

“APLICACIÓN DE LA NORMA ASTM E950-09 PARA DETERMINAR LA REPETIBILIDAD Y PRECISIÓN EN UN PERFILÓMETRO INERCIAL MARK III – DYNATEST”

Ing. V. Rea¹, Ing. F. Rojas¹, M. Manosalvas²

¹Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador.

E-mail: vrea@espe.edu.ec, frojas@espe.edu.ec

²Carrera de Ingeniería Civil, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador.

E-mail: m-manosalvas@promanvial.com.ec

RESUMEN

El Proyecto denominado “Aplicación de la Norma ASTM E950-09 para determinar la Repetibilidad y Precisión en un Perfilómetro Inercial Mark III - Dynatest”, presenta una guía aplicativa de la norma antes mencionada para clasificar los diferentes equipos que pueden medir el perfil longitudinal del camino.

Este proyecto además comprende realizar una clasificación de la Ruta E28 “Mitad del Mundo – La Independencia” basándose en el Índice de Rugosidad Internacional IRI obtenido y comparándolo con el Documento Técnico del MOP y la Escala Estándar empleada por el Banco Mundial.

ABSTRACT

The project entitled "Application of ASTM E950-09 to determine the repeatability and accuracy in Inertial Perfilometer Mark III - Dynatest" presents an applicative guide to classify the different equipment's that can measure the longitudinal profile of the road.

This project also includes a classification of Route E28 "Mitad del Mundo – La Independencia" based on the International Roughness Index IRI obtained and compared with MOP Technical Paper and the Standard Scale used by the World Bank.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proponer una metodología para calificar la repetibilidad de los diferentes equipos de medición a nivel nacional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar si el equipo cumple los requerimientos para ser considerado un perfilómetro inercial Clase I, de acuerdo a la norma ASTM E 950-09¹
- Determinar la Precisión / Repetibilidad del perfilómetro inercial Mark III en una sección de la Ruta E28².
- Determinar el Índice de Rugosidad Internacional IRI a lo largo de toda la Ruta E28 para los dos sentidos de la vía.
- Mediante el “Documento Técnico MOP, Concesión de Carreteras”³, determinar el orden en que se encuentra la Ruta E28.
- Proponer un plan de Mantenimiento para aquellos tramos que superen el límite permitido por el Documento Técnico del MOP.

ANTECEDENTES

Desde mediados de la década de los años noventa, se ha venido utilizando en la mayoría de países del mundo sistemas de Perfilómetros Inerciales Laser para la evaluación del perfil longitudinal del pavimento. En la actualidad, el uso y manejo de dichos perfilómetros, se ha vuelto una herramienta imprescindible para la evaluación de pavimentos, debido a que cada país tiene una escala de valores con la cual clasifican el nivel de servicio de las vías.

La determinación de Precisión / Repetibilidad en equipos destinados a la medición de perfiles longitudinales, llevará a determinar el Índice de Rugosidad Internacional “IRI”, será de gran utilidad para el Ministerio de Transporte y Obras Públicas “MTO”, ingenieros planificadores, ejecutores de mantenimiento vial y constructores viales, debido a que las especificaciones de construcción del MTO establecen límites máximos de tolerancia del IRI de acuerdo al tipo de carretera que se esté analizando. Este estudio podrá ser utilizado como una herramienta para calificar a los diversos equipos a nivel nacional, a fin de que se pueda garantizar la calidad de los resultados obtenidos del perfil longitudinal

¹ Norma ASTM E950-09: “**Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference**”.

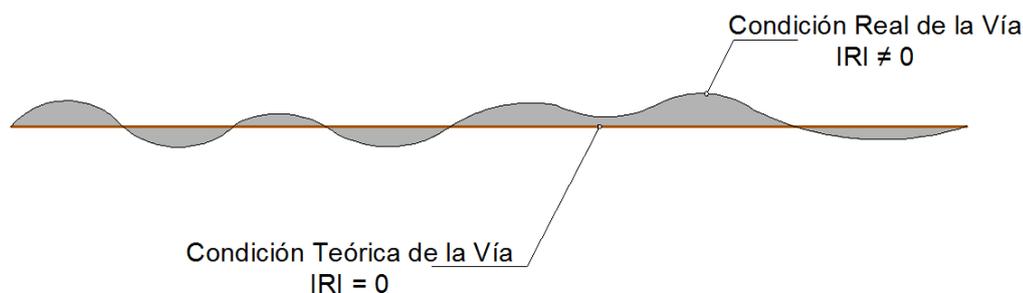
² Nomenclatura asignada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas a la carretera La Independencia – Redondel del Condado.

³ Infraestructura Vial digital. Recuperado el 15 de Febrero de 2013, de http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com_content&view=article&id=267&Itemid=269.

RUGOSIDAD

DEFINICIÓN

La norma americana E 867⁴ de la ASTM (American Society of Testing and Materials), define la rugosidad como las desviaciones entre una superficie de pavimento y una superficie plana con dimensiones características que afecten la dinámica del vehículo, calidad en el desplazamiento, cargas dinámicas y drenaje, tal como, perfil longitudinal y perfil transversal.



