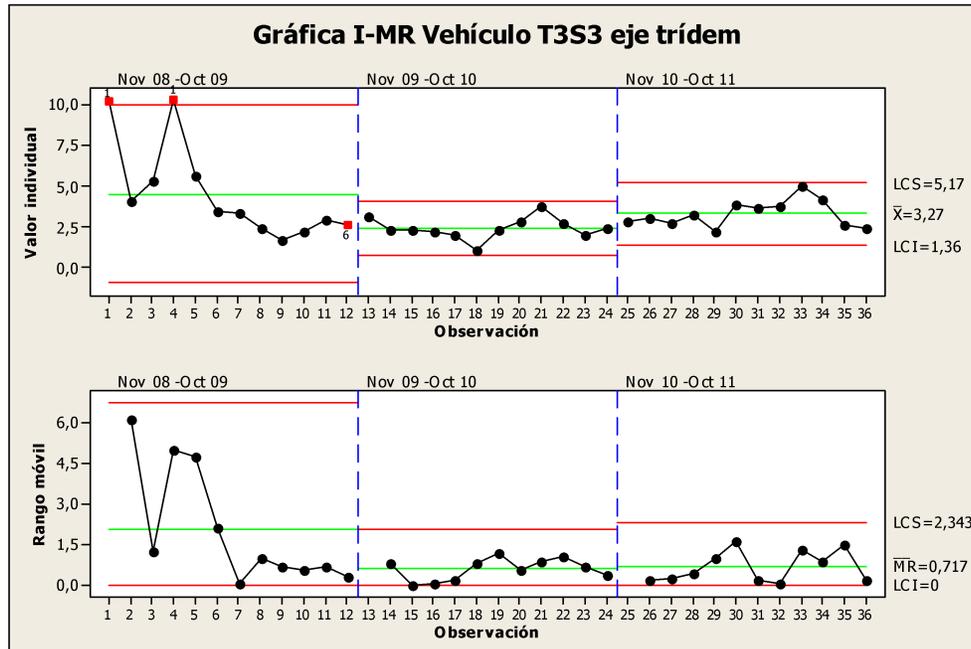


Figura 24. Gráfico de control I-MR del porcentaje de incumplimiento de peso de vehículos T3-S3 en el eje trídem.

El incumplimiento de peso en el eje trídem evidencia una leve estabilización desde el año 2010, sin embargo, presenta una tendencia hacia la alza en el año 2011. Lo mismo se observa con una disminución en las pendientes de la regresión lineal, alcanzando su valor mínimo cercano a cero en el rango 2009-2010 con un ligero aumento en el rango 2010-2011. Mediante el gráfico de control se hace evidente que los datos varían naturalmente alrededor de un 3,27% de incumplimiento.

9.1.3. Resumen de valores de estabilización

En la siguiente tabla se resumen los hallazgos respecto a la estabilización en función del un período de observación de 36 meses analizados.

Tabla 13. Resumen de los hallazgos de estabilización del porcentaje de incumplimiento.

Vehículo	Eje	Estabiliza	% Incumplimiento Estabilizado
C2	Simple	Si	0,029
	Dual	Si	0,173
C3	Simple	Si	0,974
	Tándem	Si	2,099
T3-S2	Simple	Si	0,019
	Tándem	Si	3,716
T3-S3	Simple	Si	0,069
	Tándem	No	-
	Tridem	Si	3,260

9.2. Factor camión

La segunda relación de importancia por analizar corresponde a la tendencia del factor camión, los cuales se analizarán según el tipo de vehículo únicamente, no se hará distinción de porcentaje de participación de cada eje o estación de la cual provengan los datos.

9.2.1. Tendencia

En las siguientes gráficas, se muestran series de variaciones temporales de la evolución del factor camión en el período analizado, desde octubre del 2008 hasta noviembre del 2011, por medio del modelo de regresión potencial mostrado en la Ecuación 5.

Las pruebas detalladas del modelo de regresión para el factor camión de cada tipo de vehículo de carga se puede consultar en el Apéndice 3.

9.2.1.1. Vehículo C2

En la Figura 25, se muestra el comportamiento del factor camión desde noviembre del 2008 hasta octubre 2011. Se evidencia un comportamiento decreciente en el valor de factor camión hasta alcanzar valores relativamente estables, aproximadamente, en el año 2011.

El modelo de regresión utilizado cumple adecuadamente con los supuestos de normalidad, homogeneidad e independencia de los residuos, y fue a partir de éste que se obtuvo un valor de factor camión de incumplimiento constante de 0,1906 para el mes 36 (octubre del 2011).

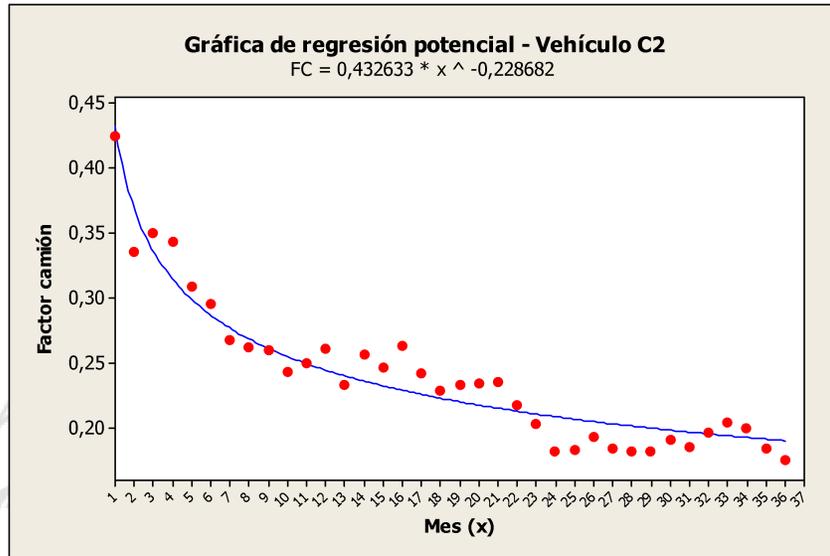


Figura 25. Factor camión promedio en el vehículo de carga C2.

9.2.1.2. Vehículo C3

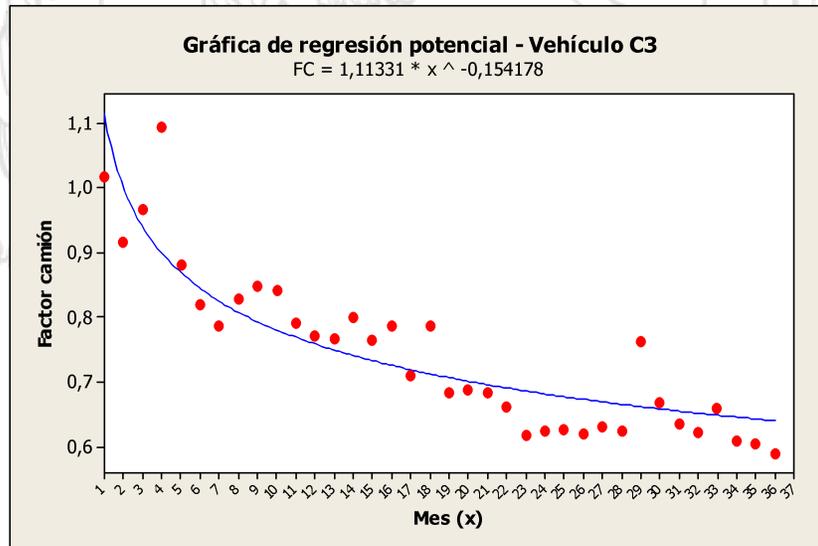


Figura 26. Factor camión promedio en el vehículo de carga C3.

