

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) EMPLEANDO TECNOLOGÍA LASER DE TRES DIMENSIONES (LCMS) Y PERFILOMETRO LASER.

David Saldaña M.¹, Rodrigo Díaz T.², Waldo Marquez³, Ricardo Garrido S.⁴

¹ APSA, Carrera 16 # 96-64 Of 509 Bogotá, Colombia, dsaldana@apsacolombia.co

² APSA, Calle Narciso de la Colina N° 421 Of 1402 Miraflores Lima – Perú, rdiaz@apsaperu.pe

³ APSA, Calle Narciso de la Colina N° 421 Of 1402 Miraflores Lima – Perú, wmarquez@apsaperu.pe

⁴ APSA, Jose Manuel Infante 2802, Santiago - Chile, rgarrido@apsa.cl

Resumen

El Índice de Rugosidad Internacional IRI es un concepto desarrollado por el Banco Mundial en los 80, se define como un indicador que mide las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan: la calidad del rodado, seguridad, costos de mantención y operación del vehículo. También se relaciona con el confort que siente el usuario al transitar por carretera. Existen diversos métodos para medir el IRI, clasificándolos por clases: I, II, III, IV, según la forma de obtención del perfil longitudinal y grado de precisión de las mediciones. En el mundo las agencias viales adoptaron este indicador para la recepción, evaluación y mantención de las carreteras.

Dentro de los equipos clase I, el Perfilómetro Laser es el más usado en el gremio vial, sin embargo, debido al avance de la tecnología existen equipos como el Laser Crack Measurement System (LCMS por sus siglas en inglés) que realiza un escaneo de la superficie del pavimento en tres dimensiones para posteriormente realizar el cálculo del indicador. El estudio realizado presenta los resultados obtenidos al efectuar la evaluación del IRI empleando ambas tecnologías, demostrando que los resultados entre equipos son repetibles, reproducibles y comparables entre sí.

Palabras Clave: Rugosidad – IRI – Perfilómetro Laser, LCMS.

1. Antecedentes

El Índice de Rugosidad Internacional es un concepto desarrollado por el Banco Mundial en los 80 que emplea como base matemática el concepto denominado Golden Car [1]. El cálculo matemático está basado en los desplazamientos verticales en valor absoluto a los cuales se ve sometido un cuarto de carro, dividido por la distancia recorrida.

Este índice permite conocer de manera cuantitativa la calidad asociada a un determinado camino y viene siendo empleado por las diferentes agencias viales a nivel mundial para controlar y verificar la calidad de sus carreteras. Existen diferentes equipos que permiten realizar la evaluación de este indicador, esta diferenciación está basada en la manera como estos equipos obtienen el perfil longitudinal para realizar el cálculo del índice. Es así como el Banco Mundial dividió los equipos en 4 diferentes categorías a saber [2]:

- Clase 1: Perfil de precisión. Representa el mayor estándar de precisión para la medición del IRI. Requiere que como base para el cálculo del IRI se realice una medición precisa del perfil longitudinal como una serie de puntos de elevación cercanos y equidistantes a lo largo de la huella de circulación.
- Clase 2: Otros métodos perfilométricos. Esta clase incluye a todos los métodos en que el perfil longitudinal es medido como base para el cálculo del IRI, pero que no son capaces de lograr la precisión requerida para una medición clase 1.
- Clase 3: IRI estimado mediante ecuaciones de correlación. Métodos que dependen de la respuesta dinámica del sistema de medición para obtener propiedades de rugosidad comparables a la escala de IRI mediante ecuaciones de correlación.
- Clase 4: Calificación subjetiva y dispositivos no calibrados.

El perfilómetro laser se encuentra ubicado en los equipos clase 1[3], actualmente es el más reconocido y empleado a nivel mundial y su uso es ampliamente aceptado por las diferentes agencias viales. El perfilómetro empleado se presenta en la Fotografía1 y corresponde a un Hawkeye series 1000, clasificado como el de máxima precisión en su tipo, de acuerdo al estándar ASTM E 950-94. Este equipo mide en el sentido de circulación en forma continua y sin interrumpir el tránsito. Su operación se realiza en conjunto con el sistema de posicionamiento kilométrico, permitiendo a la persona que lo está utilizando, definir los intervalos de muestreo y ubicando a su vez cualquier tipo de evento o singularidad que se detecte durante la campaña de medición en terreno.



