

# CIRCULAR NÚMERO LM-PI-C1

## INVESTIGACIONES EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

ESTUDIOS TÉCNICOS  
REALIZADOS PARA LA  
APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE  
REGULARIDAD INTERNACIONAL  
(IRI) EN COSTA RICA

PROGRAMA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE





**CIRCULAR** NÚMERO LM-PI-C1  
INVESTIGACIONES EN  
INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

ESTUDIOS TÉCNICOS  
REALIZADOS PARA LA  
APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE  
REGULARIDAD INTERNACIONAL  
(IRI) EN COSTA RICA

Preparado por:

PROGRAMA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

San José, Costa Rica  
Julio, 2014

## **Programa de Infraestructura del Transporte - PITRA**

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D. MSc  
Coordinador General

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA  
Subcoordinador

Unidades de trabajo

### **Unidad de Auditoría Técnica**

Ing. Wendy Sequeira, MScE.  
Coordinadora

### **Unidad de Materiales y Pavimentos**

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.  
Coordinador

### **Unidad de Evaluación de la Red Vial**

Ing. Roy Barrantes Jiménez  
Coordinador

### **Unidad de Gestión Municipal**

Ing. Jaime Allen Monge, MSc  
Coordinador

### **Unidad de Transferencia de Tecnología**

Ing. Raquel Arriola Guzmán  
Coordinadora

### **Unidad de Puentes**

Ing. Roy Barrantes Jiménez  
Coordinador

### **Unidad de Seguridad Vial y Transportes**

Ing. Diana Jiménez Romero, MSc., MBA  
Coordinadora

# INFORMACIÓN TÉCNICA DEL DOCUMENTO

<b>1. Informe Final:</b> LM-PI-C1	<b>2. Copia No.:</b> 1	
<b>3. Título y subtítulo:</b> Estudios técnicos realizados para la aplicación del índice de regularidad internacional (IRI) en Costa Rica	<b>4. Fecha del Informe:</b> Julio, 2014	
<b>5. Organización y dirección:</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440	<b>6. Encargado de Publicación:</b> Ing. Paulina Leiva Padilla, Investigadora, Unidad de Materiales y Pavimentos	<b>7. Diagramación:</b> Mauricio Bolaños
<b>9. Resumen</b> <p><i>El Índice de Regularidad Internacional es un parámetro de suma importancia en el control de calidad de aceptación de proyectos nuevos y en la gestión de los pavimentos en general. Con el control de este índice es posible asegurar el confort y calidad del viaje del usuario por una carretera. Es por tal motivo que se hace importante su introducción en el quehacer diario de la ingeniería de pavimentos.</i></p> <p><i>En el presente documento se presentan las labores realizadas por las diferentes unidades del Programa de Infraestructura del Transporte del LanammeUCR, para la aplicación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), en Costa Rica.</i></p> <p><i>A continuación se compilan los documentos más relevantes en el tema donde se abordan aspectos relacionados con: definiciones y conceptos importantes, investigación, metodologías de recopilación de datos, evaluación de resultados, fiscalización de proyectos nuevos y asesoría en el tema del IRI.</i></p> <p><i>La finalidad de la realización de este compendio, es poner a disposición del público involucrado en el tema, información relevante que pueda facilitar la interpretación y aplicación de este parámetro, así como la homologación a nivel nacional, de criterios técnicos en cuanto a conceptos y metodología para la determinación del IRI, tomando como base la experiencia de 10 años por parte del LanammeUCR, en esta materia. Lo anterior, en definitiva, para contribuir a través de la Transferencia de Tecnología, con la mejora de los estándares de la red vial por ende, de la calidad de vida de los ciudadanos.</i></p>		
<b>10. Palabras clave</b> IRI, Índice de Regularidad Internacional, Especificaciones	<b>11. Nivel de seguridad</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 108
<b>13. Preparado por:</b> Ing. Paulina Leiva Padilla Investigadora, Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 31/07/14	<b>Preparado por:</b> Ing Ana Elena Hidalgo Auditora, Unidad de Auditoría Técnica  Fecha: 31/07/14	
<b>Revisado por:</b> Ing. Raquel Arriola Guzmán, Coordinadora, Unidad de Transferencia de Tecnología  Fecha: 31/07/14		<b>15. Revisado y aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loría Salazar, MSc Coordinador General, PITRA  Fecha: 31/07/14



1. INDICE DE FIGURAS .....	x
2. INDICE DE TABLAS .....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	01
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS Y DEFINICIONES IMPORTANTES CON RESPECTO AL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL .....	05
DETERMINACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA EL CÁLCULO DE IRI .....	05
INTRODUCCIÓN .....	05
<i>Justificación e importancia</i> .....	05
<i>Objetivo general</i> .....	07
<i>Objetivos específicos</i> .....	07
EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL, CONCEPTOS GENERALES .....	07
<i>Definición de Regularidad Superficial</i> .....	07
<i>Cálculo de índices de Regularidad Superficial</i> .....	08
<i>Consideraciones e implicaciones del cálculo del Índice Internacional de Regularidad (IRI)</i> .....	15
Nivel y mira topográfica .....	16
Dipstick .....	17
Perfilógrafos .....	18
Equipos tipo respuesta (RTRRMS) .....	19
Perfilómetro inercial .....	20
<i>Especificaciones de IRI y metodologías empleadas en otros países</i> .....	21
CONSIDERACIONES PARA ESTABLECER LA METODOLOGÍA DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI EN COSTA RICA .....	23
<i>Determinación del IRI con diferentes equipos de medición en un tramo particular</i> .....	23
<i>Variación del IRI según la longitud de evaluación</i> .....	28
<i>Efecto de singularidades en la medición y cálculo del IRI</i> .....	37

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN COSTA RICA .....	42
<i>Procedimiento utilizado en Costa Rica para la medición del IRI</i> .....	42
<i>Propuesta para la determinación del IRI en Costa Rica</i> .....	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	46
<b>PROPUESTA PARA LA DEFINICIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL</b> .....	47
FUNDAMENTACIÓN .....	47
OBJETIVO GENERAL .....	47
ALCANCE .....	48
ANTECEDENTES .....	48
MARCO TEÓRICO .....	52
<i>Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)</i> .....	52
<i>Consideraciones e implicaciones de la medición del Índice de Regularidad</i> .....	53
<i>Especificaciones de IR empleadas en otros países</i> .....	55
<i>Especificaciones de Índice de Regularidad Internacional (IRI) para Costa Rica</i> .....	57
<i>Base de medición de Índice de Regularidad Internacional (IRI)</i> .....	57
PROPUESTA PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DEL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) LanammeUCR .....	58
RECOMENDACIONES .....	60
<b>CAPÍTULO 3. INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL EN EL PROYECTO CAÑAS-LIBERIA</b> .....	63
<b>CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN RELACIÓN CON LA ESPECIFICACIÓN DE IRI PARA EL PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN DE LA RURA NACIONAL Nº 1, CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA (LPI Nº 201 1LI-ODI00) Y FUTUROS PROYECTOS DE SIMILAR CONDICIÓN.</b> .....	63
INTRODUCCIÓN .....	63
FUNDAMENTACIÓN .....	64
OBJETIVO GENERAL .....	64

MARCO TEÓRICO .....	65
<i>Índice de Regularidad Internacional</i> .....	65
Generalidades .....	65
Conceptos importantes .....	67
Importancia .....	69
ESPECIFICACIÓN NACIONAL CON RESPECTO AL IRI (CR-2010) .....	70
EXPERIENCIA NACIONAL EN CUANTO A LA REGULARIDAD EN PROYECTOS DE OBRA VIAL.....	72
PROYECTO CAÑAS-LIBERIA .....	74
<i>Descripción del proyecto</i> .....	74
<i>Especificaciones del cartel de licitación</i> .....	77
OBSERVACIONES .....	78
<i>Con respecto a la normativa nacional CR-2010</i> .....	78
<i>Con respecto al cartel de licitación del proyecto analizado</i> .....	78
<i>Recomendaciones por parte del LanammeUCR</i> .....	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	83
<b>EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)</b> .....	84
INTRODUCCIÓN .....	84
<i>Objetivo del estudio</i> .....	84
ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) .....	84
<i>Modelo matemático del IRI</i> .....	84
<i>3.1.2 Elementos que intervienen en la determinación del IRI</i> .....	87
<i>Ejemplo de evaluación de IRI</i> .....	88
<i>CASO DE EVALUACIÓN SEGÚN NORMATIVA CHILENA (Montes, 2001)</i> .....	88
<i>CASO DE EVALUACIÓN EN COSTA RICA</i> .....	97
CONCLUSIONES .....	104
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	105

# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MODELO DE CUARTO DE CARRO .....	11
FIGURA 2: ESCALA ESTÁNDAR EMPLEADA POR EL BANCO MUNDIAL PARA .....	14
FIGURA 3: NIVEL Y MIRA TOPOGRÁFICA .....	16
FIGURA 4: EQUIPO DIPSTICK .....	17
FIGURA 5: OPERACIÓN DE EQUIPO DIPSTICK .....	17
FIGURA 6: PERFILÓGRAFO CALIFORNIA (ROMARO INTERNACIONAL, S.A DE C.V) .....	18
FIGURA 7: PERFILÓGRAFO RAINHART (RAINHART COMPANY) .....	18
FIGURA 8: COMPONENTES DE EQUIPOS TIPO RESPUESTA (ADAPTADO DE "A SYNOPSIS ON THE CURRENT EQUIPMENT USED FOR MEASURING PAVEMENT SMOOTHNESS") .....	19
FIGURA 9: COMPONENTES DE EQUIPOS CON REFERENCIA INERCIAL (ADAPTADO DE "A SYNOPSIS ON THE CURRENT EQUIPMENT USED FOR MEASURING PAVEMENTSMOOTHNESS") .....	20
FIGURA 10: VARIACIONES APARENTES DE PERFILES LONGITUDINALES .....	23
FIGURA 11: LOS MISMOS PERFILES DE LA FIGURA ANTERIOR DESPUÉS DEL FILTRADO .....	24
FIGURA 12: PERFILÓMETRO INERCIAL RSP MARK III. MARCA DYNATEST (PROPIEDAD DEL LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES(LANAMMEUCR)) .....	25
FIGURA 13: TRAMO SELECCIONADO PARA LA MEDICIÓN DEL IRI (IMAGEN TOMADA Y ADAPTADA DE GOOGLE EARTH 2008) .....	25
FIGURA 14: PERFIL LONGITUDINAL MEDIDO CON EL DIPSTICK Y CON EL .....	26
FIGURA 15: PERFIL LONGITUDINAL SUAVIZADO DEL DIPSTICK Y DEL .....	26
FIGURA 16: ÍNDICE REGULARIDAD INTERNACIONAL OBTENIDO DEL DIPSTICK Y DEL .....	27
FIGURA 17: COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICE REGULARIDAD INTERNACIONAL OBTENIDO .....	27
FIGURA 18: ÍNDICE REGULARIDAD INTERNACIONAL OBTENIDO CON EL PERFILÓMETRO INERCIAL RSP MARK III Y CON EL PROGRAMA ROADRUF .....	29
FIGURA 19: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE IRI OBTENIDO ENTRE EL PERFILÓMETRO INERCIAL RSP MARK III Y CON EL PROGRAMA ROADRUF .....	29
FIGURA 20: VARIACIÓN EN EL VALOR DEL IRI SEGÚN LA LONGITUD DE EVALUACIÓN .....	35

FIGURA 21: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE IRI OBTENIDO CADA 20 M .....	36
FIGURA 22: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE IRI OBTENIDO CADA 50 M .....	36
FIGURA 23: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE IRI OBTENIDO CADA 100 M .....	36
FIGURA 24: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE IRI OBTENIDO CADA 200 M .....	36
FIGURA 25: SIMULACIÓN DE UNA JUNTA DE CONSTRUCCIÓN (EJEMPLO 1) .....	38
FIGURA 26: SIMULACIÓN DE UNA JUNTA DE CONSTRUCCIÓN (EJEMPLO 2) .....	39
FIGURA 27: SIMULACIÓN DE UN BACHE DE 10 M DE LONGITUD MAL CERRADO .....	40
FIGURA 28: SIMULACIÓN DE UN HUECO DE 2.5 CM DE PROFUNDIDAD Y 10 M DE LONGITUD .....	40
FIGURA 29: SIMULACIÓN DE COMBINACIÓN DE BACHEO EXTENSIVO, HUECOS Y JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN DEFICIENTES (EJEMPLO 1) .....	41
FIGURA 30: SIMULACIÓN DE COMBINACIÓN DE BACHEO EXTENSIVO, HUECOS Y JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN DEFICIENTES (EJEMPLO 2) .....	42
FIGURA 31: POSICIÓN DE SENSORES EN LA BARRA DEL PERFILÓMETRO LÁSER .....	43
FIGURA 32: ESCALA ESTÁNDAR EMPLEADA POR EL BANCO MUNDIAL PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL IRI PARA DIFERENTES TIPOS DE VÍAS (UNIDAD DE VII INVESTIGACIÓN, LANAMMEUCR. “DETERMINACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA EL CÁLCULO DEL IRI”, COSTA RICA, 2008) .....	54
FIGURA 33: ESCALA ESTÁNDAR EMPLEADA POR EL BANCO MUNDIAL PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL IRI PARA DIFERENTES TIPOS DE VÍAS (UMTRI RESEARCH REVIEW, VOL. 33. NÚMERO 1. ENERO-FEBRERO 2002, ADAPTADO Y CITADO POR (BADILLA, ELIZONDO, & BARRANTES, DETERMINACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA EL CÁLCULO DEL IRI, 2008)) .....	65
FIGURA 34: RECOMENDACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE IRI EN FUNCIÓN DEL TPDA (OROZCO Y OTROS (2004) .....	66
FIGURA 35: UBICACIÓN DEL PROYECTO SOBRE LA RUTA NACIONAL N°1, SECCIÓN: CAÑAS-LIBERIA .....	75
FIGURA 36: CONSTRUCCIÓN DE LOSAS DE CONCRETO EN EL PROYECTO CAÑASLIBERIA .....	76
FIGURA 37: MODELO DE CUARTO DE CARRO ((BADILLA, DETERMINACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO, MEDIANTE EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL. (IRI), 2009) .....	86
FIGURA 38: ESQUEMA DEL EJEMPLO UTILIZANDO LA METODOLOGÍA CHILENA PARA LA EVALUACIÓN DEL IRI .....	89
FIGURA 39: ESQUEMA DEL EJEMPLO UTILIZANDO LA METODOLOGÍA COSTARRICENSE PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DEL IRI .....	98

# INDICE DE TABLAS

TABLA 1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS .....	21
TABLA 2 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES DE IRI .....	22
TABLA 3 VARIACIÓN EN EL VALOR DEL IRI (M/KM) SEGÚN LA LONGITUD DE EVALUACIÓN .....	30
TABLA 4 RESUMEN DE LAS SESIONES DE LA COMISIÓN DE IRI .....	50
TABLA 5 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES DE ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) .....	56
TABLA 6 BASES DE MEDICIÓN DE IRI Y SU OBJETIVO .....	58
TABLA 7 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES DE IRI .....	67
TABLA 8 VALORES IRI POR PERCENTIL PARA LOS PROMEDIOS .....	71
TABLA 9 PORCENTAJE DE M/KM DEL VALOR DEL IRI PARA PROYECTOS DE PAVIMENTO RÍGIDO .....	74
TABLA 10 IRI CARACTERÍSTICO DE LOS PROYECTOS EN ESTUDIO EN EL AÑO 2009 PARA UNA BASE DE MEDICIÓN CADA 100M .....	74
TABLA 11 MULTAS POR DEFICIENCIAS EN LA RUGOSIDAD .....	77
TABLA 12 MODIFICACIÓN PROPUESTA A LA TABLA DE MULTAS DEL CARTEL .....	82
TABLA 13 RESUMEN COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE IRI .....	83
TABLA 14 DATOS DEL ENSAYO Y PROCESAMIENTO CHILENO .....	90
TABLA 15 DATOS DEL ENSAYO Y PROCESAMIENTO COSTARRICENSE .....	99

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la regularidad o rugosidad superficial de un pavimento es uno de los controles más importantes de considerar en la recepción de una obra.

Con este parámetro se pretende garantizar la funcionalidad deseada a un pavimento, de manera que se pueda ofrecer a los usuarios: el mayor nivel de confort, la mayor seguridad y la menor inversión en los costos de operación.

