



# ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD EN LA RED CARRETERA DE MÉXICO

Mario C. Arriaga Patiño Paul Garnica Anguas Alfonso Rico Rodríguez

Publicación Técnica No.108 Sanfandila, Qro., 1998

# INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Índice Internacional de Rugosidad, aplicación ala red carretera de México

ΕI	presente	trabaj	o fue	elabo	rado en	la Coord	dinad	ción de	Infraestr	uctura	del
Ins	tituto Mex	icano	del Tra	nspor	te por Ma	rio C. Arr	iaga	Patiño,	con la d	irección	de
Pa	ul Garnica	a Angu	as, inv	estiga	dores del	Instituto.	Se	agraded	en los c	omenta	rios
de	Alfonso	Rico	Rodrí	guez,	Director	General	у	Rodolfo	Téllez	Gutiér	rez,
Co	ordinador	de Infr	aestru	ctura							

# **ÍNDICE**

Resumen	<u>Página</u> I
Abstract	II
Resumen ejecutivo	Ш
1. Introducción	1
2. Características de la red nacional carretera	3
3. Costos de operación de los vehículos	5
4. Indice de Servicio Actual (ISA)	7
<ul> <li>5. Índice Internacional de Rugosidad (IRI)</li> <li>5.1 Definición</li> <li>5.2 Antecedentes</li> <li>5.3 Características del modelo</li> <li>5.4 Escala y Características del IRI</li> </ul>	9
6. El Índice Internacional de rugosidad en la red nacional carretera	13
Conclusiones y recomendaciones	19
Anexos:	
Anexo 1. Programa para el cálculo del IRI con base en el Levantamiento topográfico de un perfil longitudinal de un camino	21
Anexo 2. Procedimiento para la correlación del IRI con un equipo De tipo respuesta (Mays Ride Meter)	29
Anexo 3. Cálculo del IRI utilizando la viga móvil de tres metros	39
Bibliografía	46

#### Resumen

Este trabajo pretende describir el concepto de Índice Internacional de Rugosidad (IRI), los procedimientos para el cálculo del mismo y su correlación con los equipos de medición de rugosidad. Describe la utilidad y ventajas de evaluar el estado superficial de la red nacional de carreteras en valores del Índice Internacional de Rugosidad.

# **Abstract**

This paper describes the International Roughness Index (IRI) concept and the Advantages for application in order to evaluate the superficial condition of Mexican highway System. A procedure to correlate other roughness index with the IRI is proposed.

.

### Resumen ejecutivo

En nuestro país, el transporte por carretera es el de mayor contribución a la actividad nacional, por lo que es necesario que el transporte opere con base a parámetros de eficiencia. Por la red de carreteras fluye el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y el 98% del movimiento de pasajeros; además, permite desarrollar los aspectos comercial, social e industrial.

Para preservar esta red de carreteras es importante contar con un programa de mantenimiento acorde con las necesidades y presupuestos. La información que se requiere para preparar un programa de conservación es sólo una parte de toda la información que se puede medir en un camino, por lo que se debe "tamizar" constantemente para obtener sólo aquellos datos que realmente influyan en las decisiones para el mantenimiento de la red o para la elaboración de un proyecto detallado de rehabilitación de un tramo específico.

Se han realizado estudios para conocer cuales son los factores de un camino que influyen de manera directa en los costos de operación de los vehículos, principalmente de los de carga, resultando que uno de los principales es el estado superficial.

Los principales costos de operación son los siguientes:

- Combustibles,
- Lubricantes,
- Llantas,
- Reparación y refacciones,
- Costos del operador.
- Depreciación y reposición de vehículos,
- Intereses,
- Seguros y
- Tiempo de transporte de las mercancías.

La influencia de las condiciones del camino en los costos de operación de los vehículos es significativa. En condiciones óptimas de circulación, que se asocian con una carretera bien conservada, recta, en terreno plano y sin problemas de tránsito, el costo de operación es mínimo. La presencia de baches o deficiencias en la superficie; de pendientes o grados de curvatura no adecuados, así como de otros vehículos afecta las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes.

Para evaluar la calidad de la superficie de las carreteras en nuestro país, durante muchos años se ha utilizado el método desarrollado en los años sesentas por la American Association of State Highway Officials (AASHO), la cual toma en cuenta un parámetro denominado Índice de Servicio Actual (ISA). Esto ayudó a estimar

de una forma rápida y sin interrumpir el flujo de vehículos, las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en México.

El índice o nivel de servicio actual (ISA) consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino a la velocidad de operación y lo realiza un grupo o panel de valuadores. Cada valuador debe calificar el camino de una manera subjetiva en una escala de 0 a 5, correspondiente a una superficie intransitable y a una superficie en excelentes condiciones, respectivamente.

Para medir las características superficiales de los caminos se han diseñado y modificado algunos equipos, tales como las vigas móviles que tienen un interés específico en la detección de irregularidades puntuales en la fase de control de obra; sin embargo, por sus bajos rendimientos son obsoletos para la medición de grandes longitudes de camino. Otro grupo de sistemas de medida, son los equipos de tipo dinámico, con los que se pueden conseguir altos rendimientos y que, por lo tanto, pueden aplicarse incluso para la evaluación del estado total de la red. Recientemente han aparecido equipos sofisticados que pueden desplazarse a velocidades superiores a los 80 km/hr, provistos de cámaras láser y que además de medir la rugosidad, pueden evaluar: la profundidad de roderas, la macrotextura, radios de curvatura, fisuraciones, etc.

Debido a la gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial de los caminos, y los numerosos índices y escalas para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, se llegó a considerar la conveniencia de adoptar un "índice único". Cada país contaba con equipos "sui géneris", dificultando adoptar criterios de calificación universal. Estas razones han obligado a proponer a nivel mundial, el empleo del Índice Internacional de Rugosidad.

El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) fue aceptado como estándar de medida de la regularidad superficial de un camino por el Banco Mundial en 1986. Su obtención es posible correlacionarla con cualquier equipo de medición de la rugosidad de un pavimento.

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad relaciona la acumulación del desplazamiento (en valor absoluto), de la masa superior con respecto a la inferior de un vehículo modelo, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino transitado por el vehículo a una velocidad de 80 km/hr. EL IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/milla, etc. Para un camino pavimentado el rango de la escala del IRI es de a 0 a 12 m/km, donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino prácticamente intransitable.

Algunos países como Estados Unidos, España, Chile, Honduras y Uruguay ya han establecido valores de niveles de rugosidad para las características de su red de caminos, en la escala del Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Aunque ya se

cuenta con equipos que están evaluando tramos de la red nacional de carreteras en valores del IRI, actualmente en nuestro país, no existen niveles o especificaciones al respecto.

Es importante evaluar la condición superficial mediante el monitoreo periódico y permanente de la red nacional de carreteras con equipos automatizados debidamente calibrados.

En este documento se describe el programa del Banco Mundial para el cálculo del IRI obtenido a partir de un levantamiento topográfico del perfil del tramo de prueba. Las ecuaciones y arreglos matriciales que se requieren para obtener el IRI variando la longitud de la toma de los datos del levantamiento de 25 a 50 cm.

Debido a que en México existen equipos del tipo "respuesta" (ejemplo el Mays Ride Meter), se anexó el procedimiento para la correlación del Índice Internacional de Rugosidad con estos equipos, desde la selección de los tramos de prueba hasta la medición sistemática del equipo, así como un ejemplo de dicho procedimiento.

Se describe la utilización de la viga móvil de tres metros, el algoritmo de la viga aplicado a perfiles topográficos evaluados a cada 25 o 50 cm. Se determinó la correlación del Índice Internacional de Rugosidad con el valor promedio obtenido con la viga móvil de tres metros, para la evaluación de tramos de prueba o para la detección de irregularidades puntuales en la fase de control de obra.

**Palabras clave**: Índice Internacional de Rugosidad, IRI; Índice de Servicio Actual, ISA; viga móvil de tres metros; evaluación de pavimentos; Mays Ride Meter.

#### 1 Introducción

El transporte por carretera en nuestro país es el de mayor contribución a la actividad nacional en sus aspectos comercial, industrial y de movimiento de pasajeros y de carga, por lo que la red nacional de carreteras se convierte en la columna vertebral en la vida económica, social y política de México.

El mantenimiento de esta red es uno de los problemas mas relevantes y uno de los más importantes a resolver. En nuestro país, la expansión y mejora de la red carretera no se ha visto acompañada por un aumento proporcional de los presupuestos de mantenimiento. En cambio, el crecimiento del tránsito ha sido en muchos casos mayor que el esperado y las cargas de los vehículos pesados han excedido la capacidad de soporte de muchos de los pavimentos. La combinación de estos factores ha producido un aumento en el deterioro de las carreteras.

Para realizar desde el punto de vista técnico un adecuado programa de conservación, se requiere disponer de buena información de campo, obtenida mediante un sistema de recolección de datos que debe actualizarse regularmente para permitir la medición de los cambios de la condición de la red y que reflejen las inversiones que se han realizado. Los datos se pueden obtener de tramos representativos de la red para evitar un costo excesivo, pero deben garantizar una representatividad estadística de los elementos del sistema de información elegido; debe también permitir comparar el estado de las carreteras en el tiempo y entre las diferentes áreas del país.

La información obtenida en una carretera es muy variada, la recolección, procesamiento y actualización de todos los datos necesarios puede ser muy compleja y tener un costo elevado, y debe evitar obtener datos redundantes o adquirir costosos equipos automatizados de dudosa necesidad. Pero la información que se requiere para preparar un programa de mantenimiento es solo una fracción de toda la información que se puede producir, por lo que se debe revisar constantemente para medir solo aquellos datos que realmente influyan en las decisiones que se tomen para el mantenimiento de la red o para la elaboración de un proyecto detallado de rehabilitación de un tramo específico.

También es fundamental para la evaluación del comportamiento de un camino, el establecimiento de medidas o parámetros seleccionados de manera que exista uniformidad de los datos recogidos en campo y procesados a través del sistema de información.