Definición gráfica de Rugosidad

La rugosidad puede también ser definida como la distorsión de la superficie del pavimento que transmite aceleraciones verticales no deseadas en el vehículo que contribuyen a un desplazamiento incómodo y no deseable.

IMPORTANCIA DE LA RUGOSIDAD EN LAS VÍAS

Las vías terrestres, además de ser medios de comunicación indispensable para los usuarios, deben permitir desplazamientos rápidos, seguros y cómodos. Considerando estos aspectos, la AASHO (*American Association of State Highway Officials*), en el desarrollo del proyecto Road Test en 1962, introdujo el concepto de Serviciabilidad, la cual debe ser definida en relación al propósito de un pavimento construido, esto es, proveer un viaje confortable, seguro y suave a los usuarios. En otras palabras, la serviciabilidad debe estar explícitamente relacionada con los usuarios.

En el ensayo de la AASHO, la serviciabilidad se cuantificó inicialmente a través del PSR (*Present Serviciability Rating*), el cálculo de este índice se realizó por medio de una apreciación subjetiva sobre la calidad de rodado, de esta evaluación surgió una nueva escala que calificó la calidad de ruedo con valores entre cero y cinco como se muestra en la siguiente tabla.

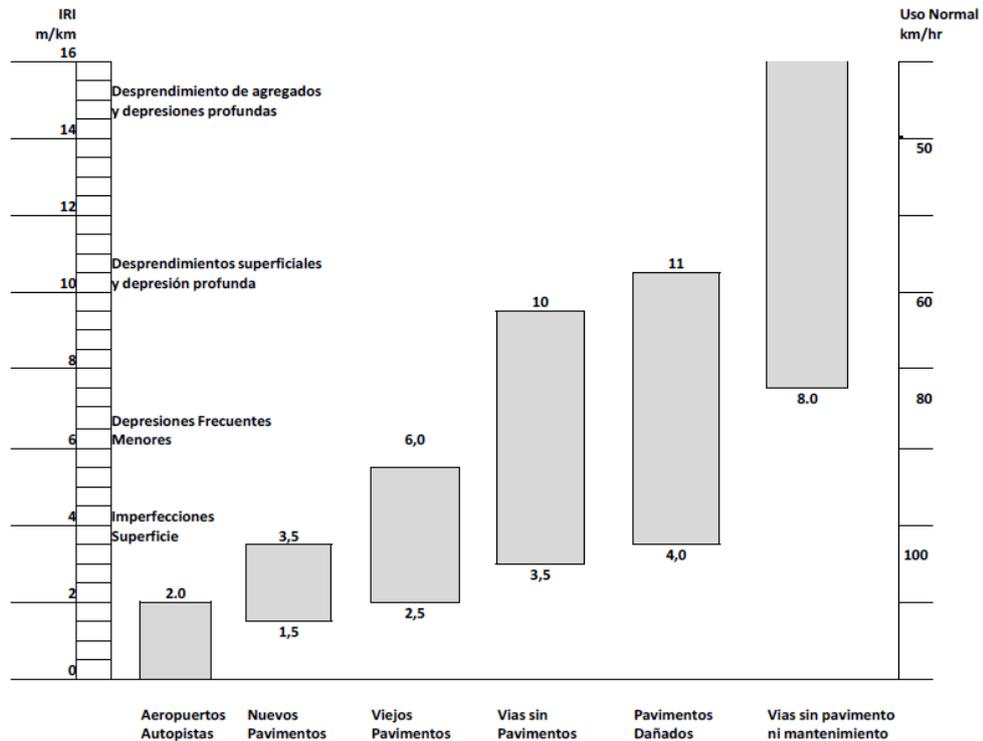
0-1	Muy Malo
1-2	Malo
2-3	Regular
3-4	Bueno
4-5	Muy Bueno

⁴ NORMA ASTM E867: **Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems.**

CLASIFICACIÓN DE LAS VÍAS SEGÚN LA RUGOSIDAD

Actualmente la rugosidad superficial de un pavimento se mide por medio del Índice de Rugosidad Internacional, más conocido como IRI, el cual se ha definido matemáticamente como la suma de irregularidades verticales (en valor absoluto), de la superficie de rodamiento de un camino con respecto a una superficie plana ideal, dividida entre la distancia recorrida.

El IRI fue concebido como una unidad universal para medir la rugosidad de un pavimento, cuyas medidas se dan en metros por kilómetro “m./km.” o pulgada por milla “pulg./milla.”



Clasificación de IRI presentada por el Banco Mundial

FUENTE: <http://deepblue.lib.umich.edu/itstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf?sequence=2>

TPDA	IRI (m/km)	PCI	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	SURCO DE HUELLA (mm)	DEFLEXIÓN (mm)
>5,000	2 - 3	85 - 100	> 55	6,0	< 0,40
3,000 - 5,000	3,5	85 - 100	> 55	6,0	0,45 - 0,40
1,000 - 3,000	4,0	70 - 85	> 50	6,0 - 8,0	0,58 - 0,45

Rangos aceptables condición calzada presentado en el Documento Técnico del MOP, Concesiones.

