

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CONTROL Y CERTIFICACIÓN DE EQUIPOS PERFILÓMETROS INERCIALES PARA VALORAR LA RUGOSIDAD EN ARGENTINA

Marta Pagola¹, Oscar Giovanon² y Gleisson Mañon Pujols³

¹ Laboratorio Vial IMAE, Universidad Nacional de Rosario, Pellegrini 250, Rosario, Argentina, pagola@fceia.unr.edu.ar

² Laboratorio Vial IMAE, Universidad Nacional de Rosario, Pellegrini 250, Rosario, Argentina, ogiovanon@gmail.com

³ Maestrando de la Universidad Nacional de Rosario, Manzana 6, Edificio 19C, Las Caobas, Santo Domingo, República Dominicana, inggleisson@gmail.com

Resumen

Hasta el momento los equipos perfilómetros inerciales han sido controlados en el IMAE aplicando la misma metodología desarrollada para los equipos del tipo respuesta dinámica.

Cuando se realiza una medición de rugosidad, los equipos utilizados tienen asociado un “error” de medición, el cual depende de la repetibilidad entre pasadas sucesivas y de su capacidad de estimar el IRI. Si el objetivo de la medición es un control global a nivel red, podría admitirse un mayor error de medición que si el objetivo de la medición es penalizar por incumplimiento de límites fijados en las especificaciones como recepción de obra o como valor en servicio. En este último caso el tema se complica, ya que pueden aplicarse penalizaciones en forma errónea, y todo error producido por los equipos resulta más crítico. Por lo tanto, se recomendaría la utilización de equipos con menor error asociado a sus mediciones.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para ser aplicada en Argentina para controlar los equipos perfilómetros inerciales. Para esto se realizó un amplio estudio bibliográfico de las metodologías que son aplicadas en otros países, y luego se valoró la aptitud de la metodología propuesta en algunos equipos en uso en Argentina.

Palabras Clave: rugosidad, perfilómetros inerciales, control equipos

1 Introducción y objetivos

La rugosidad / regularidad es uno de los parámetros representativo de la calidad de circulación que los pavimentos ofrecen a los usuarios, la que es medida con equipos en forma no destructiva desde la superficie del pavimento.

La unidad en que se expresa este parámetro es el IRI (International Roughness Index), y fue definida por el Banco Mundial en el IRRE (Experimento internacional de rugosidad de carreteras) desarrollado en Brasil, en el año 1982 [1, 2]. En esa experiencia participaron 11 tipos de equipos que desarrollaron mediciones en tramos de caminos en servicio, donde cada uno expresaba los resultados con sus propias metodologías y unidades. De la misma surgió el índice IRI que compatibilizó los resultados de todos los equipos y que permite intercambiar valores y experiencias.

Se definió también la metodología de control de los equipamientos de manera de valorar que los resultados expresados tengan confiabilidad. Los equipos de esa época

eran en general del tipo respuesta dinámica, y la metodología fue dirigida hacia ese tipo de equipos.

En la actualidad los equipos han evolucionado mucho gracias al avance de la electrónica y la informática, y las metodologías de control tuvieron que evolucionar en forma acorde con estos avances.

En Argentina, en el Laboratorio Vial del IMAE, se desarrolló hace años una metodología para el control de los equipos tipo respuesta dinámica, que eran los equipamientos disponibles en nuestro país, y la misma fue utilizada para numerosos equipos de reparticiones públicas y de empresas privadas.

En los últimos años las instituciones han modernizado sus equipos de medición y han adquirido equipos perfilómetros, así es que en el Laboratorio se desarrolló una nueva metodología de control de los equipos más adecuada a los equipos perfilómetros, y esa es la metodología que se describe en el presente trabajo.

2 Índice de rugosidad IRI

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) la rugosidad "son las desviaciones de la superficie del camino con respecto a una superficie plana que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de circulación, cargas dinámicas y drenaje".

La rugosidad superficial viene determinada por la geometría del perfil longitudinal, que influye de manera muy importante en la seguridad y la comodidad de los usuarios, y en la economía de la conservación del pavimento.

En la Figura 1, se muestra un esquema simplificado del sistema dinámico de los vehículos como dos masas, una no suspendida (rueda) y una suspendida (chasis), estas estarían relacionadas entre sí por su sistema de suspensión (amortiguador y resorte) y apoyadas sobre la calzada a través de un resorte (neumático).