Fotografía1 Equipo perfilómetro laser.

Por otro lado, el Laser Crack Measurement System (LCMS), presentado en la Fotografía 2 se clasifica dentro de los equipos clase 1, esto debido a la manera en que obtiene los datos, sin embargo, por ser una nueva tecnología no es conocida por muchas agencias viales. El LCMS es un equipo que realiza un escaneo en 3 dimensiones a la superficie del pavimento, lo cual permite además identificar los deterioros superficiales, el ahuellamiento que se presenta en la carretera evaluada y al acoplarle un acelerómetro permite evaluar el IRI del camino. Además de su precisión destaca la mínima interrupción de los carriles, ya que evalúa a cualquier velocidad entre 0 y 120 km/hora.



Fotografía 2 Equipo Laser Crack Measurement System.

En países como Australia se han realizado investigaciones con el objetivo de conocer el comportamiento de este equipo y compararlo frente a otros dispositivos, los resultados obtenidos presentan una correlación del 97% y demuestran que al adicionar un acelerómetro al equipo LCMS se cumplen los requisitos para que este equipo pueda ser empleado [4]. En Sur-América este equipo se ha empleado en gran manera en Chile, obteniendo resultados satisfactorios con su uso. A fin de poder evaluar el grado de relación existente entre Perfilómetro Laser con el LCMS, se procedió a evaluar una ruta que presentase diferentes condiciones en lo que respecta al perfil longitudinal IRI y así poder realizar el análisis estadístico bajo diferentes supuestos en función de los resultados obtenidos en terreno por dos operadores diferentes.

2. Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es comparar las mediciones realizadas del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) empleando dos equipos disponibles en el mercado, como lo son el Perfilómetro Laser y el LCMS, evaluando si los resultados entre equipos son repetibles, reproducibles y comparables entre sí.

3. Metodología del estudio

Como primera parte de las pruebas, los equipos se montan y calibran según recomendaciones indicadas por el fabricante validando los datos de los equipos.

Una vez efectuadas las evaluaciones en terreno, se realizó un análisis estadístico con el objetivo de poder evaluar el grado de repetibilidad y reproducibilidad (GRR). Existen distintos métodos para realizar un estudio GRR a un sistema de medición, ya sea en forma de rango o su representación como varianzas o desviaciones estándar. Los métodos que se utilizan son: Rango, Promedio y Rango, y ANOVA (análisis de varianza) [5].

Entre estos métodos, el ANOVA es el más completo, dado que permite diseñar un experimento para cualquier tipo de instrumento o sistema de medición. Además, estima la varianza con mayor precisión y entrega información acerca de las partes, los operadores y su interacción. El experimento realizado contempló:

- 2 Equipos de medición:
Equipo de medición 1: Laser Crack Measurement System (LCMS)
Equipo de medición 2: Perfilómetro Laser.
- 2 Operadores.
Se seleccionó a los operadores de un conjunto de operarios de los equipos de medición cuyo nivel de capacitación es alto. Los operadores fueron seleccionados al azar dentro de un grupo de personas que se han desempeñado en dicha labor por más de dos años y conocen el funcionamiento de los equipos de medición en todos sus niveles.
- 2 repeticiones por operador.
Cada operador realizó dos evaluaciones con cada uno de los equipos de medición y tramo evaluado.
- 1 Tramo de medición.
El tramo evaluado corresponde a un sector de 30 kilómetros de longitud de una carretera chilena ubicada en la Región Metropolitana. La carpeta de rodado presenta diferentes estados de deterioro. Se consideró evaluar la pista lenta (pista de tránsito pesado), que tiene un ancho de 3.5 metros y un TMDA de 3.072 vehículos.