El factor camión del vehículo C3 posee una tendencia hacia la estabilización, pues los valores de factor camión disminuyen de forma constante. Sin embargo, la disminución en los valores a partir del año 2011 (desde el mes 27 al 36) ha sido menos marcada y se evidencia que en marzo del 2011 el valor de factor camión promedio mostró un aumento significativo alcanzando un valor factor camión de 0,8, aproximadamente.

En lo referente al modelo de regresión utilizado, se logró verificar todos los supuestos de los residuos. Mediante este modelo de regresión se proyectó el factor camión de incumplimiento constante, calculado para el mes 36, con un valor de 0,6407.

9.2.1.3. Vehículo T3-S2

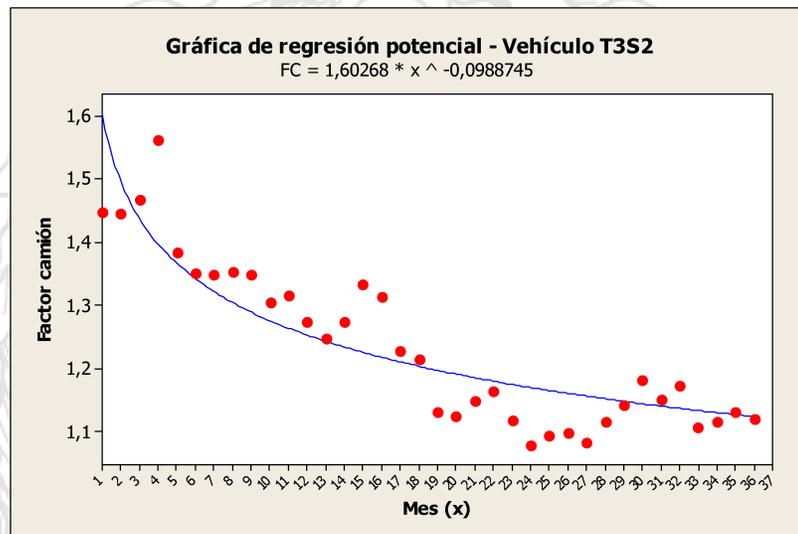


Figura 27. Factor camión promedio en el vehículo de carga T3-S2.

Los factores camión que produce el vehículo T3-S2 tienden a la baja alcanzando valores estables en los últimos meses del período de análisis, y se calcula un valor de factor camión de incumplimiento constante de 1,1245; esto con la inferencia del modelo de regresión potencial y evaluando el factor camión en el mes 36.

9.2.1.4. Vehículo T3-S3

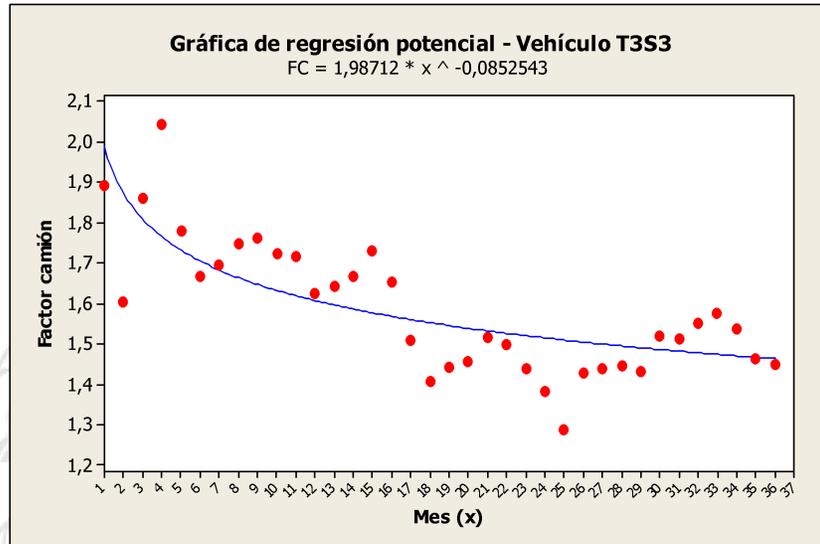


Figura 28. Factor camión promedio en el vehículo de carga T3-S3.

Los factores camión producidos por los vehículos de carga T3-S3 mostraron una disminución significativa durante el 2009; pero, en el período 2010-2011 el factor camión mostró una aleatoriedad significativa de los valores y una mínima tendencia a la baja. El factor camión de incumplimiento se proyecta para el mes 36 con un valor de 1,4640.

En la Tabla 14 se resumen los hallazgos referentes a la tendencia y estabilización de los factores camión resultantes en vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3.

Tabla 14. Resumen de los hallazgos de estabilización del factor camión.

Tipo de vehículo	Ecuación	FC (proyectado mes 36)	Estabiliza
C2	$FC = 0,43263 * x^{-0,228682}$	0,1906	Sí
C3	$FC = 1,11331 * x^{-0,154178}$	0,6407	Sí
T3-S2	$FC = 1,60268 * x^{-0,098874}$	1,1245	Sí
T3-S3	$FC = 1,98712 * x^{-0,085254}$	1,4640	Sí

9.3. Relación entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso

Existe una relación directamente proporcional entre el porcentaje de vehículos que exceden la regulación y el factor camión promedio producido por estos vehículos. Por lo tanto, el objetivo de esta sección corresponde a determinar dicha relación, y posteriormente realizar una proyección del factor camión con incumplimiento constante.

Informe LM-PI-GM-INF-05-15	Fecha de emisión: 20 de julio de 2015	Página 43 de 61
----------------------------	---------------------------------------	-----------------

9.3.1. Análisis de regresión entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso

El análisis se realiza mediante el uso de la regresión lineal simple, analizando como variable independiente el porcentaje de excedente en cada eje por tipo de vehículo, y como variable dependiente el factor camión; así como también se estudia la correlación entre los porcentajes de incumplimiento de peso de diversos ejes de un mismo tipo de vehículo.

En caso de no existir correlación entre el porcentaje de incumplimiento de los tipos de ejes para un vehículo específico, se estudia un modelo de regresión múltiple, esto con el fin de mejorar la predicción del modelo de regresión simple.

9.3.1.1. Vehículo C2

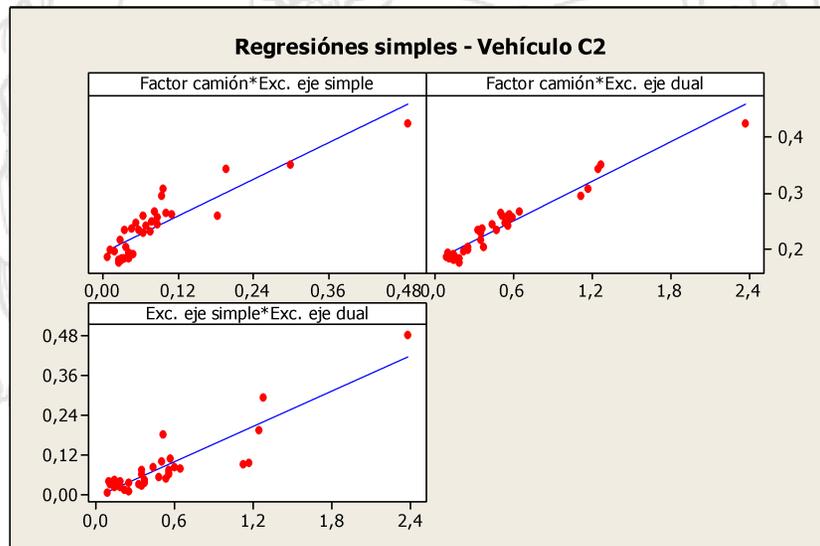


Figura 29. Gráfico de regresiones entre factor camión e incumplimiento en los ejes del vehículo C2.

