

Análisis estadístico de un sistema de medición del pesaje de vehículos de carga en movimiento*¹

[An analysis of a measure system of weight-in-motion load vehicles]

[Análise do sistema de medição de pesagem em movimento de veículo de carga]

**ILIANA RAMÍREZ VELÁSQUEZ², ADRIANA GUERRERO PEÑA³,
JORGE IVÁN USMA GUTIÉRREZ⁴**

Recibo: 20.02.2016 – Aprobación: 08.10.2016

Resumen: *Entidades encargadas de vigilar y controlar las cargas de vehículos pesados que circulan por el sistema vial, algunos de los reportes locales indican que el sobrepeso de dichos vehículos registrados en estaciones de pesaje puede generar daños en las carreteras. El propósito de este trabajo es presentar un estudio descriptivo de un sistema de pesaje de vehículos de carga en movimiento para diseñar un protocolo de medición que se ajuste a los requerimientos de la Recomendación Internacional OIML R-134. Para ello se realizaron pruebas de excentricidad y exactitud para el pesaje estático, empleando 10 vehículos de carga. El error calculado en dichas pruebas, está dentro del intervalo de tolerancia (-20 a +20 Kg), lo que señala que el protocolo se ajustó a los requerimientos. En cuanto al pesaje en movimiento, se realizaron pruebas de*

*** Modelo para la citación de este artículo:**

RAMÍREZ VELÁSQUEZ, Iliana; GUERRERO PEÑA, Adriana & USMA GUTIÉRREZ, Jorge Iván (2016). Análisis estadístico de un sistema de medición del pesaje de vehículos de carga en movimiento. En: Ventana Informática No. 35 (jul-dic). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 47-62. ISSN: 0123-9678.

- 1 Reporte de caso proveniente del proyecto *Estudio de la recomendación internacional OIML R-134 para su aplicación en el pesaje de vehículos de carga en Colombia*, ejecutado en el periodo 05/2013-06/2014, e inscrito en el grupo de investigación *Didáctica y Modelamiento en Ciencias Exactas y aplicadas* del Instituto Tecnológico Metropolitano.
- 2 Física, Magister en Control y Automatización Industrial. Docente Investigadora. Instituto Tecnológico Metropolitano (Medellín, Antioquia, Colombia). Correo electrónico: ilianaramirez@itm.edu.co. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9779-4019>
- 3 Estadística, Magister en Administración. Docente Investigador. Instituto Tecnológico Metropolitano-Medellín. Instituto Tecnológico Metropolitano (Medellín, Antioquia, Colombia). Correo electrónico: adrianaguerrero@itm.edu.co
- 4 Ingeniero Químico, Magister en Ciencias Químicas. Docente Investigador. Instituto Tecnológico Metropolitano (Medellín, Antioquia, Colombia). Correo electrónico: jorgeusma@itm.edu.co

Repetibilidad (r) y Reproducibilidad (R) a tres velocidades diferentes. La variabilidad se midió a través de la aplicación del método estadístico ANOVA, en donde el porcentaje de la relación entre la Repetibilidad y la Reproducibilidad estuvo por debajo del 10%, lo que significa que el sistema de medición utilizado es aceptable.

Palabras clave: pesaje, repetibilidad, reproducibilidad, variabilidad

Abstract: *There are bodies responsible for monitoring and controlling heavy loads of vehicles on the road system, some local reports indicate that overweight situations in those vehicles can cause damage to the roads. The purpose of this paper is to present a descriptive study of a system of weigh-in-motion for trucks in order to design a measurement protocol that conforms to the requirements of the International Recommendation OIML R-134. In order to achieve the objective some eccentricity and accuracy for static loads tests were performed using ten vehicles charging. The calculated error in these tests is within the tolerance range between -20 and +20 Kg, which determined that the protocol was adjusted to the requirements. With respect to weigh-in-motion, Repeatability (r) and Reproducibility (R) tests at three different speeds were performed. The variability was measured by applying the statistical method ANOVA, where the percentage of the ratio Repeatability (r) and reproducibility (R) was below 10%, which means that the measurement system used is acceptable.*

Keywords: *weighting, repeatability, reproducibility, variability.*

Resumo: *No meio existem órgãos responsáveis pela vigilância e controlo das cargas de veículos pesados sobre o sistema viário, alguns relatórios locais indicam que o excesso de peso desses veículos matriculados pesando estações pode causar danos às estradas. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo descritivo de um sistema de pesagem de veículo de carga em movimento para projetar um protocolo de medição que satisfaça as exigências da Recomendação Internacional OIML R-134. Para esta excentricidade e precisão testes para cargas estáticas que foram realizados utilizando 10 caminhões. O erro calculado em tais testes é dentro do intervalo de tolerância (-20 a 20 kg), indicando que o protocolo foi ajustado para os requisitos. Como para a pesagem em movimento, testa repetibilidade (r) e reprodutibilidade (R) a três velocidades diferentes foram realizados. A variabilidade foi medida através da aplicação do método estatístico ANOVA, em que a percentagem da relação entre a repetibilidade e reprodutibilidade foi inferior a 10%, o que significa que o sistema de medição utilizado é aceitável.*