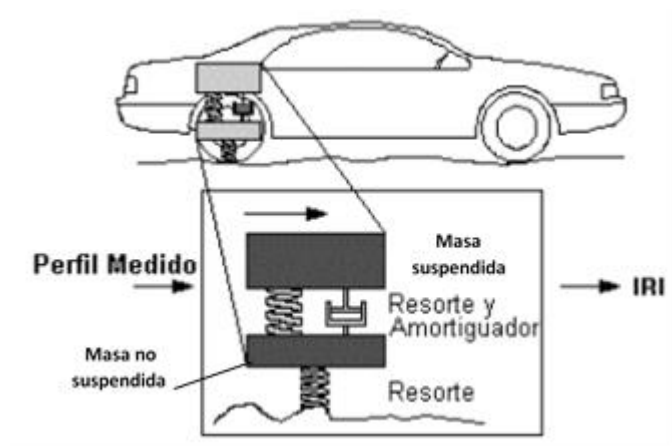


Figura 1. Modelo de Sistema dinámico de los vehículos [3]

Este sistema difiere de acuerdo con el tipo de vehículo considerado y su respuesta puede ser analizada frente a diferentes frecuencias de excitación dando como resultado lo que se denomina función respuesta de la irregularidad la amplificación y/o atenuación que sufre la misma traducida en el movimiento relativo entre el chasis y el neumático.

En el año de 1982 se realizaron en Brasil, bajo el auspicio del Banco Mundial, estudios para definir un parámetro universal de medida de rugosidad superficial, que pudiese ser utilizado por los diferentes equipos de medición en la actualidad. En este estudio se definió el Índice de Rugosidad Internacional IRI, siendo esta la unidad de medida de la rugosidad superficial de un camino utilizada a partir de ese momento.

Para la definición del IRI se empleó el modelo de cuarto de vehículo con constantes dinámicas vehiculares definidas, que circula por un tramo de camino a una velocidad de 80 Km/h. En inglés se conoce a este modelo como QCS (Quarter Car Simulation). El modelo de simulación consta de una masa “amortiguada o suspendida” (masa de un cuarto de carro ideal) conectada a una masa “no amortiguada” (eje y neumático), a través de un resorte y un amortiguador lineal (suspensión), y por último el neumático es representado por otro resorte lineal. Figura 2.

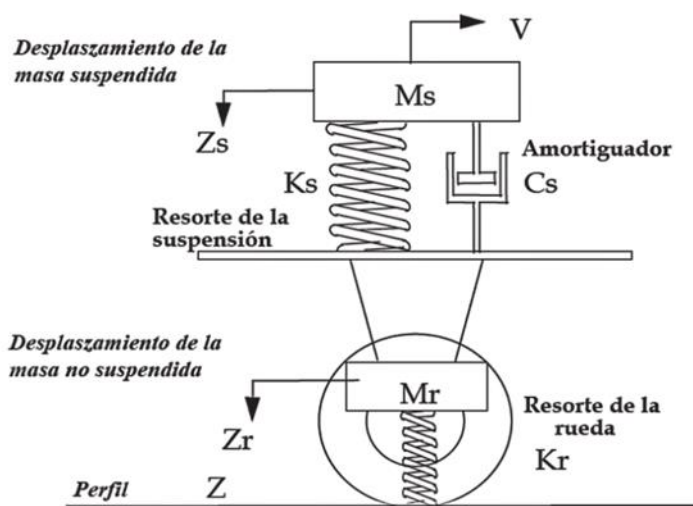


Figura 2. Modelo de cuarto de carro [1]

El modelo de cuarto de carro (Quarter Car Simulation) emplea las constantes del sistema dinámico que se muestran a continuación:

$$k_2 = \frac{k_s}{M_s} = 63.3 \text{ seg}^{-2} \quad k_1 = \frac{k_r}{M_s} = 653 \text{ seg}^{-2} \quad c = \frac{c_s}{M_s} = 6 \text{ seg}^{-1} \quad \mu = \frac{M_r}{M_s} = 0.15 \quad (1)$$

donde \$k_s\$ es la constante del resorte de la suspensión, \$k_r\$ la constante del resorte de la rueda, \$M_s\$ la masa suspendida, \$M_r\$ la masa no suspendida y \$c_s\$ la constante del amortiguador.

Las ecuaciones dinámicas presentes en el modelo permiten simular sus desplazamientos utilizando como dato de entrada el perfil digitalizado de la carretera (en la parte inferior del “resorte del neumático”). La medida de la regularidad del camino se define como el movimiento acumulado vertical del eje respecto a la masa suspendida (diferencia entre \$Z_s\$ y \$Z_r\$) por unidad de longitud recorrida. La unidad habitual es m/km (metros acumulados por kilómetro recorrido).