REALIZACIÓN DEL TRABAJO

ESTUDIO TOPOGRÁFICO

En la Norma ASTM E950-09, en la sección 10 correspondiente a PROCEDIMIENTO y en el apartado 10.3 SECCIÓN DE PRUEBA, se describe lo siguiente:

“Para la medición de secciones cortas de prueba de una superficie recorrida, el operador debe familiarizarse con la sección de prueba, incluido el principio, el final y cualquier otra característica que haya que identificar dentro de la sección de prueba. Si se identifican características dentro de la sección de prueba que se detectan de forma automática, el operador deberá colocar el respectivo marcador en la superficie de rodadura, a los lugares que han sido identificados. Es muy importante que las marcas de rueda sean identificadas en la calzada de manera que las mediciones se hacen en las huellas de las ruedas o en los caminos que se van a medir.”



Inicio del Tramo



Fin del Tramo

Ubicación Geo referenciado del tramo

	Estación (km)	X	Y
Punto Inicial	0+000	779334,234	10000431,229
Punto Final	0+350	778985.975	10000394.2



El estudio se lo realizó el día miércoles 13 de Marzo de 2013 y se utilizó una Estación Total Trimble 3305 Dr. El procedimiento para realizar el trabajo de campo es el descrito a continuación.

Se identifica el punto de partida mediante la utilización del GPS Mobile Mapper™ 6 marca MAGELLAN y se señala el punto auxiliar No.1 que se muestra en la siguiente tabla en coordenadas geográficas.

Ubicación Geo referenciado del tramo

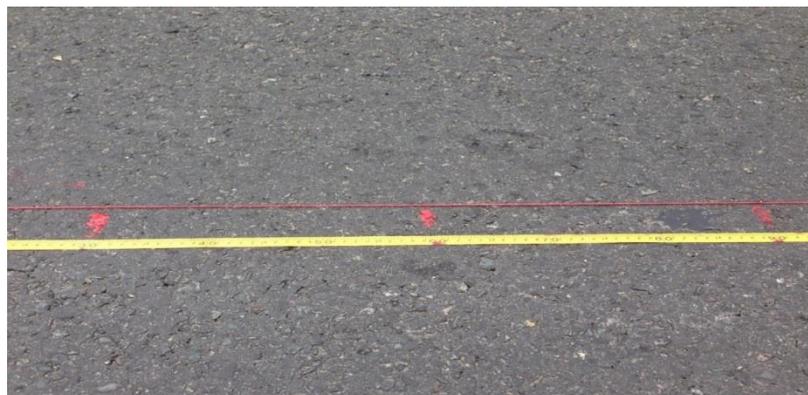
	X	Y	Z
AUX-1	779334,234	10000431,229	100



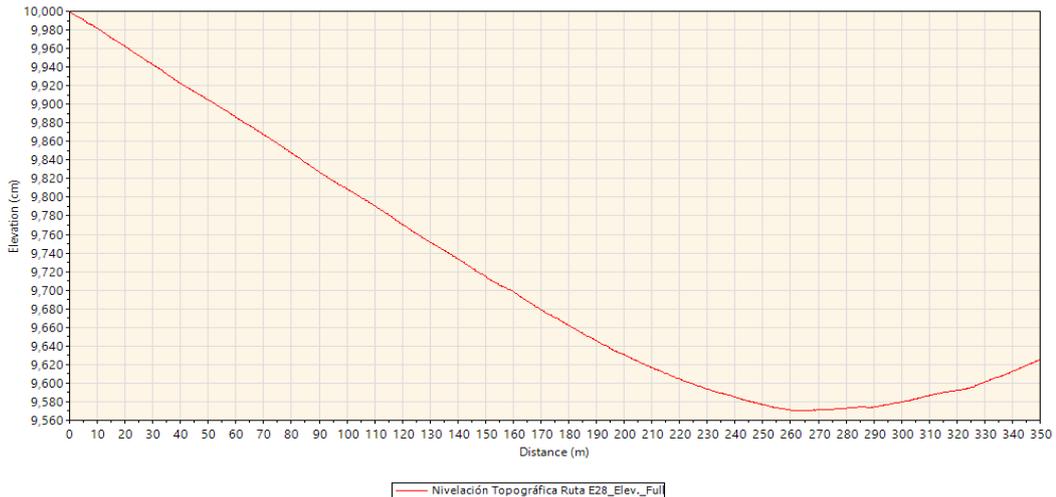
Con un flexómetro, se mide 1 metro desde la línea referencial derecha para que el levantamiento se realice en la huella derecha. Con el mismo GPS., se mide una distancia de 150 metros para poner el punto auxiliar No. 2, que además es la Estación No.1. Adicionalmente se utilizarán las Estaciones Nos 2 y 3 para realizar los 350 metros que indica la norma a un espaciamiento de 30 centímetros.