Palavras-chave: *pesagem, repetibilidade, reprodutibilidade, variabilidade.*

Introducción

En Colombia, los sistemas de pesajes estáticos y dinámicos son administrados por INVIAS, Instituto Nacional de Concesiones (INCO), entre otras. Estas entidades tienen entre sus funciones, detectar y controlar las cargas de los camiones que circulan por la Red Vial Nacional de Colombia, «*mediante estaciones de control de peso, fijas y móviles, encontrándose sobrepesos de camiones entre 1% á 10% en la estaciones fijas y entre 4% á 16% en estaciones móviles*» (Muñoz et al., 2011, 322), situación que puede generar daños en las carreteras por el sobrepeso.

El Ministerio de Transporte (2004), a través de la Resolución No. 004100, define los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de carga de transporte terrestre que se movilizan por la red vial nacional. En este punto es relevante considerar los modelos de regulación que establecen las características metrológicas, los instrumentos de medición y los métodos y equipos para verificar la conformidad propia del sistema de gestión de la calidad correspondiente.

En el ámbito internacional, *The International Organization of Legal Metrology* tiene varias publicaciones, entre ellas la OIML R 134 (OIML, 2003 y OIML, 2009), que junto a la NTC 2031 (Icontec, 2014), son base para la formulación del conjunto de reglas para calibrar los equipos de medición que se articule con el control de los sistemas de pesajes estáticos y dinámicos en las carreteras.

De otro lado, el deterioro de las carreteras debido al sobrepeso del flujo vehicular, hace necesario grandes inversiones para conservar la infraestructura en niveles económicos y seguros. Por esta razón, estudios desarrollados en torno a la identificación de los factores que afectan las carreteras cobran gran importancia. En este sentido, Macea, Fuentes & Álvarez (2013, 58), reportan un trabajo cuya finalidad es caracterizar adecuadamente el tráfico de carga que den cuenta de los efectos progresivos del incremento de cargas pesadas en las vías nacionales, ya que dicho incremento requieren de un control efectivo, puesto que esta situación puede ocasionar daños en las carreteras, lo implica la inversión de recursos adicionales para llevar a cabo el arreglo de las mismas.

En consonancia con las recomendaciones internacionales, se propone la implementación de un protocolo basado en la *Recomendación Internacional OIML R-134* aplicable en territorio nacional, de manera que pueda garantizar el control de cargas máximas permitidas de

acuerdo con la resolución 004100 (Ministerio de Transporte, 2004), para lo cual se diseñó un montaje experimental con fines de medir el peso de vehículos de carga en reposo y en movimiento utilizando una celda de carga convencional.

La aprobación del sistema de medición implementado se verificó mediante una prueba de *repetibilidad* y *reproducibilidad*. Así, se pudo determinar que la velocidad del vehículo, no afectó la toma de la medición de su peso, además se realizaron pruebas de *interbloqueo*, *excentricidad* y *exactitud* de carga el para el pesaje estático y se compararon estos resultados con los obtenidos en el pesaje de los vehículos en movimiento.

1. Antecedentes

1.1 Descripción del caso de estudio

El abordaje de un tema relacionado con los sistemas de pesaje en movimiento y medida de cargas en eje o conjunto de ejes de los camiones de carga, es un asunto importante, sobre todo si este apunta hacia el conocimiento y control del rango real de cargas que circulan por cierta ruta o región del país. En la práctica, cuando se pretende conocer dicho espectro se recurre a la metodología convencional de instalar balanzas portátiles o fijas en operativos de censos de carga, los cuales pueden ser, sin fines punitivos, evadidos por los conductores en unos casos, mientras que en otros se evidencia la sobrecarga, situación que genera daños en las carreteras. Esta afirmación es corroborada por Paul & David (1997, 1), quienes afirman que el deterioro de las carreteras es causado principalmente por las cargas de los ejes más pesados asociados con los vehículos comerciales grandes, pero al mismo tiempo un aumento de peso bruto permitido en vehículos comerciales puede ahorrar hasta un 5% en el costo de transporte de mercancías.