Para poder calcular el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), es necesario la utilización tanto de herramientas estadísticas, matemáticas y computacionales, las cuales permitan obtener la medida de rugosidad con la que cuenta un camino, al momento de su medición.

Lo primero a realizar para la obtención del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), es medir las cotas del camino, que permitan obtener el perfil longitudinal digitalizado. Hay que tener en cuenta que el IRI, estará en función únicamente del perfil longitudinal detallado del camino, es decir su calidad depende del espaciamiento entre puntos y la precisión del relevamiento. Los datos obtenidos son sometidos a un primer filtro, consistente en un análisis estadístico (media móvil cada 25 cm) con el fin de eliminar irregularidades que son atenuadas por la impronta del neumático y así obtener un nuevo perfil, el cual puede ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades relevantes para la rugosidad.

El siguiente paso es aplicar un segundo filtro al nuevo perfil que se había generado. Este consiste en la aplicación de un modelo de cuarto de carro (Figura 2) que se desplaza a una velocidad de 80 Km/h, a través de este modelo se registran las características asociadas al camino, basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar. De esta manera, el IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; que modelan simplificadaamente un vehículo como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino.

A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala de medición de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías, esta escala es mostrada en la Figura 3. Para caminos pavimentados, el rango de valores del IRI es de 0 a 12 m/km, donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; para vías no pavimentadas el rango se extiende hasta el valor de 20.

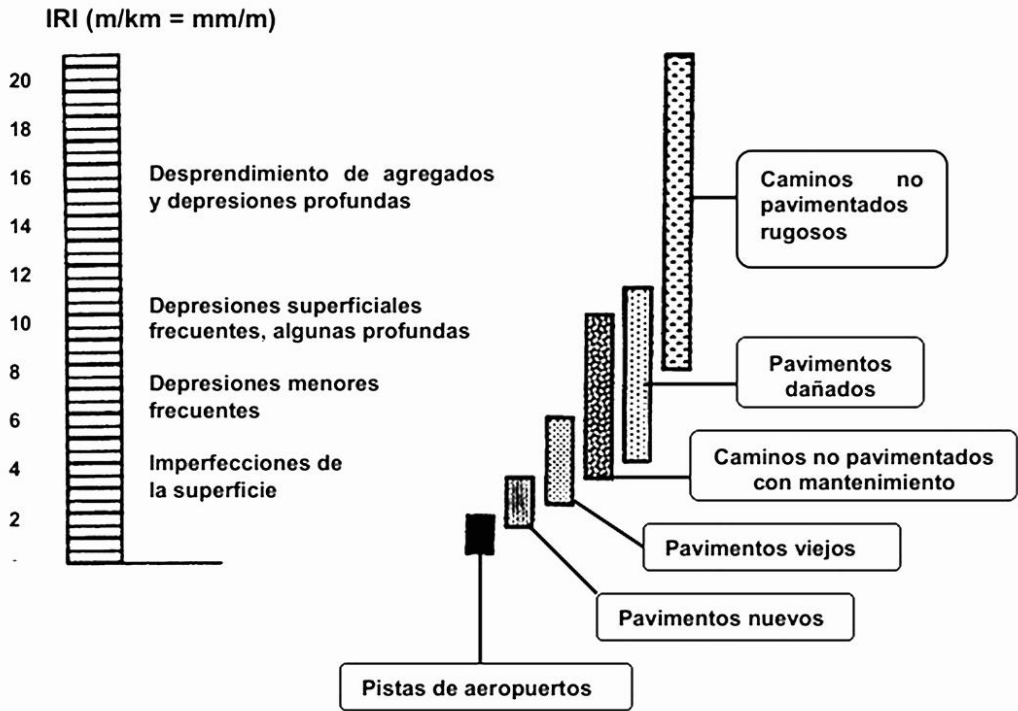


Figura 3. Escala de rugosidad IRI [2]

3 Equipamientos de alto rendimiento disponibles en Argentina para medir el IRI

3.1 Equipos tipo respuesta dinámica

Desde el año 1980, en Argentina se han utilizado equipos de medición del tipo respuesta dinámica. Estos equipos miden la rugosidad a través de un sensor montado en un vehículo, o un trailer, que valora los movimientos relativos entre las ruedas y el chasis. Como resultado se obtiene la acumulación de los movimientos relativos en una determinada longitud, generalmente 100 metros. En la Figura 4 se muestran algunos de los equipos en uso. Ese valor representa la sensación de confort que experimenta el usuario al circular la carretera, pero está muy influenciado por el tipo de vehículo en el que se encuentra montado el sensor. Para que sus resultados puedan ser expresados en IRI es necesario desarrollar una ecuación de calibración por correlación, en base a mediciones realizadas en tramos con valor de IRI conocido obtenido con otros equipamientos de referencia.



