

DETERMINACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS MEDIANTE EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI): ASPECTOS Y CONSIDERACIONES IMPORTANTES

Ing. Gustavo A. Badilla Vargas
Unidad de Investigación en Infraestructura Vial
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
gustavo.badilla@ucr.ac.cr

Resumen

Diferentes investigaciones realizadas, revelan que los costos de operación de los vehículos dependen de la magnitud de las irregularidades superficiales del pavimento, afectando la velocidad de circulación, deterioro de los vehículos y el consumo de combustible.

Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones del estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

Conocer la regularidad superficial del pavimento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente.

Debido a que el Índice de Regularidad Internacional (IRI) es geográficamente transferible, repetible y estable con el tiempo, se ha convertido en una medición atractiva y conveniente para el control de calidad de la construcción de nuevos pavimentos. Además de permitir evaluar la regularidad superficial de la carretera y reflejar el confort y seguridad de los usuarios, garantiza indirectamente el desempeño estructural del pavimento.

Recientemente, en Costa Rica, la Administración ha venido introduciendo la medición del IRI como parámetro de aceptación de diferentes obras viales. Sin embargo, el desconocimiento u omisión de detalles propios del método de cálculo de IRI no han permitido una adecuada implementación de este índice. Debido a ello, este artículo presenta los principales detalles, cuidados y procedimientos involucrados en el cálculo del IRI, con la finalidad de que sean tomados en cuenta en la definición de especificaciones de aceptación de proyectos viales o evaluación de la red vial. De esta manera, la implementación de estas mediciones puede conllevar a la introducción de nuevas tecnologías en las obras de pavimentación y con ello beneficios para la infraestructura vial del país.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de pavimentos proporciona información que puede ser utilizada tanto en el diseño como en la gestión de la infraestructura, permitiendo priorizar las actividades de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción. Permite también realizar inventarios del

estado y la condición de la red vial, así como evaluar los costos adicionales en los cuales pueden incurrir los usuarios por el uso de la carretera.

Se reconocen dos tipos de evaluaciones, la evaluación estructural (relacionada con la capacidad que tiene el pavimento para soportar las cargas de los vehículos) y la evaluación funcional (relacionada directamente con la percepción del usuario al utilizar una determinada vía).

En el caso de la evaluación funcional, la regularidad de la superficie de ruedo permite ofrecer condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras. Además la regularidad tiene incidencia en los costos de operación de los vehículos, puesto que dependiendo de la magnitud de las irregularidades superficiales: la velocidad de circulación puede verse afectada negativamente, puede aumentar el desgaste en las llantas y el consumo de combustible.

Por otro lado, los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento que puede favorecer el deterioro y el consecuente aumento en los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

Por estas razones, conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente.

Debido a esto, muchos países han utilizado el Índice de Regularidad Internacional (IRI), como parámetro para evaluar la regularidad y reflejar el confort y seguridad de los usuarios.

Profundizar en los detalles, cuidados, procedimiento de cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI), así como las especificaciones internacionales, permitirá contar con una metodología homogénea y objetiva que permita evaluar la condición superficial, representada por el IRI.

OBJETIVO GENERAL

Establecer los principales detalles, cuidados y procedimiento de cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) que deben considerarse para establecer la metodología de ensayo que se aplicará para la medición del IRI en Costa Rica.

CONCEPTOS GENERALES EN LA EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL

Definición de Regularidad Superficial

En la norma de ensayo ASTM E 867-06 “*Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*”, se define el concepto de “*Roughness*” como: “*desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal.*”

A la luz de esta definición, algunos autores prefieren utilizar el término Regularidad, puesto que este concepto se asocia más fácilmente a la definición de “*Roughness*”, que el término Rugosidad. De esta manera, puede encontrarse bibliografía que trata indistintamente los conceptos de Regularidad y Rugosidad; sin embargo para efectos del presente artículo se prefiere utilizar Regularidad, para referirse a las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad del rodado, seguridad y costos de operación del vehículo.