De otro lado, los camiones sobrecargados pueden causar retrasos en el resto del tráfico vehicular de manera que el retraso experimentado y la necesidad de permanecer detrás del vehículo de movimiento lento podría aumentar la frustración entre los pilotos más rápidos y causar un comportamiento inseguro, según señala Brewer (2000, 51). Por consiguiente, expresan Karim et al. (2014, 125), la presencia de un número significativo de camiones sobrecargados en un flujo de tráfico también puede crear problemas de seguridad para otros usuarios de la carretera.

Cabe aclarar que para Chatti, Manik & Brake (2009, 126), el daño en el pavimento se minimiza, si los vehículos de carga cuentan con diferentes configuraciones de varios ejes, además la valoración de dicho daño se puede realizar a partir del conocimiento de la distribución de carga real en los diferentes ejes de los vehículos. Esta situación es favorable para el diseño de carreteras dado que el espectro de carga se puede medir en campo con tecnologías altamente confiables y procedimientos de medición adecuados.

1.2 Sistemas de pesaje en movimiento

En los últimos años, señalan O'Brien, Žnidarič & Ojio (2009, 40), se han generado dispositivos diseñados para llevar a cabo la tarea de pesar vehículos en movimiento utilizando sensores basados en cuarzo o en celdas de carga.

«En el mundo existen dos (2) sistemas de pesaje en movimiento basados en las especificaciones internacionales de la norma ASTM E 1318-02: El primero, es denominado WIM (Weight in motion), que consiste en medir las fuerzas estáticas y dinámicas de los ejes de un vehículo en movimiento permitiendo almacenar datos sobre el peso de los vehículos, el volumen de tráfico, su clasificación y velocidad. (...) El segundo sistema de pesaje en movimiento consiste en un pesaje a través de un puente instrumentado y se denomina BWIM (Bridge Weight in motion), permite determinar el peso dinámico (total y por ejes, entre otros) de los camiones pesados que circulan sobre un puente, basados en su instrumentación y en desarrollos matemáticos denominados Algoritmos genéticos» (Muñoz, et al., 2011, 323).

Hang, Xie & He (2013, 143) afirman que hay muchos sistemas WIM⁵ disponibles en el mercado, cuya mayoría pueden generar resultados razonablemente precisos, por lo que comúnmente se usan como parte integral del mantenimiento de carreteras, para mejorar la regulación del peso de camiones en las carreteras, y ha facilitado la implementación de mecanismos de cobro de peaje por el peso, más no por clase de vehículo. Estos sistemas requieren de la aplicación de medidas de control de peso eficaces para las regulaciones de peso de camión y de esta manera evitar graves daños a la infraestructura y el aumento de riesgo en accidentes de tráfico.

⁵ «Weigh-in-motion (WIM), es una tecnología popular y eficiente que puede medir el de vehículos que se desplazan a velocidades normales o reducidas» Hang, Xie & He (2013, 143).

Por su parte, Karim et al. (2014, 124), consideran que la adecuada utilización del sistema WIM para mejorar la aplicación de límite de peso sin duda beneficia, no sólo a las autoridades de tráfico, sino también a los automovilistas en general. Por supuesto, la eficacia de las actuales estaciones de pesaje estático es bastante baja en comparación con el número real de casos de violación de la normativa por parte de los vehículos comerciales detectados por el sistema WIM, permitiendo que estos sistemas se conviertan en una herramienta apropiada para ayudar a las entidades reguladoras de tránsito, con el fin de preservar la infraestructura vial del deterioro prematuro y mejorar la seguridad de los demás usuarios de la carretera.

De otro lado, la medición del peso de vehículos en movimiento, se puede emplear, junto con otras cantidades físicas como velocidad y aceleración, para definir modelos que indican la magnitud de los desplazamientos y esfuerzos que se generan en el terreno como consecuencia de la aplicación de carga, como lo señalan Vargas & Barrantes (2013, 24): *«al comparar el registro de aceleraciones con los pesos de los vehículos se observa que en la superficie asfáltica hay una relación directa entre el peso de los vehículos y los registros de aceleraciones que se aforaron en el trabajo de campo, ya que conforme el peso de los vehículos es mayor el pico de aceleración registrada también aumenta»*.