Figura 4. Algunos de los equipos tipo respuesta dinámica (fuente propia)

3.2 Equipos perfilómetros

En el año 2000 aproximadamente se empezaron a incorporar equipos perfilómetros. Estos equipos valoran el perfil longitudinal de la carretera con el uso de sensores laser o ultrasonido, con una discretización de puntos muy cercanos entre sí, del orden de 2 cm. Estos perfiles son luego procesados con el software del IRI, que simula el pasaje de un vehículo ideal a 80 Km/h y valoran la acumulación de los desplazamientos verticales entre la rueda y el chasis.

En Argentina hay equipos que valoran una sola línea del perfil, con el sensor ubicado en la huella externa, y otros valoran las dos huellas, externa e interna. En la Figura 5 se muestran algunos de los equipos.



Figura 5. Algunos de los equipos perfilómetros (fuente propia)

4 Metodología utilizada para el control de los equipos tipo respuesta dinámica

Para los equipos tipo respuesta dinámica se desarrolló una metodología en el Laboratorio Vial del IMAE en los años 80, la que es aplicada al control de todos los equipos que concurren a la Institución para esa tarea.

Estos equipos tienen que ser controlados periódicamente debido a que su respuesta depende del estado del vehículo en el que se encuentran montados. Las partes componentes del sistema dinámico: ruedas, amortiguadores, resortes, sufren desgastes debido al uso y eso modifica la respuesta dinámica y por lo tanto los movimientos relativos que se miden para valorar la rugosidad. Esta metodología se definió tomando como base la norma ASTM E 1448 y la publicación nº 46 del Banco Mundial.

4.1 Calibración

Los pasos para calibrar los equipos son:

- Se utilizan al menos 10 pistas de calibración de 300 metros de longitud, ubicadas sobre caminos reales en servicio. Las pistas seleccionadas tienen que tener un entorno de valores de rugosidad que cubre el espectro de rugosidades a medir posteriormente en rutas en servicio.
- Cada pista se recorre 5 veces a la velocidad de medición del equipo, y se obtienen los resultados en las unidades propias de cada equipo (pulsos), expresados en (m/Km o pulsos/Km).
- Se controla la dispersión de los resultados repetidos obtenidos: el valor del rango (valor máx – valor mín) dividido el valor medio, expresado en porcentaje, debe ser menor o igual al 10%.

$$\frac{\text{máx}-\text{mín}}{\text{promedio}} \leq 10\% \quad (2)$$

- En cada pista se mide el valor de IRI de referencia a partir de mediciones del perfil longitudinal realizadas con el equipo Romdas Z-250 con puntos espaciados 25 cm.
- Se determina la ecuación de calibración del equipo por correlación entre el valor promedio de las 5 mediciones repetidas en pulsos, y el valor de IRI de referencia
$$IRI = A + B \times \text{pulsos} \quad (3)$$
- Una vez determinada la ecuación, las 5 mediciones repetidas del equipo se expresan en IRI, y se calcula la repetibilidad en cada una de las pistas.
 - Se calcula la varianza entre las 5 mediciones.
 - Luego se calcula el promedio de las varianzas.
 - Por último, se calcula la raíz cuadrada de la varianza promedio. Este valor obtenido es la desviación estándar de repetibilidad del equipo.
- Luego, se calcula el error de estimación del IRI.
 - Primero se calcula la diferencia cuadrática entre el valor de IRI estimado y el valor de IRI de referencia.
 - Luego se calcula el promedio de estos valores, esta es la desviación estándar residual.
 - Finalmente, la raíz cuadrada de este valor obtenido es el error de estimación del IRI del equipo.

- Se calcula luego el error total del equipo haciendo la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores de repetibilidad y de estimación.

$$error\ total = \sqrt{(error\ repetibilidad^2 + error\ estimación^2)} \quad (4)$$

- Para que el equipo sea aprobado para realizar mediciones, el error total del sistema debe ser menor o igual a 0.30 m/Km IRI. Este error es grande, pero con este tipo de equipos no pueden lograrse mejores resultados.