Ubicación Geo referenciado de las estaciones topográficas

	X	Y
Estación No.1	779185,110	10000415,363
Estación No.2	779016,201	10000397,574
Estación No.3	778976,452	10000393,201



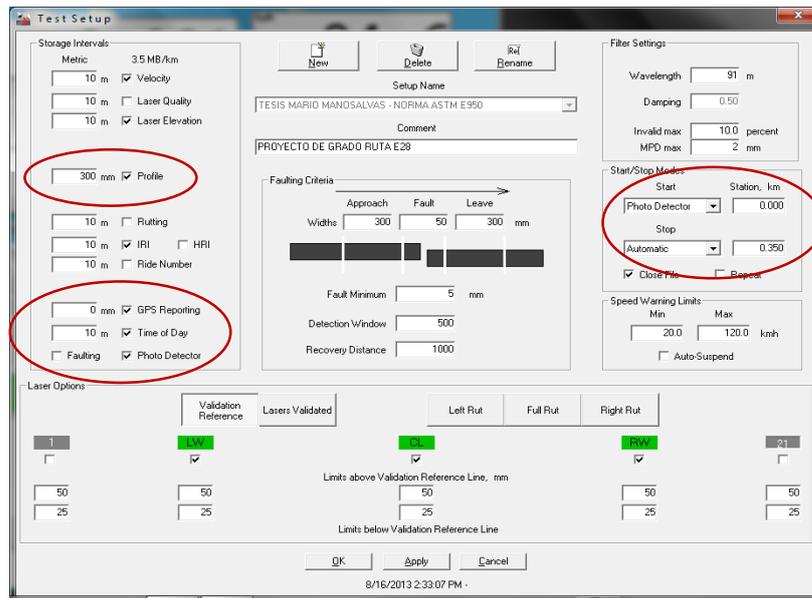
Representación del perfil longitudinal en la huella derecha, con espaciamiento cada 30 centímetros como indica la Norma ASTM E950-09.



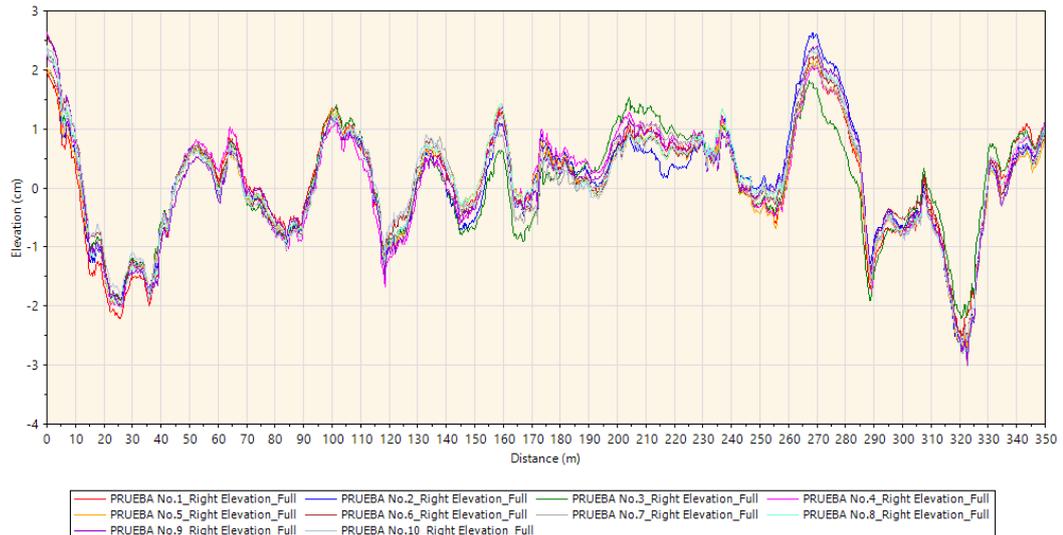
Visualización del perfil longitudinal generado a partir de la nivelación realizada utilizando el software PROVAL.

MEDICIÓN DEL TRAMO CON EL PERFILÓMETRO MARK III

Para la evaluación, se realizó la siguiente configuración de prueba donde se observa que el perfil longitudinal del camino se guardará cada 300 milímetros de manera que posteriormente se pueda comparar con el perfil generado mediante la estación total.



En la norma ASTM E950-09 establece que para estudios de repetibilidad y precisión se deberá recolectar el perfil longitudinal por lo menos diez veces por lo que se procede a recolectar la información que es mostrada a continuación.



Visualización de los perfiles longitudinales generados por el Perfilómetro Inercial Mark III.

El Perfilómetro con el que se realizó las mediciones del perfil ongitudinal corresponde a un Clase 1 de acuerdo a las Tablas 1 y 2 (Muestreo Longitudinal y Resolución de medida Vertical), mostradas a continuación las mismas que han sido extraidas de la norma ASTM E950-09 por lo tanto se asegura que los datos antes mostrados tienen una alta confiabilidad

TABLE 1 Longitudinal Sampling

Class 1	less than or equal to 25 mm [1 in.]
Class 2	greater than 25 mm [1 in.] to 150 mm [6 in.]
Class 3	greater than 150 mm [6 in.] to 300 mm [12 in.]
Class 4	greater than 300 mm [12 in.]

TABLE 2 Vertical Measurement Resolution

Class 1	less than or equal to 0.1 mm [0.005 in.]
Class 2	greater than 0.1 mm [0.005 in.] to 0.2 mm [0.010 in.]
Class 3	greater than 0.2 mm [0.010 in.] to 0.5 mm [0.020 in.]
Class 4	greater than 0.5 mm [0.020 in.]