1.3 Confirmación de métodos de medición

En cuanto a la confirmación de los métodos de medición, la literatura y las normas, como por ejemplo la NTC 3529-1 (Icontec, 2005a), describen la manera de determinar la exactitud y veracidad de un método de medida con base a modelos estadísticos que requieren un análisis de la varianza. Teniendo en cuenta la calibración de los equipos de medición de pesaje no automáticos, Tsimitras (2003, 5) propuso una metodología cuya finalidad es calcular el total de incertidumbre del instrumento de pesaje basada en parámetros tales como *repetibilidad*, *excentricidad* y *resolución* entre otros, parámetros incluidos en recomendaciones y normativas vigentes. En particular, Gómez (2013, 55), adapta *«la metodología del modelo R&R⁶ para el pesaje en la operación de preparación de pedidos, se implementa en una empresa dedicada al*

6 *«La selección del método de R&R [Reproducibilidad y Replicabilidad] se justifica en el hecho de que es un modelo estadístico, que permite medir la variabilidad en los sistemas de medición de pesaje en procesos logísticos, lo cual es determinante en la eficiencia y satisfacción de los pedidos, de los clientes, ya que garantiza la entrega de las cantidades solicitadas»* (Gómez, 2013, 61).

procesamiento y comercialización de ensaladas de frutas, y verduras que permite atender los requerimientos de los clientes en la ciudad de Medellín».

Para Botero, Arbeláez & Mendoza (2007, 537) «*un estudio de repetibilidad y reproducibilidad sirve para calcular su variabilidad y detectar cuando éste se encuentra funcionando en condiciones anormales, de esta manera, se pueden buscar estrategias correctivas que le permitan al proceso volver a trabajar en condiciones normales*». De forma similar Arango, Gómez & Zapata (2013, 135) señalan que la variabilidad del pesaje a través de la aplicación del método estadístico de *Reproducibilidad y Replicabilidad (R&R)* permite identificar el comportamiento, causas y factores relacionados con la báscula y operarios, los cuales afectan la variabilidad de las mediciones de pesaje.

En Colombia, se cuenta con normativa en cuestión de pesaje en automóviles en movimiento, en ella se contemplan la instrumentación requerida para tal fin, y sus respectivas características metrológicas, tales como, pesaje total, parcial, en movimiento, el rango de pesajes con límites establecidos: máximo y mínimo, rango de velocidades. En términos generales, la NTC 5367-1 (Icontec, 2005b) busca especificar los requisitos y métodos para llevar a cabo pesaje de automóviles en movimiento, determinando su masa total, mientras en la NTC 5367-2 (Icontec, 2005c) se tienen establecidos los formatos para llevar a cabo el informe que da cuenta de los resultados de los ensayos, en la misma dirección que presenta la Recomendación OIML R-134, por lo tanto es importante implementar un protocolo basado en la recomendación mencionada para ser aplicado en territorio nacional, de tal manera que pueda garantizar el control de cargas máximas permitidas por la Resolución 004100 de 2004.

1.4 Fundamentación teórica

1.4.1 Verificación de básculas camioneras. Para llevar a cabo el proceso de medición es necesario la verificación de los instrumentos para determinar si dicho proceso se práctica de acuerdo con lo establecido en las recomendaciones correspondientes de la OIML u otras normas vigentes, tales como la NTC 3529, donde se especifican los protocolos para que la medida sea considerada como exacta en un rango específico. Un parámetro importante a evaluar es la exactitud, constituida en dos componentes, la veracidad y la precisión. La veracidad es un parámetro que expresa la proximidad de la media de una serie

$$T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk} \quad (1)$$

$$T_x^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 \quad (2)$$

$$T_c^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij}^2 \quad (3)$$

$$T_1^2 = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n T_{jk}^2 \quad (4)$$

$$T_2^2 = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n T_{ik}^2 \quad (5)$$

$$SSA = T_1^2 - \frac{T^2}{N} \quad (6)$$

$$SSB = T_2^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

$$SSAB = T_c^2 + \frac{T^2}{N} - T_1^2 - T_2^2 \quad (8)$$

$$SSE = T_x^2 - T_c^2 \quad (9)$$

$$SST = T_x^2 - \frac{T^2}{N} \quad (10)$$

$$MSA = \frac{SSA}{a-1} \quad (11)$$

$$MSB = \frac{SSB}{b-1} \quad (12)$$

$$MSAB = \frac{SSAB}{(a-1)(b-1)} \quad (13)$$

$$MSE = \frac{SSE}{ab(n-1)} \quad (14)$$

$$r = 5.15\sqrt{MSE}; \%r = \frac{r}{T} * 100\% \quad (15)$$

$$R = 5.15\sqrt{\frac{MSA-MSAB}{bn}}; \%R = \frac{R}{T} * 100\% \quad (16)$$

$$I = 5.15\sqrt{\frac{MSAB-MSE}{n}}; \%I = \frac{I}{T} * 100\% \quad (17)$$

$$r\&R = \sqrt{r^2 + R^2 + I^2} \quad (18)$$

$$\%r\&R = \sqrt{(\%r)^2 + (\%R)^2 + (\%I)^2} \quad (19)$$

2. Metodología

2.1 Montaje experimental

El montaje consistió en la ubicación de dos básculas camioneras dispuestas una frente a otra, con el objeto de llevar a cabo el pesaje de vehículos de carga en reposo y en movimiento. Se utilizaron dos básculas camioneras SUPAWEIGHT 5000 C serie 009125, calibradas de acuerdo a la normativa establecida para este tipo de medición. Los vehículos empleados fueron siete camiones de dos ejes, dos tracto-camiones de dos ejes con semi-remolque de dos ejes, y un camión de cuatro ejes, todos con carga. De cada vehículo se obtuvieron tres indicaciones de pesaje correspondiendo su promedio al *peso de referencia*.