En la década de los 70s, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Aún datos de un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

Con el objetivo de unificar los diferentes parámetros que se utilizaban en diferentes países para determinar la regularidad superficial de las carreteras, se realizó en Brasil en 1982, el proyecto “*International Road Roughness Experiment*” (*IRRE*), promocionado por el Banco Mundial; en el cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. En este proyecto se realizó la medición controlada de la regularidad superficial de pavimentos para un número de vías bajo diferentes condiciones y con una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un único parámetro de medición de la regularidad superficial denominado **Índice de Regularidad Internacional** (*IRI*, *International Roughness Index*).

Este índice fue definido de la siguiente manera: “El *IRI* resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas ($RARS_{80}$, “*Reference Average Rectified Slope*”, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, ($RQCS$, “*Reference Quarter Car Simulation*”), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h”.

En términos más sencillos, el *IRI* es un modelo matemático, el cual calcula el movimiento acumulado en la suspensión de un vehículo de pasajeros típico, al recorrer una superficie del camino a una velocidad de 80 km/h.

Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

El cálculo del *IRI* involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten derivar la medida de regularidad asociada al camino; lo cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático.

El primer paso del procedimiento para el cálculo del *IRI*, y el más importante de todos, consiste en medir las cotas o elevaciones de terreno que permiten representar el perfil real de camino. ***Esto significa que el IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil, y dependerá únicamente de la calidad del perfil longitudinal.*** Estos datos son sometidos a un **primer filtro**, en el cual se realiza un análisis estadístico (media móvil) y adecuaciones matemáticas para poder generar un nuevo perfil posible de ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades que se pudieran observar. Las razones para aplicar este

primer filtro se fundamentan en las siguientes razones: a) para simular el comportamiento entre las llantas de los vehículos y la carretera, y b) para reducir la sensibilidad del algoritmo del IRI al intervalo de muestreo.

Al nuevo perfil generado se le aplica un **segundo** filtro, el cual consiste en la aplicación de un modelo de cuarto de carro que se desplaza a una velocidad de 80 km/h, a través de este se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar, el cual es modelado de forma simplificada 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. (Ver Figura 1)

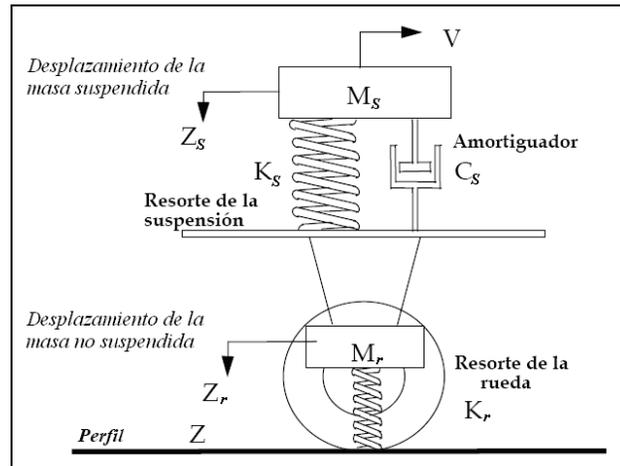


Figura 1: Modelo de cuarto de carro

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.

El modelo de cuarto de carro emplea los parámetros de lo que se ha denominado como el Carro de Oro, los cuales se muestran a continuación:

$$k_2 = \frac{K_s}{M_s} = 63,3 \quad k_1 = \frac{K_r}{M_s} = 653 \quad c = \frac{C_s}{M_s} = 6 \quad \mu = \frac{M_r}{M_s} = 0,15 \quad (1)$$

donde:

k_s : constante del resorte de la suspensión

k_r : constante del resorte de la rueda

M_s : masa suspendida

M_r : masa no suspendida

c_s : amortiguador

Las ecuaciones dinámicas presentes en el modelo, forman un sistema de ecuaciones que utilizan como dato de entrada el perfil de la carretera (en la parte inferior del “resorte del neumático”). El movimiento vertical del eje respecto a la masa suspendida se calcula y acumula. El valor en m/km (metros acumulados por kilómetro viajado) es la medida final de la regularidad del camino.

Una consideración importante que debe considerarse en el método de cálculo de IRI es que se deben estimar valores iniciales entre la respuesta de transición y la respuesta inducida por el perfil. Los efectos de esta inicialización disminuyen conforme la simulación del cuarto de carro cubre una mayor distancia del perfil. Esta inicialización influye en el modelo del cuarto de carro en aproximadamente 20 m. Por lo tanto, la manera más precisa de tratar con la inicialización es medir el perfil al menos 20 m antes del punto de inicio del tramo, e iniciar a partir de allí el cálculo del IRI.