Cada operador realiza 2 pasadas por equipo manteniendo una velocidad de operación constante de acuerdo a la normativa existente e instrucciones del fabricante, identificando cualquier evento o singularidad que se presente durante las evaluaciones. Una vez realizada las mediciones, los datos son procesados con los softwares especializados de cada equipo. Se obtuvieron los resultados de IRI promedio para unidades de muestra (UM) de 10 m, 50 m y 100 m para todas las pasadas y operadores. A continuación se detalla la base de datos.

Tabla 1. Consideraciones del ensayo

Op.	Sector Evaluado	Equipos de Medición	Unidades 10 m	Unidades 50 m	Unidades 100 m	N° de Pasadas	IRI @10	IRI @50	IRI@ 100
1	1 - Ruta 5 Norte (30 Km)	LCMS	3000	600	300	2	6000	1200	600
		Perfilómetro Laser	3000	600	300	2	6000	1200	600
2	1 - Ruta 5 Norte (30 Km)	LCMS	3000	600	300	2	6000	1200	600
		Perfilómetro Laser	3000	600	300	2	6000	1200	600

La base datos conformada presentó valores promedio en distintos rangos los cuales pueden ser clasificados en categorías de bajo, medio y alto. Con el propósito de verificar el comportamiento del sistema de medición para distintos niveles del estado de la carpeta de rodado, se seleccionó unidades de muestra cuyos resultados de IRI promedio cada 100 metros se clasifican como bajo ($IRI < 1.5$ m/km), medio ($1.5 > IRI > 2.7$ m/km) y alto ($IRI > 2.7$ m/km).

La base de datos se filtró y una parte de ella fue utilizada para realizar el análisis. Los pasos para el análisis de datos se presenta a continuación:

1. Análisis preliminar de datos.

Este análisis incluye, gráficas comparativas para resultados con ambos equipos, operadores y pasadas. Además se calcula el estadístico R^2 para comparar resultados entre equipos y obtener un valor de correlación. De igual forma se tomaron en consideración los estudios de repetibilidad y reproducibilidad para cada equipo según indica el punto 2 y 3 del presente apartado como un análisis interno. El estudio definitivo consideró el sistema de medición conjunto entre ambos equipos de acuerdo a lo indicado en el punto 4.

2. Estudio GRR para el equipo LCMS.

- Se realizó un estudio GRR para tres unidades de muestra de 10 m cuya clasificación de IRI es bajo, medio y alto. Se repitió el ejercicio para resultados en unidades de muestra de 50 m y 100 m.
- Se realizó un estudio GRR para 15 unidades de muestra de 100 m, 5 unidades para cada clasificación de IRI.

3. Estudio GRR para el equipo Perfilómetro Laser

- Se realizó un estudio GRR para tres unidades de muestra de 10 m cuya clasificación de IRI es bajo, medio y alto. Se repitió el ejercicio para resultados en unidades de muestra de 50 m y 100 m.
- Se realizó un estudio GRR para 15 unidades de muestra de 100 m, 5 unidades de muestra para cada clasificación de IRI.

4. Estudio GRR, objeto del presente estudio, para las mediciones con ambos equipos considerados como un único sistema de medición.

- Se realizó un estudio GRR para 15 unidades de muestra de 100 m, 5 unidades de muestra para cada clasificación de IRI.

Finalmente, se realizaron los análisis utilizando un software estadístico con lo que se evaluó la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados para el sistema de medición con LCMS, Perfilómetro Laser y para el sistema de medición combinado independiente del equipo de medición. Se determinó para cada caso el error de las mediciones debido a repetibilidad y reproducibilidad a través de las siguientes relaciones.

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{parte}}^2 + \sigma_{\text{operador}}^2 + \sigma_{\text{instrumento}}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{instrumento}}^2 = \sigma_{\text{repetibilidad}}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{operador}}^2 = \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 \quad (3)$$

Donde la parte corresponde a la muestra obtenida a una longitud de 100 metros, mientras que el operador e instrumento corresponden a las variables consideradas dentro del sistema de medición. Por lo tanto, el error o variabilidad de las mediciones debido a repetibilidad y reproducibilidad se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación: [6]

$$\sigma_{\text{GRR}}^2 = \sigma_{\text{repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 \quad (4)$$

4. Resultados obtenidos

La Figura 3 muestra el resultado de las evaluaciones realizadas en la zona de muestreo en secciones de 100 metros de longitud para cada uno de los equipos, por su parte la Figura 4 presenta la buena correlación entre ambas tecnologías con un valor de R^2 igual a 0.9825.