Según (Zaabar & Chatti, 2013), el componente más importante en el costo que se ve afectado por la regularidad es el consumo de combustible, seguido se encuentra el mantenimiento y reparación del vehículo y en tercer lugar el desgaste de las llantas. Cifras relacionadas con el tema según el mismo estudio se enumeran a continuación:

1. Independientemente de la velocidad, el aumento en el valor del IRI en 1 m/km incrementa el consumo de combustible en vehículos livianos entre un 2 y 3%.
2. Para el caso de los camiones, un incremento de IRI de 1 m/km incrementa el consumo de combustible entre 1 y 2% a altas velocidades y entre 2 y 3% a bajas velocidades.
3. A partir de valores de IRI iguales a 3 m/km, el mantenimiento y reparación de vehículos se empieza a ver afectado.
4. Por encima del valor anterior, para valores de IRI de 4 m/km el costo por mantenimiento y reparación aumenta en un 10% tanto para vehículos livianos como camiones.
5. Finalmente en casos donde el IRI presenta un valor de 5 m/km, el costo por mantenimiento y reparación aumenta en un 40% para vehículos livianos y un 50% para camiones.

En este sentido, el PITRA-LanammeUCR desde el 2004 ha venido desarrollando una serie de labores en investigación, asesoría, auditoría, evaluación, divulgación y capacitación, que se encuentran definidas dentro de sus obligaciones de ley, para la implementación de este parámetro en Costa Rica. Para ilustrar lo anterior, a continuación se despliega un listado con el nombre de algunos de los documentos y actividades realizadas:

Documentos de investigación:

- 2005: LM-PI-PV-IN-24b-05: Índice de Regularidad Internacional. Preparado por: Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz.
- 2008: Proyecto No. UI-03-08: Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI. Preparado por: Ing. Gustavo Badilla Vargas, Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MSc, Ing. Roy Barrantes Jiménez.
- 2013: LM-PI-002-2013: Propuesta para la definición de un procedimiento de medición y análisis del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Preparado por: Ing. Gustavo Badilla Vargas, Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.

#### Actividades de transferencia de conocimiento:

- 2011: Charla: IRI: Estado de la práctica y mitos. Preparada por: Ing. Gustavo Badilla Vargas.
- 2011: Taller IRI: El Índice de Regularidad Internacional (IRI). Preparado por: Ing. Gustavo Badilla Vargas, Ing. Alex Cerdas, Ing. Tania Ávila Esquivel, Ing. Ellen Rodríguez.
- 2014: Foros y talleres: Diagnóstico de la Red Vial Cantonal: FWD, IRI, conteos, sondeos a cielo abierto, auscultación visual de deterioros, Notas Q y planes quinquenales y de inversión. Preparados por: Unidad de Gestión Municipal.

#### Documentos de asesoría:

- 2014: LM-PI-026-2014: Respuesta al oficio UE-358-2014 con referencia al proyecto Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional N°1, Carretera Interamericana Norte, Sección Cañas-Liberia. Preparado por: Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, MSc, Ph.D.
- 2014: LM-PI-UMP-A-007 (Anexo al oficio LM-PI-026-2014, mencionado en la línea anterior): Consideraciones técnicas en relación con la especificación de IRI para el proyecto: Ampliación y rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas - Liberia (LPI No. 2011LI-000004) y futuros proyectos de similar condición. Preparado por: Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo, Ing. Paulina Leiva Padilla.

#### Artículos científicos:

- 2004: Índice de Regularidad Internacional (IRI). Preparado por: Ing. Jorge Arturo Castro.
- 2009: Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo de índice internacional de regularidad (IRI). Preparado por: Ing. Gustavo Badilla Vargas.
- 2009: Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo de índice internacional de regularidad (IRI): Aspectos y consideraciones importantes. Preparado por: ?

#### Documentos de Auditoría Técnica:

- 2009: LM-AT-156-09: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 204, Sección: Zapote-San Francisco. Preparado por: Ing. Mauricio Salas Chaves, Ing. Erick Acosta Hernández, Ing. Raquel Arriola Guzmán.
- 2009: LM-AT-215-09: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 211, Sección: San Francisco-La Colina. Preparado por: Ing. Raquel Arriola Guzmán, Ing. Mauricio Salas Chaves, Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.
- 2009: LM-AT-255-09: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento

de la Ruta Nacional No. 167, Sección: Librería Universal - M.A.G. (La Salle). Preparado por: Ing. Raquel Arriola Guzmán, Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.

- 2010: LM-AT-096-10: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 34, Sección: Quepos-Barú. Preparado por: Ing. Raquel Arriola Guzmán, Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.
- 2010: LM-AT-111-10: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 34, Sección: Librería Universal - M.A.G. (La Salle). Preparado por: Ing. Raquel Arriola Guzmán, Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.
- 2010: LM-AT-159-10: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 167, Sección: Quepos-Barú. Preparado por: Ing. Raquel Arriola Guzmán, Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.
- 2010: LM-AT-159B-10: Evaluación de la Regularidad Superficial (IRI), Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 613, Sección: Sabalito-Las Mellizas. Preparado por: Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo, Ing. Raquel Arriola Guzmán.
- 2013: LM-PI-AT-011-2013: Evaluación de la regularidad superficial resultante de las intervenciones de conservación vial en la Ruta Nacional 32, Tramo Puente Río Virilla-Intersección con Ruta Nacional 4. Preparado por: Ing. José David Rodríguez Morera, Ing. Mauricio Salas Chaves, Ing. Sandra Solórzano Murillo.

#### Evaluación de la Red Vial Nacional:

- 2004, 2006, 2008, 2010, 2012: Informes de evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada. Preparados por: Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional.
- 2008: Desarrollo de herramientas de gestión con base en la determinación de índices de la Red Vial Nacional. Preparado por: Ing. Roy Barrantes Jiménez, Ing. Denia Sibaja Obando, Sr. Juan Diego Porras Alvarado.
- 2010: INF-PITRA-002-2010: Informe de Evaluación del Proyecto San José-Caldera, Ruta Nacional 27.
- 2011: LM-PI-UE-008-2011: Informe de Evaluación del Proyecto San José-Caldera, Ruta Nacional 27. Preparado por: Ing. José Francisco Garro, Sr. Christian Valverde, Sr. César Chaves.
- 2013: INF-PITRA-001-2013: Informe de Evaluación del Proyecto San José-Caldera, Ruta Nacional 27. Preparado por: Ing. José Francisco Garro, Sr. Christian Valverde, Ing. Jairo Sanabria.
- 2014: INF-PI-UGERVN-05-2014: Informe de Evaluación del Proyecto San José-Caldera, Ruta Nacional 27. Preparado por: Ing. José Francisco Garro, Ing. Christian Valverde, Ing. Ronald Naranjo, Geol. Paulo Ruiz.

Los siguientes capítulos recopilan los trabajos relacionados con conceptos importantes, metodologías de medición y cálculo (o evaluación) de este parámetro, para facilitar al lector una referencia, que le permita hacer un uso adecuado de este parámetro, específicamente en el control de recepción de obra de proyectos nuevos. Lo anterior a su vez permitirá un mejor entendimiento al trasladar el uso de este parámetro funcional, aplicado a proyectos de conservación vial, así como realizar una correcta lectura de los resultados de IRI de las campañas de evaluación bienal de la red vial nacional que realiza el LanammeUCR y su importancia en la gestión de pavimentos.



## CAPÍTULO 2. CONCEPTOS Y DEFINICIONES IMPORTANTES CON RESPECTO AL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL



# DETERMINACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA EL CÁLCULO DEL IRI

Gustavo Badilla Vargas, Fabián Elizondo Arrieta, Roy Barrantes Jiménez

## INTRODUCCIÓN

### Justificación e importancia

El desempeño funcional de la infraestructura vial, además de garantizar condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras, repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de pavimentos.

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, el desgaste de las llantas 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 de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar 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 que el Índice de Regularidad Internacional (IRI) es geográficamente transferible, repetible y estable con el tiempo, se ha convertido en medición atractiva y conveniente para el control de calidad de la construcción de nuevos pavimentos; ya que permite evaluar la regularidad superficial de las mismas, y reflejar el confort y seguridad de los usuarios, garantizando de manera indirecta el desempeño estructural del pavimento.

Es posible encontrar investigaciones en las cuales se ha evaluado la influencia de valores iniciales de IRI con el comportamiento del pavimento a largo plazo (Zaghloul, 1996). Estas demuestran que valores iniciales elevados de IRI ocasionan mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento. Aún solucionándose los deterioros iniciales, el pavimento siempre presentará

fallas funcionales en el tiempo más graves que aquel pavimento que inició su vida útil con un valor de IRI menor.

En 1988 Michael S. Janoff del JMJ Research, estudió el efecto de la regularidad inicial sobre el rendimiento del pavimento a largo plazo. Los resultados fueron presentados en 1990 en la reunión anual de la NAPA, en la publicación titulada "The Effect of Increased Pavement Smoothness On Long Term Pavement Performance & Annual Pavement Maintenance Cost". Algunos de los resultados obtenidos de este estudio fueron:

Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen niveles más bajos de regularidad para los siguientes 10 años a la construcción.

Los pavimentos con una menor regularidad inicial tiene niveles más bajos de agrietamiento para los siguientes 10 años a la construcción.

Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen costos anuales medios de mantenimiento más bajos para los siguientes 10 años a la construcción.

Debido a estas razones es importante profundizar en el conocimiento de la forma de medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI), así como las especificaciones internacionales que garantizan el desempeño óptimo de las carreteras, de manera tal que se pueda contar con una metodología única que permita evaluar la condición superficial, representada por el IRI, de forma homogénea y objetiva, y posteriormente realizar mediciones en diferentes tramos y compararlos con los valores o especificaciones que habitualmente se usan en el mundo.

Finalmente, en años recientes, Costa Rica ha venido introduciendo la medición del IRI como parámetro de aceptación de diferentes obras viales.

- Ruta 18. Sección Limonal – Tempisque: Reconstrucción y Mejoramiento.
- Ruta 21. Sección Pavones-Intersección Corozal. San Rita-Jicaral-Lepanto-Playa Naranjo II: Mejoramiento.
- Ruta 23. Sección Interamericana-Caldera: Reconstrucción.

Sin embargo el desconocimiento u omisión de algunos detalles propios del método del cálculo de IRI no han permitido una adecuada implementación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), como parámetro de aceptación, control y gestión.

La implementación de estas mediciones puede conllevar a la introducción de nuevas tecnologías o técnicas que se emplearán en las obras de pavimentación, que garanticen el desempeño funcional, lo cual dará repercusiones positivas en la construcción de carreteras en nuestro país.

## Objetivo General

Establecer la metodología de ensayo que se aplicará para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), como control para la recepción de los proyectos de infraestructura vial en Costa Rica, estableciendo el intervalo de longitud para la determinación del IRI.

## Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica para determinar el concepto de Índice de Regularidad Internacional (IRI) y su normativa internacional.
- Determinar los cuidados, detalles y características que deben considerarse para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- Definir el procedimiento y el intervalo de evaluación que debe utilizarse para el cálculo del IRI, tanto para evaluación a nivel de red como control para la recepción de proyectos nuevos.

## EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL, CONCEPTOS GENERALES

### Definición de regularidad superficial

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

En el ensayo de AASHO, la serviciabilidad se cuantificó inicialmente a través del Present Serviciability Rating (PSR); el cálculo de este índice se realizó por medio de una apreciación subjetiva sobre la calidad de rodado, realizado por un grupo de personas especialmente seleccionadas que formaron parte de un panel evaluador, de modo que representaran a los usuarios. De esta evaluación subjetiva surgió una escala de clasificación que calificó la calidad de ruedo con valores entre 0 (intransitable) y 5 (excelente).

En vista que dicha metodología contenía aspectos subjetivos, dentro del proyecto de AASHO Road Test, se realizaron correlaciones entre el PSR y mediciones objetivas de la condición del pavimento, lo cual contribuyó a determinar el Present Serviciability Index (PSI). De esta forma fue posible estimar el PSI como una función derivada de variables como el "Slope Variance" (SV), la cual corresponde a la varianza de las medidas de desnivel del perfil longitudinal, y considerando el aporte de deterioros como agrietamientos y bacheo.

En la norma de ensayo ASTM E 867-06 Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems, se define el concepto de Roughness, cuya traducción al español es Rugosidad y viene dada por:

*“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 documento prefiere utilizarse 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 70's, 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.

### **Cálculo de índices de regularidad superficial**

El perfil longitudinal de un camino es una representación en dos dimensiones de la superficie del mismo, a lo largo de una línea imaginaria. Por lo tanto, la medición del perfil es una serie de números que representan elevaciones relativas respecto a un nivel de referencia.

De esta manera, se tiene que el índice de un perfil es un valor calculado que resume las variaciones en el perfil de la superficie. Los detalles del cálculo determinan el significado y significancia del índice. El valor del índice puede estar relacionado con un modelo matemático del movimiento de un vehículo o por otros índices comúnmente utilizados.

Se dice que un índice es portable y reproducible, cuando este puede ser calculado a partir de un perfil verdadero y por cualquier perfilógrafo válido. Además, se habla que es estable en el tiempo, cuando puede ser comparado en el tiempo; puesto que el concepto de perfil verdadero tiene el mismo significado año a año y la subsecuente transformación matemática del perfil verdadero también es estable con el tiempo.

A partir de un simple perfil pueden calcularse muchos índices de regularidad. En términos generales, todos los índices de regularidad pueden calcularse empleando transformaciones matemáticas en cuatro pasos básicos. Los detalles en cada uno definirán el índice. A continuación se describen cada uno de estos pasos:

1. *Determinación de la cantidad de perfiles iniciales.* La mayoría de los índices son calculados a partir de un perfil simple, pero algunos índices requieren dos perfiles (generalmente uno sobre cada huella del carril).

2. *Filtrado de longitudes de onda y datos.* Algunos análisis requieren aplicar una secuencia de filtros.
3. *Acumulación y reducción del perfil filtrado.* La secuencia de cantidades filtradas deben ser reducidas a un valor o índice. Comúnmente se realiza una acumulación de los valores absolutos, o una acumulación de los valores elevados al cuadrado, de todos los números. El resultado es un único valor acumulado.
4. *Escalonamiento del índice.* El paso final es convertir el valor acumulado a una escala apropiada. Esto generalmente involucra una división por la cantidad de puntos del perfil o la longitud del perfil para normalizar la regularidad por la longitud cubierta.

Algunos índices de regularidad empleados para cuantificar la regularidad de la carretera son:

Mean Panel Rating (MPR):

El concepto del MPR surge de la evaluación en la pista de ensayo de la AASHTO en 1950. Constituye el valor promedio de la evaluación subjetiva de la calidad de rodado, realizado por un grupo de personas especialmente seleccionadas que formaron parte de un panel evaluador, de modo que representaran a los usuarios. La subjetividad del juicio del MPR dependía fuertemente de las instrucciones dadas a cada uno de los miembros del panel de evaluación, debido a las indicaciones de las propiedades físicas y calidad que debían ser juzgadas.

Slope Variance (SV):

Es la varianza estadística de la pendiente del perfil de la carretera, muestreado en intervalos de 30.48 cm (1 ft). Este índice es sensible al intervalo de muestreo de los datos del perfil.

Índice de Perfil (Profile Index, PI):

Es un valor calculado que resume las variaciones en el perfil de la superficie. El valor del índice está relacionado con las masas, resortes de los amortiguadores y suspensión, aplicados a un modelo matemático del movimiento de un cuarto de carro, normalizado a una escala entre 5 (perfectamente irregular) y 0 (máxima regularidad posible).

Ride Number (RN):

El Ride Number se calcula idealmente a partir de los perfiles obtenidos en las huellas izquierda y derecha de un vehículo. Cada perfil es procesado independientemente y los resultados son combinados en el último paso. Este parámetro puede ser relacionado con el Índice de Perfil (PI) mediante la fórmula:  $RN = \frac{PI}{100}$ . La escala de medición está ente 0 y 5, donde 5 representa una rodabilidad perfecta y 0 es impasable.

## Índice de Regularidad Internacional (IRI):

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 parámetro de medición de la regularidad superficial, el cual satisface completamente criterios de ser estable en el tiempo, transferible y relevante, denominado Índice de Regularidad Internacional (IRI, International Roughness Index).

Paterson, en 1986, define el IRI como: "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 (RARS80, 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".