Para caminos pavimentados el rango de la escala 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 la escala se extiende hasta el valor de 20. El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, pero se define por su IRI inicial mayor a cero, debido principalmente a que alcanzar valores de IRI = 0 es sumamente difícil desde el punto de vista constructivo. Una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito. A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala general de los valores de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías (ver Figura 2).

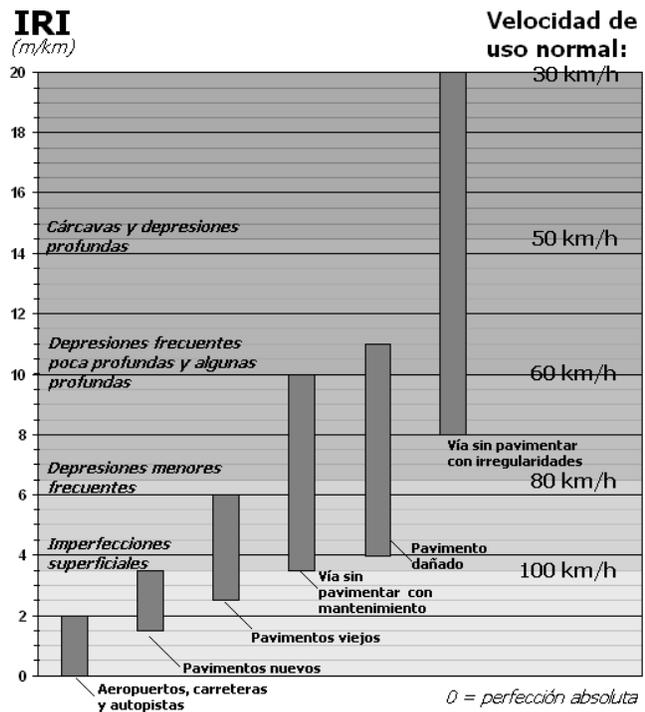


Figura 2: Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías

Equipos para la Medición de la Regularidad Superficial de los Pavimentos

Existen diferentes equipos para determinar la regularidad superficial de los pavimentos, los cuales han venido evolucionando en el tiempo, variando unos de otros en la precisión y rapidez para la obtención de los resultados. En la Tabla 1 se muestra de manera resumida los diferentes equipos empleados para la determinación de la regularidad superficial y sus principales usos.

Como se mencionó anteriormente el cálculo del IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado, y por lo tanto el paso más importante para el cálculo del IRI, consiste en la calidad de la medición de las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal. Sin embargo, es importante destacar que, graficar las elevaciones en función de la distancia longitudinal para un mismo tramo de carretera empleando diferentes equipos de medición no necesariamente

implica que los perfiles longitudinales medidos coincidan entre sí. Por ejemplo, la Figura 3 muestra los perfiles longitudinales obtenidos a partir del Dipstick y otros dos perfilómetros inerciales (ICC Laser y K.J. Law), los cuales evidentemente son muy diferentes entre sí. Estas diferencias se deben principalmente a la conjugación entre el perfil del camino que contribuye a la regularidad y la pendiente total del tramo seleccionado. En otras palabras, dependiendo del equipo se establecen niveles de referencia diferentes para la determinación del perfil; es decir, en el caso del Dipstick se registra la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro, mientras que en el caso de los perfilómetros inerciales, las elevaciones se registran respecto a un eje de referencia inercial, lo cual genera las diferencias mostradas en la Figura 3.