La superficie de un camino es la parte que ve y que siente el operador de un vehículo al circular y refleja de alguna manera las características estructurales de las capas que conforman el pavimento; esto originó que se buscara la forma de medir o calificar la condición superficial surgiendo así algunos equipos y métodos para realizar esta tarea. Cada uno de los equipos adoptó su escala propia, encontrando de esta manera diferentes escalas para una misma condición.

Se realizaron estudios para conocer cuales eran los factores de un camino que influían de manera directa en los costos de operación de los vehículos, demostrando que uno de los principales es el estado superficial, por lo cual se procedió a buscar una escala que permitiera correlacionar un valor índice con la variedad de escalas que manejan los diversos equipos de medición de la rugosidad.

El Índice Internacional de Rugosidad mejor conocido por IRI, fue aceptado como estándar de medida de regularidad superficial de las carreteras por el Banco Mundial en 1986. Permite evaluar con cualquier equipo de medición de la rugosidad de un pavimento e indicarla en valores de IRI, permitiendo referirse a una sola escala de medición que puede identificar en que condiciones superficiales se encuentra la red nacional y detectar anomalías en algunos de sus tramos.

El Índice Internacional de Rugosidad permite especificar rangos o niveles de tolerancia para la aceptación de tramos nuevos de autopistas y carreteras, sirviendo como un parámetro de control de calidad superficial. Para carreteras ya en servicio, el Índice Internacional de Rugosidad es una herramienta para monitorear el comportamiento del camino a través del tiempo y permite fijar umbrales de alerta para proceder a un estudio de los daños o para realizar las labores de mantenimiento de acuerdo a la importancia del camino.

#### 2 Características de la red nacional carretera

La red de carreteras nació y se desarrolló a principios de siglo con el objetivo básico de integrar el país, fase que aún no termina. Sin embargo, actualmente se requiere que el transporte opere con base en otros parámetros de eficiencia.

El sistema de transporte mexicano depende fundamentalmente de la red de carreteras. A través de ella fluye el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y aproximadamente el 98% del movimiento de pasajeros y ha sido uno de los elementos básicos para la transformación y desarrollo del país.

Ante estos hechos, el funcionamiento de las carreteras resulta clave para la vida económica y social de la nación, por lo cual México ha dedicado desde hace muchos años importantes esfuerzos a la extensión, preservación y modernización de su red carretera.

Algunas de las causas fundamentales de los problemas de la situación actual de las carreteras son las siguientes: más del 60% de los tramos existentes se construyeron hace más de 40 años con criterios de diseño, especificaciones y materiales diferentes a los exigidos hoy en día. Los volúmenes de tránsito que circulan hoy por la red federal son mucho mayores a los previstos en su diseño original y los porcentajes de vehículos pesados se han incrementado hasta en 50% en algunos tramos. En los programas anuales de conservación, las asignaciones presupuestales son siempre insuficientes para cubrir las necesidades y en ocasiones se aplican de manera excesiva en múltiples frentes de trabajo y con la falta de una estrategia general que contenga programas de mediano y largo plazo para el mejoramiento de las carreteras, que permita una inversión en mantenimiento y reconstrucción sostenida durante un periodo aproximado de 15 años

Las carreteras requieren una adecuada gestión para obtener el máximo beneficio de los recursos humanos y materiales invertidos. Si no se cuenta con una metodología que determine las necesidades, no existen las bases adecuadas para establecer un presupuesto requerido para mantener la red en el nivel deseado de servicio. Los procedimientos para establecer el presupuesto anual basado en tomar como referencia el presupuesto anterior y añadir una cantidad relacionada con la inflación o el crecimiento de la red no son ya adecuados cuando se manejan cifras elevadas y a la vez los recursos cada vez más escasos. De esta manera, no se puede asegurar que el presupuesto sea adecuado a las necesidades o que los fondos se invertirán de una manera efectiva.

El estado superficial de un camino incide directamente en algunos aspectos tales como:

- Costos de operación de los vehículos.
- .Calidad de manejo, confort.
- .Seguridad de los usuarios al transitar por las carreteras.
- Las cargas dinámicas que transmiten los vehículos, que a su vez afectan al pavimento.

Los últimos años se han significado por la búsqueda de opciones para resolver de manera permanente los rezagos y las insuficiencias que se han acumulado durante varias décadas y que se han traducido en importantes sobrecostos para la operación de los vehículos.

### 3 Costos de operación de los vehículos

Los costos que cualquier país debe de enfrentar durante toda la vida útil de un camino se dividen en tres clases:

- Costos iniciales de construcción, que implican la realización de un proyecto.
- •Costos de conservación, que son aquellos que abarcan las inversiones para mantener el camino en buenas condiciones, así como de conservar la calidad de servicio al usuario, enfrentando el probable crecimiento en la demanda.
- •Costos de operación, que se producen cotidianamente por la circulación de los vehículos por dicho camino.

El criterio que debe orientar las decisiones en el área del transporte es minimizar los costos nacionales totales durante la vida útil del camino. Los costos de operación de los vehículos implican una atención especial debido a que estos superan a los otros dos, ocurren rutinariamente por el paso del tráfico de vehículos a lo largo de la carretera y tienen que ser pagados por los usuarios como resultado de la operación de dichos vehículos. Los principales costos de operación son los siguientes:

- a) Combustible.
- b) Lubricantes.
- c) Llantas.
- d) Reparación y refacciones.
- e) Operador.
- f) Depreciación y reposición de vehículos.
- g) Intereses.
- h) Seguros.
- i) Tiempo de traslado de las mercancías.

La influencia de las condiciones del camino en los costos de operación de los vehículos es significativa, como se puede observar en la Figura 1. En condiciones óptimas de circulación, que se asocian con una carretera pavimentada bien conservada, recta, en terreno plano y sin problemas de tránsito, el costo de operación es mínimo. La presencia de baches o deficiencias en la superficie, de pendiente o grados de curvatura, así como la de otros vehículos, afecta las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes.

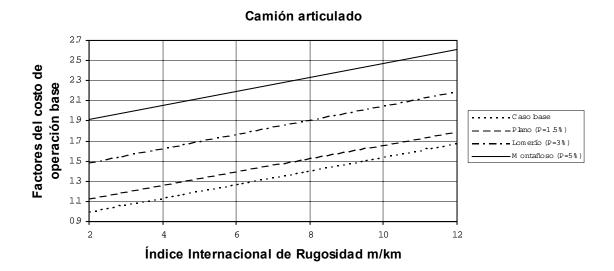


Figura 1. Influencia del Índice Internacional de Rugosidad en los costos de operación de un vehículo articulado. (Ref. 7)

# 4 Índice de Servicio Actual (ISA)

Para evaluar la calidad de la superficie de las carreteras en nuestro país, durante muchos años se utilizó el método desarrollado en los años sesentas por la American Association of State Highway Officials (AASHO), el cual toma en cuenta un parámetro denominado Present Serviceability Index (PSI), mejor conocido en México como Índice de Servicio Actual (ISA).

El índice o nivel de servicio actual consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino a la velocidad de operación y lo realiza un grupo o panel de valuadores. Cada valuador debe calificar el camino de una manera subjetiva en una escala de 0 a 5, correspondiente a una superficie intransitable y a una superficie perfecta, respectivamente. El resultado de cada sección de pavimento deberá ser reportado por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de valuadores.

La Figura 2 muestra la escala del ISA y la calificación correspondiente a la condición del camino.

Este método ayudó a estimar (de una manera subjetiva) las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en nuestro país, con rapidez y sin interrumpir el flujo de vehículos. Este método tuvo gran difusión, debido también a que no se contaba con equipos de alto rendimiento para medición de la rugosidad en la superficie de rodamiento.

<u>ISA</u>	condición del camino			
5 T	Muy bueno			
4	Bueno			
3 <b>T</b>	Regular			
2	Malo			
<sup>1</sup> 王	Pésimo			
n —				

Figura 2. Condición del camino respecto al Índice de Servicio Actual (ISA)

Dentro del estudio del Banco Mundial para el establecimiento del Índice Internacional de Rugosidad, se realizó la estimación de la evaluación subjetiva con el método AASHTO y el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad, y se observó que existen amplias diferencias entre los valores de rugosidad de los grupos de valuadores de los diferentes países, así como con los resultados de los equipos de medición de rugosidad.

EL Banco Mundial recomienda que no se utilice la calificación del panel de valuadores (ISA) para la obtención o correlación del Índice Internacional de Rugosidad, debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios; mientras que uno es sentido (ISA), el otro es medido (IRI).

# 5 Índice Internacional de Rugosidad (IRI)

#### 5.1 Definición

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indicaran las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino, surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de un camino, que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. Se trató de unificar los criterios de evaluación con los equipos de medición de rugosidad a nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos de tipo respuesta, y que de alguna manera sustituyera el método de la AASHO, ahora AASHTO, que permite calificar la condición superficial de un camino solo en forma subjetiva.

El Índice Internacional de Rugosidad, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino. El Índice Internacional de Rugosidad tiene sus orígenes en un programa Norteamericano llamado Nacional Cooperative Highway Reseach Program (NCHRP) y está basado en un modelo llamado "Golden Car" descrito en el reporte 228 del NCHRP.

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo (cuarto de carro, Figura 3), dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km. o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/hr. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc.

Así, el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino. El IRI sirve como estándar para calibrar los equipos de medición de la regularidad superficial de un camino.

#### 5.2 Antecedentes

EL Banco Mundial patrocinó varios programas de investigación en los años setentas para conocer los problemas en los países en vías de desarrollo. Algunos de ellos arrojaron que los caminos con poca inversión en infraestructura resultan costosos a estos países, debido a los costos que los usuarios pagan al circular por esos caminos. La rugosidad de las carreteras fue identificada como un factor primario en los análisis que involucran la calidad del camino, en función de los

costos de los usuarios. Se vió que los datos de la rugosidad de las diferentes partes del mundo no podían ser comparados, debido a que los datos, aun de un mismo país, eran poco confiables, ya que las mediciones estaban basadas en métodos diferentes.

La gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial y los numerosos índices y escalas existentes para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de adoptar un "índice único". Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un solo equipo a todos y tampoco se podía coartar las futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevas equipos.

En 1982, el Banco Mundial inició un experimento en Brasil para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables. Una vez establecido este punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar un índice de referencia al que posteriormente se denominó Índice Internacional de Rugosidad".

EL Índice Internacional de Rugosidad es el primer índice de perfil ampliamente utilizado, donde el método de análisis está adaptado para trabajar con diferentes tipos de equipos de medición de rugosidad y se puede decir que es una propiedad del perfil de un camino. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y ensayadas para minimizar los efectos de algunos parámetros de mediciones de perfil, tales como el intervalo de muestreo.

El cálculo del Índice Internacional de Rugosidad se basa en un modelo matemático llamado Cuarto de Carro (Quarter-Car). El sistema del Cuarto de Carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero, Los desplazamientos de la suspensión del modelo son acumulados y divididos entre la distancia recorrida para dar el Índice Internacional de Rugosidad, en unidades de m/km., mm/m, in/mi, etc.

#### 5.3 Características del modelo

El modelo de Cuarto de Carro utilizado en el algoritmo del IRI debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la Figura 3; que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda.

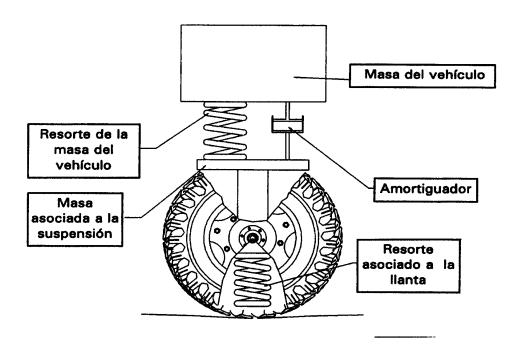


Figura 3. Representación grafica del modelo "Cuarto de Carro". (ref., 8)

EL modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta. El programa que propone el Banco Mundial (Ref. 1) para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad a partir del levantamiento topográfico de un tramo carretero, se describe en este trabajo en el Anexo 1, y representa la simulación del paso del Cuarto de Carro sobre el perfil del camino.

#### 5.4 Escala y características del IRI

La escala y características involucradas en el IRI son las siguientes:

- Las unidades están en mm/m, m/km o in/mi
- •El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km. (0 a 760 in/mi), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. En la Figura 4 se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas por el Banco Mundial en diversos países.

•Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor del IRI, no así los cambios de pendiente.

# 6 El Índice Internacional de Rugosidad en la red nacional carretera

La capa de rodadura de una carretera posee una serie de características técnicas y funcionales, obtenidas a partir de criterios y especificaciones de construcción. Su estado depende de la calidad inicial y del desgaste o deterioro producido por el transito y los factores climáticos, entre otros

A nivel de red, partiendo de las mediciones de rugosidad de un camino, se puede definir el estado de los pavimentos mediante el índice de rugosidad; si se realiza un programa de evaluación anual en esos mismos caminos se puede llegar a conocer el comportamiento del deterioro a través del tiempo.

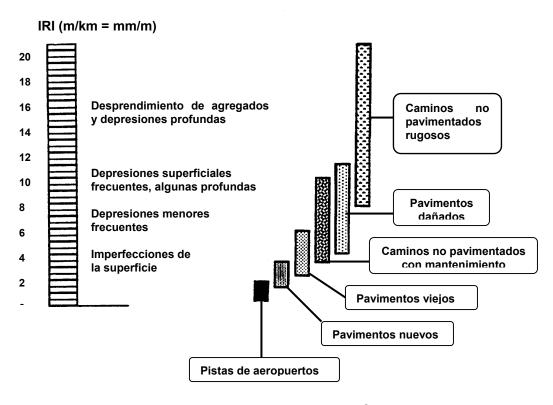


Figura 4. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos. Ref. 7

El comportamiento típico de la condición superficial respecto al tiempo se puede representar en la Figura 5, en la que se observa que a partir de un cierto nivel de rugosidad del camino, los factores que afectan al mismo son el transito, el medio ambiente, etc., que ocasionan la disminución de la calidad superficial. Esta disminución no es lineal sino que se puede dividir en tres etapas, donde la primera tiene un deterioro poco significativo en los primeros años; la segunda presenta un

deterioro mas acusado que en la primera, y requiere comenzar a programar un mantenimiento para no dejar avanzar el deterioro, la tercera significa una etapa de deterioro acelerado, ya que en pocos años el nivel de servicio cae de forma Importante, con lo que va a llegar a un costo significativa de mantenimiento del camino y, como límite, puede ser necesaria una reconstrucción total del mismo.

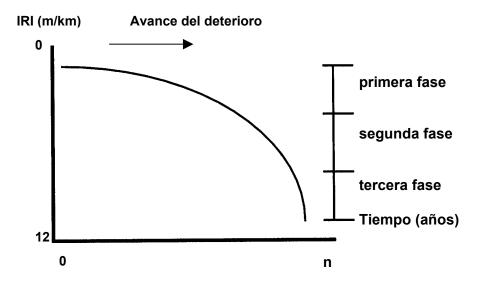


Figura 5. Grafica típica del avance del deterioro de un camino respecto al tiempo.

Los sistemas de gestión deben tratar de que gran parte de las carreteras por las que pasa la mayor riqueza del país, se mantengan con una buena calidad de servicio, a base de programar su rehabilitación a tiempo y con recursos suficientes.

El papel preponderante que están asumiendo los programas de mantenimiento carretero dentro de la administración de la infraestructura para el transporte, implica la necesidad de aplicar nuevas tecnologías que permitan no solamente la ejecución de los trabajos de mantenimiento en forma eficaz y económica, sino también el manejo oportuno y fidedigno de un gran numero de datos sobre la red.

El gran número de datos surge, por una parte, de la extensión de la red y por el deterioro en que se encuentra, y por la otra, de la obligación de aplicar eficazmente los recursos que se canalizan a la conservación.

# 6.1 Métodos y equipos de evaluación del estado superficial

Como se mencionó en el capítulo 4 de este trabajo, durante muchos años se evaluó el estado superficial en algunos tramos de carreteras en México con el método de la AASHO. A la fecha este método aun se utiliza frecuentemente en México y en países o regiones donde no se cuenta con equipos para medir la rugosidad. En algunos tramos de la red nacional se utilizaron en forma aislada (debido a su bajo rendimiento) los perfilo metros, que permiten medir las deformaciones verticales de las carreteras. Uno de estos equipos, llamado perfilo grafo Hveem desarrollado por el Departamento de Carreteras de California, ha sido utilizado con mucho éxito por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) para normar las condiciones de regularidad de los pavimentos en los aeropuertos de México, con base en un índice de perfil mínima especificado.

Actualmente en el mundo existen una gran variedad de equipos de medición de la rugosidad, de diversos costos, rendimientos y sistemas de adquisición de datos. Cada uno de estos equipos tiene una escala de medición propia; por ello, con la correlación de todos estos equipos al Índice Internacional de Rugosidad, es posible obtener un solo parámetro de medición para conocer el estado actual de un tramo específico de una manera cuantitativa. Así mismo, permite registrar la evolución de cada tramo año con año o a la frecuencia deseada.

Los equipos automatizados para la medición y evaluación de deterioros en pavimentos rígidos y flexibles permiten tener mejor consistencia y objetividad de la información, lo que permite la normalización de los criterios para la evaluación de los daños. Los sistemas automatizados son de gran eficiencia si se relacionan con un buen sistema de administración de pavimentos. Después de la inversión inicial para adquirir los equipos, el costo de la auscultación automatizada se reduce considerablemente.

En México, el Instituto Mexicano del Transporte, la Dirección General de Servicios Técnicos de la S.C.T. y algunas empresas privadas de control de calidad cuentan con este tipo de equipos, con lo que seria posible emprender un programa para la evaluación de carreteras en nuestro país de manera coordinada y permanente. En el Anexo 2 se detalla el procedimiento para la determinación de la correlación entre el Índice Internacional de Rugosidad y un equipo del tipo respuesta. Como ahí se describe, el procedimiento necesita del levantamiento topográfico previa, a cada 25 o 50 cm. de varios tramos de prueba. Un método alterno es el empleo de la viga móvil de tres metros, que se describe a detalle en el Anexo 3.

#### 6.2 Niveles de Rugosidad

En los Estados Unidos, la Federal Highway Administración ha reportado que los rangos típicos del IRI evaluados en diferentes tramos de carreteras están entre 0.8 a 4.7 m/Km. (50 y 300 in/mi). Los tramos de pavimentos con valores menores de 2.4 m/Km. (150 in/mi) son considerados como superficies en buen estado y confortables, mientras que los valores de 4.7 m/Km. o mas, son considerados como rugosos y no confortables (Referencia No.9).

En España, la Orden Circular 308/89C y E de 1989, fijaba el valor de 2 m/Km. como umbral para recibir una carretera. Mas tarde se modifico para admitir el IRI de 2.5 m/Km. en todo el tramo, siempre que en el 80% del tramo se alcance como máximo el IRI de 2 , y debiendo comenzar además el IRI de 1.5 en la mitad de tramo (Referencia No.3). Actualmente se fija un valor de 1.85 de IRI para recibir nuevas carreteras. Para carreteras en servicio con una Intensidad Media Diaria (IMD) mayor de 2,000 vehículos fijan un porcentaje de la longitud de calzada con un valor mínima de 3.5 m/Km. y para valores de IMD < 2,000 vehículos el IRI mínima de 4.5 m/Km.

En Chile, se considera un valor del IRI entre 0 y3 m/Km. como un camino bueno, entre 3 y 4 como uno regular y para un IRI mayor que 4 m/Km. como un camino malo. Mientras que en Honduras su clasificación es la siguiente: para IRI < 3.5 m/Km. se considera el camino como bueno, entre 3.5 y 6 como regular y finalmente cuando el IRI es mayor que 6m/Km. indica que el camino es malo.