2.2 Procedimiento

Para utilizar el montaje planteado, se llevó a cabo el proceso de verificación, en el cual se comprueba el cumplimiento de los requisitos definidos en la OIML R-134 y la NTC 2031. Se incluyen las pruebas de *Excentricidad*, *Exactitud* (con una tolerancia de ± 20 Kg), *Repetibilidad* (*r*), *Reproducibilidad* (*R*) e *Interbloqueo de velocidad*. La prueba de *Repetibilidad* (*r*) se realizó para los 10 vehículos de carga mencionados a una velocidad de 8 Km/h (velocidad de operación). En la prueba de *Reproducibilidad* (*R*) se varió la velocidad de los vehículos, y se tomaron datos del pesaje a 10 y 5 Km/h, además de las indicaciones dadas a la velocidad de operación. En todos los casos, se tomaron cinco indicaciones por vehículo. Cabe anotar que la puesta en marcha de este montaje es definir un protocolo de medición utilizando básculas convencionales para vehículos de carga en movimiento, sin necesidad de implementar costosos sistemas de pesaje.

2.3 Análisis estadístico

La precisión del sistema de medición se analiza a través del método R&R (repetibilidad y reproducibilidad), utilizando la ANOVA (Análisis de varianza) de medidas repetidas, el método más exacto para cuantificar la variabilidad de un sistema de medición, en este caso, variabilidad debido al estado de movimiento del vehículo. Con la información que se obtiene al aplicar el análisis de varianza al conjunto de datos, se calcula la Repetibilidad y reproducibilidad, de acuerdo a las ecuaciones descritas en la sección de la fundamentación teórica del presente artículo. Se debe tener en cuenta, de acuerdo con Botero, Arbeláez & Mendoza (2007, 535) y Arango, Gómez & Zapata (2013, 144), que si el

porcentaje de la relación entre la *repetibilidad* y la *reproducibilidad* está por encima del 30% el sistema de medición se considera no aceptable, si este resultado está entre 10 y 30% el sistema de medición puede ser aceptable, aunque requiere mejoras y si está por debajo del 10% el sistema de medición es aceptable.

Otro análisis estadístico que se realiza, es lo que se denomina la carta de control, empleada para analizar la variación de un proceso, en ella se puede observar el comportamiento de la variable peso en función de la carga.

3. Resultados y discusión

3.1 Descripción de resultados

3.1.1 Prueba de Excentricidad. Esta prueba consiste en ubicar la carga de prueba en diferentes posiciones del receptor de carga. La carga seleccionada se aplicó en un sentido y en pares de punto de apoyo y luego en sentido inverso, las mediciones aparecen en la Tabla 1. La carga aplicada fue de 4190 Kg, la división de escala del instrumento de medida es de 10 Kg. El error se calculó a partir de la ecuación (1):

$$Error = Q_{indicada} - Q_{aplicada} + 0.5d - \Delta Q \quad (20)$$

Tabla 2. Exactitud de carga

No.	Carga (Kg)	Indicación (Kg)	Aumento ΔQ (kg)	Margen de error (Kg)
1	0	0	7	-2
2	500	500	6	-1
3	1000	1010	7	8
4	2000	2010	8	7
5	4000	4010	9	6
6	6000	6010	8	7
7	8000	8000	6	-1
8	10000	10010	7	8
9	14000	14020	8	17
10	16000	16020	7	18
11	18000	18020	6	19
12	20000	20020	5	20