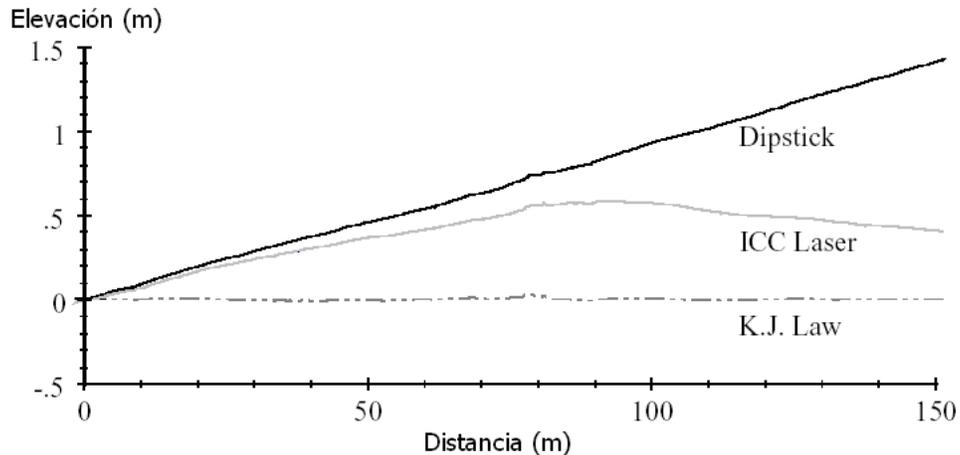


Figura 3: Variaciones aparentes de perfiles longitudinales utilizando diferentes equipos

Una vez que se cuenta con el perfil longitudinal, este es sometido al primer filtro, que consiste en una serie de adecuaciones matemáticas y análisis estadístico (media móvil), para generar un nuevo perfil suavizado de las irregularidades. Como se muestra en la Figura 4, los perfiles anteriores después de la aplicación del primer filtro muestran básicamente el mismo patrón.

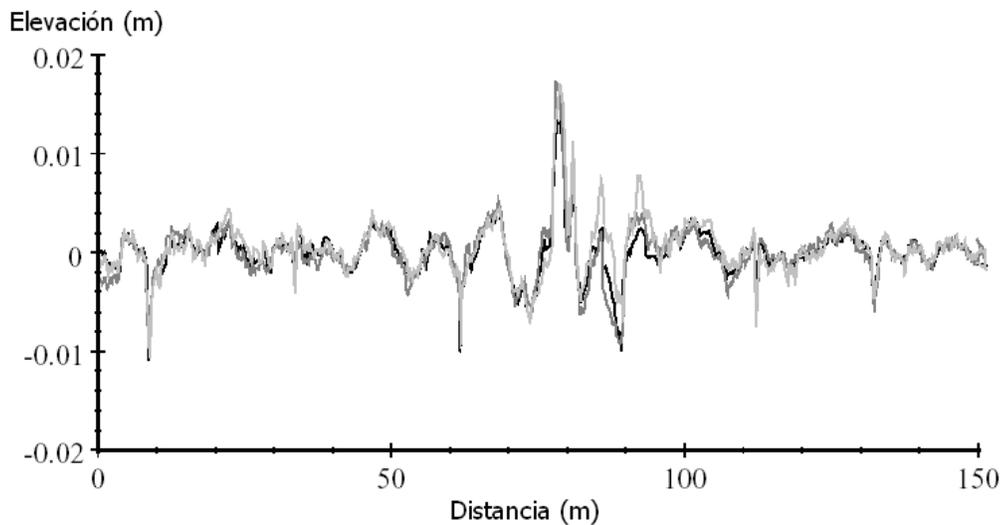


Figura 4: Los mismos perfiles de la figura anterior después del filtrado

Finalmente a este perfil suavizado se le aplica el segundo filtro de la simulación del cuarto de carro, RQCS, a una velocidad de 80 km/h y se le determina finalmente el IRI.

Variación del IRI según la Longitud de Evaluación

El IRI puede ser calculado sobre cualquier longitud de camino; sin embargo, los usuarios deben entender que el cálculo del IRI depende altamente sobre qué longitud es acumulado. Es fundamental entender la relación que existe entre la variación de regularidad a lo largo del camino y el largo del camino sobre el cual la regularidad es promediada. De esta forma, aunque la bibliografía casi siempre habla solamente del valor del IRI de una carretera, es conocido que para ser precisos se debe añadir cada qué longitud se determina dicho valor, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen. Habitualmente el valor unitario más utilizado es cada 0.25 m y el valor global de referencia puede variar dependiendo de cada país o agencia que administra los pavimentos.

En vista de la importancia que tiene la longitud para la determinación del IRI, es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera engañosa valores de IRI satisfactorios. Por otra parte, la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de irregularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort. La Figura 5 muestra los resultados de IRI obtenidos cuando se realizan variaciones en la longitud de evaluación.