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 consiste en medir las cotas o elevaciones de terreno que permiten representar el perfil real de camino, a través de un sistema clasificatorio asociado a la precisión obtenido por parte del instrumento utilizado en la auscultación del camino. 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. Para un perfil que ha sido muestreado a un intervalo  $\Delta$ , un filtrado de la regularidad por media móvil se define como la sumatoria de:

$$h_{ps}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} h_p(j)$$
$$k = \max[1, \text{nint}(L_B / \Delta)]$$

Donde:

hp= elevación del perfil

hps= elevación del perfil suavizado

max = valor máximo de 2 argumentos,

nint = entero más cercano,

LB = longitud base de la media móvil, 250 mm

Por ejemplo, si el intervalo de muestreo  $\Delta = 150$  mm, la razón ( $L_B/\Delta$ ) es 1.67, la cual es redondeada a 2. El número 2 es mayor que 1, por lo tanto  $k$  será 2.

Al nuevo perfil generado se le aplica un segundo filtro, el cual consiste en la aplicación del modelo de cuarto de carro, a través de este se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar. De esta manera, el IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; que modelan simplificada un vehículo como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino. (Ver Figura 1).

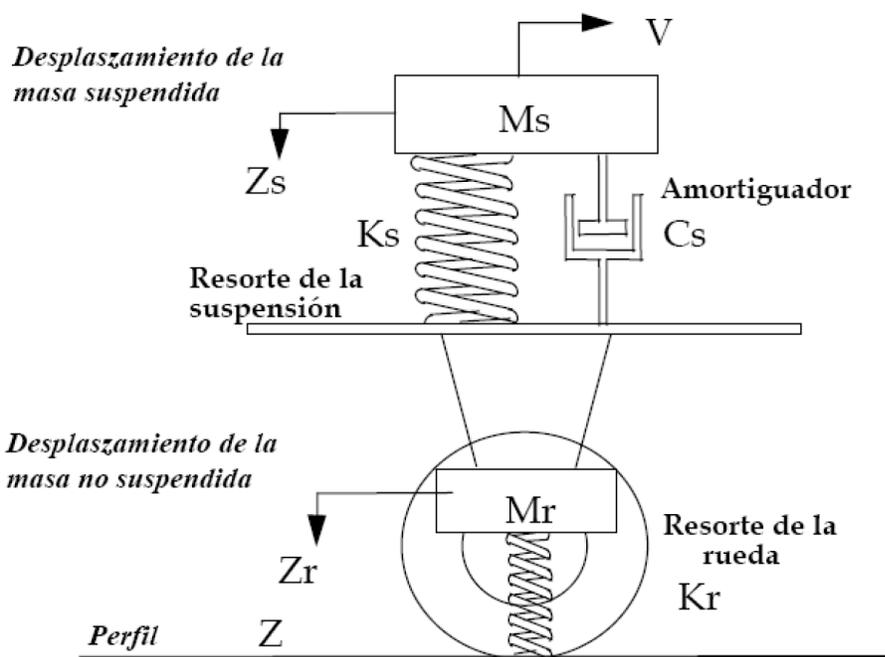


Figura 1

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:

$$k_2 = \frac{k_s}{M_s} = 63.3 \quad k_1 = \frac{k_r}{M_s} = 653 \quad c = \frac{c_s}{M_s} = 6 \quad \mu = \frac{M_r}{M_s} = 0.15$$

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

Los movimientos sobre el perfil de la carretera están asociados a desplazamientos verticales, velocidad y aceleración de masas, quedando todo el sistema regido por la primera Ley de Newton,

El modelo del cuarto de carro está descrito por 4 ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, que pueden ser escritas en forma de matriz como siguen:

$$\dot{x} = Ax + Bh_{ps}$$

donde las matrices  $x$ ,  $A$ , y  $B$  se definen como siguen:

$$x = [z_s, \dot{z}_s, z_r, \dot{z}_r]^T \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1+k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix} \quad B = [0, 0, 0, k_1 / \mu]^T$$

donde,

$h_{ps}$  = elevación del perfil suavizado

$z_s$  = elevación (coordenada vertical) de la masa suspendida

$z_r$  = elevación (coordenada vertical) de la masa no suspendida

$x$  = matriz de las variables de estado (variables que en conjunto describen completamente el estado del sistema simulado)

Las derivadas con respecto al tiempo se indican con un punto (por ejemplo,  $\dot{z}_s$ ). El tiempo está relacionado con la distancia longitudinal a la velocidad simulada del vehículo:

$$t = x/V$$

donde "x" es la distancia longitudinal y "V" es la velocidad, que para el IRI está definida como 80 km/h. Las unidades de la velocidad deben ser de longitud/segundo, y además las unidades de la longitud deben coincidir con las unidades de "x".

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.

El IRI es una acumulación de la simulación del movimiento entre la masa suspendida y la masa no suspendida en el modelo del cuarto de carro, y normalizada a la longitud L, del perfil:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_r| dt$$

Nótese que la ecuación anterior es una ecuación lineal, es decir, si el IRI de una sección de 500 m es 1.0 m/km, y el IRI en la sección siguiente de 500 m es 2.0 m/km el IRI para el kilómetro completo es el promedio aritmético simple: 1.5 m/km.

Una consideración importante de la ecuación diferencial, es que se debe conocer o estimar valores iniciales. De esta manera la respuesta obtenida sobre el perfil incluye una respuesta de transición a partir de los valores iniciales hasta la respuesta inducida por el perfil. Los efectos de esta inicialización disminuyen conforme la simulación del cuarto de coche cubre una mayor distancia del perfil. A una velocidad de simulación del IRI de 80 km/hr, la inicialización influye en el modelo del cuarto de coche 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.

El IRI como indicador estadístico de la irregularidad superficial de pavimento representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, IRI = 0) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

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.

Las consideraciones más importantes sobre el IRI son:

- El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil.
- Para el cálculo del IRI es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo utilizado.
- La precisión de los equipos de medida de la irregularidad superficial es uno de los temas más complejos de decidir y valorar.
- El cálculo matemático del IRI relaciona la acumulación de desplazamientos del sistema de suspensión de un vehículo modelo, dividida entre la distancia recorrida por el vehículo a una velocidad de 80 km/h, y se expresa en mm/m o m/km. 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. A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala de medición de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías (ver Figura 2).

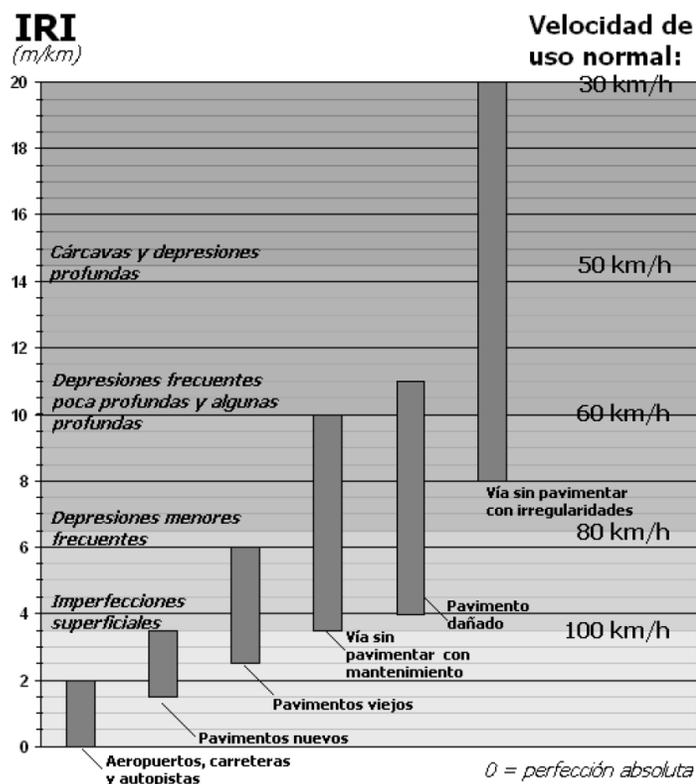


Figura 2

Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías (Adaptado de UMTRI Research Review, Vol. 33. Numero 1. Enero-Febrero 2002)

Mean Roughness Index (MRI):

El Mean Roughness Index se calcula como el IRI promedio de las huellas izquierda y derecha de un vehículo. De esta forma que el MRI es expresado generalmente en unidades de mm/m o m/km.

### **Consideraciones e implicaciones del cálculo del Índice Internacional de Regularidad (IRI)**

En lo que respecta al cálculo del IRI se deben considerar los siguientes requisitos:

1. El IRI es calculado a partir de un solo perfil a lo largo de una de la huellas de las llantas de un vehículo. El intervalo de muestreo del perfil debe ser no mayor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de regularidad, necesitándose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5 mm en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
2. Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
3. El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos: simular el comportamiento de la envolvente de los neumáticos y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto de carro al espaciamiento de muestreo del perfil longitudinal.
4. El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, RQCS, con parámetros específicos, a una velocidad de 80 km/h.
5. El movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de esta forma que el IRI es expresado generalmente en unidades de mm/m o m/km.

El IRI está definido como una propiedad de un solo perfil longitudinal, por lo tanto si se desea establecer un valor por pista se debería establecer criterios de cuántos perfiles tomar; generalmente se toman los perfiles en ambas huellas de las llantas de un vehículo para así derivar un valor por carril.

Los sitios de prueba utilizados en el desarrollo del concepto de IRI contaban con una longitud mínima de 320 m. 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 de pavimentos, así por ejemplo, en España, el valor de referencia de cálculo es cada hectómetro.

En vista de la importancia que reviste 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 inadecuada valores de IRI satisfactorios. Por otra parte la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

### Equipos existentes 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.

#### 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. Debido a que el proceso de recolección de datos es relativamente lento, en comparación con otros equipos, es considerado de bajo rendimiento. Tiene una gran precisión y permite obtener una medida exacta del perfil del pavimento, generalmente utilizado cuando se miden pocos perfiles. En los proyectos de gran magnitud, en los cuales es necesario la evaluación de la regularidad superficial, es impráctico y de alto costo (ver Figura 3).



**Figura 3**

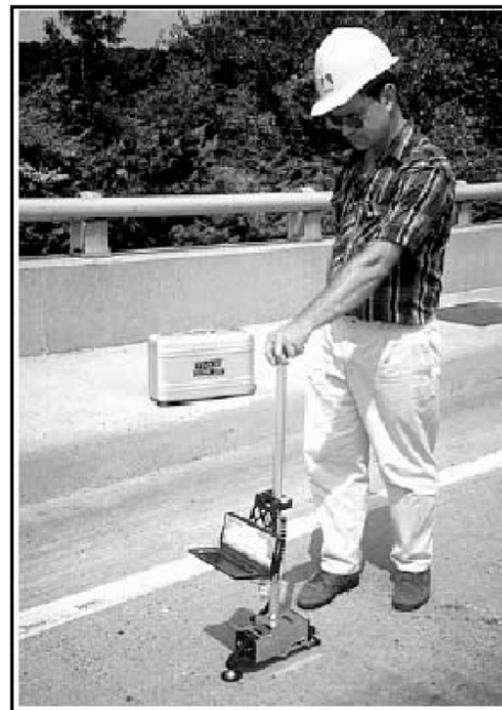
Nivel y mira topográfica

## Dipstick

Los equipos Dipstick pueden usarse para obtener una cantidad relativamente pequeña de medidas del perfil longitudinal del pavimento. 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. El operador conduce el Dipstick sobre una sección de pavimento premarcada, rotando el instrumento alternadamente sobre cada apoyo (ver Figura 4 y Figura 5). Se registran las lecturas secuencialmente mientras el operador recorre la sección. El dispositivo registra de 10 a 15 lecturas por minuto. El software de análisis es capaz de proporcionar un perfil exacto a  $\pm 0.127$  mm ( $\pm 0.005$  pulg). El Dipstick comúnmente es usado para medir un perfil para la calibración de instrumentos más complejos, tal como los equipos tipo respuesta RTRRMS, así mismo para la verificación de resultados obtenidos por los perfilómetros inerciales.

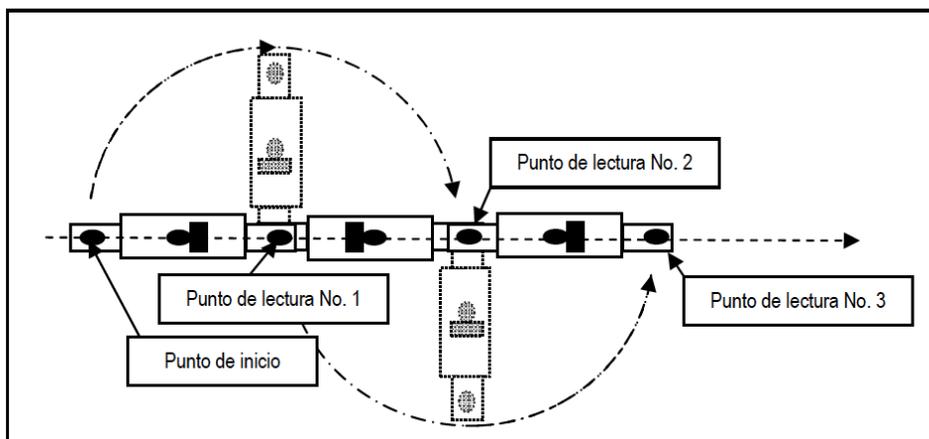
**Figura 4**

Equipo Dipstick



**Figura 5**

Operación de equipo Dipstick



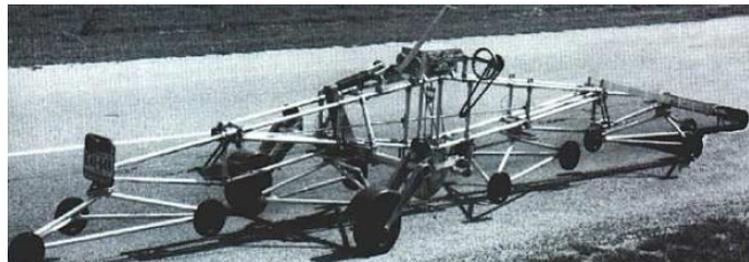
## Perfilógrafos

Los perfilógrafos han estado disponibles durante muchos años y han existido en una variedad de formas, configuraciones y marcas. Dos tipos básicos de perfilógrafos que se han desarrollado, que difieren en la configuración del sistema de ruedas que los soportan, el funcionamiento y procedimientos de medida de los dispositivos, son el perfilógrafo California y el Rainhart (ver Figura 6 y Figura 7 ).



**Figura 6**

Perfilógrafo California (Romero Internacional, S.A de C.V)



**Figura 7**

Perfilógrafo Rainhart (Rainhart Company)

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. Los perfilógrafos pueden calcular desviaciones muy ligeras de la superficie y ondulaciones en aproximadamente 6.0 m (20 pies) en longitud.

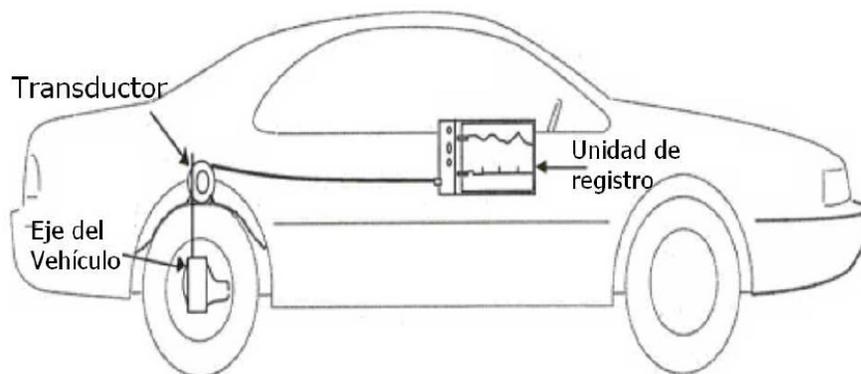
Los perfilógrafos son aparatos relativamente baratos, simples de manejar y mantener, y proveen un perfil de la superficie analizada que los usuarios fácilmente pueden entender. Ambos son operados manualmente por una sola persona, a la velocidad normal de caminado; por esta razón no se usan para obtener la regularidad de una red de carreteras, labor que requiere de alta velocidad.

Su principal uso ha sido en el control de calidad de construcciones, en los cuales se realizan chequeos de los nuevos tramos de pavimentos con defectos y verificar su corrección. Son también muy apropiados para examinar losas de puentes, así como para aquellos trabajos que requieren sólo una distancia corta de perfil.