En Uruguay hacen una diferencia de valores de IRI para pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico que se presenta a continuación:

Condición del camino	Pavimento asfáltico IRI (m/km)	Pavimento hidráulico IRI (m/km)
Muy bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 – 3.9	2.8 - 3.5
Regular	4.0 - 4.6	3.6 – 4.3
Malo	> 4.6	>4.3

En México es conveniente evaluar el Índice Internacional de Rugosidad en ciertos tramos para conocer el estado actual de la red y estimar el rango de valores en que se encuentran las carreteras y proponer una zona o umbral de alerta con respecto a la escala del IRI esto permitirá conocer cuales son los tramos que en ese momento requieren de un estudio mas detallado para conocer las causas de su deterioro para su reparación y cuales tramos por ese año no se les hará nada (tramos que no entran en esa zona). En tramos pavimentados de prueba donde se han realizado cálculos del IRI se observan valores comprendidos

entre 1.6 y 8 m/Km., siendo los mas comunes y representativos, los tramos que resultaron con valores entre 3 y 6 m/km.

# 6.3 Programas y herramientas para una estrategia de conservación

El conocimiento del estado en que se encuentra la red nacional de carreteras en nuestro país es una herramienta necesaria para realizar las estrategias de conservación adecuadas. Existen ya estudios que permiten fundamentar una estrategia de conservación, mencionándose algunos de ellos a continuación:

 El Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos (SIMAP) es un sistema de gestión de pavimentos que permite disponer de un banco de información en el cual cada tramo de la red carretera es caracterizado por el estado del pavimento (Referencia No.4). El principal objetivo de la estrategia es poner en marcha de manera simple y fácil, un mantenimiento ordenado y sistemático de los pavimentos existentes, con su prioridad detallada y con la participación intensa y coordinada de todos los elementos involucrados.

En el SIMAP se tiene un subsistema denominado Índice de Servicio Actual (ISA), que se alimenta de los datos obtenidos en el campo sobre la condición superficial del pavimento en el momento de evaluarlo, a través de valores subjetivos evaluados con el método de la MSHO (0 -5) o con valores medidos con los equipos de rugosidad referenciados a la escala del Índice Internacional de Rugosidad. Los datos se agrupan en tramos de 5 Km. para cada una de las carreteras en estudio.

- El Módulo Económico del SIMAP es un paso para convertir al SIMAP, de un sistema de administración de pavimentos en un sistema de conservación, pues no solamente se conocerán las necesidades de refuerzo, sino la duración y su costo, lo que permitirá implementar una estrategia de conservación en función de la importancia de la carretera, de la evolución histórica de su comportamiento y de la previsión a futuro, según el desarrollo del transito.
- El Módulo Geográfico del SIMAP, permite localizar e identificar los tramos en la red nacional de carreteras, conocer sus correspondientes características físicas obtenidas en campo y recopiladas en el SIMAP. En esencia, el sistema administra una base de datos geográficos y es capaz de mostrar sobre un mapa de México toda o parte de la información relevante de las carreteras; permite, por ejemplo, ver en forma gráfica los cambios de estado superficial de cada uno de los tramos que conforman una carretera a diferentes escalas.

Priorizacion de los corredores de transporte. Es importante contar con una metodología que permita el establecimiento de prioridades en los diferentes tramos carreteros, agrupados en corredores de transporte de carga, puesto que es evidente que ni aun la fracción de la red considerada como básica (30 mil kilómetros) debe de Llegar a los mismos niveles de servicio; será necesario dedicar mayor atención e inversión de conservación alas carreteras mas importantes. Para ello el Instituto Mexicano del Transporte cuenta con información recopilada mediante el estudio de pesos y dimensiones, en la cual se han identificado los tramos carreteros mas importantes para el desarrollo del país generando una mayor riqueza.

#### Conclusiones y recomendaciones

- La conservación de carreteras ocupa un lugar muy importante entre las preocupaciones de los responsables de la infraestructura carretera. Los usuarios ya no se conforman actualmente con disponer de vías de comunicación, sino que demandan que éstas les permitan desplazamientos rápidos, cómodos, económicos y seguros. El buen estado de la infraestructura carretera resulta vital para la eficiencia del transporte, el cual tiene una influencia preponderante en el estado general de la economía del país.
- La rugosidad de un camino se ha convertido en uno de los factores que influyen de manera directa en los costos de operación de los vehículos, por ello fue necesario contar con una escala que permitiera correlacionar los valores dados por los diversos equipos existentes en el mundo para medición de rugosidad, por lo que se estableció el Índice Internacional de Rugosidad
- En nuestro país es necesario implantar el Índice Internacional de Rugosidad para una mejor evaluación del estado superficial de los pavimentos. Conviene dejar de evaluar subjetivamente las carreteras con el Índice de Servicio Actual para ello en nuestro país se cuenta con el equipo automatizado necesario para empezar a obtener el Índice Internacional de Rugosidad en la red nacional de carreteras.
- Es importante evaluar la condición superficial mediante el monitoreo periódico y permanente de la red nacional de carreteras. Se recomienda que sea de manera anual.
- Los equipos de evaluación de la rugosidad del tipo respuesta se calibran periódicamente de acuerdo a las características de cada equipo y al uso del mismo.
- Los sistemas de gestión de pavimentos son una herramienta importante para realizar una adecuada estrategia de conservación, para lo cual es necesario implementar un modelo conceptual del mantenimiento carretero que permita racionalizar y sistematizar las acciones con la óptima aplicación de los recursos.
- Se requieren fijar niveles de aceptación en la escala del Índice Internacional de Rugosidad para tramos nuevos, con el objeto de contar con un parámetro para el control de calidad de las obras.

Para tramos ya existentes es necesario contar con umbrales de alerta para identificar tramos que requieren un mantenimiento urgente y los que se encuentran en ese momento en condiciones adecuadas de servicio.

### Anexo 1. Programa para el cálculo del IRI

#### Algoritmo de cálculo

El cálculo del IRI se realiza por medio de 4 variables que están en función de la simulación de la respuesta dinámica de un vehículo de referencia (cuarto de carro), que viaja sobre el perfil del camino en estudio.

Las ecuaciones de las cuatro variables son resueltas para cada punta excepto para el primero (cuando x = 0). La pendiente obtenida entre la primera elevación y la elevación a los 11 m es utilizada para inicializar las variables que se presentan a continuación:

$$Z'_1 = Z'_3 = (Y_a - Y_i)/11$$
 (1)

$$Z'_2 = Z'_4 = 0$$
 (2)

$$a = (11 / dx) + 1$$
 (3)

donde:  $Z_1'$ ,  $Z_2'$ ,  $Z_3$  y  $Z_4'$  son las cuatro variables

Y<sub>a</sub> representa la elevación del perfil a los 11 m

Y<sub>i</sub> es la elevación en el primer punto

dx es el intervalo de muestreo

Por ejemplo, sí el intervalo dx = 0.5 m, la ecuación (1) será la diferencia de elevaciones entre el punto 23 y el punto 1 entre 11, debido a que la ecuación (3) será: a = (11 /0.5) + 1 = 23, y establecer una pendiente inicial para el cálculo del IRI usando los datos del perfil de estudio.

Para cada punta de elevación, desde 2 hasta "n" (n = número de elevaciones medidas), las siguientes cuatro ecuaciones son utilizadas:

$$Z_1 = S_{11} * Z_1' + S_{12} * Z_2' + S_{13} * Z_3' + S_{14} * Z_4' + P_1 * Y_p$$
 (4)

$$Z_2 = S_{21} * Z_1' + S_{22} * Z_2' + S_{23} * Z_3' + S_{24} * Z_4' + P_2 * Y_p$$
 (5)

$$Z_3 = S_{31} * Z_1' + S_{32} * Z_2' + S_{33} * Z_3' + S_{34} * Z_4' + P_3 * Y_p$$
 (6)

$$Z_4 = S_{41} * Z_{1'} + S_{42} * Z_{2'} + S_{43} * Z_{3'} + S_{44} * Z_{4'} + P_4 * Y_p$$
 (7)

donde:

$$Y_p = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = pendiente de entrada$$
 (8)

$$Z_{j'} = Z_{j}$$
 de la posición anterior, para  $j = 1, 2, 3,4$  (9)

S<sub>ii</sub>, P<sub>i</sub> = Coeficientes que están en un arreglo para un intervalo de muestra dado.

Así, las ecuaciones (4) a (7) están resueltas para cada posición a lo largo de la huella de la llanta y la ecuación (9) es utilizada para obtener los valores de  $Z_1$ ',  $Z_2$ ',  $Z_3$ ' y  $Z_4$ ' para la siguiente posición. Así, para cada posición la pendiente rectificada (RS) de un perfil filtrado es calculada como:

$$RS_i = I Z1 - Z3 I$$
 (10)

La ecuación anterior debe ser resuelta para todos los puntos del perfil de estudio, El IRI es calculado como:

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum RS_i$$
 (11)

EL IRI estadístico es el promedio de la pendiente rectificada sobre el tramo de prueba.

Los coeficientes  $S_{jj}$  y  $P_{j}$  son constantes que se encuentran en un arreglo para un intervalo de tiempo, de donde el tiempo será el que necesite un vehículo para recorrer una distancia de un perfil en estudio para la velocidad de simulación.

Estos coeficientes han sido calculados para cada intervalo de muestreo por el Banco Mundial.