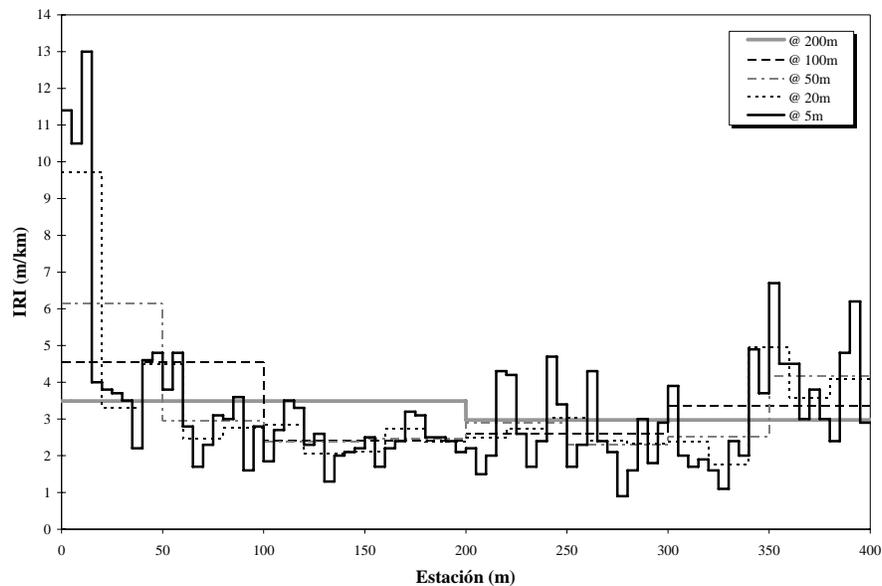


Figura 5: Variación en el valor del IRI según la longitud de evaluación

Como se puede observar en la Figura 5 las variaciones en la longitud del intervalo de medición del IRI, tiene incidencia directa en los resultados, de forma tal que los valores se suavizan como consecuencia del efecto de promediar. Lo cual es bastante evidente, al observar los primeros 200 m del tramo, en el cual se dan valores de IRI mayores a 10 y valores de IRI inferiores a 2, cuando el intervalo de evaluación es igual a 5 m. Por su parte al calcular el valor del IRI en una longitud de evaluación de 200 m, el efecto de promediar los valores dentro de este tramo muestra un valor de IRI igual a 3.5, lo cual puede resultar en la obtención inadecuada de valores de IRI satisfactorios en algunos casos.

Tabla 1. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos

Equipo	Descripción	Grado de precisión	Aplicaciones	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o ft), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	El Dipstick consiste en un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300 mm o 250 mm (dependiendo de las unidades de análisis, los apoyos pueden separarse 12 pulgadas), los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy Simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera. Miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie.	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo
Perfílometro inercial	Son equipos de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino. Determina el movimiento vertical del eje de referencia y mide desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento.	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy Compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de redes viales grandes

Efecto de Singularidades en la Medición y Cálculo del IRI

El correcto acabado de los pavimentos es de gran importancia para la comodidad, seguridad y costos de operación de los usuarios de los caminos, factor que además de tener una gran influencia en la duración de éstos, repercute en los costos del mantenimiento vial.

Debido a que el IRI involucra la diferencia entre el perfil longitudinal teórico y el perfil longitudinal existente, es un hecho que se pueden presentar ciertas singularidades que pueden afectar la medición del IRI. Se entiende como singularidad a: “Cualquier alteración del perfil longitudinal del camino que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. Entre ellas se pueden citar puentes, badenes, tapas de alcantarillas, cuñas, cruces de calles y otras, que por diseño geométrico alteren el perfil del camino” (LNV 107-2000). Debe tenerse en cuenta que el valor de la medición del IRI se verá afectado a todo lo largo de la singularidad más su área de influencia que son 40 m hacia delante en el sentido de la medición, lo cual corresponde a una característica propia del método de cálculo del IRI.

Aunque la definición anterior está relacionada con alteraciones en el perfil longitudinal que no provienen de fallas constructivas, se muestra a continuación un ejemplo particular de lo que ocurre cuando se calcula el IRI en un tramo en el cual se presenta una junta de construcción, en la cual en una longitud de 5 cm se produjo una depresión de 1.5 cm de profundidad superficial debido a fallas constructivas (ver Figura 6).