#### Equipos Tipo Respuesta (RTRRMS)

Por largo años, la mayoría de datos de regularidad de los pavimentos de una red fueron obtenidos con vehículos instrumentados con medidores de las irregularidades de las superficies de rodamiento, llamados sistemas de medición de la regularidad de una carretera tipo respuesta (RTRRMS, por sus siglas del inglés "response-type road roughness measuring system").

Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera, estos dispositivos están montados en un vehículo liviano, o en un remolque especial. Los equipos RTRRMS 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 (ver Figura 8).



**Figura 8**

Componentes de equipos tipo respuesta (Adaptado de "A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness")

Un dispositivo que se ha utilizado comúnmente es el Mays Ride Meter, el cual determina la regularidad de la vía midiendo el desplazamiento entre el soporte del eje y la carrocería del vehículo anfitrión. Por consiguiente, el hecho de que el sistema tipo respuesta dependa de la dinámica del vehículo anfitrión tiene varios efectos no deseados:

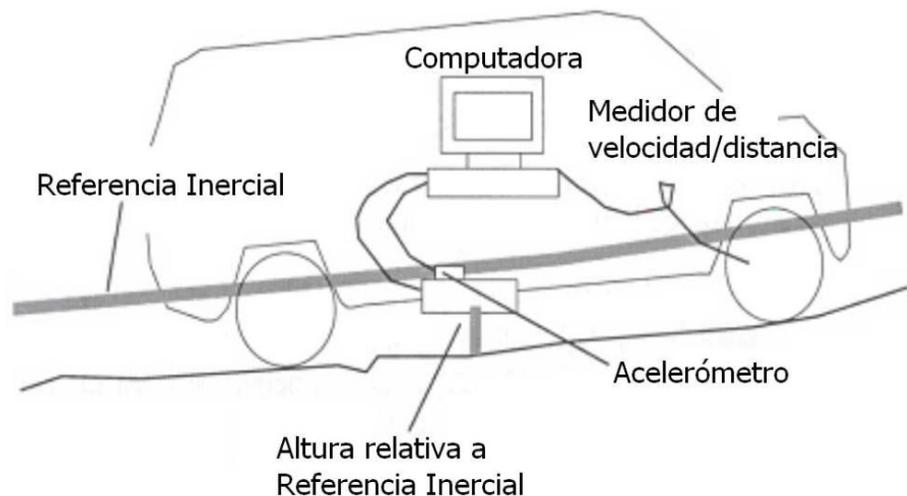
- Las medidas de regularidad no son estables en el tiempo, es decir, las medidas realizadas recientemente con un RTRRMS, no pueden ser comparadas con aquellas mediciones realizadas en años anteriores.
- Las medidas de regularidad no son transportables. Las mediciones realizadas por un RTRRMS que utiliza un determinado sistema son raramente reproducibles por otro.

A pesar de estos y otros problemas asociados con medidores tipo respuesta, han estado funcionando durante los últimos 50 años y aún con el advenimiento de otros perfilógrafos, gran cantidad de agencias de carreteras los siguen usando.

### Perfilómetro Inercial

El perfilómetro inercial es un equipo de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino; concebidos especialmente para el análisis de la regularidad superficial de la carretera, tanto longitudinal como transversal, superando la calidad y precisión a cualquier equipo tradicional.

Estos equipos producen medidas continuas del perfil longitudinal a altas velocidades a través de la creación de una referencia inercial, integrado por acelerómetros colocados en el vehículo los cuales permiten obtener el movimiento vertical del mismo y sensores de “no contacto” (por ejemplo, dispositivos láser infrarrojos) utilizados para medir el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento (ver Figura 9).



**Figura 9**

Componentes de equipos con referencia inercial (Adaptado de "A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness")

Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento. Generan el perfil longitudinal del camino en tiempo real y sobre todo tienen la ventaja de realizar las mediciones a altas velocidades, facilitando la obtención de datos en una determinada vía.

A continuación se resumen las principales características de los equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial (ver Tabla 1).

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

Equipo	Grado de precisión	Implementación	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	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
Perfilómetro inercial	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de res 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

Adaptado de Ventura, J. Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

### Especificaciones de IRI y metodologías empleadas en otros países,

Actualmente en otros países se están llevando a cabo proyectos para afinar más aún el valor del IRI inicial en la construcción de pavimentos. Las investigaciones tienen como objetivo proponer nuevos valores iniciales de IRI para la recepción de pavimentos, proponer acciones de mantenimiento efectivas y recomendar especificaciones para controlar el IRI durante el proceso constructivo. En

Estados Unidos cada estado posee sus propios umbrales de recepción de pavimentos, así como su metodología de evaluación continua de la red vial. En el estado de Georgia, el cual posee las vías con mejor capacidad funcional del país, el 97% de su red vial posee un valor de IRI menor de 1.2 m/km.

A continuación se presentan algunas de las especificaciones de IRI empleadas en otros países, así como el intervalo de medición empleado en cada uno (ver Tabla 2)

**Tabla 2. Especificaciones internacionales de IRI**

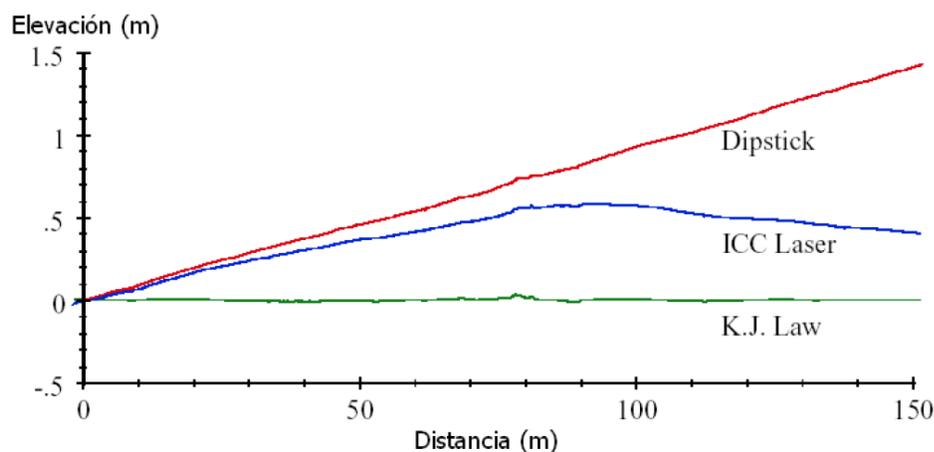
Lugar	Procedimiento general	Requerimientos de IRI según tipo de pavimento o superficie		
		Afalto	Hidráulico	Tratamiento superficial
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos $\leq 2.0$ m/km Promedio Individual $\leq 2.8$ m/km		Promedio de 5 tramos consecutivos $\leq 3.0$ m/km Promedio Individual $\leq 4.0$ m/km
	<b>Recepción de Obra Nueva</b>			
	No se indica el intervalo de medición	IRI $\leq 1.5$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 1.9$ m/km, en el 85% de los datos IRI $\leq 2.3$ m/km, en el 99% de los datos	IRI $\leq 2.0$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 85% de los datos IRI $\leq 2.8$ m/km, en el 99% de los datos	IRI $\leq 2.4$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.9$ m/km, en el 85% de los datos IRI $\leq 3.4$ m/km, en el 99% de los datos
CR-2002	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos $\leq 2.0$ m/km Promedio Individual $\leq 3.0$ m/km		----
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos con un intervalo de medición de 100 m	IRI $\leq 1.5$ m/km, en el 50% de los tramos del proyecto IRI $\leq 2.0$ m/km, en el 80% de los tramos del proyecto IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 100% de los tramos del proyecto		
WisDOT, Wisconsin Estados Unidos	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	IRI m/km < 1.1 < 1.17 < 1.29 < 1.33 < 1.37 < 1.45	Tiempo Pav. nuevo 1 Año 2 Años 3 Años 4 Años 5 Años	----
Suecia	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 200 m	IRI $\leq 1.4$ m/km IRI $\leq 2.4$ m/km		----
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	<b>Camino Rurales</b>			
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI $\leq 3.0$ m/km	----	----
	<b>Vías Interurbanas</b>			
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI $\leq 2.0$ m/km	IRI $\leq 2.5$ m/km	----
Quebec, Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI $\leq 1.2$ m/km, en el 70% de los datos IRI $\leq 1.4$ m/km, en el 100% de los datos	----	----
Eslovenia	<b>Carreteras de alto tránsito</b>			
	IRI obtenido en tramos de 20 m	2.0 $\leq$ IRI $\leq$ 2.6 m/km	----	----
	IRI obtenido en tramos de 100 m	1.2 $\leq$ IRI $\leq$ 1.8 m/km	----	----
	<b>Carreteras de bajo tránsito</b>			
	IRI obtenido en tramos de 20 m	4.0 $\leq$ IRI $\leq$ 4.6 m/km	----	----
	IRI obtenido en tramos de 100 m	3.0 $\leq$ IRI $\leq$ 3.8 m/km	----	----
Portugal	No se indica el intervalo de medición	IRI $\leq 1.5$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 80% de los datos IRI $\leq 3.0$ m/km, en el 90% de los datos	IRI $\leq 2.0$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 75% de los datos IRI $\leq 3.0$ m/km, en el 100% de los datos	----

# CONSIDERACIONES PARA ESTABLECER LA METODOLOGÍA DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI EN COSTA RICA

## Determinación del IRI con diferentes equipos de medición en un tramo particular

La investigación llevada a cabo permitió conocer la forma de obtención del Índice de Regularidad Internacional (IRI), el cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático, en el cual se involucran aspectos de análisis estadístico del perfil y una posterior modelación para medir la rugosidad asociada al perfil del camino.

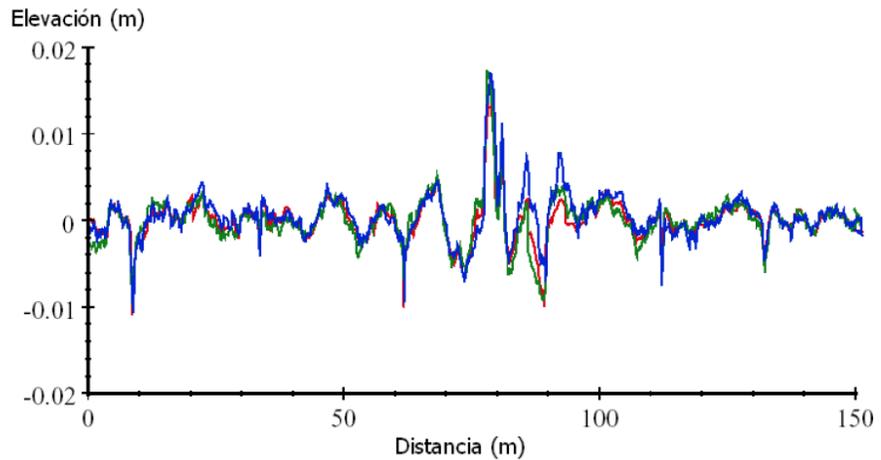
Como se mencionó anteriormente el IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal, obtenidas por cualquier técnica o equipo de medida de perfil longitudinal. Sin embargo, es importante destacar que, graficar las elevaciones versus la distancia longitudinal para un mismo tramo de carretera empleando diferentes equipos no necesariamente implica que los perfiles longitudinales medidos coincidan entre sí. Por ejemplo, la Figura 10 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 la parte del 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 registran 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 10.



**Figura 10**

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. Tal y como se muestra en la Figura 11 los perfiles anteriores después de la aplicación del primer filtro muestran básicamente el mismo patrón.



**Figura 11**

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. Este segundo filtro mide los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino.

Teniendo en consideración estos principios teóricos básicos se procedió a la selección de un tramo de carretera en el cual se pudiera corroborar lo mencionado anteriormente. Se seleccionó un tramo de 230 metros de longitud, ubicado dentro de las Instalaciones Deportivas de la Universidad de Costa Rica, específicamente en el boulevard de la entrada principal (ver Figura 13). En este tramo se realizó la medición del perfil longitudinal utilizando el Dipstick, y la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI) con un perfilómetro inercial RSP Mark III de la marca Dynatest (ver Figura 12)



**Figura 12**

Perfilómetro inercial RSP Mark III. Marca Dynatest (Propiedad del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR))



**Figura 13**

Tramo seleccionado para la medición del IRI (Imagen tomada y adaptada de Google Earth 2008)

Nuevamente, como se puede observar en la Figura 14, los perfiles longitudinales obtenidos utilizando el perfilómetro inercial RSP y el Dipstick muestran dos comportamientos muy diferentes. Sin embargo, después de la aplicación del primer filtro, se puede notar en la Figura 15 que los perfiles filtrados prácticamente son iguales.

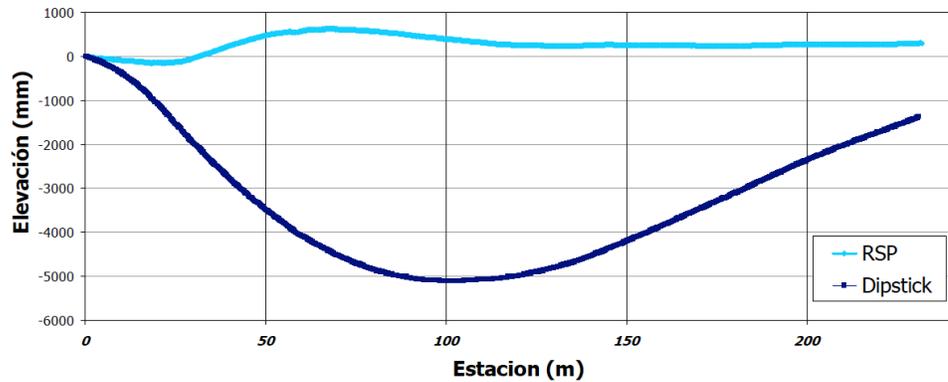


Figura 14

Perfil longitudinal medido con el Dipstick y con el perfilómetro inercial RSP Mark III

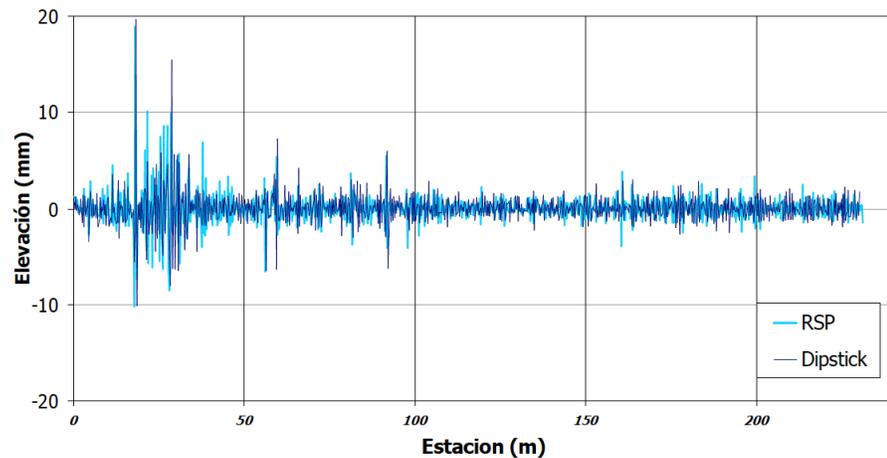
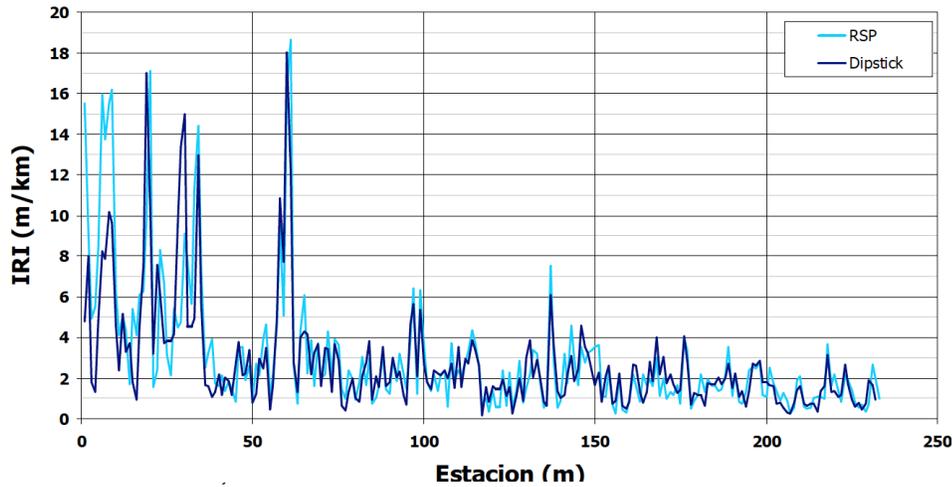


Figura 15

Perfil longitudinal suavizado del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III

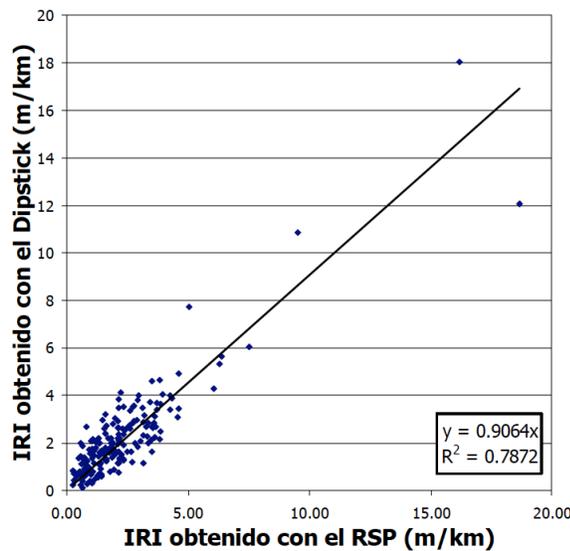
Finalmente a estos perfiles suavizados se les aplicó el segundo filtro de la simulación del cuarto de carro. Lo movimientos verticales del eje respecto a la masa suspendida se calcula y se acumula. El valor en m/km (metros acumulados por la suspensión por kilómetros viajados) es la medida final de la regularidad del camino. De esta manera la Figura 16 y Figura 17, muestran la comparaciones que se hacen entre el IRI obtenido directamente el perfilómetro inercial y el obtenido con el Dipstick. Nótese, que en los primeros 20 m, se observan grandes diferencias entre el IRI obtenido con el perfilómetro

inercial y el Dipstick, lo cual puede ser justificado por lo expuesto anteriormente, de que el modelo del cuarto de coche requiere de aproximadamente 20 m para inicializar sus variables, lo cual constituye una consideración importante y confirma la necesidad de medir el perfil al menos 20 m antes del punto de inicio del tramo, e iniciar a partir de allí el cálculo del IRI, particularmente cuando se hacen mediciones con equipos estáticos o perfilógrafos, puesto que en general los perfilómetros inerciales requieren de al menos 150 metros para alcanzar la velocidad de medición lo que permite a su vez inicializar las variables del modelo antes del punto de inicio.