De los perfiles longitudinales obtenidos y luego de realizar un análisis probabilístico, se determina que para Repetibilidad / Precisión, el láser derecho corresponde a un Clase 2 y el láser izquierdo a un Clase 1; mientras que para Sesgo no se ha podido realizar una comparación debido a que el perfil obtenido por un equipo de referencia geométrica como la estación total no es comparable con el perfil que reporta el perfilómetro inercial mark III.

MEDICIÓN DE LA RUTA E28 CON EL PERFILÓMETRO INERCIAL MARK III

Para la medición de la Ruta E28 “Mitad del Mundo – La Independencia” se genera una configuración de prueba con la que el equipo procederá a guardar los datos, esta configuración contempla la recolección continua de datos GPS, el Índice de Rugosidad Internacional, la velocidad y el tiempo del día cada 10 metros con lo cual se muestra el inicio y fin del tramo.



Inicio del tramo Km 0+000
Mitad del Mundo



Fin del Tramo Km 160+700
La Independencia



Ruta E28 "Mitad del Mundo – La Independencia", Geo referenciada



Configuración de prueba para medir la Ruta E28

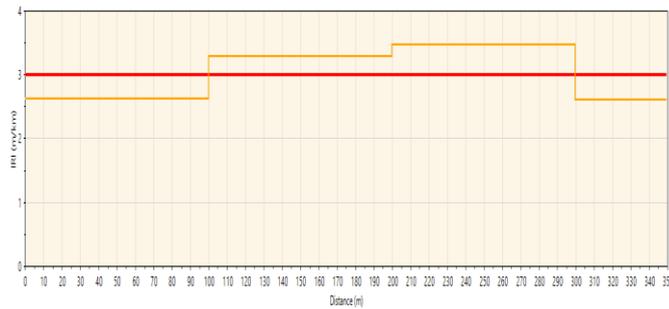
PROVAL PARA EL CÁLCULO DE IRI

ProVAL es un software de ingeniería, que permite visualizar y analizar perfiles de pavimentos de diversas maneras, es patrocinado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América, la Administración Federal de Carreteras (FHWA), y el programa de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP).

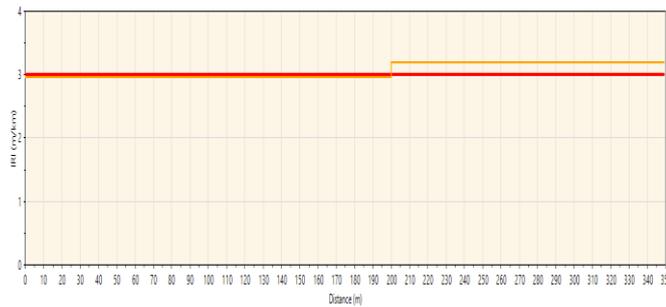
IRI OBTENIDO A PARTIR DE LA NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA



Análisis realizado cada
50 metros
Promedio: 3.10 m/km



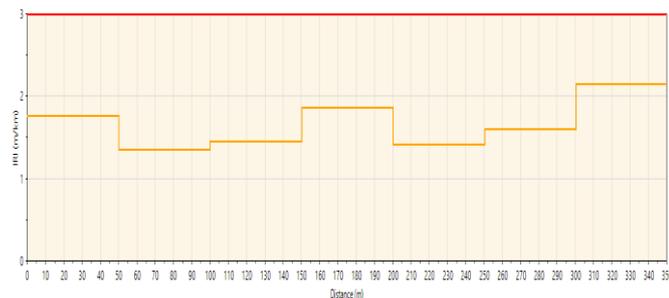
Análisis realizado cada
100 metros
Promedio: 2.99 m/km



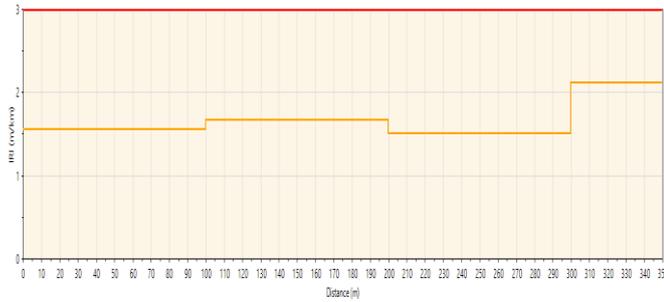
Análisis realizado cada
100 metros
Promedio: 2.99 m/km

File	Profile	IRI del Tramo (m/km)
Nivelación Mira y Nivel	Elev.	3.05

IRI OBTENIDO A PARTIR DEL PERFILÓMETRO MARK III



Análisis realizado cada
50 metros
Promedio: 1.65 m/km



Análisis realizado cada
100 metros
Promedio: 1.71 m/km

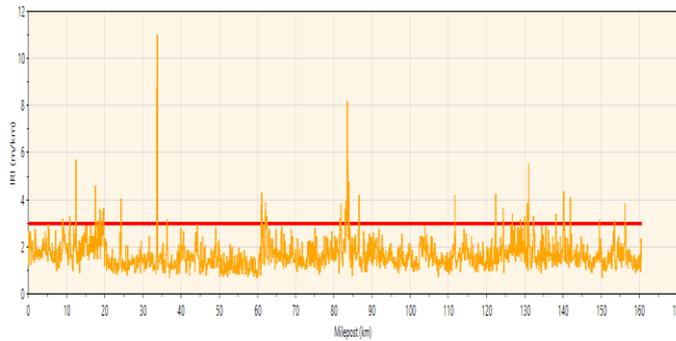


Análisis realizado cada
200 metros
Promedio: 1.66 m/km

File	Profile	IRI del Tramo (m/km)
PRUEBA No.1	Right Elevation	1.65

IRI OBTENIDO DE LA RUTA E28

Análisis cada 100 metros:

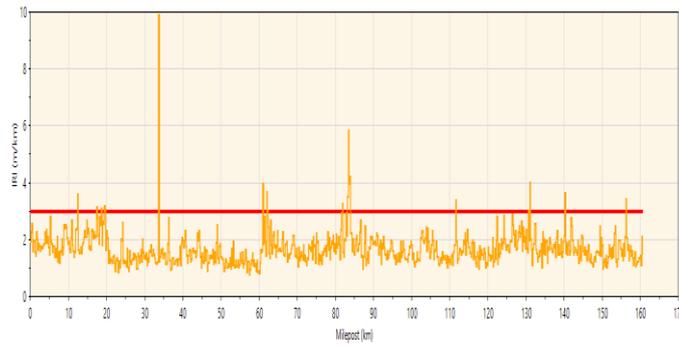


Sentido: Mitad del Mundo –
La Independencia
Promedio: 1.65 m/km



Sentido: La Independencia –
Mitad del Mundo
Promedio: 1.66 m/km

Análisis cada 200 metros:



Sentido: Mitad del Mundo –
La Independencia
Promedio: 1.65 m/km



Sentido: La Independencia
– Mitad del Mundo
Promedio: 1.66 m/km

Análisis cada 500 metros:

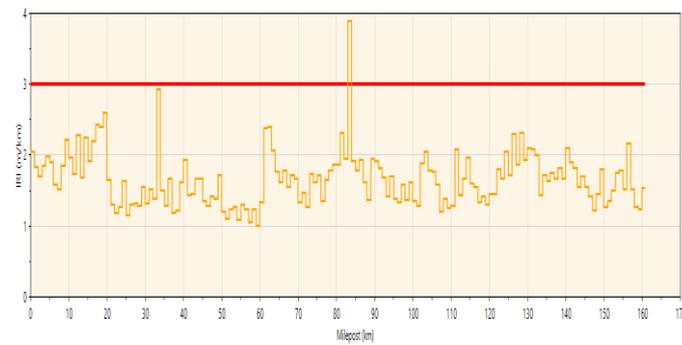


Sentido: Mitad del Mundo –
La Independencia
Promedio: 1.66 m/km

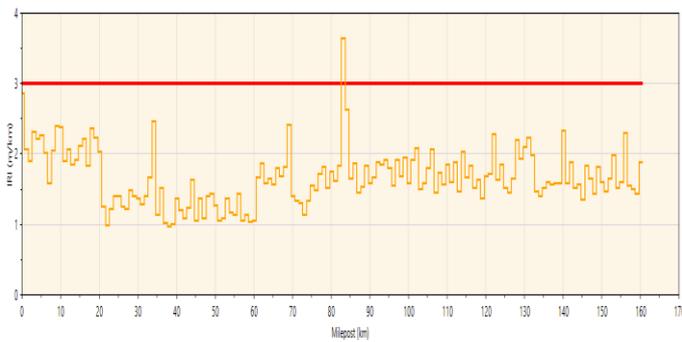


Sentido: La Independencia
– Mitad del Mundo
Promedio: 1.66 m/km

Análisis cada 1000 metros:



Sentido: Mitad del Mundo –
La Independencia
Promedio: 1.65 m/km



Sentido: La Independencia
– Mitad del Mundo
Promedio: 1.66 m/km

UBICACIÓN GPS DE IRI CADA 1000 METROS

A continuación se presenta una escala de valores con su colore respectivo para clasificar la condición del pavimento tomando como referencia el Documento Técnico del MOP y de esa manera poder visualizar la condición en un mapa.

Valor de Índice de Rugosidad Internacional		Color
Desde	Hasta	
0.00	1.50	
1.50	2.50	
2.50	3.50	
Mayor a 3.50		



Condición del Pavimento, Sentido: Mitad del Mundo – La Independencia



Condición del Pavimento, Sentido: La Independencia – Mitad del Mundo

ANÁLISIS COMPARATIVO

RELACIONES DE IRI DE ACUERDO A LA LONGITUD ANALIZADA

De los gráficos mostrados anteriormente, se puede obtener las siguientes relaciones.