Tabla 15. Resultado de regresiones entre factor camión e incumplimiento por eje en vehículo C2.

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Factor camión	Exceso eje simple	$y = 0,5424x + 0,1942$ $R^2 = 0,7873$
Factor camión	Exceso eje dual	$y = 0,1165x + 0,1802$ $R^2 = 0,9286$
Exceso eje simple	Exceso eje dual	$y = 0,1785x - 0,008$ $R^2 = 0,8144$

En la regresión realizada, se muestra una mayor relación entre el porcentaje de exceso en el eje dual y el factor camión. Además, existe correlación entre los factores Exceso eje simple y Exceso eje dual, por lo que no es recomendable una regresión múltiple, debido a la auto correlación de los predictores del modelo.

9.3.1.2. Vehículo C3

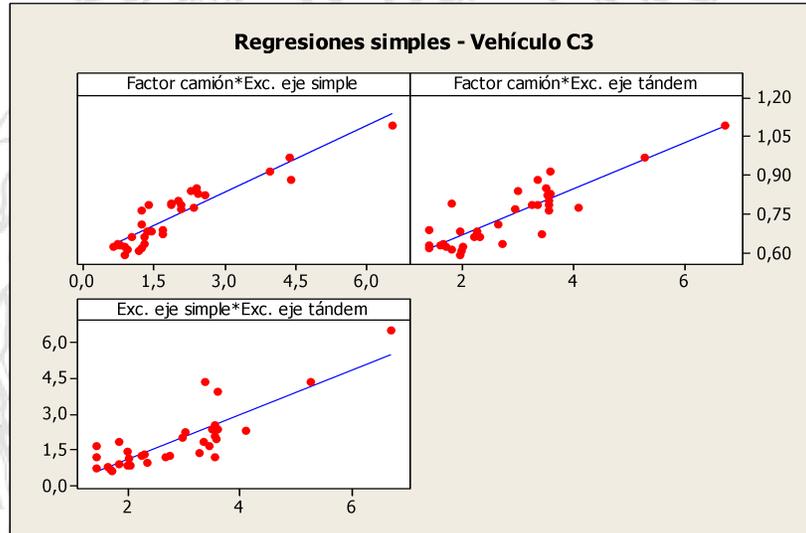


Figura 30. Gráfico de regresiones entre factor camión e incumplimiento en los ejes del vehículo C3.

Tabla 16. Resultado de regresiones entre factor camión e incumplimiento por eje en vehículo C3.

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Factor camión	Exceso eje simple	$y = 0,0857x + 0,5781$ $R^2 = 0,8492$
Factor camión	Exceso eje tandem	$y = 0,0891x + 0,4886$ $R^2 = 0,764$
Exceso eje simple	Exceso eje tandem	$y = 0,9235x - 0,7152$ $R^2 = 0,7094$

En la Tabla 16, se muestra una mayor correlación del factor camión con el porcentaje de incumplimiento en el eje simple y tandem; sin embargo, debido a que existe una correlación entre factores, no se recomienda realizar una regresión múltiple. En este caso se utiliza el eje simple como variable independiente ya que tiene mayor correlación.

9.3.1.3. Vehículo T3-S2

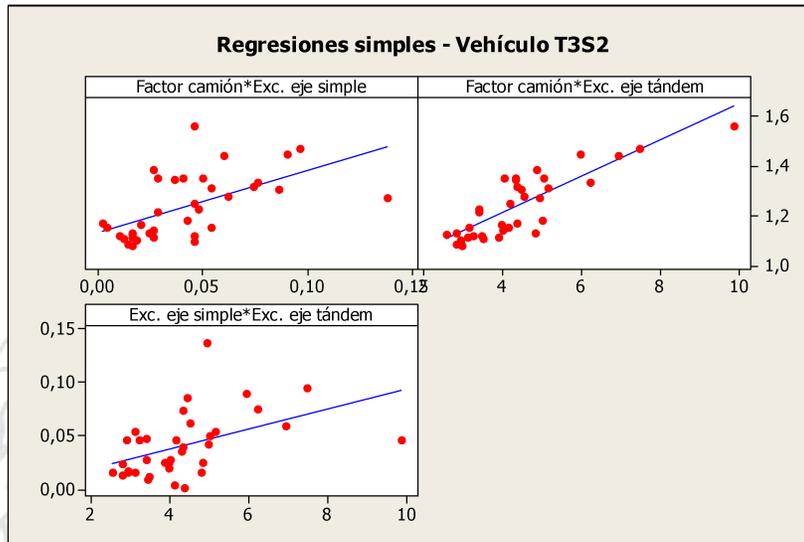


Figura 31. Gráfico de regresiones entre factor camión e incumplimiento en ejes del vehículo T3-S2.

Tabla 17. Resultado de regresiones entre factor camión e incumplimiento por eje en vehículo T3-S2.

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Factor camión	Exceso eje simple	$y = 2,4948x + 1,1332$ $R^2 = 0,3291$
Factor camión	Exceso eje tandem	$y = 0,073x + 0,92$ $R^2 = 0,7137$
Exceso eje simple	Exceso eje tandem	$y = 0,0094x + 0,0009$ $R^2 = 0,2215$

Para la regresión del factor camión en el vehículo T3-S2, se encontró la mayor relación entre factor camión y el exceso en el eje tandem.

Debido a que los excesos entre ejes no mostraron una relación significativa, se realizó una regresión múltiple (ver Apéndice 4), sin embargo, tampoco se evidenció una mejora significativa.

9.3.1.4. Vehículo T3-S3

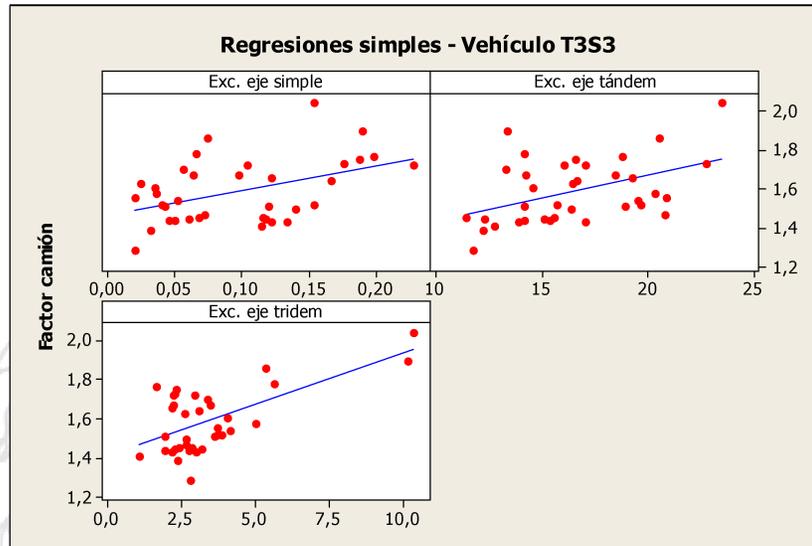


Figura 32. Gráfico de regresiones entre factor camión e incumplimiento en los ejes del vehículo T3-S3.