**Figura 16**

Índice Regularidad Internacional obtenido del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III



**Figura 17**

Comparación entre Índice Regularidad Internacional obtenido del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III

## Variación del IRI según la longitud de evaluación

Como se mencionó anteriormente, cuando se habla del valor del IRI de una carretera es necesario 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 250 m y el valor global de referencia dependerá de cada país o agencia de transporte, tal y como se mostró en Tabla 2. Es interesante calificar una carretera por sus valores cada 100 m, pero a veces también lo es obtener los valores cada 5, 20, 50, 200 metros o por el contrario cada kilómetro o cada tramo objeto de análisis.

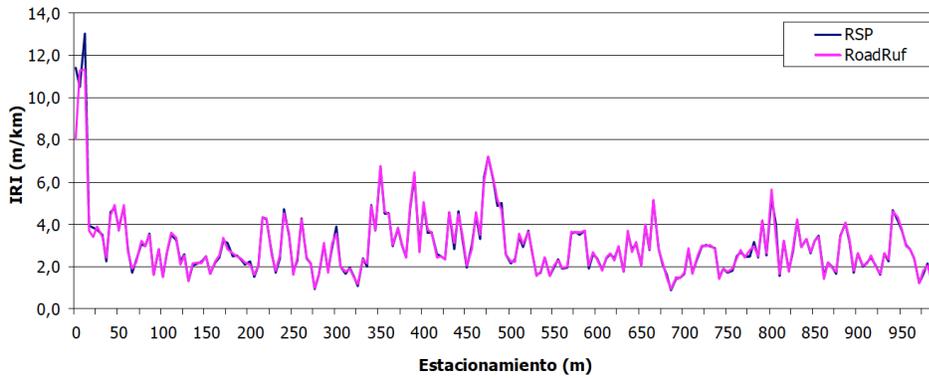
Es necesario recordar que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de irregularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de IRI satisfactorios. Por otra parte la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

Con la finalidad de evaluar lo anterior se consideró de interés analizar un kilómetro de una carretera. Para esto, se realizó la medición del Índice de Regularidad Internacional de un tramo, con un perfilómetro inercial Mark III de la marca Dynatest (ver Figura 12), configurando el ensayo para almacenar: datos de IRI cada 5 metros, y datos del perfil longitudinal cada 25 mm (se selecciona este intervalo pues es la resolución mínima que tiene este equipo en particular, que según la norma ASTM E950 clasifica como un equipo Clase 1). Todos estos resultados fueron guardados en un formato de archivo ERD, esto debido a que este formato almacena directamente los datos de las elevaciones del perfil longitudinal al intervalo solicitado, lo cual permite análisis posteriores del perfil a diferentes intervalos de longitud del cálculo del IRI. El formato ERD fue desarrollado por la División de Investigación en Ingeniería (Engineering Research Division, ERD) del Instituto de Investigaciones de Transportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) para facilitar los análisis automáticos de datos de simulación, medición experimental, entre otros.

Los archivos ERD obtenidos fueron procesados posteriormente con los programas:

- RoadRuf: software que contiene un conjunto integrado de herramientas para interpretación de regularidad de datos del perfil longitudinal, desarrollado por el Instituto de Investigaciones en Transportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) con fondos de la Federal Highway Administration (FHWA).
- PROVAL (Profile Viewing and Analysis): software que permite al usuario observar y analizar perfiles de pavimentos de diferentes maneras. Fue desarrollado por Transtec Group a través de la Federal Highway Administration (FHWA) y de la Long Term Pavement Performance Program (LTPP).

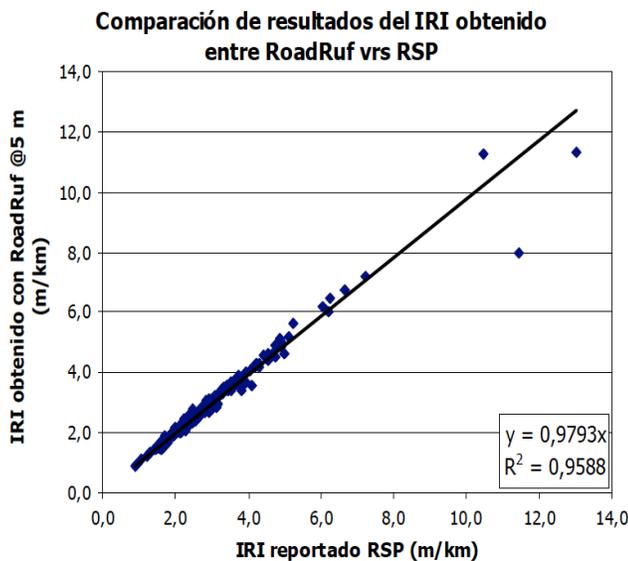
Como primer paso se compararon los resultados reportados directamente con el perfilómetro inercial cada 5 metros con los que se obtienen al procesar los datos de elevaciones almacenados en el archivo ERD en un intervalo cada 5 metros. La Figura 18 y Figura 19, muestran la comparación de los resultados obtenidos.



**Figura 18**

Índice Regularidad Internacional obtenido con el perfilómetro inercial RSP Mark III y con el programa RoadRuf

Como se puede observar en la Figura 18, en los primeros 20 m se observan diferencias entre los valores de IRI obtenidos por ambos métodos, lo cual nuevamente confirma que se requiere de aproximadamente 20 m para inicializar las variables del método de cálculo del IRI. Finalmente, una vez que se han inicializado las variables se puede observar la correspondencia de los datos restantes, lo cual es más evidente en la Figura 19, en la cual se hace la comparación entre los resultados obtenidos. En este caso se obtiene que la ecuación de la recta de mejor ajuste tiene una pendiente de 0.9793 con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.9588$ ; donde, sería de esperar una pendiente y coeficiente de correlación igual al valor de la unidad, sin embargo ambos valores son muy altos y cercanos a 1, lo que confirma la validez de los resultados obtenidos de ambas maneras.



**Figura 19**

Comparación de resultados de IRI obtenido entre el perfilómetro inercial RSP Mark III y con el programa RoadRuf

Como siguiente paso del análisis se procedió a utilizar los datos obtenidos con el perfilómetro inercial cada 5 metros; en esta ocasión se usaron estos valores y se promediaron los resultados a diferentes intervalos, por ejemplo 20, 50, 100 y 200 metros. Estos resultados fueron comparados con los que se obtienen al procesar los datos de elevaciones almacenados en el archivo ERD a los intervalos de 20, 50, 100 y 200 metros, respectivamente. La Tabla 3 y la Figura 20 muestra los resultados de IRI

**Tabla 3. Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación**

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos							
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m			
0	5	11.4	9.7	6.1	4.5	3.5	8.0	8.6	5.7	4.3	3.4			
5	10	10.5					11.3							
10	15	13.0					11.3							
15	20	4.0					3.7							
20	25	3.8	3.3				3.4	4.5				3.4	3.3	2.9
25	30	3.7					3.9							
30	35	3.5					3.4							
35	40	2.2	2.5											
40	45	4.6	4.5				2.9	4.4				2.7	2.4	
45	50	4.8						4.9						
50	55	3.8		3.7	2.7									
55	60	4.8	4.9											
60	65	2.8	2.7	2.4										
65	70	1.7	2.5		1.9	2.7								
70	75	2.3			2.2									
75	80	3.1			3.2									
80	85	3.0			2.9									
85	90	3.6	2.7		3.5	2.4								
90	95	1.6			1.6		2.8							
95	100	2.8			2.8			2.8						
100	105	1.5	1.5		2.8									
105	110	2.7	2.7						2.4					
110	115	3.5	3.6	2.0										
115	120	3.3	3.4				2.1							
120	125	2.3	2.1		2.1									
125	130	2.6	2.5					2.7						
130	135	1.3	1.3	2.5										
135	140	2.0	2.1			2.7								
140	145	2.1	2.2		2.4									
145	150	2.2	2.2				2.7							
150	155	2.5	2.5	2.4										
155	160	1.7	1.7			2.5								
160	165	2.2	2.2		2.4									
165	170	2.4	2.5				2.7							
170	175	3.2	3.4	2.5										
175	180	3.1	2.8			2.7								
180	185	2.5	2.6		2.4									
185	190	2.5	2.5				2.7							
190	195	2.4	2.4	2.5										
195	200	2.1	2.2											

obtenidos cuando se realizan variaciones en la longitud de evaluación y la Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24 muestran las comparaciones entre los resultados.

**Tabla 3 (cont). Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación**

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos				
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m
200	205	2.2	2.5	2.9	2.6	3.0	2.1	2.5	2.9	2.6	3.0
205	210	1.5					1.6				
210	215	2.0					2.0				
215	220	4.3					4.3				
220	225	4.2	4.3				2.8				
225	230	2.6	2.5								
230	235	1.7	1.8								
235	240	2.4	2.5								
240	245	4.7	4.5	3.0							
245	250	3.4	3.6								
250	255	1.7	1.6								
255	260	2.3	2.4								
260	265	4.3	4.2	2.4			2.3				
265	270	2.4	2.4								
270	275	2.1	2.1								
275	280	0.9	1.0								
280	285	1.6	1.6	2.4							
285	290	3.0	3.1								
290	295	1.8	1.7								
295	300	2.9	3.1								
300	305	3.9	3.6	2.3	3.0						
305	310	2.0	2.0								
310	315	1.7	1.8								
315	320	1.9	1.9								
320	325	1.6	1.5	1.8		2.5					
325	330	1.1	1.1								
330	335	2.4	2.3								
335	340	2.0	2.2								
340	345	4.9	4.9	5.0			3.4				
345	350	3.7	3.7								
350	355	6.7	6.8								
355	360	4.5	4.6								
360	365	4.5	4.5	3.6		4.2					
365	370	3.0	3.0								
370	375	3.8	3.9								
375	380	3.0	3.0								
380	385	2.4	2.4	4.1							
385	390	4.8	4.9								
390	395	6.2	6.4								
395	400	2.9	2.7								

Tabla 3 (cont). Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos																								
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Daca 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Daca 100 m	Cada 200 m																				
400	405	4.9	3.7	3.5	4.0	3.3	5.0	3.7	3.5	4.0	3.3																				
405	410	3.6					3.7																								
410	415	3.6					3.6																								
415	420	2.6					2.4																								
420	425	2.5	2.5				3.1																								
425	430	2.3	2.3																												
430	435	4.6	4.6																												
435	440	2.8	3.1																												
440	445	4.6	4.5	3.2																											
445	450	3.3	3.5																												
450	455	1.9	2.0																												
455	460	3.0	2.8																												
460	465	4.4	5.3	4.5			4.0	3.3	4.6			5.3	4.5	4.0	3.3																
465	470	3.3							3.5																						
470	475	6.2							6.0																						
475	480	7.2							7.2																						
480	485	6.1	4.6		4.5				4.0	3.3		6.2				4.6	4.5	4.0	3.3												
485	490	4.9										5.1																			
490	495	5.0										4.7																			
495	500	2.6										2.6																			
500	505	2.2	2.7	2.5								4.0	3.3			2.2				2.8	2.5	4.0	3.3								
505	510	2.4														2.3															
510	515	3.4														3.6															
515	520	2.9														3.1															
520	525	3.7	2.4		2.5											4.0	3.3			3.6				2.4	2.5	4.0	3.3				
525	530	2.6																		2.7											
530	535	1.6																		1.6											
535	540	1.7																		1.8											
540	545	2.5	2.1	2.5			4.0							3.3						2.4	2.1			2.5				4.0	3.3		
545	550	1.6																		1.6											
550	555	1.9																		2.1											
555	560	2.3																		2.3											
560	565	1.9	2.8		2.7	4.0			3.3		1.9							2.8		2.8	4.0				3.3						
565	570	2.0									2.0																				
570	575	3.6									3.7																				
575	580	3.6									3.6																				
580	585	3.5	2.9	2.7							4.0	3.3						3.6				3.0		2.8						4.0	3.3
585	590	3.7																3.7													
590	595	1.9																2.0													
595	600	2.6																2.7													

Tabla 3 (cont). Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos					
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	
600	605	2.4	2.3	2.6	2.5	2.5	2.3	2.3	2.6	2.5	2.5	
605	610	1.9					1.8					
610	615	2.4					2.4					
615	620	2.6					2.6					
620	625	2.4	2.6				2.3	2.7				2.3
625	630	2.9					3.0					
630	635	1.7					1.7					
635	640	3.5					3.7					
640	645	2.8	3.0				2.7	3.0				2.7
645	650	3.0					3.1					
650	655	2.1		2.0								
655	660	3.9	3.2	2.4	2.5	4.0	3.2	2.4				
660	665	2.8				2.8						
665	670	5.1				5.2						
670	675	2.8				2.8						
675	680	2.1	2.2			1.3	2.5		1.3			
680	685	1.6	1.5									
685	690	0.9	0.9									
690	795	1.4	1.5									
795	700	1.5	1.5			2.2			2.5	2.2		
700	705	1.7	1.7									
705	710	2.8	2.9									
710	715	1.7	1.7									
715	720	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4						
720	725	2.9						2.9				
725	730	3.0					3.0					
730	735	3.0					3.0					
735	740	2.9	1.7	2.5	2.5	1.8						
740	745	1.4					1.4					
745	750	1.9					1.9					
750	755	1.7	2.5			2.6	2.6	2.6				
755	760	1.8							1.7			
760	765	2.5							1.9			
765	770	2.7							2.4			
770	775	2.5	.6			3.1	2.6	3.1				
775	780	2.5							2.8			
780	785	3.2							2.5			
785	790	2.4		2.9								
790	795	4.2	3.1	3.1	3.1	3.1						
795	800	2.5					4.2					
							2.6					