4.2 Control periódico

El funcionamiento de los equipos se debe controlar periódicamente. Para ello se utiliza el siguiente procedimiento basado en cartas de control:

- En el momento de la calibración se determinó el rango medio entre las 5 pasadas repetidas de todas las pistas. Siendo el rango en cada pista calculado como la diferencia entre el mayor y el menor valor de IRI.
- Para controlar el equipo se realizan 5 mediciones repetidas en 3 o más secciones de control. Estas secciones pueden ser alguna de las pistas de calibración, o alguna sección que el equipo haya medido en forma inmediata de calibrado.
- Se controla que el valor medio de las 5 mediciones se encuentre dentro de +/- 0.577 el rango medio calculado durante la calibración del equipo.
- Se controla que el rango actual se encuentre dentro de 2.115 el Rango medio.
- Si alguno de los controles no verifica, el equipo debe ser revisado y recalibrado.

5 Metodología desarrollada para equipos perfilómetros

Con la incorporación en nuestro país de equipos perfilómetros la metodología descrita tuvo que ser modificada y adaptada a esta nueva tecnología. Estos equipos tienen tecnología más moderna en los aspectos electrónicos e informáticos, y por lo tanto los resultados que se obtienen son más precisos. Esto va de la mano con las mayores exigencias de calidad de circulación que los usuarios piden que las carreteras les brinden, fundamentalmente en autopistas y vías de alto tránsito.

Para desarrollar la metodología de control a aplicar en estos equipos fue realizado un análisis bibliográfico y consultadas normativas en uso en otros países. En forma resumida pueden citarse:

- La norma ASTM E 950 realiza el control de repetibilidad y de reproducibilidad por comparación de perfiles, entre mediciones repetidas del equipo y medición de referencia, no realiza control sobre el IRI informado. Las secciones de prueba tienen que ser de 320 m de longitud y tener los puntos del perfil informados cada 0.30 m. El análisis se puede realizar utilizando el software Proval. [4]
- La norma AASHTO R 56 también hace el análisis por comparación de perfiles obtenidos en mediciones repetidas del equipo y medición de referencia, aplicando correlación cruzada, no realiza control sobre el IRI informado. Para esto las secciones de prueba tienen que ser de 160 m de longitud y tener los puntos del perfil informados cada 0.05 m. El análisis se puede realizar utilizando el software Proval. [5]
- La norma Tex 1001 – S plantea un análisis por comparación de perfiles como en la norma ASTM E 950, pero también un control del IRI. Para el control de IRI plantea analizar la repetibilidad entre pasadas sucesivas en una o más

pistas, y el sesgo o error de estimación del IRI respecto al IRI obtenido con otro equipo de referencia. Para estos dos aspectos del IRI fija valores límites a ser verificados. A continuación, se muestran las exigencias para 2 versiones de la norma [6], y el error total calculado a partir de esos valores:

- 2012: repetibilidad ≤ 0.047 m/Km y sesgo ≤ 0.189 m/Km. (el error total debe ser ≤ 0.20 m/Km)
- 2018: repetibilidad ≤ 0.039 m/Km y sesgo ≤ 0.0947 m/Km. (el error total debe ser ≤ 0.10 m/Km)
- Las normas Austroads AM/T001 a 004 plantean el control de repetibilidad y sesgo realizando mediciones repetidas en tramos y mediciones con equipo de control, pero también plantean la opción de que el equipo pueda necesitar la aplicación de una ecuación de calibración para mejorar los resultados informados. [7, 8, 9, 10]. Al permitir desarrollar una ecuación, la norma limita los entornos en los cuales pueden encontrarse los valores de las constantes A y B de la ecuación:

$$-0.25 \text{ m/Km} \leq A \leq 0.25 \text{ m/Km} \quad 0.95 \leq B \leq 1.05 \quad R^2 \geq 0.95$$

Tomando como base las normativas citadas se planteó una metodología para aplicar en Argentina, la misma plantea el control sobre los valores de IRI informados por el equipo, ya que los equipos no brindan en forma rutinaria los perfiles requeridos en las normas ASTM E 950 y AASHTO R 56. En forma resumida, los pasos a seguir son:

- Análisis de la influencia de la velocidad de medición en los resultados de IRI.
- Análisis de los errores de repetibilidad y estimación del IRI.
- Si los valores de error superan los valores admisibles se debe plantear una ecuación de calibración.
- Verificar que los valores de las constantes de la ecuación de calibración cumplan los límites fijados, caso contrario desarrollar una ecuación con restricciones.
- Verificar el error total luego de aplicar la ecuación de calibración.
- Los valores límites que se indican para las constantes y para el error total surgieron de su aplicación en muchos equipos perfilómetros en uso en Argentina.