Tabla 18. Resultado de regresiones entre factor camión e incumplimiento por eje en vehículo T3-S3.

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Factor camión	Exceso eje simple	$y = 1,2544x + 1,4664$ $R^2 = 0,1963$
Factor camión	Exceso eje tandem	$y = 0,0235x + 1,2007$ $R^2 = 0,2109$
Factor camión	Exceso eje tridem	$y = 0,0521x + 1,4122$ $R^2 = 0,3908$

En la Figura 32, se observa una correlación baja entre cada uno de los factores y el factor camión, el factor que posee mayor coeficiente de correlación corresponde al incumplimiento en el eje tridem con una correlación de 39%, aproximadamente.

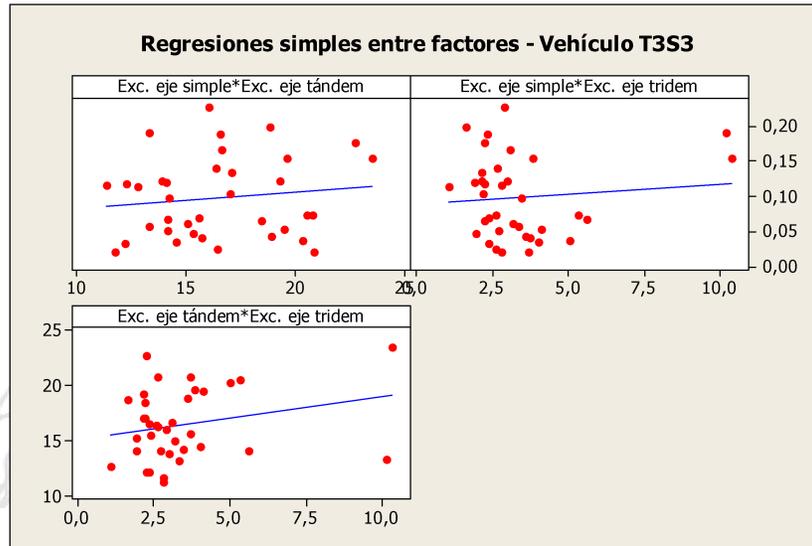


Figura 33. Gráfico de regresiones de incumplimiento en los ejes del vehículo T3-S3.

Tabla 19. Resultado de regresiones de incumplimiento entre los ejes del vehículo T3-S3.

Factor dependiente (y)	Factor independiente (x)	Ecuación
Exceso eje simple	Exceso eje tándem	$y = 0,0024x + 0,058$ $R^2 = 0,0173$
Exceso eje simple	Exceso eje tridem	$y = 0,003x + 0,0872$ $R^2 = 0,0102$
Exceso eje tándem	Exceso eje tridem	$y = 0,3838x + 15,171$ $R^2 = 0,0557$

En la Figura 33, se puede concluir la inexistencia de correlación entre los factores del modelo para el vehículo T3-S3, por lo que se realizó una regresión múltiple entre los factores (ver Apéndice 4).

La regresión múltiple cumplió con todos los supuestos de los residuos y posee un valor de correlación de **61,5%**, lo cual es significativamente mejor que las obtenidas con regresiones simples. En la Ecuación 6 se muestra la regresión múltiple obtenida.

$$FC = 1,10 + 0,998 *Exc_eje_simple + 0,0149* Exc_eje_tándem+ 0,0434*Exc_eje_tridem \quad [6]$$

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados del apartado anterior, a continuación en la Tabla 20 se presenta un resumen de las ecuaciones más significativas que se encontraron para la determinación del factor camión. Sin embargo, es importante conocer brevemente cada uno de los tipos de factores camión que se plantean en la tabla.

- **Factor camión (potencial):** El factor camión potencial se infiere por medio de las series de tiempo realizadas y proyectadas mediante la regresión potencial en el mes 36, esto podrá mejorarse en el futuro con más datos de series temporales y análisis individuales por estación.
- **Factor camión de incumplimiento constante:** Se calcula utilizando la mejor regresión obtenida entre el factor camión y el incumplimiento en uno o varios ejes, y sustituyendo en dicha ecuación el valor de incumplimiento constante. Este análisis se realiza para cada uno de los vehículos de carga.
- **Factor camión de incumplimiento 0% (regresión lineal):** Se calcula mediante el intercepto de las regresiones realizadas entre el factor camión y el incumplimiento en uno o varios ejes, según corresponda.

Además, es importante mencionar que se realizó un estudio adicional en el caso del vehículo T3-S3, ya que según lo demostrado en apartados anteriores, no existe estabilización en su eje tándem; por lo tanto, se utiliza el valor de estabilización del eje tándem del vehículo T3-S2, para mostrar el impacto que se puede obtener si se controla el incumplimiento de peso en este eje.

Tabla 20. Comparación entre factor camión con incumplimiento cero, incumplimiento constante y potencial.

Vehículo	Eje de inferencia	%Exceso Estabilizado	Estabiliza	Ecuaciones FC vs. %Exceso	R ²	FC incumplimiento 0% (lineal)	FC incumplimiento constante	FC (potencial)	Diferencia
C2	Dual	0,17	Sí	$FC = 0,1165 * Exd. + 0,1802$	0,9286	0,18	0,20	0,19	
C3	Simple	0,97	Sí	$FC = 0,0857 * Exd. + 0,5781$	0,8492	0,58	0,66	0,64	
T3-S2	Tándem	3,72	Sí	$FC = 0,073 * Exd. + 0,92$	0,7137	0,92	1,19	1,12	
T3-S3	Simple	0,07	Sí	$FC = 0,998 * Exc_sim + 0,0149 * Exc_tan + 0,0434 * Exc_tri + 1,10$	0,615	1,10	1,54	1,46	0,17
	Tándem	15,59	No						
	Trídem	3,26	Sí						
T3-S3 (Inferencias con Tándem T3-S2)	Simple	0,07	Sí						
	Tándem	3,72	Sí				1,37		
	Trídem	3,26	Sí						

En la Tabla 20, se muestra el resultado y ecuaciones para obtener los diferentes valores de factor camión; de estos valores se puede inferir que el factor camión calculado mediante la regresión y estabilización del incumplimiento de peso, posee una relación significativa con el factor camión calculado mediante el modelo potencial.

El valor de factor camión se incrementa conforme se aumenta la cantidad de ejes articulados del vehículo de carga, además, se evidencian diferencias de hasta 25% entre los factores camión con incumplimiento constante y con incumplimiento cero.

En el caso del vehículo de carga T3-S3, se realizaron dos análisis para los factores camión estabilizados, el primero utilizando los valores de estabilización de los ejes simple y trídem, y el promedio anual mínimo obtenido para el eje tándem; el otro análisis se realizó de forma similar al anterior, pero utilizando el valor de estabilización del eje tándem del vehículo T3-S2. El resultado obtenido refleja que se podría tener una disminución en los valores de factor camión de hasta 0,17 al exigir controles más estrictos y eficientes sobre el exceso de carga en el eje tándem del vehículo T3-S3.