Sentido: Mitad del Mundo – La Independencia

IRI cada	100 metros	200 metros	500 metros	1000 metros
Desviación Estándar	0.67	0.58	0.47	0.38
Promedio	1.65	1.65	1.66	1.65
Coeficiente de Variabilidad	0.40	0.35	0.28	0.23

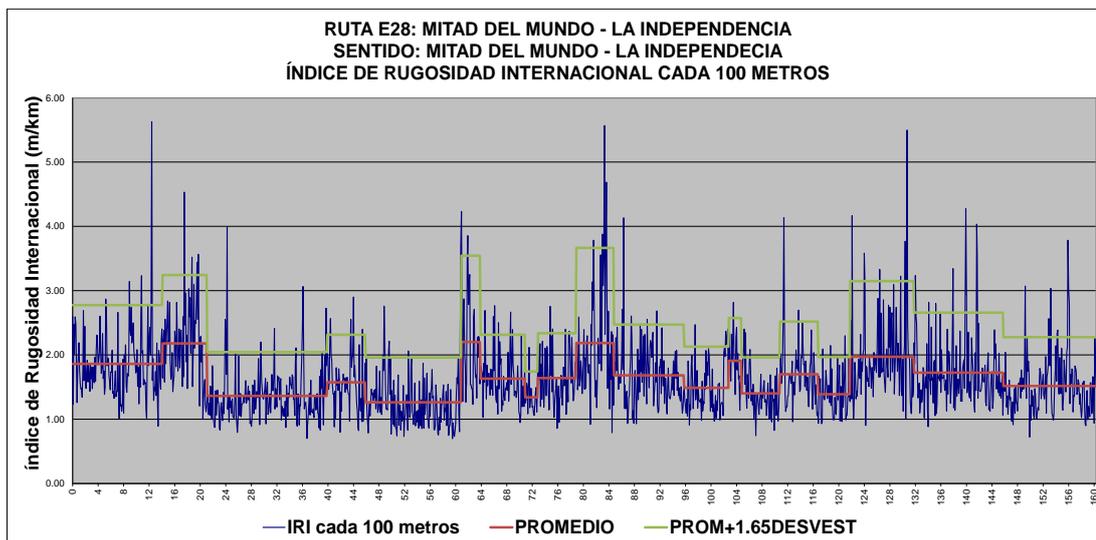
Sentido: La Independencia – Mitad del Mundo

IRI cada	100 metros	200 metros	500 metros	1000 metros
Desviación Estándar	0.66	0.56	0.46	0.40
Promedio	1.66	1.66	1.66	1.66
Coeficiente de Variabilidad	0.40	0.34	0.28	0.24

Variabilidad de acuerdo a la longitud de análisis

	de 100 a 200	de 100 a 500	de 100 a 1000
Porcentaje de Variabilidad	16.97%	42.78%	65.47%

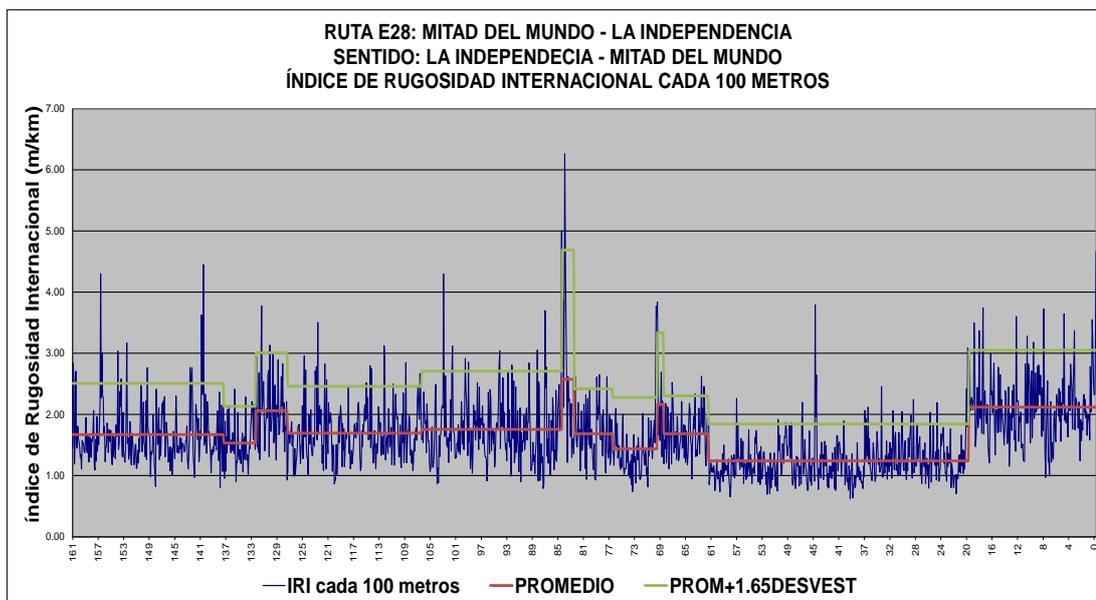
De las tablas mostradas, y teniendo claro que cuando se realiza el análisis de IRI cada 100 metros se puede tener una mejor caracterización de la condición de la carretera, se procede a generar secciones homogéneas para los dos sentidos de la Ruta E28 a fin de poder determinar un plan de rehabilitación que mejor se ajuste a las condiciones actuales que presenta la carretera.