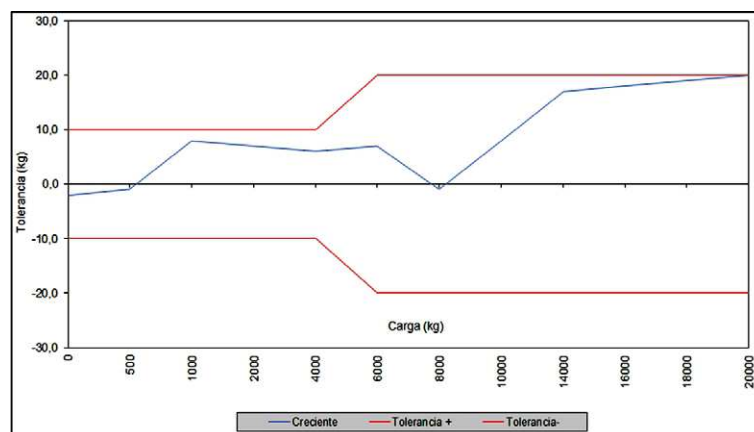


Figura 1. Carta de control: Errores máximos tolerados

3.1.3 Pesaje de los vehículos en movimiento. La Tabla 3 contiene los cálculos de las ecuaciones (6) a la (14). La relación entre la *repetibilidad* (r), la *reproducibilidad* (R) y su porcentaje se obtuvo a partir de las ecuaciones (18 y 19): , y , que de acuerdo con los criterios de aceptación considerados, se deduce que el sistema de medición es aceptable. La velocidad entre 5 Km/h y 10 Km/h, no incide en la indicación del peso de báscula, las variaciones no son estadísticamente significativas.

3.1.4 Prueba de Interbloqueo. La prueba de interbloqueo se realizó para verificar que la velocidad al momento de realizar el pesaje permanece constante.

Tabla 3. Tabla ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Velocidad	SSA = 809,7	2	MSA = 404,8
Vehículos	SSB = 2,1E+10	9	MSB = 2,4E+09
Interacción	SSAB = 5996,6	18	MSAB = 333,1
Error	SSE = 26374,8	120	MSE = 219,8
Total	SST = 2,1E+10	149	

3.2 Discusión de resultados

En la prueba de excentricidad se puede observar que el error en la medida en valor no superó los 9 Kg, considerando que, de acuerdo con la Figura 1, el error máximo tolerado es de 20 Kg, quedando claro que la posición del vehículo no incide en la indicación del peso en la báscula camionera.

En la prueba de exactitud, en donde se observa el error en la medida conforme se aumenta la carga, dicho error no supera los 20 Kg, que es justamente el error máximo permitido, en la Figura 1 se puede observar el comportamiento del error, el cual no cruza los límites definidos en la carta de control.

Aunque el resultado de la aplicación de la ANOVA, mostró que no hay diferencia estadísticamente significativa, entre las indicaciones de peso a diferentes velocidades, al obtener la representación gráfica del intervalo de confianza para la diferencia de las medias de las tres velocidades (Figura 2), se observa que si hay diferencia en el promedio de los pesos con relación a la velocidad, pero no son diferencias muy marcadas.

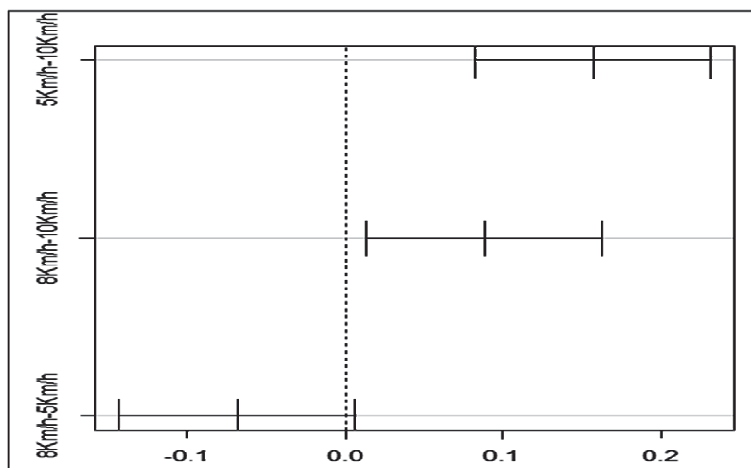


Figura 2. Diferencias entre las medias de las diferentes velocidades (niveles)

4. Conclusiones

La desviación estándar de la indicación del peso de los vehículos en movimiento tiende a ser mayor que la de los vehículos en reposo, excepto en los vehículos 5 y 9. Se podría pensar que a mayor peso y velocidad los datos tenderían a tener una medida de dispersión mayor.

El método ANOVA fue adecuado para calcular la variabilidad de este proceso. Esto se debe a que se considera la variabilidad que se presenta por la afectación, en este caso, de la medida del peso debido a la velocidad del vehículo. Sin embargo, el cálculo de intervalos de confianza muestra que no hay evidencia suficiente que permita decir que hay diferencia significativa entre los pesos de los vehículos medidos a velocidades de 5 y 8 Km/h, pero, sí la hay entre los pesos medidos a las velocidades de 8 y 10 Km/h y entre 5 y 10 Km/h, lo que hace pensar que el nivel 10 Km/h del factor velocidad sí impacta considerablemente la medida del peso de los vehículos al pasar por la báscula, pero no afecta en general, al sistema de medición.