11. CONCLUSIONES

- En forma general se determinó que la implementación de controles de pesaje en las rutas nacionales produce un efecto de estabilización en los factores camión y en el porcentaje de incumplimiento.
- El vehículo T3-S3 en su eje tándem fue el vehículo de carga que no mostró evolución en la estabilización del incumplimiento, pero de forma general este vehículo estabilizó el factor camión en el período de análisis.
- Los vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3 estabilizaron a factores camión de 0,19 - 0,64 - 1,12 - 1,46 respectivamente mediante el uso de series de tiempo con regresión potencial; y estabilizaron a valores de 0,20 - 0,66 - 1,19 - 1,54 respectivamente por medio de la estabilización del porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso en sus ejes y regresiones lineales entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento en los ejes.
- Mediante el análisis de regresión entre los factores camión y el porcentaje de exceso, se evidencia diferencias entre el ajuste de los factores, es decir algunos ejes son mejores estimadores del factor camión, tal es el caso del vehículo C3, ya que la

regresión factor camión contra porcentaje de exceso del eje simple mostró un ajuste del modelo R^2 de 0,85 a diferencia de la regresión factor camión contra porcentaje de exceso eje tándem con un R^2 de 0,76. La diferencia anterior se puede originar debido a que por ser un eje simple es bastante sensible a la sobrecarga, por lo tanto es de importancia controlar el exceso de carga en el eje simple con el fin de reducir los factores camión en este tipo de vehículo.

- Para el diseño de pavimentos es importante considerar la evolución de los factores camión generales calculados en la presente investigación, debido a que se podría sobrestimar un diseño al utilizar factores camión que no responden a la realidad y evolución de la carga del pavimento en el tiempo.
- Es sumamente importante utilizar estos resultados para concientizar a las autoridades del beneficio en reducción del daño a los pavimentos que se obtiene con un control estricto y prolongado con estaciones de pesaje.

12. RECOMENDACIONES

- Se sugiere al investigador realizar una validación de las inferencias realizadas en la presente investigación, mediante el estudio de las series del tiempo en el período 2011-2014.
- Elaboración espectros de carga por estación de control, en la cual el análisis se realice por cada eje de cada tipo de vehículo, y en cada uno de los sentidos de circulación, de manera que muestren el porcentaje de vehículos que transitan con cierta cantidad de carga.
- El análisis mostrado se puede realizar en cada una de las estaciones de pesaje, lo cual podría brindar información más detallada sobre la evolución y diferencias de los factores camión de incumplimiento cero e incumplimiento constante en las principales rutas nacionales.
- Se recomienda realizar una investigación del costo beneficio de tener una estación de pesaje en un corredor importante con estricto control durante el período de vida útil del pavimento, a no tenerlo del todo, para las condiciones de Costa Rica.

13. REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures* (4 ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Obtenido de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAASHTO21/aashto-guide-design-pavement>
- Allen, J., & Badilla, G. (2011). *Determinación de la carga de diseño para pavimentos flexibles en Costa Rica*. XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP.
- Badilla, G., & Molina, D. (2009). *Incidencia de las estaciones de pesaje móvil en los factores camión en pavimentos de Costa Rica*. San José: LanammeUCR.
- Battelle Memorial Institute. (2012). *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-07)*. Federal Aviation Administration.
- Montgomery, D., & Runger, G. (2006). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería* (2 ed.). Mexico, DF: Limusa Wiley.
- Ulloa, Á., Allen, J., Badilla, G., & Sibaja, D. (2008). Determinación de factores camión en pavimentos de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 10(19), 28-37.

14. Apéndices

Apéndice 1. Caracterización del tránsito

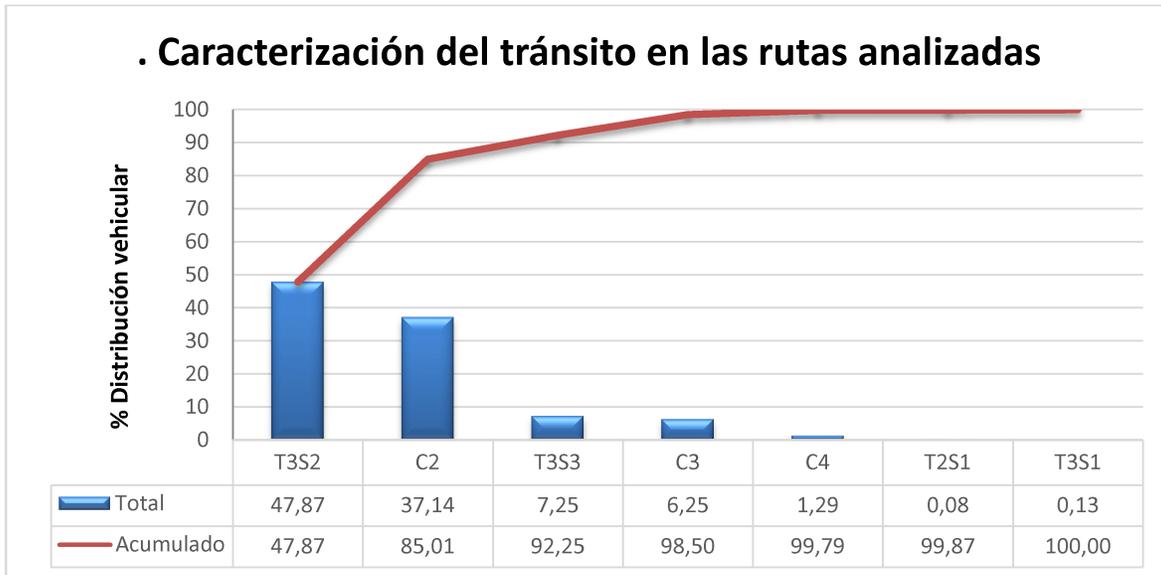


Figura 1-1. Porcentaje por cada tipo de vehículo evaluado.

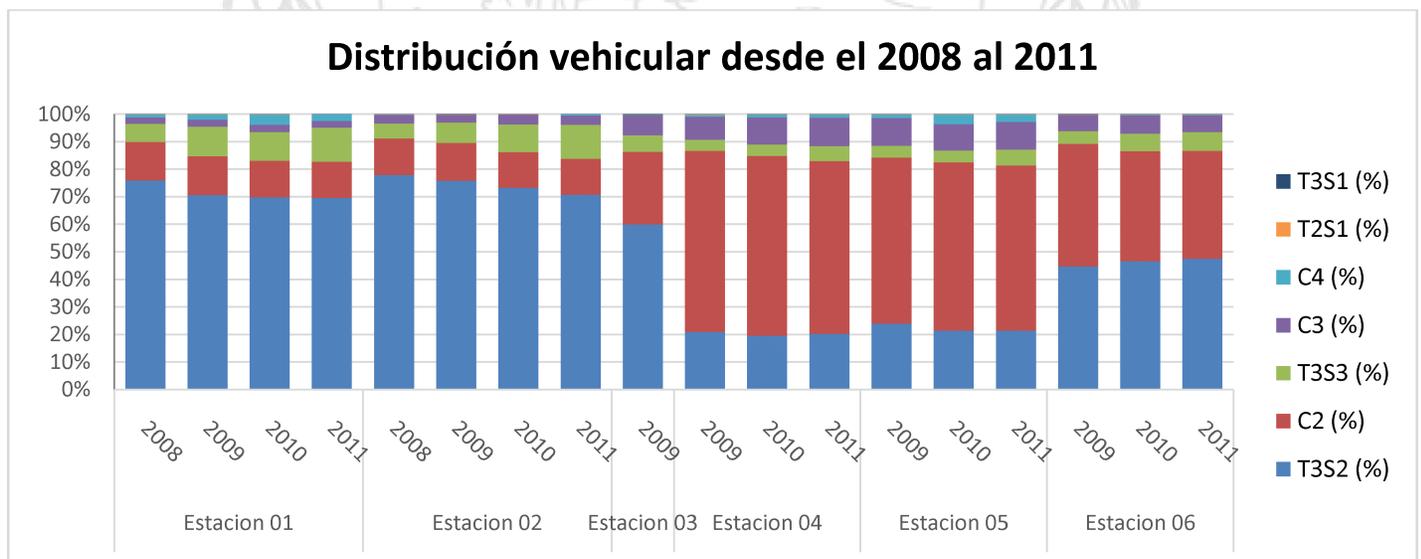


Figura 1-2. Evolución del tránsito por cada tipo de vehículo y estación de pesaje desde el 2008 hasta el 2011.