Secciones Homogéneas cada 100 metros, Sentido: Mitad del Mundo – La Independencia

Tramos con rugosidades mayores al límite permitido por el Documento Técnico del MOP, Sentido: Mitad del Mundo – La Independencia

Estación Inicial (Km)	Estación Final (Km)	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + 1.65*Desviación Estándar
14+000	21+000	2.18	0.64	3.24
61+000	64+000	2.20	0.81	3.54
79+000	85+000	2.18	0.90	3.67
122+000	132+000	1.97	0.71	3.15



Secciones Homogéneas cada 100 metros, Sentido: La Independencia – Mitad del Mundo

Tramos con rugosidades mayores al límite permitido por el Documento Técnico del MOP, Sentido: La Independencia – Mitad del Mundo

Estación Inicial (Km)	Estación Final (Km)	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + 1.65*Desviación Estándar
132+026	127+026	2.06	0.58	3.01
84+026	82+026	2.58	1.28	4.69
69+026	68+026	2.17	0.71	3.34
20+026	0+026	2.12	0.56	3.05

La longitud total en la que se realizará el mantenimiento es de 54 kilómetros que representa el 20.30% de la longitud total del proyecto. Para realizar en análisis económico se utilizan los APU que maneja el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en la unidad de Estudios – Área de Costos.

Volumen de trabajo a ser rehabilitado

Longitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen de Trabajo (m ³)
54000	10.00	0.05	27000

Costo por trabajos de Fresado en tramo a intervenir

Volumen de Trabajo (m ³)	APU Fresado por (m ³)	TOTAL
27000	14.56	\$ 393,120.00

Costo por trabajos de Reposición de Carpeta Asfáltica en tramo a intervenir

Área de Trabajo (m ²)	APU Tendido CA (m ²)	TOTAL
540000	6.26	\$ 3,380,400.00

El costo total de inversión para realizar la rehabilitación de los sectores críticos de la Ruta E28, asciende a \$ 3,773,520.00 (dólares de los Estados Unidos), donde el presupuesto empleado en fresar la carpeta asfáltica representa el 11.63% del total a utilizarse.

CONCLUSIONES

- Una vez realizadas las pruebas de Precisión / Repetibilidad en el tramo seleccionado de la Ruta E28 “Mitad del Mundo–La Independencia”, por las condiciones encontradas in situ y la interacción humano - máquina, se determina que, el láser de la huella derecha corresponde a un clase II y el láser de la huella izquierda corresponde a un clase I, de acuerdo a la Norma Americana ASTM E950-09.

- El equipo “Perfilómetro Inercial Mark III - Dynatest”, corresponde a un perfilómetro clase I, de acuerdo a la Norma Americana ASTM E 950-09, ya que cumple con los parámetros pre-establecidos de muestreo longitudinal y resolución de medida vertical.
- El Índice de Rugosidad Internacional se calculó para los dos sentidos de la Ruta E28, teniendo un valor de 1.65 m/km para el sentido Mitad del Mundo–La Independencia y, 1.66 m/km para el sentido La Independencia–Mitad del Mundo.
- Se debe tener claro que mientras mayor sea la distancia en la que se realice el análisis de la rugosidad, la caracterización de los datos se reducirá, pero el promedio será el mismo ya sea analizando cada 100 metros o cada 1 kilómetro.
- De acuerdo a la Escala Estándar empleada por el Banco Mundial, donde se clasifica a las vías de acuerdo a la rugosidad, la Ruta E28, con un valor promedio de 1.66 m/km para los dos sentidos, se encuentra en el rango más alto de clasificación (Aeropuerto– Autopista o como un Nuevo Pavimento).
- Comparando el Índice de Rugosidad Internacional obtenido con el Documento Técnico del MOP, se concluye que la Ruta E28, cumple satisfactoriamente la normativa de 2 m/km a 3 m/km impuesta para un TPDA mayor a 5000 vehículos.
- Como plan de rehabilitación en la Ruta E28, se han determinado los sectores donde el Índice de Rugosidad Internacional supera el límite establecido por el Documento Técnico del MOP. El costo de la rehabilitación alcanza un total de \$ 3,773,520.00 (dólares de los Estados Unidos), para determinar el costo se utilizó los APU del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Unidad de Estudios–Área de Costos.

REFERENCIAS

OWNER’S MANUAL (s.f), Road Surface Profiler Test Systems, DYNATEST 5051 Mark III / IV, Version 2.5.0.

SISTEMA DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS (2004), Versión 2.0, Publicación Técnica No 245 – Sanfandila. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt245.pdf>

The Little Book of Profiling (1998), Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profilers. Michael W. Sayers – Steven M. Karamihis. Obtenido de <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>

WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER 46 (1986), Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D. O. Paterson. Obtenido de <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf?sequence=2>

ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD EN LA RED CARRETERA DE MÉXICO (1998), Publicación Técnica No 108 – Sanfandila. Obtenido de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>

USO DEL PERFILÓMETRO INERCIAL CON SENSORES LÁSER PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI Y SUS APLICACIONES EN LA INGENIERÍA VIAL (2005), Karla Pérez Loarca, Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2544_C.pdf

VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE PERFILES DE PAVIMENTOS, ProVAL (2012). Obtenido de <http://www.roadprofile.com/download/ProVAL-Intro-Spanish.pdf>