Tabla 3 (cont). Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos									
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Daca 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Daca 100 m	Cada 200 m					
800	805	5.2	3.5	3.2	2.9	2.7	5.6	35	3.2	2.9	2.7					
805	810	4.1					3.6									
810	815	1.6					1.6									
815	820	3.2					3.2									
820	825	1.8	2.9				1.7	2.9				1.7				
825	830	2.7					2.9									
830	835	4.2					4.2									
835	840	2.9					2.9									
840	845	3.3	3.1	2.6	2.5	2.7	3.3	3.2	2.9	2.7						
845	850	2.6					2.7									
850	855	3.2					3.2									
855	860	3.4					3.4									
860	865	1.6	1.9				2.6	2.5			2.7	1.4	1.8	2.9	2.7	
865	870	2.2										2.2				
870	875	2.0										2.0				
875	880	1.7										1.7				
880	885	3.4	3.1	2.6	2.5	2.7			3.4	3.1		2.9	2.7			
885	890	4.0							4.1							
890	895	3.2							3.3							
895	900	1.7							1.8							
900	905	2.6	2.3				2.7	2.5	2.7	2.6	2.3			2.9	2.7	
905	910	2.0								2.0						
910	915	2.2								2.1						
915	920	2.4								2.5						
920	925	2.1	2.1	2.7	2.5	2.7				2.0	2.2	2.9	2.7			
925	930	1.6								1.7						
930	935	2.6								2.6						
935	940	2.3								2.4						
940	945	4.7	3.9				2.3	2.5	2.7	4.6	3.9			2.9	2.7	
945	950	4.2								4.3						
950	955	3.7								3.7						
955	960	3.0								3.0						
960	965	2.8	2.0	2.3	2.5	2.7				2.8	2.1	2.9	2.7			
965	970	2.4								2.4						
970	975	1.2								1.2						
975	980	1.7								1.8						
980	985	2.1	2.0				2.3	2.5	2.7	2.0	2.0			2.9	2.7	
985	990	1.3								1.3						
990	995	1.8								1.9						
995	1000	2.8								2.7						
Media		2.98	2.98	2.98	2.98	2.98				2.97	2.97	2.97	2.97			2.97
Desviación		1.56	1.28	0.96	0.74	0.40				1.45	1.16	0.88	0.69			0.37
Coef. de variación		0.52	0.43	0.32	0.25	0.14				0.49	0.39	0.30	0.23			0.13
IRI característico		4.54	4.26	3.94	3.72	3.39				4.42	4.13	3.85	3.66			3.34

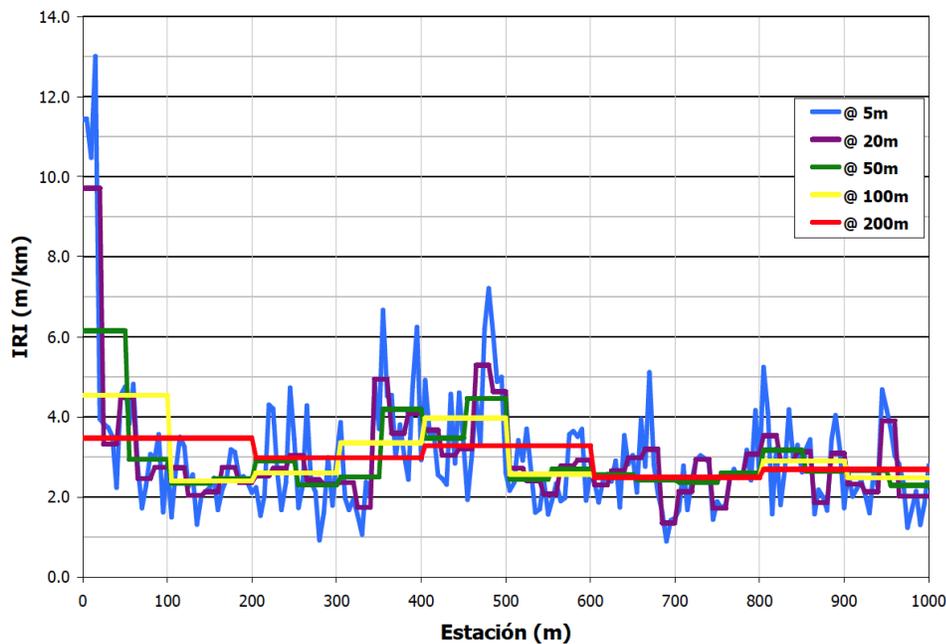


Figura 20

Variación en el valor del IRI según la longitud de evaluación

Como se puede observar de la tabla y de la figura anterior 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 evolución es igual a 5 m. Por su parte al calcular el valor del IRI en un 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.

Además, los resultados de la media y la desviación estándar mostrados al final de la tabla permiten comprobar que la media estadística para todo el tramo se mantiene y la desviación típica disminuye según se va aumentando la longitud de evaluación. Como se observa la desviación típica es de 1.56 cuando se calcula con datos cada 5 metros y se reduce a 0.40 cuando se hace con datos cada 200 metros. Lo mismo sucede con el coeficiente de variación o cociente entre la desviación y la media, los cuales se redondean al aumentar la longitud de evaluación.

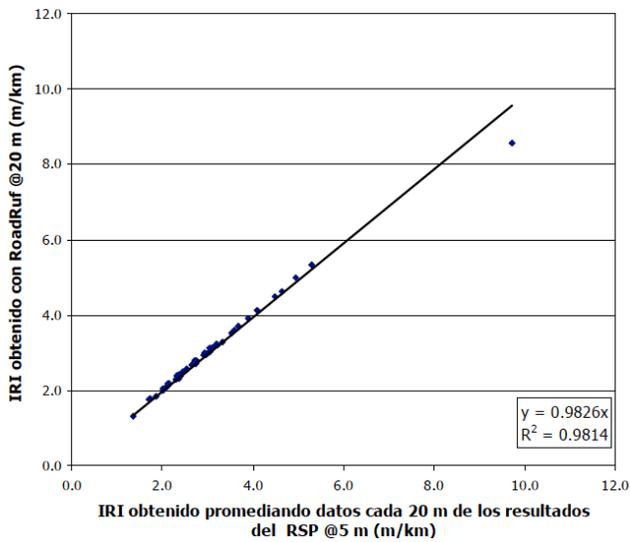


Figura 21

Comparación de resultados de IRI obtenido cada 20 m

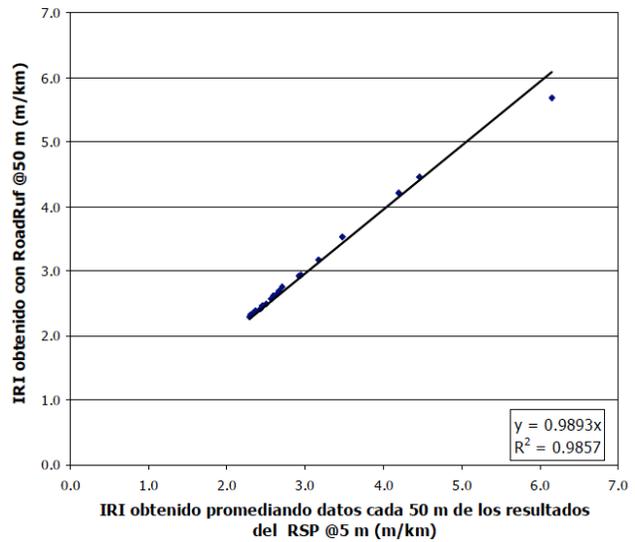


Figura 22

Comparación de resultados de IRI obtenido cada 50 m

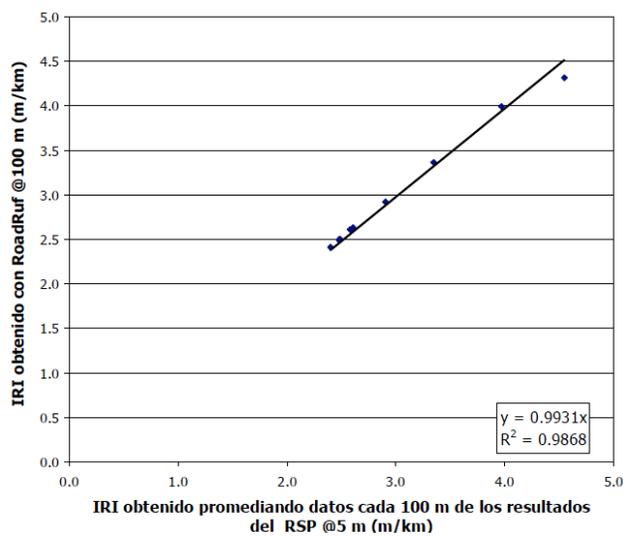


Figura 23

Comparación de resultados de IRI obtenido cada 100 m

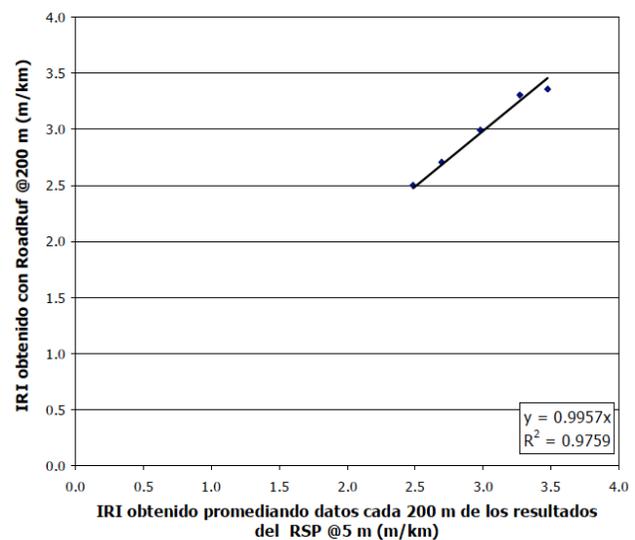


Figura 24

Comparación de resultados de IRI obtenido cada 200 m

Cuando hacemos las comparaciones entre los resultados de simplemente promediar los resultados obtenidos con el RSP a los intervalos de 20, 50, 100 y 200 metros, con los resultados obtenidos con el programa RoadRuf al procesar los datos de elevaciones a los intervalos de 20, 50, 100 y 200 metros, se puede observar que existe una muy buena correspondencia entre los resultados, cuyos coeficientes de correlación,  $R^2$  son muy altos de aproximadamente 0.98 en todos los casos, lo cual

es una muestra de dos aspectos muy importantes en lo que respecta al cálculo del IRI; aspectos de los cuales ya se ha hecho mención anteriormente, tales como:

- El IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen. De esta manera es posible promediar los valores de IRI de longitudes de evaluación más pequeños para obtener el valor de IRI en longitudes de evaluación mayores.
- Cuando se cuenta con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal, es posible determinar el IRI a cualquier intervalo de longitud de evaluación, empleando programas adecuados como el RoadRuf o PROVAL, ya que el IRI es el resultado de la aplicación de un modelo matemático a la línea de perfil.

## Efecto de singularidades en la medición y cálculo del IRI

La correcta terminación 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.

Como se mencionó anteriormente el IRI es un indicador estadístico de la irregularidad superficial de pavimento y representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta,  $IRI = 0$ ) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

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.

Debido a que 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. La metodología de evaluación para determinar la regularidad IRI de los pavimentos LNV 107-2000, empleada por la Dirección de Vialidad en Chile define a una singularidad como:

*“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”*

De igual manera, esta misma metodología define un área de influencia asociada a la singularidad, como sigue:

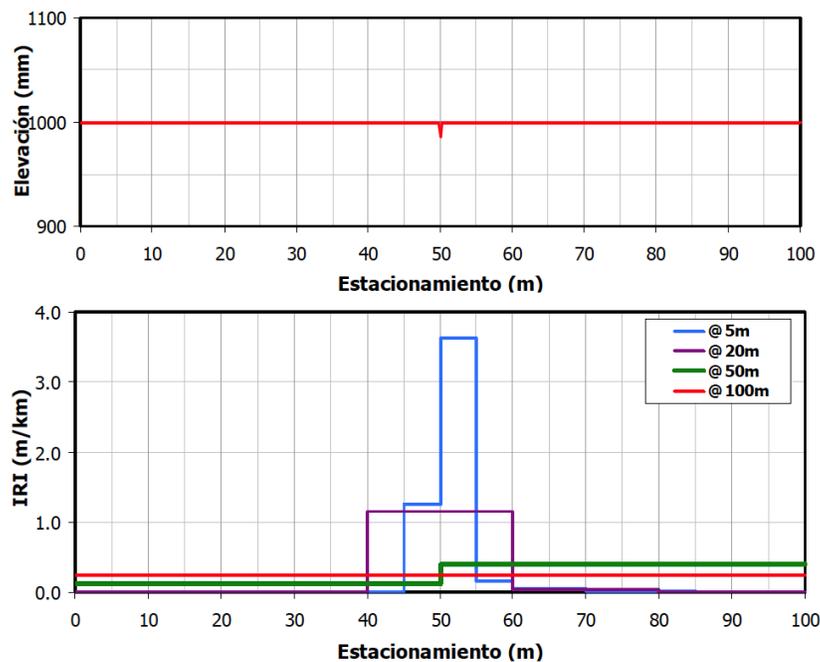
*“El largo de una singularidad corresponde a la suma de su longitud más su área de influencia que son 40 m hacia delante en el sentido de la medición”*

Tomando en consideración estos aspectos, se procedió a proponer y simular perfiles longitudinales teóricos que fueron guardados en formato ERD y procesarlos posteriormente con los programas

RoadRuf y PROVAL. Para cada uno de los perfiles propuestos se le incluyeron singularidades posibles que pueden presentarse en las carreteras nacionales, y de esta manera calcular el IRI del tramo y evaluar la magnitud en el valor del IRI de la singularidad y su área de influencia; así como también evaluar como se refleja la singularidad en la longitud de evaluación.

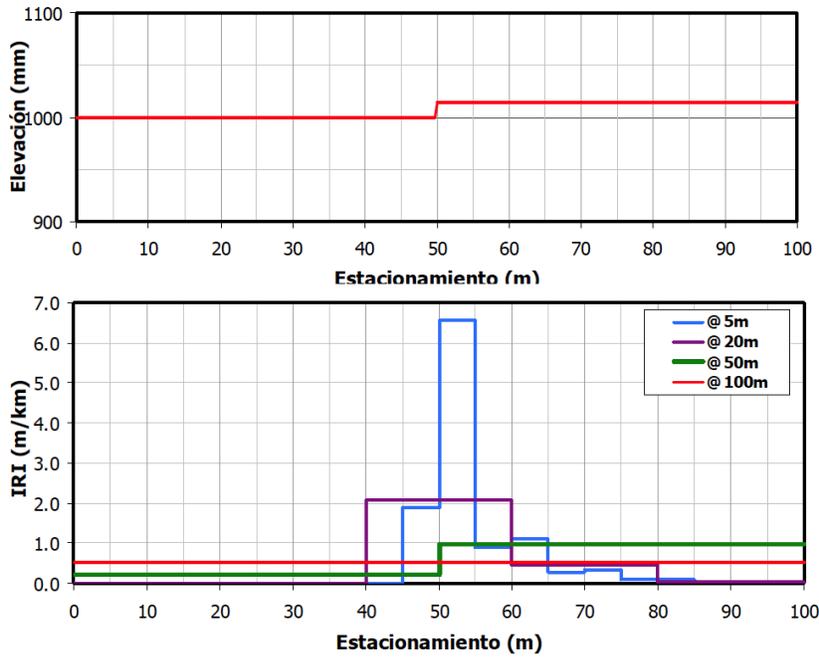
Como se observa en la Figura 25 y Figura 26, se realizó la simulación del efecto de juntas de construcción con acabados deficientes. En el primer caso, se supuso una junta entre dos tramos consecutivos de 50 metros cada uno, en la cual en una longitud de 5 cm se produjo una depresión de 1.5 cm de profundidad. En el segundo caso se supuso que entre dos tramos consecutivos de 50 metros cada uno, existía una diferencia de elevación de 1.5 cm, con una transición de solamente 2.5 cm, producto de problemas constructivos en la conformación de la junta de construcción.

En ambos casos se tiene singularidades muy puntuales en el tramo simulado que generan un incremento en el valor del IRI. Sin embargo, este incremento es aún más evidente cuando se utilizan intervalos o longitudes de evaluación más cortos, así por ejemplo un intervalo de longitud de evaluación cada 5 metros permite identificar claramente el punto donde se encuentra la singularidad; sin embargo, un intervalo de medición tan pequeño definirá valores de IRI relativamente altos para particularidades tan pequeñas como ésta. Es evidente también, que conforme aumentamos la longitud de evaluación, los resultados se suavizan por lo que se obtienen valores de IRI satisfactorios, además de que se imposibilita determinar el sitio donde se presentan las particularidades. Finalmente, la Figura 25 y Figura 26, muestran claramente el área de influencia de la singularidad, la cual corresponde a 40 metros después del sitio donde se presentó la particularidad, fenómeno que deberá considerarse cuando se define la longitud de evaluación del IRI en el caso de la definición de una especificación.