El motivo que conlleva a la realización de este estudio de caso se centra en la validación de un método de medición estático y dinámico. El montaje es sencillo pero es útil para verificar que los vehículos de carga en reposo o en movimiento no afectan la indicación en la báscula camionera de manera significativa, además el procedimiento es susceptible a incluirse en los protocolos para la verificación del instrumento de medición y al proceso mismo de medición. Situación que en cierta medida favorece el control por parte de las autoridades competentes de los vehículos de carga que circulan por la red nacional.

Como trabajos futuros, se puede considerar ampliar el alcance del estudio de caso, incluyendo otros rangos de velocidad y la inclinación de la pendiente de la carretera, con el fin de obtener los perfiles de velocidad y cuantificar el efecto en la medición.

5. Agradecimientos

Se agradece al Ingeniero Alejandro Argumedo, Director de la empresa Metroglobal, por su apoyo al desarrollo de este estudio.

Referencias bibliográficas

- ARANGO SERNA, M.D.; GÓMEZ M., R.A. & ZAPATA CORTÉS, J.A. (2013). Medición y mejoramiento de la operación de despacho de carbón a través de modelos estadísticos R&R [en línea]. En: Boletín de Ciencias de la Tierra. No. 33 (Jul.). Medellín (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. p. 135-146. e-ISSN: 2357-3740. <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/29872/41118>> [consulta: 10/04/2016]
- BOTERO ARBELÁEZ, M.; ARBELÁEZ SALAZAR, O. & MENDOZA VARGAS, J.A. (2007). Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. En: Scientia et Technica, Vol. 13, No 37 (dic). Pereira (Colombia): Universidad Tecnológica de Pereira. p. 533-537. ISSN: 0122-1701.
- BREWER, A.M. (2000). Road rage: what, who, when, where and how? [online]. In: Transport Reviews, Vol. 20, No. 1 (Jan). London (UK): Taylor & Francis Group. p. 49-64. ISSN: 0144-1647. <DOI:10.1080/014416400295338>, <http://www.tandfonline.com/sci-hub/cc/doi/pdf/10.1080/014416400295338#.V0X_gPnhBpg> [consult: 10/05/2016]
- CHATTI, K.; MANIK, A. & BRAKE, N. (2009). Effect of axle configurations on fatigue and faulting of concrete pavements [online]. In: 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles, ICWIM 5 (19-22/05/2008), Paris (France): Laboratoire central des ponts et chaussées. JACOB, Bernard; O'BRIEN, Eugene; O'CONNOR Alan & BOUTELDJA, Mohamed (eds.) (2009). Proceedings of the ICWIM 5. International Conference on Heavy Vehicles. Hoboken (NJ, USA): Wiley-ISTE p. 117-126. ISBN: 978-1-84821-059-2 <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118557464.ch13/pdf>> [consult: 10/04/2016]
- GÓMEZ MONTOYA, R.A. (2013). Modelo estadístico de medición R & R en el pesaje de productos de la preparación de pedidos en un centro de distribución. En: Revista Soluciones de Postgrado EIA, Vol. 5, No. 10 (ene-jun). Medellín (Colombia): Escuela de Ingeniería de Antioquia. p. 45-63. ISSN: 2011-3854.
- HANG, W.; XIE, Y. & HE, J. (2013). Practices of using weigh-in-motion technology for truck weight regulation in China [online]. In: Transport Policy, Vol. 30 (Nov). p. 143-152. ISSN: 0967-070X. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X13001467>>, <doi:10.1016/j.tranpol.2013.09.013>, <http://ac.els-cdn.com/S0967070X13001467/1-s2.0-S0967070X13001467-main.pdf?_tid=7f36511a-22b6-11e6-a4fb-00000aacb362&acdnat=1464207969_1ffe325b5544a80e2a2d65a086226181> [consult: 19/04/2016]
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC (2014). Norma Técnica Colombiana NTC 2031: Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento no Automático (segunda actualización) [en línea]. Bogotá (Colombia): Icontec (16/07/2014). <http://www.sic.gov.co/drupal/sites/default/files/normatividad/Proyecto_Resolucion_BALANZAS_NTC2031_Version_2014.pdf> [consulta: 12/05/2016].
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC (2005a). Guía Técnica Colombiana GTC 131: exactitud (veracidad y precisión) de los métodos y de los resultados de mediciones. Guía práctica para el uso de la NTC 3529-2 (ISO 5725-2) en el diseño, implementación y análisis estadístico de resultados [en línea]. Bogotá (Colombia): Icontec (22/12/2005). 4 p. <<https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/GTC131.pdf>> [consulta: 12/05/2016].
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC (2005b). Norma técnica colombiana NTC 5367-1: Instrumentos automáticos para automóviles en movimiento. Parte 1. Pesaje total del vehículo. Bogotá (Colombia): Icontec. 50 p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC (2005c). Norma técnica colombiana NTC 5367-2: Instrumentos automáticos para automóviles en movimiento. Parte 2. Formato de informe de ensayo. Bogotá (Colombia): Icontec. 55 p.
- KARIM, M.R.; IBRAHIM, N.I.; SAIFIZUL, A.A. & YAMANAKA, H. (2014). Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability [online]. In: IATSS Research, Vol. 37, No. 2 (Mar). Tokyo (Japan): International Association of Traffic and Safety Sciences, IATSS. p. 124-129. ISSN: 0386-1112 <<http://dx.doi.org/10.1016/j.iatssr.2013.06.004>>, <http://ac.els-cdn.com/S0386111213000174/1-s2.0-S0386111213000174-main.pdf?_tid=90497968-1ed9-11e6-