5.1 Control de la influencia de la velocidad en los resultados de IRI

La primera vez que se controla el equipo, se realiza un estudio para ver que influencia tiene la velocidad de circulación en los resultados de IRI obtenidos. Para esto el equipo debe realizar 5 mediciones repetidas en al menos 2 de las pistas de calibración de 300 m, a 3 velocidades (por ejemplo 40, 60 y 80 Km/h).

Al momento de valorar la influencia de la velocidad y la repetibilidad es muy importante seleccionar pistas que tengan rugosidad uniforme en el sentido transversal de la ruta, preferiblemente sin la presencia de problemas de borde y/o fisuras abiertas (grado 4 o superior según la Metodología de Evaluación de la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina). Si se seleccionan pavimentos de hormigón, las mediciones deben realizarse en cortos periodos de tiempo para minimizar la variación del alabeo por temperatura.

Se debe controlar la dispersión entre las 5 pasadas repetidas de cada velocidad. La desviación estándar entre las mismas debe ser menor o igual a 0.10 m/km.

Luego se analiza la influencia de la velocidad. La desviación estándar entre los promedios de las 3 velocidades debe ser menor o igual a 0.05 m/km.

Si este aspecto no se verifica, el equipo no podrá medir a velocidad libre, sino que tendrá que ser definida una velocidad de medición, la que se deberá respetar con una variación de +/- 5 Km/h.

5.2 Calibración / control del error del equipo

Se utilizan al menos 10 pistas de calibración de 300 metros de longitud, ubicadas sobre caminos reales en servicio. Las pistas seleccionadas tendrán un entorno de valores de rugosidad que cubra el espectro de rugosidades a medir posteriormente en rutas en servicio.

En cada pista se tiene que disponer del valor de IRI de referencia, calculado a partir de mediciones del perfil longitudinal realizadas con el equipo Romdas Z-250 ó similar. Ese IRI de referencia debe ser obtenido a partir de, al menos, tres mediciones repetidas con el equipo elegido.

Cada pista se recorre 5 veces a velocidad libre o a la velocidad de medición del equipo, y se obtienen los resultados en IRI de cada equipo (IRI_{medido}), expresados en (m/Km).

En dos de las pistas se deben realizar 10 mediciones sucesivas, a los fines de valorar la repetibilidad del equipo. Se indica que en las mediciones realizadas para control de repetibilidad y calibración se tenga mucho cuidado en la operación del equipo, sin aceleraciones ni frenadas bruscas. Las pistas seleccionadas no deben tener variaciones de IRI en el sentido transversal de la ruta, no tener baches ni fisuras anchas abiertas, no tener problemas de borde y no ser de hormigón debido al alabeo térmico.

Para el cálculo del error de repetibilidad se calcula la varianza entre las 10 mediciones de las pistas elegidas, luego, se calcula la raíz cuadrada de la varianza promedio. Este valor obtenido es la desviación estándar de repetibilidad del equipo. La desviación estándar de repetibilidad en cada pista debe ser menor o igual a 0.10 m/km IRI.

Para el cálculo del error de estimación del IRI primero se calcula la diferencia cuadrática entre el valor de IRI estimado y el valor de IRI de referencia, para cada una de las pistas, luego se calcula el promedio de estos valores, esta es la desviación estándar residual, finalmente, la raíz cuadrada de este valor obtenido es el error de estimación del IRI del equipo.

Para el cálculo del error total se calcula haciendo la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores de repetibilidad y de estimación del IRI.

$$error\ total = \sqrt{(error\ repetibilidad^2 + error\ estimación^2)} \quad (5)$$

El error total del sistema debe ser menor o igual a un valor xxxx m/km IRI (a definir).

Para que el equipo sea aprobado para realizar mediciones deben cumplirse los valores de repetibilidad y error total.

En el caso de no verificar, se determina la ecuación de calibración del equipo por correlación entre el valor promedio de las 5 mediciones repetidas en IRI_{medido} , y el valor de IRI de referencia.

$$IRI_{informado} = A + B \times IRI_{medido} \quad (6)$$

Las constantes de la ecuación deben estar entre los siguientes límites (a definir):

$$xx \leq A \leq xx \quad xx \leq B \leq xx \quad R^2 \geq xx$$

A todas las mediciones repetidas del equipo se les aplica la ecuación obtenida, y se calculan los errores de repetibilidad, de estimación del IRI y el error total, valores que deben verificar los límites antes mencionados.

5.3 Control periódico de los equipos

En forma periódica se controlará el funcionamiento de los equipos. Para ello se utilizará el mismo procedimiento indicado en el punto 4.2.