**Figura 25**

Simulación de una junta de construcción (ejemplo)



**Figura 26**

Simulación de una junta de construcción (ejemplo 2)

En el caso de la Figura 27 y Figura 28, se realizó en el primer caso la simulación del efecto de un actividad de bacheo con un mal acabado de aproximadamente 10 metros de longitud, en el cual existe una sobrelevación respecto a la superficie del pavimento de 2.5 cm. En el segundo caso se realiza la simulación de una depresión o hueco de 2.5 cm de profundidad y 10 m de longitud.

Como primera observación importante, se puede notar que los valores de IRI para cualquier intervalo o longitud de evaluación para ambos casos son exactamente iguales. Esto debido a que el IRI es un índice que mide los desplazamientos de los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino, independientemente de si se trata de una sobrelevación o no. Nuevamente las singularidades generan un incremento en el valor del IRI, el cual es más evidente cuando se utilizan intervalos o longitudes de evaluación más cortos. Otra vez, conforme aumenta la longitud de evaluación, los resultados de los valores de IRI se reducen e imposibilitan determinar el sitio donde se presentan las particularidades. En este caso es más sencillo ver los 40 metros del área de influencia de la singularidad después del sitio donde se presentó la particularidad, especialmente cuando se emplean intervalos o longitud de evaluación pequeños. Finalmente, se notan valores de IRI superiores a 12 m/km (que según la escala del Banco Mundial corresponde a un camino intransitable), cuando se emplean longitudes de evaluación muy pequeños.

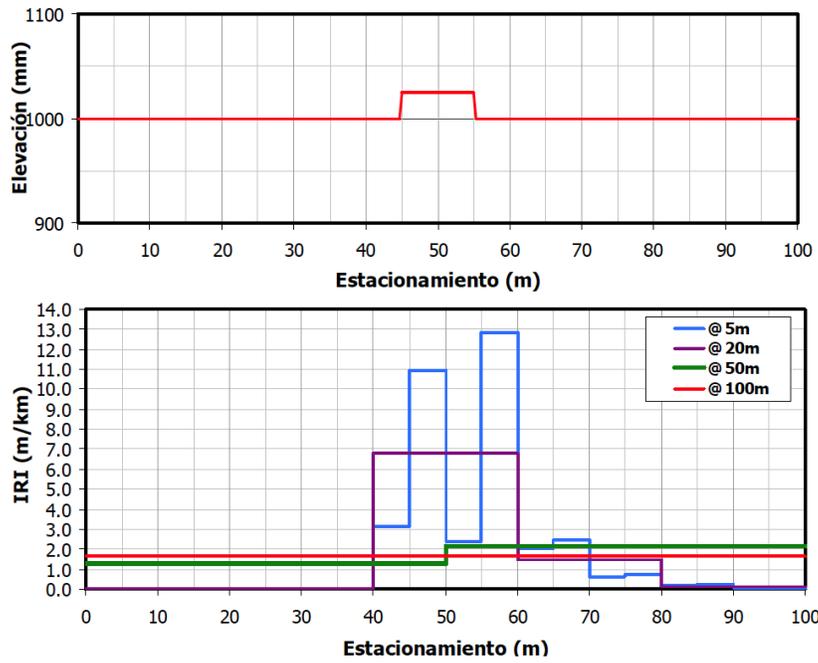


Figura 27

Simulación de un bache de 10 m de longitud mal cerrado

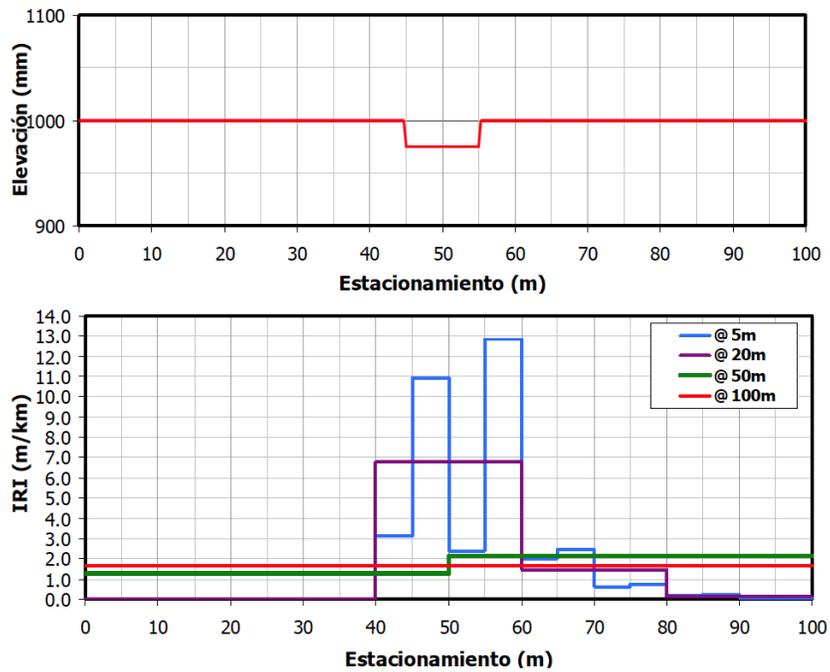
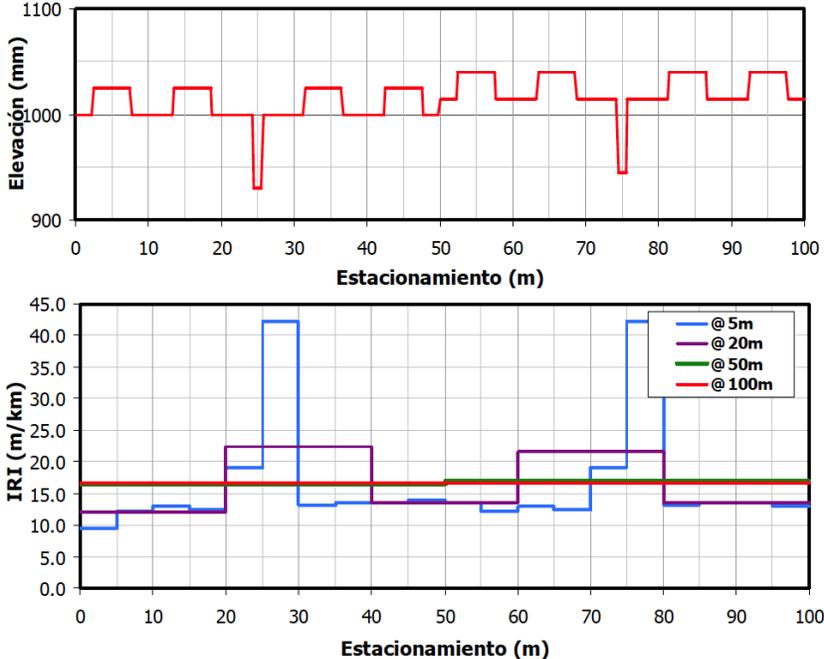


Figura 28

Simulación de un hueco de 2.5 cm de profundidad y 10 m de longitud

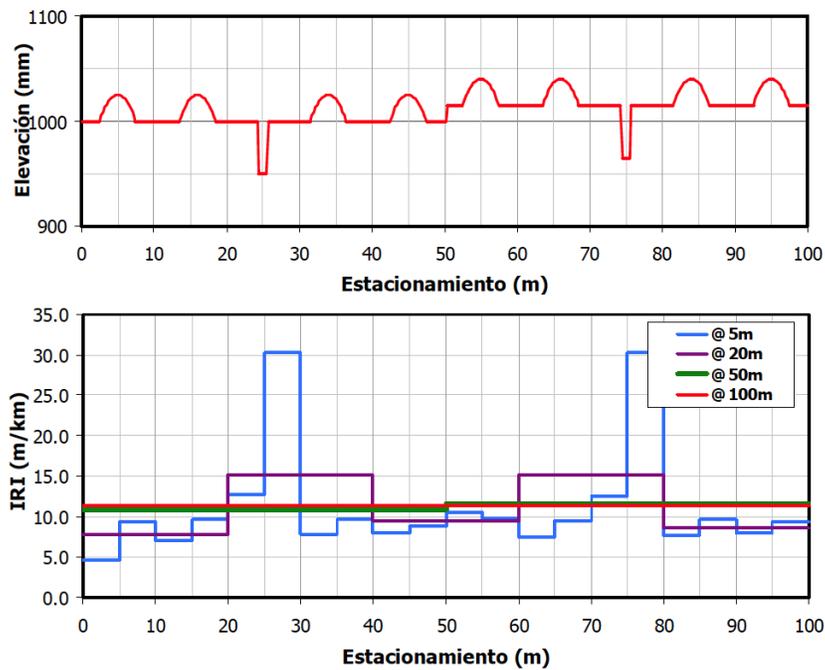
La Figura 29 y la Figura 30 simulan la combinación de actividades bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes, con la finalidad de evaluar la influencia que tendrán en el valor del IRI. En ambos casos se considera el efecto de actividades de bacheo con malos acabados de aproximadamente 5 metros de longitud, en el cual existe una sobrelevación respecto a la superficie del pavimento de 2.5 cm. En el primer caso, se consideran baches perfectamente planos en su superficie y en el segundo caso se considera una forma más “real” de la superficie del bache con cierta concavidad del mismo. Las juntas de construcción son similares a las que se muestran en la Figura 26 y las dimensiones de los huecos son las que se muestran en las figuras.

Nuevamente las singularidades generan un incremento en el valor del IRI. En el caso de intervalos de evaluación cortos los valores de IRI son extremadamente altos, incluso superando valores de IRI de 40 m/km. Se notan valores de IRI superiores o cercanos 12 m/km para todas las longitudes de evaluación, que según la escala del Banco Mundial corresponde a un camino intransitable, lo que denota condiciones de confort y seguridad inadecuadas, además se esperarían deterioros prematuros y mayores costos de mantenimiento.



**Figura 29**

Simulación de combinación de bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes (ejemplo 1)



**Figura 30**

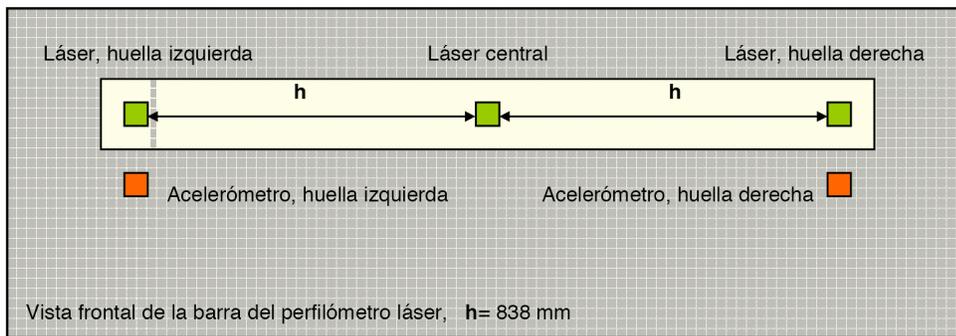
Simulación de combinación de bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes (ejemplo 2)

## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN COSTA RICA

### Procedimiento utilizado en Costa Rica para la medición del IRI

En Costa Rica, la medición de la regularidad de los pavimentos, para efectos de control de calidad y recepción de algunos proyectos de la infraestructura vial se realiza actualmente a través del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Sin embargo, las mayores aplicaciones del IRI que se han venido realizando son las campañas de Evaluación de la Red Vial Nacional 2004, 2006 y actualmente la 2008. Dichas campañas se han venido realizando con un perfilómetro inercial láser, marca Dynatest, modelo 5051 Mark III Road Surface Profiler (RSP), propiedad del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR); con el cual se puede recolectar información del estado de la carretera con gran exactitud en las mediciones de perfil, tanto longitudinal como transversal. El RSP obtiene estas mediciones, las despliega y almacena; así como también calcula los índices de regularidad superficial, medición de ahuellamiento y registra la velocidad de operación del equipo (ver Figura 12)

El RSP tiene instalados tres dispositivos láser localizados, uno en la línea central de la barra del RSP y los otros dos en los extremos, que corresponden a cada una de las huellas del vehículo, como se aprecia en la Figura 31. Estos dispositivos miden, por triangulación, la distancia entre la barra del RSP y la carretera. Los láser ubicados en los extremos, se encuentran a 838 mm del centro de la barra. En los extremos, el RSP posee dos acelerómetros que se encargan de convertir la aceleración vertical en una medida de referencia inercial.



**Figura 31**

Posición de sensores en la barra del perfilómetro láser

El RSP tiene un dispositivo de medición de distancia (distance measurement, DMI) con resolución de 1 mm, con el que se establecen las mediciones longitudinales ó intervalos de medición (como por ejemplo: @ 100 m, @ 200 m, etc.).

El proceso de medición del Índice de Regularidad Internacional se basa en las Normas de ASTM E 950 "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference", la cual abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros; y la Norma ASTM E 1170 "Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces", la cual abarca el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera.

En el caso de la Evaluación de Red Vial Nacional los resultados del IRI están dados en tramos de 100 metros de longitud, y se reporta el valor promedio del IRI para los sensores izquierdo y derecho del perfilómetro láser; esto debido a que estos sensores son los que toman los datos de la huella de rodamiento de los vehículos en la carretera. De esta manera se reporta el Índice de Regularidad Promedio (Mean Roughness Index, MRI) el cual según se había mencionado anteriormente, constituye el IRI promedio de las huellas izquierda y derecha de un vehículo; y se expresa en unidades de mm/m o m/km, tal y como se puede encontrar en lo indicado en la especificación AASHTO PP37-02 "Standard Practice for Quantifying Roughness of Pavements".

En el caso de proyectos nuevos el CR-2002, "Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes en Costa Rica", establecía que:

*El control de IRI (índice de rugosidad internacional) se realizará por sectores homogéneos, correspondientes a un mismo tipo de superficie de ruedo. No se considerarán puentes, vados u otras singularidades que afecten la medición. Asimismo, no se exigirá este control para carpetas sobre pavimentos existentes, excepto cuando en el proyecto se establezcan cotas de rasante para esos recapados, así como en vías urbanas y en vías con una velocidad de diseño menor o igual a 60 Km/h, y en curvas con radios menores o iguales a 300 m. Se*

*medirá en forma continua en tramos de 200 metros, o fracción, en caso de que el último tramo de un sector homogéneo no alcance a los 200 m, y se informará el IRI (m/Km) con un decimal.*

Cabe destacar que este manual no tiene carácter oficial a la fecha, pero por constituir uno de los primeros avances en la generación de una normativa nacional se hace importante su consideración en el presente estudio.

A continuación se mencionan algunos proyectos en los cuales se ha solicitado el cumplimiento de del Índice de Regularidad Internacional:

- Ruta 18. Sección Limonal – Tempisque: El valor máximo aceptable será de 2.5 m/km una vez concluida la operación de Reconstrucción y Mejoramiento.
- Ruta 21. Sección Pavones-Intersección Corozal. San Rita-Jicaral-Lepanto-Playa Naranjo II: El valor máximo aceptable será de 2.5 m/km una vez concluida la operación de Mejoramiento.
- Ruta 23. Sección Interamericana-Caldera: Corresponde a lo expresado en el CR-2002, en donde la evaluación del IRI se realizará tomando el promedio de los valores de cinco tramos consecutivos. Se entenderá que la superficie del pavimento tiene una rugosidad aceptable si todos los promedios consecutivos de cinco valores de IRI tienen un valor igual o inferior a 2,0 m/km, y ninguno de los valores individuales supera 3,0 m/km.

### **Propuesta para la determinación del IRI en Costa Rica**

Como se ha mencionado anteriormente el IRI es un indicador independiente del equipo de medida. Depende únicamente de la medida de los datos de entrada de la elevación perfil longitudinal. Al existir diferentes equipos para la medición del perfil longitudinal, deberá seguirse los procedimientos y recomendaciones dadas por el fabricante. A continuación se mencionan algunas de normas relacionadas con la determinación de la regularidad de los pavimentos:

- ASTM E 1170 “Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces”
- ASTM E 950 “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference”
- ASTM 867 “Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems”
- ASTM E 1364 “Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method”
- ASTM E 1274 “Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph”
- ASTM E 1926 “Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements”

- ASTM E 1082 “Standard Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness”
- AASHTO PP 37-02 “Quantifying Roughness of Pavements”

De igual manera para la medición de la regularidad debe considerarse lo establecido en el Apéndice E del Highway Performance Monitoring System Field Manual (“Measuring Pavement Roughness”) del Office of Highway Policy Information de la FHWA, el cual menciona que los valores de IRI deben ser obtenidos cuando existan buenas condiciones climáticas, preferiblemente cuando la superficie de la carretera se encuentre seca. Así mismo, la medición deberá determinarse en sectores homogéneos, que corresponden a un pavimento de estructuración uniforme y que no es dividido por puentes, líneas férreas, cruces de calles y otros que puedan alterar el perfil longitudinal del camino e incrementar el valor del IRI.