#### Descripción del programa

EL programa se encuentra en las paginas 26 y 27 de este trabajo, se especifica para un intervalo dx = 0.25 y fue realizado por el Banco Mundial, se encuentra en lenguaje "BASIC" debido a la facilidad de ser ejecutado en cualquier microcomputadora. Sin embargo, los comandos en el lenguaje "BASIC" varían de acuerdo con cada máquina y para ello puede ser necesario modificar algunas instrucciones. Este programa se describe a continuación:

a) EL programa calcula el valor del Índice Internacional de Rugosidad, a partir del perfil del camino realizado por un levantamiento topográfico de una rodada, para un intervalo de muestra (dx) seleccionado, que se encuentra entre 0.10 y 0.60 m, siendo las mas comunes para el cálculo las de 0.25 y 0.50 m para una longitud de tramo de estudio no mayor de 600 m. La elección entre 0.25 y 0.50 m es debido a que el Banco Mundial indica que con la primera se tiene mejor precisión de las deformaciones en el pavimento, sin embargo se ha observado que no existe diferencia significativa en el resultado del IRI con respecto a utilizar dx = 0.50, no así el trabajo del levantamiento y el manejo de datos, por lo que es mejor trabajar con el intervalo de cincuenta centímetros.

b) De las líneas 1030 -1140 se inicializan las constantes y se lee la matriz de transición de estado ST (4 x 4) para cada uno de los intervalos de muestra dx, (especificado en la línea 1510), lo mismo hace para el vector PR (4 x 1), estos valores se encuentran entre las líneas 1520 -1550 Y dependen del intervalo de muestra. Para este programa (Fig. 6) el intervalo es de 0.25 m.

**Nota:** Debido a la forma de leer los datos, en las líneas 1520 a la 1550 se encuentran unidos los datos de la matriz ST y el vector PR de la siguiente manera:

```
Linea 1520 ST _{11}, ST _{12}, ST _{13}, ST _{14}, PR_{1} Linea 1530 ST _{21}, ST _{22}, ST _{23}, ST _{24}, PR_{2} Linea 1540 ST _{31}, ST _{32}, ST _{33}, ST _{34}, PR_{3} Linea 1550 ST _{41}, ST _{42}, ST _{43}, ST _{44}, PR_{4}
```

#### Para dx = 0.25 m

$$\mathsf{RT} = \begin{bmatrix} 0.9966071 & -0.5563044 & -2.083274 \mathsf{E} - 03 & 3.190145 \mathsf{E} - 04 \\ -0.5563044 & 0.9438768 & -0.8324718 & 5.0647014 \mathsf{E} - 02 \\ 2.153176 \mathsf{E} - 02 & 2.126763 \mathsf{E} - 03 & 0.7508714 & 8.221888 \mathsf{E} - 03 \\ 3.335013 & 0.3376467 & -39.12762 & 0.4347564 \end{bmatrix}$$

$$PR = \begin{bmatrix} 5.476107E - 03 \\ 1.388776 \\ 0.2275968 \\ 35.79262 \end{bmatrix}$$

Si las evaluaciones se realizan a cada 0.50 m (dx), las líneas 1510 a la 1550 se cambian por los valores siguientes:

#### Para dx = 0.50 m

$$\mathsf{ST} = \begin{bmatrix} 0.9881727 & 2.128394 & -2.52093\mathrm{E} - 02 & 9.923165\mathrm{E} - 04 \\ -0.928516 & 0.9001616 & -3.391369 & 6.280167\mathrm{E} - 02 \\ 6.386326\mathrm{E} - 02 & 6.615445\mathrm{E} - 03 & 0.2402896 & 9.862685\mathrm{E} - 03 \\ 3.743294 & 0.418677\mathrm{E} - 02 & -46.67883 & -0.1145251 \end{bmatrix}$$

$$PR = \begin{bmatrix} 3.703847E - 02 \\ 4.319885 \\ 0.6958473 \\ 42.93555 \end{bmatrix}$$

Para intervalos de muestreo diferentes a 0.25 y 0.50 m, la publicación No. 46 del Banco Mundial presenta en la pagina 37 los valores de ST y PR de cada intervalo que se escribirán en las líneas 1510 a la 1550.

#### C) De las líneas 1150 -1240 se inicializan variables

En la línea 1160 y 1170 se solicita la elevación Y (K) para cuando x = 11 m.y x = 0, Y (1) primera elevación, esto es para calcular la pendiente que existe entre ambos puntos y sirve para inicializar las variables de entrada. De la ecuación (1):

$$Z_1' = Z_2' = (Y_a - Y_1) / 11$$
 $Y_a$ 
 $Y_1$ 
 $0$ 

11 m

Donde a = 
$$11/dx+1$$
  
para dx =  $0.25m Y_a=Y_{45}$   
para dx= $0.50m Y_a=Y_{23}$ 

En el programa, las ecuaciones (1) y (2) quedan representadas por las líneas 1180 -1210 de la siguiente manera:

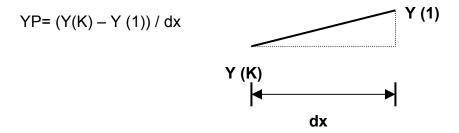
$$Z1(2) = Z1(4) = 0$$

**Nota:** Los valores de las elevaciones Y (K) en este programa son dados en unidades de milímetros y el intervalo de muestreo dx están en metros, por lo que el IRI resultante estará en unidades de mm/m, que son equivalentes alas unidades m/Km.

- d) De las líneas 1250 -1290 se tiene la entrada de los valores del perfil. Como se explico en la nota anterior las elevaciones estarán dadas en mm y se introducirás para cada intervalo de muestreo desde x = dx (en metros).
- e) De las líneas 1300 -1360 se calculan las pendientes de entrada.

De la ecuación (8), la pendiente de entrada YP es la diferencia de los valores de la elevación Y (K) (elevación en el punta actual) menos la elevación del punta anterior Y (1) dividido entre el intervalo de muestreo dx.

Representada esta ecuación en la línea 1330 como:



Donde Y (1) es un almacén temporal que guarda la elevación del punta anterior al evaluado Y (K).

f) En las líneas 1370 -1490 se efectúa la simulación del vehículo (calculo del IRI)

Las variables utilizadas en el programa son cuatro variables de estado del vehículo en el arreglo de Z (Z1, Z2, Z3 y Z4). Obtenidas mediante las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) calculadas en la línea 1410, mediante un ciclo de "J" desde 1 hasta 4:

$$Z(J) = Z(J) + ST(J, JJ) * Z1(JJ)$$

Los coeficientes utilizados Z son derivados de las propiedades dinámicas del modelo de vehículo referido (cuarto de carro). Estas propiedades dinámicas están descritas por cuatro ecuaciones diferenciales, las cuales tienen la siguiente forma:

$$dz(t)/dt = A *z(t) + B *y(t)$$

donde z es un vector que contiene las cuatro variables de Z, A es la matriz de estado de transición (4 x 4) que describe los movimientos dinámicos del modelo; B

es un vector (4x 1) que describe como el perfil interactúa con el vehículo y, y(t) es el perfil de entrada.

La pendiente rectificada (RS: rectified slope) es la sumatoria del valor absoluto de la diferencia de las variables Z (1) y Z (3), así, la ecuación 10 queda como:

$$RS = \sum |Z(1)-Z(3)|$$

representada en el programa en la línea 1470 como:

$$RS = RS + ABS (Z (1) - Z (3))$$

El IRI es calculado como la sumatoria de la pendiente rectificada dividida entre el número de puntas evaluadas en el perfil. En el punta x = 0 no se obtiene la pendiente rectificada porque no existe elevación anterior, por lo que la ecuación 11 queda:

$$RS = \frac{1}{n-1} \sum RS$$

representada en la línea 1480 como:

donde "I" es el numero de elevaciones del perfil menos uno (n -1)

EL IRI esta en unidades de m/Km. = mm/m.

Es de hacerse notar que el programa de cálculo del IRI con las mediciones del nivel y estadal desarrollado por el Banco Mundial, consiste en evaluar tramos conos (menores de 600 m) y hacer pasar por dichos tramos los equipos de medición de rugosidad con su escala propia y establecer una correlación de este equipo con la escala del IRI. Esto obliga alas empresas que cuentan con equipos de tipo respuesta a hacer calibraciones individuales y periódicas de acuerdo al trabajo programado. También se debe realizar la calibración si se modifico o cambio algún elemento que afecte el resultado del equipo (ejemplo: Llantas, suspensión, reparación de la consola, etc.)

```
1000 REM Programa para calcular el IRI
1030 REM Inicializar constantes
1040 DIM Y (26), Z (4), Z1 (4), ST (4,4), PR (4)
1050 READ DX
1060 K = INT (.25/ DX + .5) + 1
1070IF K<2THEN K=2
```

```
1.080 BL = (K - 1) * DX
1090 FOR I = 1 TO 4
1100FOR J = 1 TO 4
1110 READ ST (I,J)
1120 NEXT J
1130 READ PR (I)
1140 NEXT I
1150 REM Inicializar variables
1160 INPUT "Elevación del perfil cuando x = 11 m?", Y (K)
1170 INPUT" Cuando x= 0, cual es la elevación?", Y (1)
1180 Z1 (1)= (Y (K) -Y (1)) /11
1190 Z1 (2) = 0
1200 Z1 (3) = Z1 (1)
1210 Z1 (4) = 0
1220 RS = 0
1230 IX = 1
12401=0
1250 REM Entrada de las elevaciones del perfil
12601=I+1
1270 PRINT "X ="; IX*DX,
1280 IX = IX + 1
1290 INPUT "Elevación = ";Y(K)
1300 REM Cálculo de la pendiente de entrada
1310 IF IX < K THEN Y(IX) = Y(K)
1320 IF IX < K THEN GOTO 1270
           Figura 6. Programa para calcular el IRI (Pág. 34 referencia 1)
1330 \text{ YP} = (Y (K) - Y (1)) / BL
1340 FOR J = 1 TO K
1350 Y(J-1) = Y(J)
1360 NEXT J
1370 REM Simulación de la respuesta del vehículo
1380 FOR J = 1 TO 4
1390 Z (J) = PR (J) * YP
1400 FOR JJ = 1 TO 4
1410 Z(J) = Z(J) + ST(J,JJ) * Z1 (JJ)
1420 NEXT JJ
1430 NEXT J
1440 FOR J = 1 TO 4
```

1450 Z1(J) = Z(J)

1470 RS = RS + ABS (Z(1) - Z(3))

1480 PRINT "DESPLAZAMIENTO ="; RS \* OX; "IRI ="; RS / I

1460 NEXT J

1490 GOTO 1260 1500 END 1510 DATA 0.25 1520 DATA .9966071, .01091514, -.002083274, .0003190145, .005476107 1530 DATA -.5563044, .9438768, -.8324718, .05064701, 1.388776 1540 DATA .02153176, .002126763, .7508714, .008221888, .2275968 1550 DATA 3.335013, .3376467, -39.12762, .4347564,35.79262

Figura 6. Programa para calcular el IRI (Continuación)

# Anexo 2 Procedimientos para la correlación del IRI con un equipo de tipo respuesta (Mays Ride Meter)

### Levantamiento topográfico de los tramos de prueba

1.- Se seleccionan 4 tramos de 500 metros en función de su estado superficial que contengan un rango representativo de los caminos que posteriormente serán evaluados.