6 Determinación de los valores límites para emplear en el control de perfilómetros

Una vez planteada la metodología hubo que realizar un análisis para definir los valores límites de aceptabilidad. Para eso se trabajó con los resultados obtenidos con 8 equipos perfilómetros.

Estos equipos realizaron mediciones repetidas en tramos de rutas en servicio de 300 metros de longitud, a distintas velocidades. Las pistas incluyeron tramos con carpeta de rodamiento asfáltica y tramos con carpeta de rodamiento de hormigón.

Respecto a la influencia de la velocidad de circulación, los resultados indicaron que todos son insensibles a ese parámetro, o sea que pueden realizar mediciones en ruta sin necesidad de fijar una velocidad de operación. Las mediciones pueden realizarse a una velocidad similar a la del tránsito circulante por la ruta, encontrándose entre 20 y 100 Km/h.

Para todos los equipos se desarrollaron distintos tipos de ecuaciones, que se muestran en la Tabla 1: con todas las pistas, con las pistas de superficie de rodamiento asfálticas (sin H^0) sin ecuación, sin restricciones de parámetros, y con restricciones de parámetros.

- Inicialmente se desarrolló una ecuación conteniendo todas las pistas medidas y sin control de los parámetros A y B de la ecuación. El utilizar un conjunto de pistas con amplio rango surgió pensando que los equipos se utilizarían para medir en rutas con condición de estado muy variable, incluyendo rutas muy deterioradas. Lo que se buscó es aplicar una ecuación para que el error total del equipo fuera lo más bajo posible. En algunos de los equipos esta ecuación presentó valores de A muy altos, lo que tiene como inconveniente que los resultados informados por el equipo parten de ese valor de IRI de base.
- Luego, considerando que estos equipamientos son de alta calidad y precisión (según la tecnología que poseen y lo informado por los proveedores), se planteó el análisis con los resultados obtenidos en tramos con superficie asfáltica, o sea reducir el entorno de análisis a un $IRI \leq 3$ m/Km.
- El primer análisis es verificar la necesidad de aplicar ecuación o no. Para esto se adoptaron las constantes de la ecuación $A = 0$ y $B = 1$. El análisis del error total indica que en algunos equipos el error es bajo, pero en otros no, incluso es del mismo orden que se utiliza en los equipos de respuesta dinámica (error total ≤ 0.3 m/Km), equipos 2, 7 y 8.
- Viendo esta situación, se planteó una ecuación de calibración sin restricciones de las constantes de la ecuación A y B. Las ecuaciones obtenidas mejoraron el error obtenido en los equipos, pero los valores obtenidos de la constante A son muy altos, lo que implica que los resultados informados por el equipo parten de

ese valor de IRI de base. Aspecto crítico cuando se plantea la medición de aceptabilidad de obras nuevas o de control de rutas con valores muy bajos de exigencia en IRI (del orden de 1.8 m/Km). Este hecho se genera por estar desarrollando una ecuación de calibración en un entorno muy pequeño de valores de IRI.

- Se planteó entonces una nueva ecuación, limitando los valores de las constantes A y B siguiendo lo indicado en las normativas Austroads. En esta opción, los valores del error total son un poco mayores que en la opción anterior sin restricciones. Igualmente, los errores totales obtenidos son ≤ 0.20 m/Km. Lo que no pudo lograrse es que el $R^2 \geq 0.95$, valor indicado en las normativas Austroads.

7 Conclusiones

Como resultado de este análisis se concluye que:

- Considerando que los equipos van a ser utilizados fundamentalmente para medir rutas con altas exigencias de rugosidad, se recomienda utilizar tramos con superficie de rodamiento asfáltica para realizar el control de errores.
- El error total admisible para estos equipos perfilómetros debe ser ≤ 0.20 m/Km IRI. En principio se esperaba que este error fuera menor, pero esto se logró solo en algunos de los equipos. Este valor obtenido es del mismo orden que el error total calculado según las exigencias de la norma Tex 1001 – S del año 2012.
- En algunos de los equipos no hace falta aplicar ecuación de calibración para que el error total verifique el límite finalmente definido.
- En caso de tener que aplicar ecuación de calibración, las constantes de la ecuación deben estar entre los siguientes límites:
$$-0.25 \leq A \leq 0.25 \quad 0.95 \leq B \leq 1.05$$
- Para el parámetro R^2 no se ha podido obtener un valor muy alto. Para que este parámetro mejore los futuros controles se realizarán en pistas donde haya menor variación transversal del IRI, y se darán instrucciones a los operadores para que tengan mayor cuidado en mantener la línea de medición cuando hagan las mediciones repetidas. Adicionalmente se continuará buscando pistas de calibración con valores de IRI más bajos, del orden de 1 m/Km.