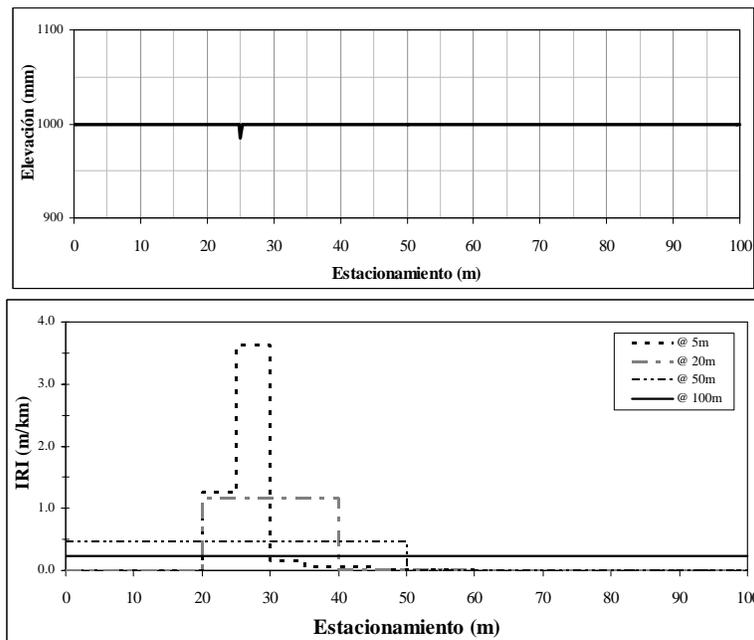


Figura 6: Simulación de una junta de construcción

Se puede notar que esta falla constructiva genera un incremento en el valor del IRI (valor superior a 3 m/km para un intervalo de evaluación de 5 metros), especialmente si se utilizan intervalos o longitudes de evaluación más cortos. En el caso de que aumente la longitud de evaluación, los resultados de los valores de IRI se reducen e imposibilitan determinar el sitio donde se presentan las particularidades. Puede notarse también los 40 metros del área de influencia después del sitio donde se presentó la particularidad, especialmente cuando se emplean intervalos o longitud de evaluación pequeños, fenómeno que deberá considerarse

cuando se define la longitud de evaluación del IRI en el caso del establecimiento de una especificación.

CONCLUSIONES

Del estudio bibliográfico, de los resultados y análisis llevados a cabo se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil. Depende únicamente de la calidad del perfil longitudinal.
- Para indicar un valor adecuado del IRI es necesario indicar cual es el intervalo o longitud de evaluación, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios.
- Intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo valores de IRI satisfactorios.
- Según la experiencia internacional, es conveniente anticipar controles de regularidad en las capas estructurales inferiores a la superficie de rodado. La evaluación por capas puede permitir corregir eventualmente diferencias en la construcción de una capa y mejorar la regularidad superficial del pavimento.

REFERENCIAS

- Awasthi, G., Singh, T. (2003). *On Pavement Roughness Indices*. IE (I) Journal-CV.
- Badilla, G., Elizondo F., Barrantes, R. (2008) *Determinación de un Procedimiento de Ensayo para el Cálculo del IRI*. Unidad de Investigación en Infraestructura Vial. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. San José, Costa Rica.
- Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP) (1999). *Summary of Pavement Smoothness Specifications in Canada and Around the World*. Technical Brief #16. Canada. Recuperado 18 de diciembre 2007 de: <http://www.cshrp.org/products/br-6-e.pdf>.
- Crespo del Río, R.(2003). *Variación del IRI según la longitud de evaluación*. Área de Gestión de Infraestructura. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España.
- Ningyuan, L., Marciello, F., Kazmicrowski, T. (2002). *Quality Assurance Applied in Measuring Pavement Roughness of Ontario Provincial Roads*. Ontario, Canadá.
- Sayers, M., Karamihas, S. (1998). *The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*. University of Michigan, USA.
- Sayers, M. (1995). *On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile*. Transportation Research Record, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC. No. 1501, p 1-12.
- Ventura, J., Alvarenga E. (2005). *Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. República de El Salvador.
- Zaghloul S. (1996). *Benefits of Constructing Smoother Pavements*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65, p 747-770.