Se recomienda que los tramos sean rectos y que se ubiquen de ser posible en carreteras con poco transito (principalmente los tramos con condición superficial de regular a mala).

- 2.- A consideración del responsable, se puede hacer una corrida con el equipo de evaluación sobre los tramos seleccionados, a fin de verificar si entre ellos existen diferencias en el estado superficial. En caso de que existan tramos con valores muy similares de rugosidad con la unidad propia del equipo (por ejemplo los conteos en el Mays Ride Meter), se hará la selección de otro tramo mediante la medición con el equipo.
- 3.- Una vez seleccionados los tramos de prueba, se procede a realizar el levantamiento topográfico del perfil longitudinal sobre las rodadas del camino y/o en las huellas por donde pasara el equipo de medición de rugosidad. El levantamiento se realizara con nivel y estadal a cada 50 cm., para lo cual se tomaran las medidas de seguridad adecuadas para el personal que realiza el estudio, dependiendo de las condiciones topográficas y de transito del camino.

Es necesario colocar marcas sobre el pavimento para localizar las puntas inicial y final del levantamiento, así como la dirección de la rodada para su posterior identificación.

Se recomienda que en el registro de lecturas se reporten las características de algunos puntos de importancia, que puedan ayudar a la ubicación e interpretación de las elevaciones tales como baches, corrimientos de asfalto, entradas y salidas de alcantarillas, etc.

### Filtros de datos y cálculos del IRI

4.- Se introducen los datos del levantamiento en una hoja de cálculo, en la cual se hace un filtro con los datos para determinar posibles errores en la medición a captura de los datos.

Este filtro se realiza graficando las diferencias de alturas de todos los puntos del levantamiento de la siguiente manera:

Supóngase que en la columna A se encuentran el numero de puntas evaluados desde 1 hasta ""n"; en la columna B están los datos de las alturas del levantamiento topográfico, así la altura  $Y_1$  para cuando X=0 m se encuentra en la celda B1, la altura  $Y_2$  para cuando X=0.5 m esta en la celda B2 y así sucesivamente hasta "n"; en la celda C2 se escribe la formula: +A2-A 1, que representa la diferencia de alturas entre el punta actual y el anterior ( $Y_2-Y_1$ ), esta fórmula se copia para el resto de la columna C, excepto para C1.

Se grafica la columna A en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la columna C, se observa como los valores de las diferencias de alturas siguen una cierta secuencia que se puede representar mediante una banda a rango flexible. Si todos los valores se encuentran dentro de esta banda a no son mayores al doble de ella se puede afirmar que los datos son correctos (ver Figura 8). En el caso en que existan valores que se salen del doble de este rango, se determina si alguno a algunos de ellos son los puntas de importancia que se registraron en el levantamiento topográfico, en caso contrario se procede a analizar la secuencia de las diferencias de alturas anteriores y posteriores en la columna C al data incorrecto para ser modificado de una manera aproximada. Observe como en la Figura 7 se presentan 4 puntas que se salen del doble de la banda que se menciono, estos valores ya corregidos se presentan en la Figura 8.

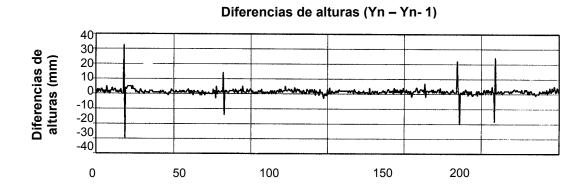


Figura 7. diferencias de alturas de un tramo sin filtrar los datos del

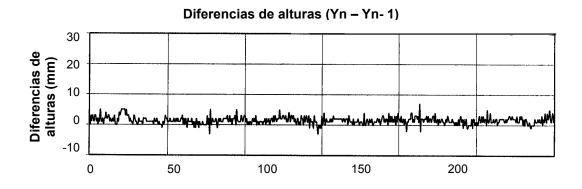


Figura 8. diferencia de alturas de un tramo (datos filtrados y corregidos)

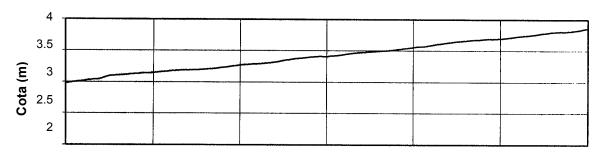
5.- Con los datos del perfil ya corregido se introducen en el programa del Banco Mundial que se incluye en esta publicación (ver Anexo 1) Y con los coeficientes correspondientes a la distancia del levantamiento (50 cm.), se calcula el Índice Internacional de Rugosidad de cada rodada. Con el valor del IRI para cada una de las rodadas se promedian para obtener el valor del IRI en ese tramo. Se puede. Dividir el tramo de 500 metros en dos secciones para obtener dos valores de IRI para cada sección de 250 m, a fin de comparar las mediciones de estos con las de los valores obtenidos por el equipo de medición de rugosidad.

En las Figuras 9, 10 Y 11 se presentan las graficas de 3 tramos de 300 m cada uno, con diferentes valores de IRI (desde un pavimento en excelentes condiciones hasta uno en condiciones críticas).

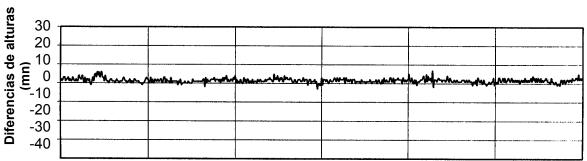
La Figura 9 presenta tres graficas de un tramo de carretera cuyo IRI es de 1.6 m/km. Se observa en primer lugar la grafica del perfil del camino, obtenida con los datos del levantamiento topográfico. Debido a la escala de la grafica no se observan diferencias importantes de un punto a otro, por lo que en la segunda grafica se muestran las diferencias de alturas entre cotas, esta grafica nos permite comparar el comportamiento de un tramo en buenas condiciones con tramos con grados de deterioro más avanzado como en los tramos de la Figuras 10 Y 11. En la tercera grafica de la Figura 9 se encuentran los valores del IRI en cada punto, y se obtiene con los datos de salida del programa.

En las Figuras 10 Y 11 se presentan las graficas de los tramos con IRI de 4.7 Y 9.0 m/km respectivamente. Observe la graficas de las diferencias de alturas de cada uno de los tramos, ya que estas diferencias son los datos de entrada del perfil al programa del cálculo del IRI, por lo que a mayor amplitud de diferencias de alturas el IRI aumenta.

### Perfil del camino



### Diferencias de alturas (Yn-Yn-1)



### Índice Internacional de Rugosidad

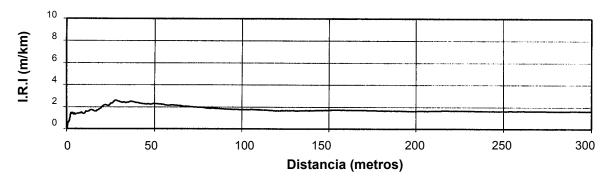
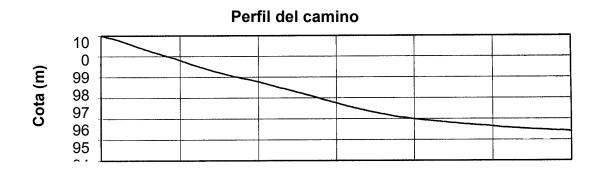
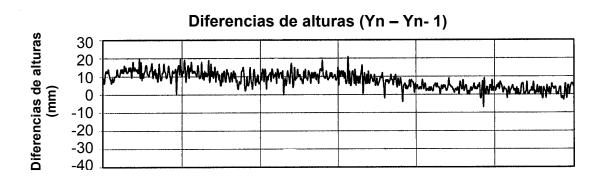


Figura 9.Gráficas de un tramo de 300 metros con valor de IRI=1.6 m/km





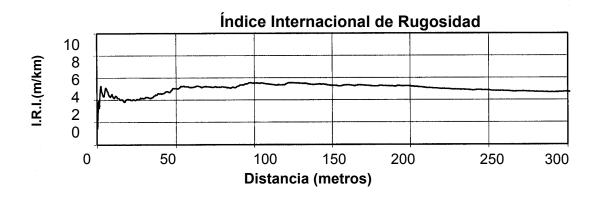
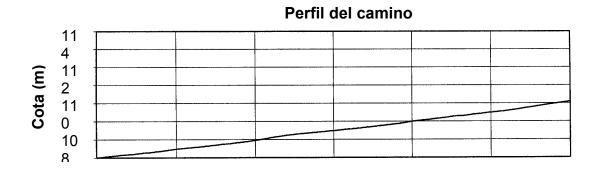
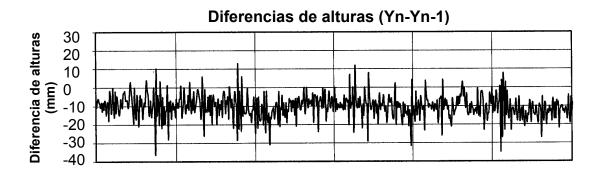


Figura10.Gráficas de un tramo de300 metros con valor de IRI= 4.7 m/km





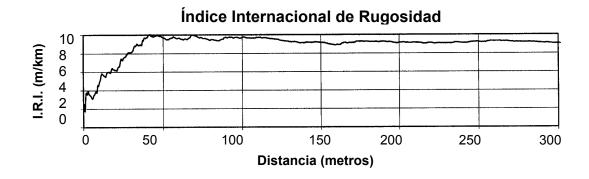


Figura 11. Gráficas de un tramo de 300 metros con valor de IRI =9.0 m/km.