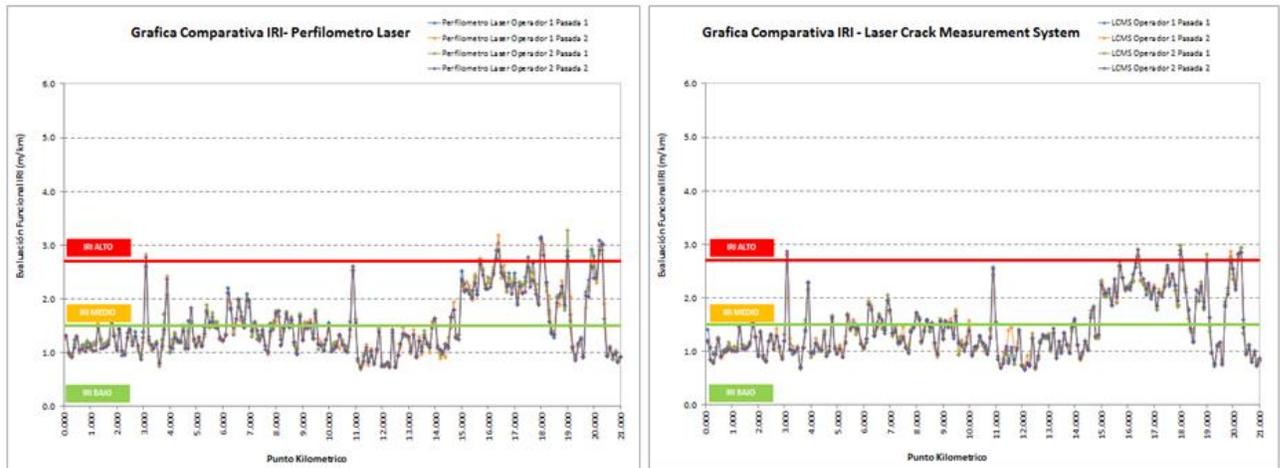


Figura 3 Graficas IRI Perfilómetro Laser - Laser Crack Measurement System 100 metros.

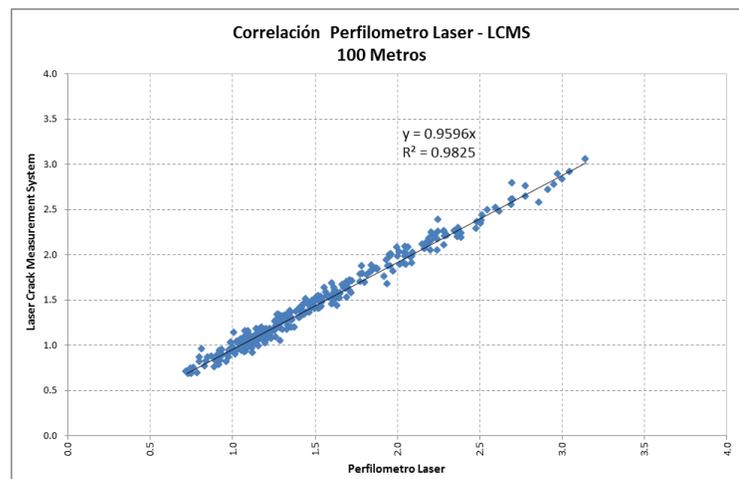


Figura 4 Correlación lineal.

Los histogramas presentados en la reflejan de igual forma el grado de precisión de los equipos utilizados en las evaluaciones. Los resultados se encuentran en torno a 1.5 y 2.5 m/km.