- b05e-00000aacb35d&acdnat=1463783225_6b9882cad3315b01cd78e0d5ffb9dc5f>
[consult: 10/05/2016]
- MACEA, L.F.; FUENTES, L.G. & ÁLVAREZ, A.E. (2013). Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. En: Revista Facultad de Ingeniería, No. 66 (Mar). Medellín (Colombia): Universidad de Antioquia. p. 57-69. ISSN: 0120-6230.
- MINISTERIO DE TRANSPORTE (2004). Resolución No. 004100 de 28 dic 2004 [en línea]. Bogotá (Colombia): Ministerio de Transporte. 9 p. <<https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241>> [consulta: 13/05/2016]
- MUÑOZ, E.; GÓMEZ, D; NÚÑEZ, F & FLÓREZ, C (2011). Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación [en línea]. En: Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 26, No. 3 (Dic.). Santiago (Chile): Pontificia Universidad Católica de Chile. p. 321-352. e-ISSN: 0718-5073. <<http://www.scielo.cl/pdf/ric/v26n3/art05.pdf>> <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732011000300005>> [consulta: 15/05/2016]
- O'BRIEN, E.; ŽNIDARIČ, A. & OJIO, T. (2009). Bridge weigh-in-motion – latest developments and applications worldwide [online]. In: 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles, ICWIM 5 (19-22/05/2008), Paris (France): Laboratoire central des ponts et chaussées. JACOB, Bernard; O'BRIEN, Eugene; O'CONNOR Alan & BOUTELDJA, Mohamed (eds.), Proceedings of the ICWIM 5. International Conference on Heavy Vehicles. Hoboken (NJ, USA): Wiley-ISTE p. 39-56. ISBN: 978-1-84821-059-2 <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118623305.ch2/pdf>>, <http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470394090_sample_442033.PDF> [consult: 10/04/2016]
- ORGANIZATION INTERNATIONAL OF LEGAL METROLOGY, OIML. (2003). International Recommendation OIML R 134-1: Automatic instruments for weighing road vehicles in motion Total vehicle weighing. Paris (France): Organization International of Legal Metrology. 41 p. <https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r134-1-e03.pdf> [consult: 12/05/2016]
- ORGANIZATION INTERNATIONAL OF LEGAL METROLOGY, OIML. (2009). International Recommendation OIML R 134-2: Automatic Instruments For Weighing Road Vehicles In Motion And Measuring Axle Loads - Part 2: Test Report Format. Paris (France): Organization International of Legal Metrology. 72 p. <https://www.oiml.org/fr/files/pdf_r/r134-2-f09.pdf> [consult: 12/05/2016]
- PAUL, C. & DAVID, C. (1997). The Design and Performance of Road Pavements. 3 ed. New York (USA): McGraw-Hill. 528 p. ISBN: 0070144516.
- PROZZI, J.A; HONG, F. & LEIDY, J. (2006). Implementation Aspects of Traffic Characterisation by Means of Axle Load Spectra in the NCHRP Mechanistic-Empirical Design Guide [CD-ROM]. In: 10th International Conference on Asphalt Pavements (12-17/08/2006), Quebec (Canada): International Society for Asphalt Pavements, ISAP. Proceedings of the conference, Vol. 2, p. 1083-1092. ISBN: 9781617820847.
- TSIMITRAS, P. (2003). Calibration of electronic nonautomatic weighing instruments - Error analysis. In: OIML Bulletin, Vol. 44, No. 2 (Apr). Paris (France): International Organization of Legal Metrology. p. 5-19. ISSN: 0473-2812.
- VARGAS QUINTERO, J.N & BARRANTES, D.M. (2013). Efectos del tránsito en la estabilidad de taludes [en línea]. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Civil). Bogotá (Colombia): Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. 49 p. + anexos. <<http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12687>> [consulta: 12/05/2016]