### Medición de la rugosidad con el equipo

6.- Teniendo los tramos ubicados y su valor de IRI, se realiza la medición de la rugosidad con el equipo, con una mínima de tres pasadas sobre el tramo a cada una de las velocidades alas cuales se requiera realizar la correlación con el IRI. La elección de estas velocidades obedece al rango de velocidad que recomiendan los diseñadores de los equipos y a la velocidad a la cual se pretendan hacer las evaluaciones posteriores dependiendo de los tipos y características de los caminos a calificar; par ejemplo, el equipo Mays Ride Meter tiene un buen comportamiento a velocidades entre 60 y 80 km/hr.

Por cada una de las velocidades se registran los valores de los conteos (para el caso del Mays Ride Meter), obteniéndose el promedio de las mediciones. Se toma la precaución de eliminar los registros que difieran en ±7% del promedio, calculándose nuevamente el valor medio de la población restante.

Se recomienda que antes de efectuar las mediciones, se observen las especificaciones del equipo proporcionadas por el proveedor o por normas vigentes y verificar que el equipo se encuentre trabajando correctamente. Debe verificarse también que las condiciones en las que el equipo será correlacionado en los tramos de prueba, sean similares a las que serán utilizadas para las mediciones de la red de caminos a evaluar posteriormente (presión de inflado de Llantas, que el vehículo de arrastre del equipo sea el mismo, componentes de remolque, etc.). Debe verificarse que el odómetro del equipo de medición de rugosidad este trabajando y midiendo correctamente, ya que los datos de salida están en función de la longitud recorrida.

### Gráfica de correlación

7.- Se realiza una grafica con el valor medido con el equipo para cada una de las velocidades y el valor del IRI obtenido en cada uno de los tramos evaluados; se traza la línea de tendencia o regresión que mejor se ajuste al conjunto de datos, esta puede ser lineal, logarítmica, exponencial, etc. y se calcula la formula de correlación. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de la calibración de un equipo tipo respuesta (Mays Ride Meter).

Si los datos en la grafica no presentan una cierta línea de tendencia deberán revisarse las especificaciones y las variables que intervienen en la correlación, algunos de los pasos a seguir son:

A) Leer las especificaciones del equipo para detectar posibles indicaciones de uso y restricciones que puedan afectar los valores de salida.

- B) Revisar el equipo para detectar posibles anomalías (suspensión, cables, sistema de registro o de cómputo, etc.).
- C) Verificar que los resultados de las mediciones del equipo correspondan al valor de los más evaluados.
- D) Revisar el cálculo del IRI esto se hace nuevamente mediante la entrada de los datos del perfil en el programa del Banco Mundial y se puede revisar par medio del algoritmo de la viga de tres metros que se presenta en el Anexo 3 de esta publicación, ya que el programa puede estar dañado.

#### Periodo de correlación

Se debe realizar la correlación del IRI cada vez que se modifiquen o reparen partes o componentes que influyan en la respuesta del equipo ante la rugosidad del camino (cambio de amortiguadores, utilización de otro vehículo de arrastre, reparación por daño de la registradora de datos, etc.).

Dependiendo del programa de trabajo que se encuentre realizando el equipo, se recomienda que la calibración se efectué entre 6 y un año.

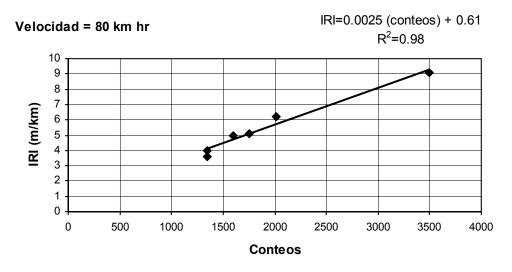


Figura 12. Grafica de calibración de un Mays Ride Meter

### Evaluaciones en los caminos

Una vez calibrado el equipo se procede a identificar los tramos que serán evaluados, para ello se requiere conocer los datos necesarios del camino tales como nombre, kilometraje, sentido, numero de carriles, etc., así como también es

importante conocer los datos del equipo, fecha de la calibración y nombre de los operadores.

Es necesario hacer referencia al inicio de la evaluación con base en un punto fijo, ya que es común que el kilometraje que va registrando el equipo no coincida con el marcado en el camino.

La evaluación en campo consiste en pasar el Mays Ride Meter en cada uno de los carriles que componen el camino a una velocidad específica. Esta velocidad estará fijada por el tipo de camino y por la velocidad de calibración del equipo.

Durante este recorrido es conveniente realizar un levantamiento visual de deterioros que permita tener una idea de las posibles causas de los valores del Índice Internacional de Rugosidad. Existen algunos deterioros que no influyen en los valores de la rugosidad, sin embargo es necesario reportarlos para su reparación.

Para el levantamiento visual de deterioros es conveniente diseñar una hoja donde se especifiquen los daños mas frecuentes que se presentan en los caminos, como agrietamientos longitudinales, agrietamientos piel de cocodrilo, baches, deterioros en zonas reparadas, deformaciones longitudinales, corrimientos, roderas, aproches de puentes y alcantarillas, etc.

Para puntas especiales en un camino en el que no se pudiera evaluar con el equipo: zonas de topes, curvas cerradas, tramos bastante dañados, etc., el encargado de la evaluación decidirá con los datos obtenidos antes y después de estos puntas el valor de la rugosidad para ese tramo o, si lo considera necesario, pasar un perfilografo para evaluar esa longitud de camino. Los topes no se consideran dentro de la rugosidad de un camino.

Se considera que para fines de evaluación es necesaria una corrida del equipo sobre el carril del camino. Si el equipo hubiese presentado problemas a la hora de evaluar o hubo la necesidad de cambiar de velocidad en el recorrido par alguna causa, es necesario hacer una segunda corrida. Para fines de control de calidad el número de pasadas del equipo sobre el tramo estará fijado par el proyecto. Es difícil que dos pasadas con el equipo sobre el mismo tramo den resultados iguales, debido a la diferencia de puntas recorridos por cada una de las huellas de las llantas en cada pasada, sin embargo estos resultados no deben de diferir en más de un 15%.

EL reporte de resultados de esta evaluación debe contener los datos específicos del tramo, los valores de la rugosidad en la escala de IRI a cada 500 metros o a cada kilómetro, los deterioros observados durante los recorridos y un condensado del IRI de cada 5 kilómetros para la introducción de la rugosidad a los Sistemas de Administración de Pavimentos (SIMAP).

# Anexo 3. Cálculo del IRI utilizando la viga móvil de tres metros

### Introducción

Debido a la inquietud de obtener un método alterno para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad en tramos de prueba que se realiza par media del levantamiento topográfico con nivel y estadal, se utilizo el equipo denominado viga móvil de tres metros. Estos tramos de prueba sirven para la calibración de los equipos tipo respuesta, tales como el Mays Ride Meter con el que cuentan algunas dependencias de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y empresas particulares en México.

La viga de tres metros es un equipo del tipo móvil que se desplaza a la velocidad del operador (aprox. 2 km/hr) sobre la rodada del camino, el equipo registra sobre un papel graficados la diferencia de alturas entre el punta media de una línea horizontal formada por la rueda delantera y la rueda trasera, con la altura de la parte central del camino, determinada por una rueda móvil. Esta diferencia de alturas se denomina valor de la viga de tres metros (V), ver Figura 13.

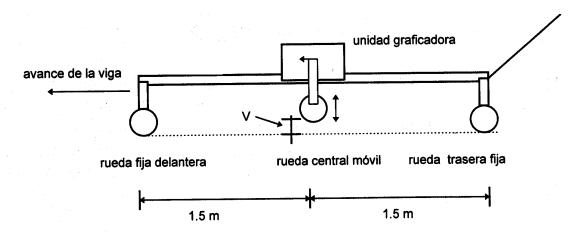


Figura 13. Representación de la viga móvil de 3 metros

Para el calculo del valor promedio (V Prom.) de la viga de tres metros existen dos métodos, el primero denominado indirecto y consiste en la aplicación del algoritmo de este equipo sobre perfiles topográficos de diferentes tramos. Esto permite obtener la correlación entre V prom. con el valor del IRI para diversos tramos; con esta correlación se puede calcular el IRI a partir de un levantamiento topográfico sin utilizar el programa del Banco Mundial.

EL segundo es el método directo, que consiste en hacer pasar la viga de tres metros sobre el perfil del camino y obtener el valor V prom. mediante el registro grafico del equipo. Este puede ser un método alterno para la obtención del IRI para tramos de prueba sin realizar el levantamiento del perfil, aplicando la formula de correlación entre V prom. y el IRI (ver Figura 14).

## Algoritmo de la viga de tres metros aplicado a perfiles topográficos

La Tabla 1 representa dos ejemplos de la aplicación del algoritmo de la viga de tres metros en los datos del levantamiento topográfico de un perfil, uno con elevaciones a cada 25 cm. y otro a cada 50 cm., el procedimiento para obtener estos resultados se explica a continuación:

#### Cálculo de la V gram. con levantamientos a cada 25 cm.

Observe la Tabla 1 para dx = 25 cm. Supóngase que los datos del perfil longitudinal están en una hoja de calculo, si el perfil esta situado en la columna C y comienza en la fila 1 (cuando x = 0 m), se busca la cota para cuando x = 1.5 m EL valor obtenido es el valor de la viga de 3 m.

La fórmula a poner en la celda D7 es: + (A1+A13)/2-A7. Se copia a continuación a lo largo de toda la columna D hacia abajo hasta el final del archivo, excepto para los últimos 1.5 m. Esta formula calcula el valor de la viga de tres metros (V) en unidades de mm.

En la columna E se obtiene el valor absoluto de "V", que se encuentra en la columna D Se realiza la sumatoria de los valores absolutos de "V" y se divide entre el número de estos; que es el número de datos totales menos doce, debido a que en esos puntas no se obtiene el valor de V. Este resultado representa el valor de V prom. para ese perfil.