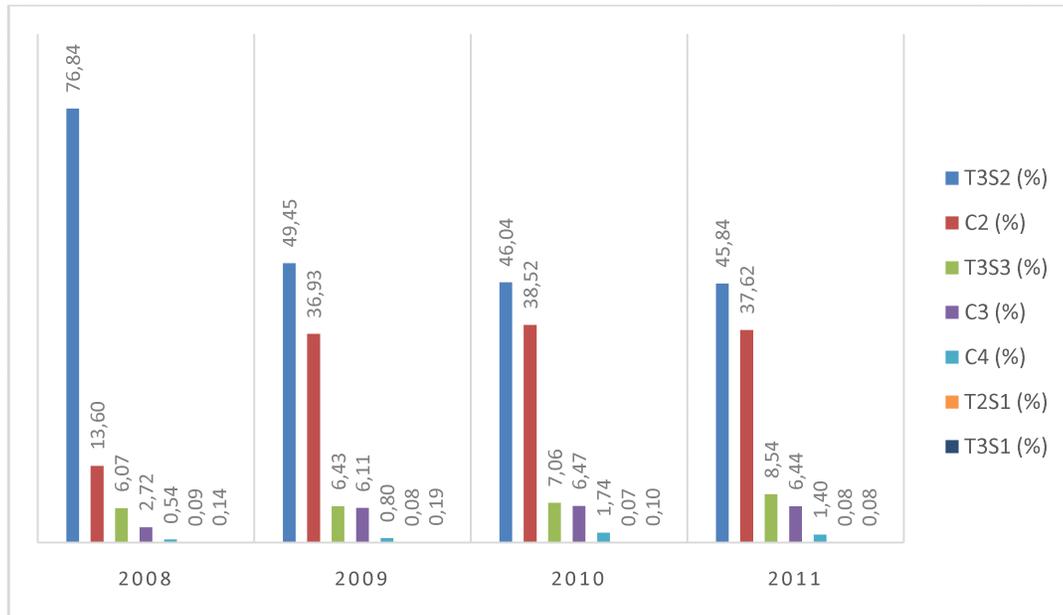
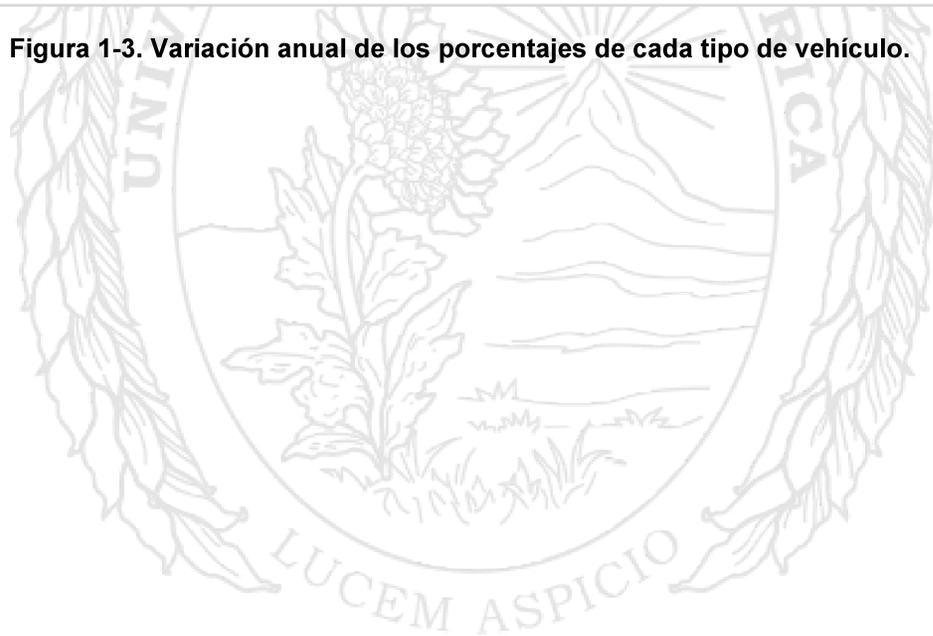


Figura 1-3. Variación anual de los porcentajes de cada tipo de vehículo.



Apéndice 2. Base de datos utilizada

Tabla 2-1. Factores camión promedio para cada tipo de vehículo.

Mes / Año	Vehículo C2 (Factor camión)	Vehículo C3 (Factor camión)	Vehículo T3-S2 (Factor camión)	Vehículo T3-S3 (Factor camión)
11/2008	0,42	1,02	1,45	1,89
12/2008	0,34	0,92	1,45	1,61
1/2009	0,35	0,97	1,47	1,86
2/2009	0,34	1,09	1,56	2,04
3/2009	0,31	0,88	1,38	1,78
4/2009	0,30	0,82	1,35	1,67
5/2009	0,27	0,79	1,35	1,70
6/2009	0,26	0,83	1,35	1,75
7/2009	0,26	0,85	1,35	1,76
8/2009	0,24	0,84	1,31	1,72
9/2009	0,25	0,79	1,32	1,72
10/2009	0,26	0,77	1,28	1,63
11/2009	0,23	0,77	1,25	1,64
12/2009	0,26	0,80	1,27	1,67
1/2010	0,25	0,76	1,33	1,73
2/2010	0,26	0,79	1,31	1,66
3/2010	0,24	0,71	1,23	1,51
4/2010	0,23	0,79	1,22	1,41
5/2010	0,23	0,69	1,13	1,45
6/2010	0,23	0,69	1,13	1,46
7/2010	0,24	0,69	1,15	1,52
8/2010	0,22	0,66	1,17	1,50
9/2010	0,20	0,62	1,12	1,44
10/2010	0,18	0,63	1,08	1,39
11/2010	0,18	0,63	1,09	1,29
12/2010	0,19	0,62	1,10	1,43
1/2011	0,19	0,63	1,08	1,44
2/2011	0,18	0,63	1,12	1,45
3/2011	0,18	0,62	1,14	1,43
4/2011	0,19	0,67	1,18	1,52
5/2011	0,19	0,64	1,15	1,52
6/2011	0,20	0,62	1,17	1,55
7/2011	0,20	0,66	1,11	1,58
8/2011	0,20	0,61	1,12	1,54
9/2011	0,19	0,61	1,13	1,47
10/2011	0,18	0,59	1,12	1,45

Tabla 2-2. Porcentaje promedio de vehículos que exceden la regulación de peso.