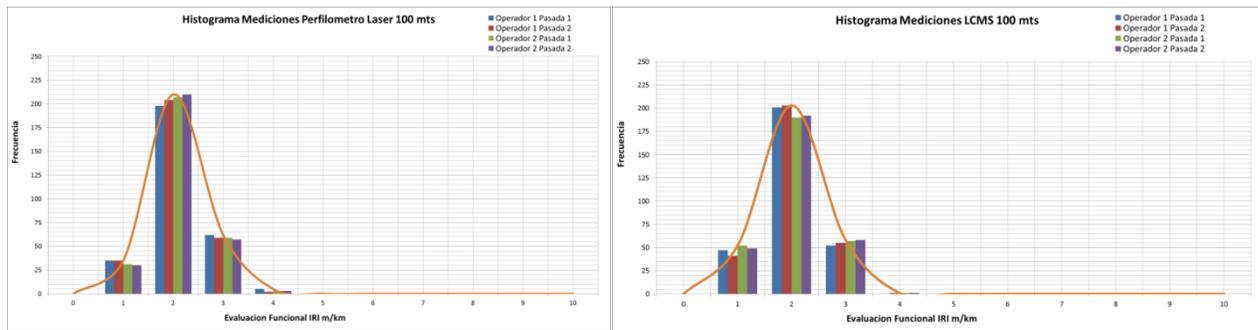


Figura 5 Histograma IRI equipo perfilómetro laser y LCMS 100 metros

4.1.1 Análisis repetibilidad y reproducibilidad (GRR):

Los datos considerados para el estudio son los que se presentan en la siguiente tabla para secciones de 100 metros.

Tabla 2. Sectores de ensayo cada 100 metros

IRI BAJO (<1.5 m/Km)										
			PERFILOMETRO LASER				LASER CRACK MEASUREMENT SYSTEM			
			OPERADOR 1		OPERADOR 2		OPERADOR 1		OPERADOR 2	
PK Inicio (km)	PK Final (km)	Long (km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)
10.000	10.100	0.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1
10.100	10.200	0.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
10.200	10.300	0.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2	1.3
10.300	10.400	0.1	1.3	1.1	1.3	1.3	1.1	1.2	1.1	1.2
10.400	10.500	0.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1
IRI MEDIO (1.5 <IRI<2.7 m/Km)										
			PERFILOMETRO LASER				LASER CRACK MEASUREMENT SYSTEM			
			OPERADOR 1		OPERADOR 2		OPERADOR 1		OPERADOR 2	
PK Inicio (km)	PK Final (km)	Long (km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)
15.700	15.800	0.1	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
15.800	15.900	0.1	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.2	2.2
15.900	16.000	0.1	2.3	2.3	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
16.000	16.100	0.1	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.2	2.3	2.2
16.100	16.200	0.1	2.5	2.6	2.4	2.5	2.3	2.3	2.3	2.4
IRI ALTO (IRI>2.7 m/Km)										
			PERFILOMETRO LASER				LASER CRACK MEASUREMENT SYSTEM			
			OPERADOR 1		OPERADOR 2		OPERADOR 1		OPERADOR 2	
PK Inicio (km)	PK Final (km)	Long (km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)	Med1 (m/km)	Med2 (m/km)
16.300	16.400	0.1	3.0	3.2	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.9
17.900	18.000	0.1	3.1	2.8	3.1	3.1	2.8	3.0	3.0	2.9
18.000	18.100	0.1	2.8	3.0	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
20.100	20.200	0.1	3.1	3.0	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8
20.200	20.300	0.1	3.0	3.0	2.9	3.0	2.9	3.1	3.1	3.0

El estudio repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición consta de los siguientes parámetros [7]:

1. Repetibilidad: Es la variabilidad resultante de mediciones repetidas por el mismo operador.
2. Reproducibilidad: Es la variabilidad resultante cuando diferentes operadores miden la misma parte.

Los resultados del estudio GRR (Ver Tabla 3) concluyen que la mayor contribución de variabilidad de los resultados se presenta cuando se miden valores de IRI mayores a 2.7 m/km, donde la varianza correspondiente a un 0.0092616 está influenciado por una contribución de un 60.53% por el análisis GRR y un 39.47% por la variación entre las muestras.