#### Cálculo de la V prom. con levantamientos a cada 50 cm.

Observe la Tabla 1 para dx = 50 cm. Supóngase que los datos del perfil longitudinal están en una hoja de calculo, si el perfil esta situado en la columna C y comienza en la fila 1 (cuando x = 0 m), se busca la cota para cuando x = 1.5 m que aparece en la fila 4. En esta fila y en la columna D se calcula la media de las cotas para x = 0 y x = 3 m, y se regia la cota correspondiente a x = 1.5 m .EL valor obtenido es el valor de la viga de 3 m.

La formula a poner en la celda D4 es: +(A 1 +A7)/2-A4. Se copia a continuación a lo largo de toda la columna o hacia abajo hasta el final del archivo, excepto para los últimos 1.5 m. Esta formula calcula el valor de la viga de tres metros (V) en unidades de mm.

En la columna E se obtiene el valor absoluto de "V", que se encuentra en la columna D. Se realiza la sumatoria de los valores absolutos de "V" y se divide entre el número de estos; que es el número de datos totales menos seis, debido a que en esos puntas no se obtiene el valor de V. Este resultado representa el valor de V prom. Para ese perfil.

### Cálculo de V prom para levantamientos @25 cm

Num. De	Distancia	Cota	V	ABS (V)
puntos	X (m)	(mm)	(mm)	(mm)
Α	В	С	D	Е
1	0.00	10871		
2	0.25	10868		
3	0.50	10863		
4	0.75	10859		
5	1.00	10855		
6	1.25	10850		
7	1.50	10846	-5.0	5.0
8	1.75	10842	-5.0	5.0
9	2.00	10837	-4.5	4.5
10	2.25	10829	-3.0	3.0
11	2.50	10824	-3.0	3.0
12	2.75	10820	-4.5	4.5
13	3.00	10811	-1.5	1.5
14	3.25	10806	0.0	0.0
15	3.50	10802	-2.0	2.0
16	3.75	10793	-0.5	0.5
17	4.00	10787	0.0	0.0
18	4.25	10781	2.5	2.5
19	4.50	10773	4.0	4.0
20	4.75	10770	2.5	2.5
21	5.00	10763	5.0	5.0
22	5.25	10756	4.0	4.0
23	5.50	10750	4.5	4.5
24	5.75	10747	-1.0	1.0
25	6.00	10743	-3.0	3.0
26	6.25	10739	-1.5	1.5
27	6.50	10734	-3.0	3.0
28	6.75	10727	-3.0	3.0
29	7.00	10722	-3.0	3.0
30	7.25	10711	3.5	3.5
31	7.50	10707	3.5	3.5
32	7.75	10705	0.0	0.0
33	8.00	10699	3.0	3.0
34	8.25	10692	2.5	2.5
35	8.50	10688	SUMA	78.5
36	8.75	10682		
37	9.00	10678		
38	9.25	10671		
39	9.50	10670		
40	9.75	10662		

### Cálculo de V prom. para levantamientos @50 cm

Num. De	Distancia	Cota	V	ABS (V)
Puntos	X (m)	(mm)	(mm)	(mm)
Α	В	С	D	Е
1	0.0	99489		
2	0.5	99485		
3	1.0	99483		
4	1.5	99481	-1	1
5	2.0	99475	1.5	1.5
6	2.5	99473	0.5	0.5
7	3.0	99471	0	0
8	3.5	99468	0	0
9	4.0	99464	2.5	2.5
10	4.5	99461	2	2
11	5.0	99461	-2.5	2.5
12	5.5	99460	-5.5	5.5
13	6.0	99455	-3	3
14	6.5	99449	-2	2
15	7.0	99445	0	0
16	7.5	99443	-1.5	1.5
17	8.0	99433	5.5	5.5
18	8.5	99430	5.5	5.5
19	9.0	99428	5.5	5.5
20	9.5	99428	0	0
21	10.0	99426	-0.5	0.5
22	10.5	99424	0	0
23	11.0	99423	1	1
24	11.5	99421	2	2
25	12.0	99420	1	1
26	12.5	99420	-0.5	0.5
27	13.0	99420	-2.5	2.5
28	13.5	99418	-1.5	1.5
29	14.0	99416	-0.5	0.5
30	14.5	99414	1	1
31	15.0	99413	0.5	0.5
32	15.5	99411	0	0
33	16.0	99410	0	0
34	16.5	99409	-1	1
35	17.0	99406	1	1
36	17.5	99406	0.5	0.5
37	18.0	99403	3	3
38	18.5	99403	SUMA	55
39	19.0	99403		
40	19.5	99403		

Tabla 1. Cálculo del valor promedio dela viga de tres metros mediante levantamientos topográficos .

### Correlación de V promedio y el IRI

Se realizo el calculo del valor promedio de la viga de tres metros (V prom.) con el algoritmo de este equipo en los datos de 36 levantamientos topográficos realizados a cada 25 cm. y otros efectuados a cada 50 cm., con estos mismos datos topográficos se calculo el valor del Índice Internacional de Rugosidad con el programa del Banco Mundial que se encuentra en el Anexo 1 de este documento.

La Figura 14 representa la relación entre el valor promedio de la viga de 3 m y el valor del IRI calculados para los tramos de prueba. La grafica obtenida es de tipo lineal cuya formula es:

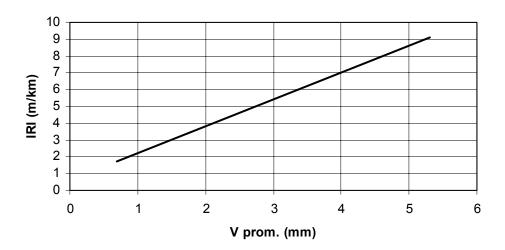


Figura 14. Relación entre el IRI y el valor promedio de la viga de tres metros

### Determinación de V prom. con la viga de tres metros

La utilización de estos equipos se limita por su rendimiento a tramos de prueba, tramos que no se pueden medir con equipos de alto rendimiento o tramos que requieren un control de calidad .El procedimiento para la obtención del valor promedio(V , prom .) de la viga de tres metros es la siguiente:

- a) Se revisa que todas las uniones de la viga se encuentren fijas y que el equipo funcione adecuadamente. Se debe verificar que la longitud que recorre la viga es la misma longitud que marca la escala del papel.
- b) Se calibra el equipo mediante la alineación de las tres ruedas .Esto se realiza colocando la rueda central (móvil) en el cero del marcador, se pasa un hilo desde la rueda trasera hasta la rueda delantera, si las tres ruedas quedan alineadas se dice que el equipo esta calibrado. En caso contrario se ajusta la rueda delantera de manera que las tres ruedas queden alineadas una vez realizada la calibración se ajusta la plumilla en el cero del papel graficador haciéndolo coincidir con el cero del marcador del equipo.
- c) Se seleccionan los tramos de prueba y se pasa el equipo de preferencia sobre las rodadas del carril o si va a servir para calibrar un equipo, sobre la huella en la que se va a pasar dicho equipo, obteniendo la grafica del tramo como la que se muestra en la Figura15. La diferencia de alturas se registra en un papel a escala ,obteniéndose una línea continua .En el sentido vertical del papel se tiene la escala de alturas en milímetros en un rango de 50mm y en el sentido horizontal la distancia recorrida por la viga ,cada división representa a escala 50 cm.
- d) El valor de viga (V) se obtiene calculando la altura que existe entre la línea de la grafica y la línea central (cero) a cada 50cm,los valores arriba del cero se consideran( elevaciones ) y los de abajo negativos ( depresiones) .En la figura 15 se muestran los puntos que determinan el valor de V. El valor de V promedio se obtiene de la suma de todos los puntos en valor absoluto de V entre el numero de puntos evaluados en unidades de milímetros. Con el valor promedió se determina del valor IRI para esa rodada utilizando la Figura 14. Con el promedio de los valores de ambas rodadas se obtiene el IRI del tramo.

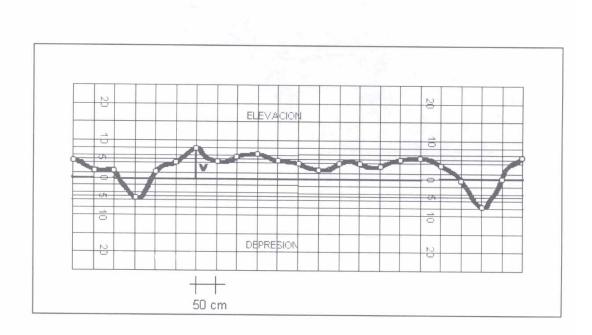


Figura 15 gráfica de la viga de 3 metros

### **Bibliografía**

- 1. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurement Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, William D. O. Paterson Banco Mundial. Technical Paper 46.
- The International Road Roughness Experiment
   Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, Cesar A. V. Queiroz
   Banco Mundial. Technical Paper 45
   1986.
- Cálculo del IRI de una carretera a partir de su perfil longitudinal Dr. Manuel J. Mellis Revista RUTAS Mayo de 1992.
- Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos
   A. Rico, R. Téllez, M. Elizondo
   Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico 3, 4 y 5 1991.
- 5. Seminario Internacional de Pavimentos Instituto Mexicano del Transporte 1991.
- Two Quarter-Car models for defining road roughness: IRI and HRI Michael W. Sayers Transportation Research Board 1989.
- 7. Estado superficial y costos de operación en carreteras R. Aguerrebere, F. Cepeda Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica 30 1991.
- La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el Índice Internacional de Rugosidad
   J. A. Romero

Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica 67. 1996.

 Manual for profile measuarement: Operational field guidelines SHRP P-378
 National Research Council 1994.



### **CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683 Col. Mixcoac 03730, México, D. F. Tel (55) 56 15 35 75 55 98 52 18 Fax (55) 55 98 64 57

### **SANFANDILA**

Km. 12+000, Carretera Querétaro-Galindo 76700, Sanfandila, Qro. Tel (442) 2 16 97 77 2 16 96 46 Fax (442) 2 16 96 71

Internet: http://www.imt.mx publicaciones@imt.mx