Mes /Año	C2 eje simple	C2 eje dual	C3 eje simple	C3 eje tandem	T3-S2 eje simple	T3-S2 eje tandem	T3-S3 eje simple	T3-S3 eje tandem	T3-S3 Eje tridem
11/2008	0,49	2,38	9,93	4,57	0,09	5,94	0,19	13,31	10,17
12/2008	0,41	0,96	3,96	3,59	0,06	6,91	0,04	14,55	4,03
1/2009	0,30	1,27	4,37	5,28	0,10	7,46	0,07	20,52	5,33
2/2009	0,20	1,24	6,55	6,73	0,05	9,84	0,15	23,52	10,37
3/2009	0,10	1,17	4,39	3,35	0,03	4,83	0,07	14,16	5,62
4/2009	0,09	1,12	2,58	3,54	0,03	3,99	0,10	14,20	3,47
5/2009	0,08	0,64	1,86	3,34	0,04	4,30	0,06	13,25	3,35
6/2009	0,11	0,56	2,42	3,58	0,04	4,31	0,19	16,53	2,32
7/2009	0,18	0,51	2,38	3,50	0,05	5,00	0,20	18,81	1,62
8/2009	0,09	0,43	2,27	3,01	0,09	4,42	0,10	17,04	2,20
9/2009	0,08	0,55	1,85	1,80	0,07	4,31	0,23	16,02	2,92
10/2009	0,06	0,56	2,33	4,09	0,06	4,50	0,02	16,40	2,60
11/2009	0,08	0,34	2,05	2,95	0,05	4,14	0,17	16,64	3,08
12/2009	0,09	0,59	2,00	3,56	0,14	4,91	0,06	18,46	2,23
1/2010	0,05	0,53	1,22	3,55	0,08	6,21	0,18	22,74	2,26
2/2010	0,10	0,50	2,08	3,54	0,05	5,12	0,12	19,27	2,15
3/2010	0,07	0,55	1,21	2,65	0,05	3,38	0,12	14,10	1,93
4/2010	0,06	0,35	1,39	3,26	0,03	3,38	0,11	12,75	1,06
5/2010	0,06	0,47	1,43	1,95	0,02	2,79	0,12	12,22	2,25
6/2010	0,03	0,33	1,68	1,40	0,02	2,54	0,12	11,34	2,82
7/2010	0,05	0,36	1,36	2,27	0,05	3,10	0,04	15,70	3,72
8/2010	0,03	0,35	1,28	2,22	0,02	3,95	0,14	16,34	2,64
9/2010	0,04	0,25	1,22	1,40	0,05	3,21	0,05	15,32	1,94
10/2010	0,03	0,14	0,79	1,61	0,02	2,93	0,03	12,19	2,37
11/2010	0,03	0,17	0,74	1,40	0,05	2,88	0,02	11,73	2,79
12/2010	0,04	0,09	0,88	2,02	0,02	2,91	0,12	13,88	2,99
1/2011	0,04	0,18	0,71	1,67	0,01	2,78	0,05	14,16	2,73
2/2011	0,03	0,10	0,62	1,70	0,02	3,09	0,06	15,05	3,19
3/2011	0,03	0,14	0,86	2,05	0,03	3,97	0,13	17,05	2,17
4/2011	0,05	0,14	1,67	3,43	0,04	4,98	0,15	19,65	3,83
5/2011	0,01	0,08	1,28	2,72	0,00	4,11	0,04	18,90	3,61
6/2011	0,02	0,21	*	*	0,00	4,34	0,02	20,84	3,70
7/2011	0,04	0,36	1,01	2,33	0,01	3,46	0,04	20,32	5,02
8/2011	0,01	0,24	0,93	1,82	0,03	3,85	0,05	19,51	4,12
9/2011	0,03	0,17	1,16	1,99	0,02	4,80	0,07	20,79	2,63
10/2011	0,03	0,18	0,87	1,97	0,01	3,42	0,07	15,56	2,40

Apéndice 3. Supuestos modelo de regresión potencial

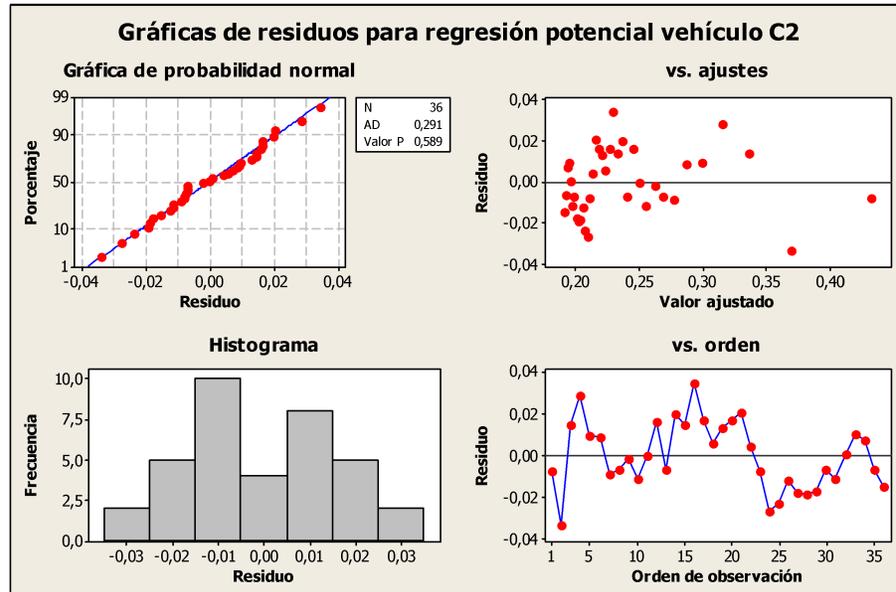


Figura 3-1. Residuos de regresión potencial para factor camión del vehículo tipo C2.

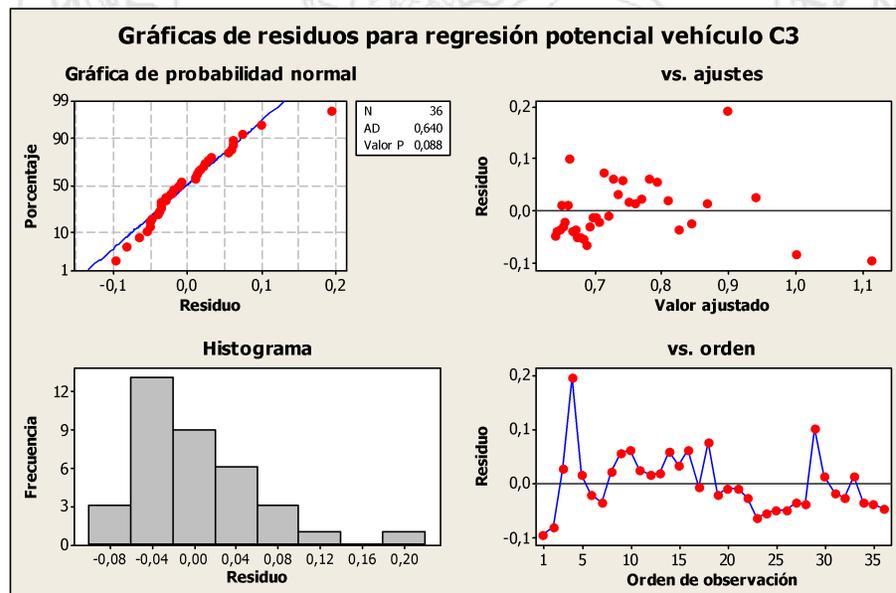


Figura 3-2. Residuos de regresión potencial para factor camión del vehículo tipo C3.