En relación a la repetibilidad del sistema de medición, se obtienen bajos porcentaje de contribución de la varianza en valores de IRI bajos y medios. En cuanto a la reproducibilidad los valores obtenidos dejan en manifiesto la poca variabilidad existente entre operadores y equipos al medir una misma muestra con valores cercanos a 0.

Tabla 3. Componentes de la varianza

Fuente	IRI < 1.5 m/km		1.5 > IRI > 2.7 m/km		IRI > 2.7 m/km	
	CompVar	%Contribución (de CompVar)	CompVar	%Contribución (de CompVar)	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0033284	37.7400000	0.003016	16.2500000	0.0092616	60.5300000
Repetibilidad	0.0033284	37.7400000	0.0029685	15.9900000	0.0092616	60.5300000
Reproducibilidad	0.0000000	0.0000000	0.0000474	0.2600000	0.0000000	0.0000000
Operadores	0.0000000	0.0000000	0.0000474	0.2600000	0.0000000	0.0000000
Parte a parte	0.0054899	62.2600000	0.0155483	83.7500000	0.0060384	39.4700000
Variación total	0.0088183	100.0000000	0.0185643	100.0000000	0.0153001	100.0000000

4. Conclusiones

Este documento presentó los resultados obtenidos al realizar la comparación de los datos evaluados con el Perfilómetro Laser y el LCMS. Para la ejecución de la investigación se seleccionó una carretera que presentará un rango amplio del indicador funcional IRI, se realizaron 4 mediciones con cada equipo y se compararon los resultados obtenidos con ambas tecnologías.

Para realizar el estudio, se efectuó un análisis estadístico de repetibilidad y reproducibilidad (GRR) posterior a un procesamiento de datos, selección de partes, cálculo de repetibilidad y reproducibilidad y análisis de resultados en muestras más discretas.

Como se expuso en el documento, existe un 98.25% de correlación entre ambos equipos. Por otro lado, respecto a la tendencia y la repetibilidad entre las evaluaciones se obtienen datos repetibles y reproducibles independiente de la condición funcional del pavimento.

Del análisis se puede concluir que la mayor contribución de variabilidad de los resultados se presenta en el análisis realizado a los resultados de IRI Altos, donde la variabilidad total del sistema correspondiente a un valor de 0.0092616 está influenciado por una contribución de un 60.53% por el análisis GRR y un 39.47% por la variación entre las muestras. Dicha situación puede ser atribuible producto de la obtención de los datos, ya que si bien las mediciones se realizaron el mismo día y en el mismo carril, estas se hicieron con dos vehículos

distintos, por tal motivo se puede estar evaluando dos perfiles longitudinales cercanos y paralelos que al presentar valores de IRI altos pueden tener una pequeña dispersión, sin ser muy distintos entre ellos.

Finalmente se puede concluir que el sistema de medición representa una buena relación entre los resultados obtenidos con ambos equipos, presentando una mínima variabilidad y mostrando una buena correlación entre mediciones realizadas a la misma muestra, obteniendo resultados repetibles y reproducibles.

5. Bibliografía

- [1] Sayers, M.W.; Gillespie, T.D. y Queiroz, C., “The International Road Roughness Experiment, Technical Paper Number 45. World Bank Technical Paper Number 45, Washington 1986.
- [2] Sayers, M.W.; Gillespie, T.D. y Paterson, W., “Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, Technical Paper Number 46”. World Bank Technical Paper Number 46, Washington 1986.
- [3] Bennett, C.; Chamorro, A.; Chen, C.; De Solminihac, H y Flintsch, G. “Data Collection Technologies for Road Management”. East Asia Pacific Transport Unit, The World Bank, Washington 2007.
- [4] Wix, R. ; Simon B. “The Australian 3D Roughness Experience”. 9th International Conference on Managing Pavement Assets. 2015.
- [5] Measurement System Analysis: Reference Manual. Automotive Industry Action Group. Tercera edición. Estados Unidos. AIAG (2002).
- [6] Gutiérrez, H., y R. de la Vara (2009) Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma. Segunda edición. Mc Graw Hill. México DF, 2009.
- [7]: MINITAB, Evaluación de la variación de un sistema de medición.