Tabla 1. Análisis de ecuaciones de calibración

	Equipo	A	B	Error de Repetibilidad (m/km)	Error de estimación de IRI (m/km)	Error total (m/km)	R2
todas las pistas	1	0.12	0.97	0.06	0.13	0.14	0.99
sin H ⁰ -sin ecuac	1	0	1	0.05	0.15	0.16	0.92
sin H ⁰ - sin restr	1	0.62	0.72	0.04	0.10	0.11	0.92
sin H ⁰ - con restr	1	0.25	0.9	0.05	0.12	0.13	0.92
todas las pistas	2	0.43	0.89	0.07	0.15	0.16	0.98
sin H ⁰ -sin ecuac	2	0	1	0.07	0.27	0.28	0.82
sin H ⁰ - sin restr	2	0.78	0.69	0.05	0.15	0.16	0.82
sin H ⁰ - con restr	2	0.25	0.95	0.07	0.18	0.20	0.82
todas las pistas	3	0	1.02	0.05	0.17	0.18	0.99
sin H ⁰ -sin ecuac	3	0	1	0.05	0.11	0.12	0.98
sin H ⁰ - sin restr	3	0	1.02	0.05	0.11	0.12	0.98
todas las pistas	4	0.13	0.945	0.05	0.17	0.18	
sin H ⁰ -sin ecuac	4	0	1	0.05	0.19	0.20	0.83
sin H ⁰ - sin restr	4	0.61	0.7	0.04	0.16	0.16	0.68
sin H ⁰ - con restr	4	0.12	0.95	0.05	0.18	0.19	0.83
todas las pistas	5	0.09	1.01	0.13	0.11	0.17	1
sin H ⁰ -sin ecuac	5	0	1	0.13	0.15	0.20	0.92
sin H ⁰ - sin restr	5	0.39	0.85	0.11	0.11	0.16	0.92
sin H ⁰ - con restr	5	0.25	0.92	0.12	0.11	0.17	0.92
sin H ⁰ -sin ecuac	6	0	1	0.05	0.13	0.14	0.91
sin H ⁰ - sin restr	6	0.49	0.75	0.04	0.09	0.09	0.91
sin H ⁰ - con restr	6	0.09	0.95	0.05	0.11	0.12	0.91
todas las pistas	7	0.34	0.97	0.08	0.13	0.15	0.99
sin H ⁰ -sin ecuac	7	0	1	0.06	0.29	0.30	0.99
sin H ⁰ - sin restr	7	0.46	0.91	0.05	0.10	0.11	0.98
sin H ⁰ - con restr	7	0.25	1.00	0.06	0.12	0.13	0.98
todas las pistas	8	0.42	0.88	0.06	0.08	0.11	0.99
sin H ⁰ -sin ecuac	8	0	1	0.07	0.28	0.29	0.99
sin H ⁰ - sin restr	8	0.30	0.99	0.07	0.08	0.11	0.99
sin H ⁰ - con restr	8	0.25	1.01	0.07	0.08	0.11	0.99

8 Referencias

- [1] Sayers W., Gillespie T. y Queiroz C. World Bank Technical Paper n° 45. "The international road roughness experiment. Establishing correlation and a calibration standard for measurements", Washington DC (USA), 1986.
- [2] Sayers W., Gillespie T. y Paterson W. World Bank Technical Paper n° 46. "The international road roughness experiment. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements", Washington DC (USA), 1986.
- [3] Chang C. y otros. Control de calidad de la regularidad superficial de los pavimentos utilizando perfilómetros inerciales". www.HBOConsultores.com, Perú, 2012.
- [4] ASTM E 950. "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference", reprobada 2004.
- [5] AASHTO R 56. "Standard Practice for Certification o Inertial Profiling Systems", 2018.
- [6] Texas Department of Transportation, (2018). Test Procedure for Operating Inertial Profilers and Evaluating Pavement Profiles (Tex-1001-S).
- [7] AUSTRROADS Test method AG:AM/T001. "Pavement Roughness Measurement with an Inertial Profilometer", 2007.
- [8] AUSTRROADS Test method AG:AM/T002. "Validation of an Inertial Profilometer for Measuring Paviment Roughness (Reference Device Method)", 2007.
- [9] AUSTRROADS Test method AG:AM/T003. "Validation of an Inertial Profilometer for Measuring Pavement Roughness (Loop Method)", 2007.
- [10] AUSTRROADS Test method AG:AM/T004. "Pavement Roughness Repeatability Bias Checks Inertial Profilometer", 2007.