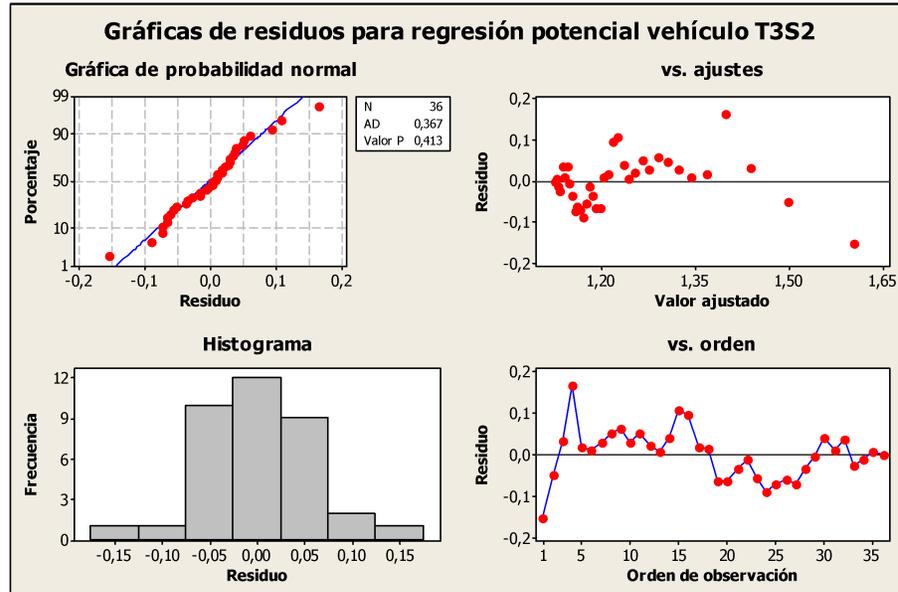


Figura 3-3. Residuos de regresión potencial para factor camión del vehículo tipo T3-S2.

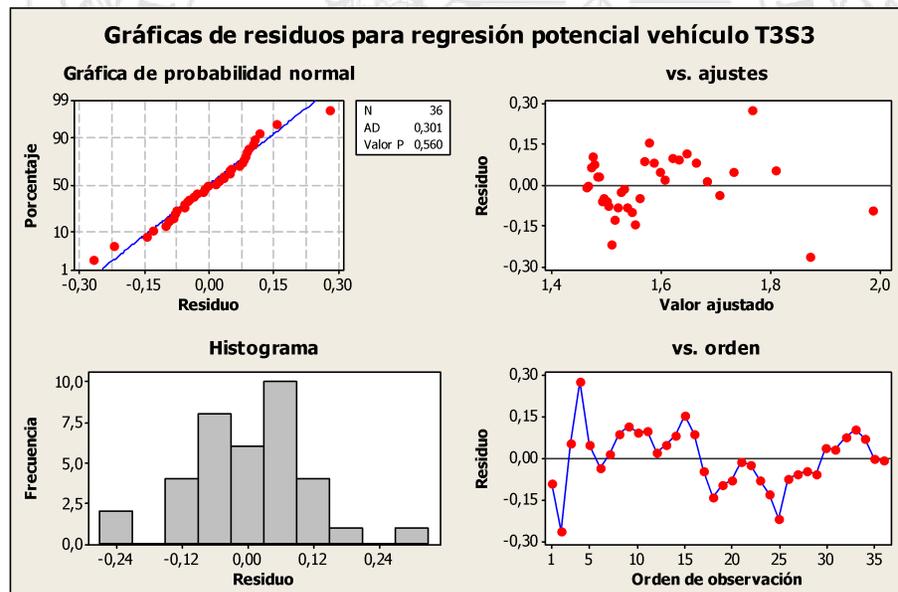


Figura 3-4. Residuos de regresión potencial para factor camión del vehículo tipo T3-S3.

Apéndice 4. Regresión múltiple entre factor camión e incumplimiento en los ejes para los vehículos T3-S2 y T3-S3.

Vehículo T3-S2. Análisis de regresión: T3-S2_FC vs. T3-S2_EXC_EJE_SIM; T3-S2_EXC_EJE_TAN

La ecuación de regresión es

$$T3-S2_FC = 0,919 + 0,984 T3-S2_EXC_EJE_SIMPLE + 0,0638 T3-S2_EXC_EJE_TANDEM$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	Significativo ($\alpha = 0,05$)
Constante	0,91913	0,03420	26,88	0,000	Sí
T3-S2_EXC_EJE_SIMPLE	0,9836	0,4260	2,31	0,027	Sí
T3-S2_EXC_EJE_TANDEM	0,063830	0,008467	7,54	0,000	Sí

S = 0,0659130 R-cuad. = 75,4% R-cuad. (Ajustado) = 73,9%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	2	0,43832	0,21916	50,45	0,000
Error residual	33	0,14337	0,00434		
Total	35	0,58169			

Fuente	GL	SC	Sec.
T3-S2_EXC_EJE_SIMPLE	1	0,19143	
T3-S2_EXC_EJE_TANDEM	1	0,24689	

Observaciones poco comunes

Obs	T3-S2_EXC_EJE_SIMPLE	T3-S2_FC	Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
4	0,046	1,5627	1,5927	0,0471	-0,0300	-0,65 X
5	0,026	1,3841	1,2529	0,0144	0,1313	2,04R
6	0,028	1,3503	1,2012	0,0121	0,1491	2,30R
14	0,138	1,2739	1,3681	0,0406	-0,0942	-1,81 X

R denota una observación con un residuo estandarizado grande.

X denota una observación cuyo valor X le concede gran apalancamiento.

Vehículo T3-S3. Análisis de regresión: T3-S3_FC vs. T3-S3_EXC_EJE_SIM; T3-S3_EXC_EJE_TAN; T3-S3_EXC_EJE_TRIDEM;

La ecuación de regresión es

$$T3-S3_FC = 1,10 + 0,998 T3-S3_EXC_EJE_SIMPLE + 0,0149 T3-S3_EXC_EJE_TANDEM + 0,0434 T3-S3_EXC_EJE_TRIDEM$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	1,09983	0,09628	11,42	0,000
T3-S3_EXC_EJE_SIMPLE	0,9977	0,3140	3,18	0,003
T3-S3_EXC_EJE_TANDEM	0,014859	0,005819	2,55	0,016
T3-S3_EXC_EJE_TRIDEM	0,043450	0,009431	4,61	0,000

S = 0,106241 R-cuad. = 61,5% R-cuad. (Ajustado) = 57,9%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	3	0,57744	0,19248	17,05	0,000
Error residual	32	0,36119	0,01129		
Total	35	0,93863			

Fuente	GL	SC	Sec.
T3-S3_EXC_EJE_SIMPLE	1	0,18426	
T3-S3_EXC_EJE_TANDEM	1	0,15361	
T3-S3_EXC_EJE_TRIDEM	1	0,23957	

Observaciones poco comunes

Obs	T3-S3_EXC_EJE_SIMPLE	T3-S3_FC	Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
1	0,190	1,8935	1,9288	0,0773	-0,0353	-0,48 X
4	0,154	2,0442	2,0534	0,0715	-0,0093	-0,12 X

X denota una observación cuyo valor X le concede gran apalancamiento.