Al permitirse el uso de cualquier tipo de equipo se sugiere imitar el ejemplo de la provincia de Ontario, Canadá, en el cual la Administración ha establecido un circuito de tramos de control, donde se ha realizado la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Para los cuales cualquier contratista deberá comparar y verificar sus resultados para certificar su equipo de medición como apto para su uso en la medición del IRI. Los procedimientos de verificación son similares a los que se realizaron en la presente investigación, lo cual puede convertirse en una guía preliminar para su implementación en Costa Rica.

De igual manera, se sugiere que los resultados obtenidos de las cotas de elevación del perfil longitudinal sean tomados en intervalos de 250 mm y guardados en un archivo en formato ERD. Esto debido a que, estos archivos pueden ser analizados con programas tales como el RoadRuf o el PROVAL; los cuales permiten realizar análisis posteriores de los resultados obtenidos; por ejemplo usando otros intervalos o longitudes de evaluación, y de ser necesario permite analizar singularidades que podrían darse en el tramo evaluado.

Debe considerarse también la inicialización de las variables del modelo del cuarto de coche, por lo tanto es necesario 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 reportar los resultados de la evaluación se sugiere seguir la norma AASHTO PP37-02 “Standard Practice for Quantifying Roughness of Pavements”, en la cual se reporta el valor promedio del IRI para los sensores izquierdo y derecho del perfilómetro láser, que corresponden a las huellas de las llantas del vehículo, reportando de esta manera el Índice de Regularidad Promedio (Mean Roughness Index, MRI), los resultados deberán expresarse en unidades de m/km con al menos un decimal.

En el caso de evaluaciones a nivel de red, se sugiere que el intervalo o longitud de evaluación sea el expresado en la norma AASHTO PP 37-02, el cual corresponde a 100 m, acorde con muchas de las especificaciones internacionales mostradas en la Tabla 2. En el caso de evaluación a nivel de proyecto, como criterio de aceptación de obras, tomando en consideración lo discutido para las figuras 20, 25, 26, 27, 28, 29 y 30, además de lo referente al área de influencia de una singularidad,

se sugiere emplear una longitud de evaluación de 50 m. Intervalo que se considera adecuado, ya que permite identificar más claramente los tramos o puntos que presenta problemas de regularidad o que presentan alguna particularidad. Además, como se puede ver en estas figuras, cuando existe mucha dispersión en los valores de IRI, los intervalos de medición mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo valores de IRI satisfactorios. Por otro lado en el caso, en que la dispersión de los resultados es bajo, los resultados de la evaluación en intervalos de 50, 100 o 200 m son muy similares entre sí, lo que permitiría realizar comparaciones con resultados obtenidos en evaluaciones a nivel de red por ejemplo. Finalmente, es posible obtener valores de IRI a longitudes de evaluación mayores simplemente promediando los resultados del IRI calculados con longitudes de evaluación menores.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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 cuál 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.
- En el caso de Costa Rica se sugiere que el intervalo de evaluación para el cálculo del IRI sea 50 m, para evaluación de proyectos nuevos y un intervalo más amplio para evaluación de la Red Vial Nacional 100 m.

Del estudio realizado por Townsend, denominado “Determinación de umbrales de rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos”, se desprenden las siguientes consideraciones, en términos cualitativos, que deben tenerse para el control de recepción de proyectos:

- La presencia de desvíos durante la construcción de las obras, aseguran valores de regularidad bajos, respecto aquellas obras ejecutadas sin la presencia de éstos.
- La geometría del camino asociada a curvas verticales y horizontales, pendientes, gradientes, peraltes y otras, durante la etapa constructiva de las obras pueden afectar la adecuada terminación de los caminos en términos de obtener valores de IRI aceptables.
- La calidad y tecnología de las maquinarias, los equipos topográficos, las buenas prácticas constructivas, el adiestramiento y la capacitación de operadores, aseguran una baja regularidad.
- Según la experiencia internacional, es conveniente anticipar controles de regularidad en las capas estructurales inferiores a la superficie de rodado. La evaluación de la capacidad

funcional en cada etapa de la construcción se presenta como una alternativa complementaria a las tradicionales. La evaluación por capas puede permitir corregir eventualmente diferencias en la construcción de una capa y mejorar la regularidad superficial del pavimento.

- Aumentar la vida útil de las carreteras y ahorrar millones de colones en mantenimiento depende de solo empezar a darle una mayor importancia a los procedimientos, especificaciones y control de calidad durante la colocación de las mezclas asfálticas para beneficio de los usuarios y contribuyentes.



# PROPUESTA PARA LA DEFINICIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL

Gustavo Badilla Vargas, Ana Elena Hidalgo Arroyo

## FUNDAMENTACIÓN

De conformidad con las disposiciones del artículo 6 de la Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias y su reforma mediante la ley 8603, dentro del Programa de Fiscalización de la Calidad de la Red Vial del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica (UCR), para lograr la eficiencia de la inversión pública, la Universidad de Costa Rica podrá celebrar convenios con el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) a fin de realizar, por intermedio de este laboratorio tareas como:

- g) Asesoramiento técnico al jerarca superior de la Dirección de Vialidad del MOPT, así como al ministro y viceministro del sector.
- h) Ejecución y auspicio de programas de cursos de actualización y actividades de transferencia de tecnología dirigidas a ingenieros e inspectores.

## OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este informe, es dar respuesta a la solicitud del Ministro Dr. Pedro Castro Fernández expresada en el oficio DMOPT-0064-2013, donde solicita que se redacte un informe en el que se contemplen la redacción de especificaciones para los proyectos de obras del CONAVI que incluyan:

- a) Valorar la aceptación y pago de obra nueva, utilizándose para ello los criterios de Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- b) Valorar la aceptación y pago por rehabilitaciones de obra, utilizándose para ello los criterios de Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- c) Valorar la aceptación y pago para reconstrucciones de obra, utilizándose para ello los criterios de Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- d) Elaborar un procedimiento para medir el Índice de Regularidad Internacional (IRI) en proyectos de construcción vial.

Se procura que este informe constituya un insumo para la Administración con el fin de colaborar en la redacción final del procedimiento solicitado, así mismo, una referencia que permita fortalecer los criterios técnicos de la Administración responsable de la calidad y mantenimiento de las obras viales.

## ALCANCE

El alcance de este informe se centra en presentar a la Administración la propuesta de procedimiento de medición y de análisis que se utiliza a nivel institucional en el LanammeUCR para el manejo del Índice de Regularidad Internacional (IRI), procedimiento empleado a nivel interno en el campo de la Investigación, informes de Auditoría Técnica, Evaluación y Gestión de la Red Vial Nacional y Gestión de la Red Vial Municipal, con el objetivo que esta información sirva de insumo para la Comisión encargada de elaborar las especificaciones para proyectos de obras del CONAVI que permitan valorar la aceptación y pago de obra nueva, de rehabilitación y reconstrucción de obras, utilizándose para ello los criterios de este índice (IRI).

Cabe aclarar que el contenido de este informe es avalado por el LanammeUCR y que la implementación del contenido del mismo, así como la armonización de los criterios aquí emitidos con el resto de la normativa técnica vigente, carteles de licitación, contratos, especificaciones especiales o documentos similares es responsabilidad plena y absoluta de la Administración y podrán ser sujetos a futuros procesos de fiscalización por parte del LanammeUCR.

## ANTECEDENTES

El día 14 de enero del 2013 se recibe el oficio DMOPT-0064-2013, en el cual el Ministro Dr. Pedro Castro Fernández comunica la conformación de una comisión encargada de atender las recomendaciones emitidas por la Auditoría Técnica del LanammeUCR, en el informe LM-PI-AT-042-12 "Evaluación del desempeño de la condición superficial del proyectos de reconstrucción a cargo de la Gerencia de Vías y Puentes del CONAVI", esta comisión estará coordinada por el Ing. Hugo Chaves Gutiérrez, (tal como si indica en el oficio DMOPT-0063-2013 del 14 de enero del 2013).

En el oficio mencionado anteriormente también se le solicita al coordinador del PITRA-LanammeUCR, Dr. Guillermo Loría Salazar, la colaboración al designar un funcionario (a) del LanammeUCR para integrar una comisión encargada de redactar, dentro de un plazo de tres meses, las especificaciones para proyectos de obras del CONAVI que permitan valorar la aceptación y pago de obra nueva, de rehabilitación y reconstrucción de obras, utilizándose para ello los criterios del Índice de Regularidad Internacional (IRI) y a su vez elaborar un procedimiento para medir el índice de Regularidad Internacional (IRI) en proyectos de construcción vial, por lo que se elige a la Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo, miembro de la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR, para que forme parte de dicha comisión en calidad de enlace y apoyo técnico para la formulación de insumos que coadyuven en la elaboración final de dicho procedimiento.

Como apoyo a la Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo, se incorporó al Ing. Gustavo Badilla Vargas como parte de la Comisión, ya que el ingeniero posee amplios conocimientos relacionados con el tema de interés, donde ha elaborado informes de investigación, trabajado con el equipo de medición y cálculo del IRI y colaborado en el desarrollo de los procedimientos internos de ensayo que permiten

el análisis y cálculo del IRI en el LanammeUCR. El ingeniero Gustavo Badilla Vargas participó en el año 2007 en la revisión del documento "Revisión de la sección 406.23: Control de Rugosidad (IRI) del CR-2002 y presentación de recomendaciones para la modificación de la especificación sobre IRI" de la Ing. Julieta Benavides Gamboa, enviado en el oficio DO-D-07-1455 en el año 2007. Adicionalmente participó en la elaboración de las secciones 401.16, 401.17, 411.13 y 501.14 del "Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010"

En el LanammeUCR se ha trabajado con el Índice de Regularidad Internacional desde hace ya varios años, a nivel de investigación se ha desarrollado trabajos como el informe UI-03-08 "Determinación de un Procedimiento de Ensayo para el Cálculo del IRI" de noviembre del 2008.

Por otro lado, la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional bajo el marco de la Ley No. 8114, le corresponde al LanammeUCR realizar cada dos años una Evaluación de la Red Vial Nacional (ERVN) pavimentada, en la cual se incluye la evaluación de la regularidad del pavimento utilizando el Índice de Regularidad Internacional (IRI), de esta manera se han realizados evaluaciones desde el año 2004.

Por su parte la Unidad de Evaluación de la Red Vial Municipal en el año 2012 realizó un estudio denominado LM-PI-GM-08-12: "Comparación de métodos de análisis: notas de calidad (FWD-VIZIR), notas calidad (FWD-IRI) y PCI, para escogencia del tipo intervención en las redes viales cantonales", en el cual determinan rangos de IRI para la evaluación y gestión de las rutas municipales, la cual se encuentra actualmente en un proceso de uso y calibración.

En la Unidad de Auditoría Técnica desde el segundo semestre del año 2009, se elaboran informes de proyecto a cargo de la Gerencia de Construcción de Vías y Puentes del CONAVI donde se evalúa el cumplimiento del Índice de Regularidad Internacional (IRI) según especificaciones como el CR-2002 o actualmente el CR-2010, teniendo presente que a nivel cartelario no es un requerimiento. Esto se hace con el objetivo de evidenciar el nivel de regularidad con el que la Administración está recibiendo proyectos de mejoramiento y reconstrucción al no incluir dentro de las especificaciones cartelarias este índice. Además por las ventajas que ofrece este parámetro, tales como su relación directa con la vida útil del pavimento, los costos de operación, confort y seguridad de la ruta, entre otros. Entre los proyectos que se han evaluado se pueden mencionar:

- Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 10, Sección Cartago-Paraíso.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 102, Sección San Vicente de Moravia-San Isidro de Coronado.
- Evaluación del IRI, Mejoramiento Ruta No. 204, sección Zapote-San Francisco.
- Evaluación de Regularidad Superficial (IRI) y deterioros prematuros. Proyecto San Francisco-Colina.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 613 Sección Sabalito-Las Mellizas.

- Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 167, sección Librería Universal - La Salle.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 34, sección Quepos-Baru.

Finalmente, como parte de la Comisión encargada de redactar las especificaciones para proyectos de obras del CONAVI que permitan valorar la aceptación y pago de obra nueva, de rehabilitación y reconstrucción de obras, utilizándose para ello los criterios del Índice de Regularidad Internacional (IRI), se le solicitó al LanammeUCR que convocara a una serie de sesiones para presentarle a los miembros de la comisión el material y conocimiento que se maneja a nivel institucional del LanammeUCR en lo relativo al tema del IRI.

A continuación se describe en la Tabla 4, las fechas y miembros presentes en dichas sesiones adicionalmente se indica cuales fueron los principales temas tratados por el LanammeUCR con el propósito de aportar información a la Comisión a manera de insumo para la redacción del informe final solicitado en el oficio DMOPT-0064-2013.

**Tabla 4. Resumen de las sesiones de la comisión de IRI**

Nº	Fecha	Presentes	Temas principales
1	08/02/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Álvaro Ulloa Ing. Gustavo Badilla Ing. Ana Elena Hidalgo	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Presentación de los miembros de la comisión.</li> <li>· Coordinar reuniones semanales.</li> </ul>
2	12/02/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Gustavo Badilla Ing. Ana Elena Hidalgo Ing. Jenny Chaverri	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Presenta CD con información del LanammeUCR</li> <li>· Presentación conceptos teóricos y normativa a cargo del Ing. Gustavo Badilla.</li> <li>· Presentación del equipo de medición de IRI, laboratorio de campo LanammeUCR a cargo de la Ing. Melissa Rojas, jefe.</li> <li>· Revisión de consultas sobre el tema en la Comisión de revisión del CR-2010</li> </ul>
3	19/02/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Gustavo Badilla Ing. Ana Elena Hidalgo Ing. Eliecer Arias Ing. José Pablo Aguiar Ing. Roy Barrantes Ing. Fabian Elizondo Ing. Jairo Sanabria	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Presentación del tema IRI relacionado con la Unidad de Gestión de la Red Vial Nacional a cargo del Ing. Roy Barrantes-.</li> <li>· Presentación del tema IRI relacionado con la Unidad de Gestión Municipal a cargo del Ing. Eliecer Arias.</li> </ul>

Nº	Fecha	Presentes	Temas principales
4	26/02/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Gustavo Badilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Presentación de los Informes elaborados por miembros del LanammeUCR en cuanto al manejo de datos, análisis y medición del IRI a cargo del Ing. Gustavo Badilla.</li> <li>· Presentación de resultados de IRI proyectos nacionales analizados por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR a cargo del Ing. Gustavo Badilla.</li> </ul>
5	05/03/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Roy Barrantes Ing. Jairo Sanabria Ing. Benjamín Sandino Ing. Sofía Rodríguez Ing. Gabriela Baltodano Ing. Hugo Chaves	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Presentación de propuesta de medición de IRI en la concesión San José-San Ramón a cargo del Ing. Roy Barrantes.</li> <li>· Muestra de informe de laboratorio emitido por el laboratorio de campo del LanammeUCR y ejemplo de cálculo de IRI utilizando ProVal a cargo del Ing. Jairo Sanabria.</li> </ul>
6	16/04/2013	Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Sofía Rodríguez Ing. Benjamín Sandino Ing. Gustavo Badilla Ing. Ana Elena Hidalgo Ing. Álvaro Ulloa	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Se comentó con los miembros de la comisión los principales aspectos que deberían estar incluidos en el informe presentado por parte del LanammeUCR, para que este informe fuese un insumo importante para el informe final de la comisión.</li> </ul>
7	30/04/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Sofía Rodríguez Ing. Ana Elena Hidalgo	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Los miembros de la comisión de IRI, realizaron comentarios sobre la sección 401.16 y 401.20 del CR-2010.</li> </ul>
8	07/05/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Sofía Rodríguez Ing. Ana Elena Hidalgo Ing. Benjamín Sandino Ing. Gustavo Badilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Comentarios sobre la sección 401.16 y 401.20 del CR-2010.</li> <li>· Aclaraciones sobre el informe que está realizando el LanammeUCR sobre el procedimiento de análisis y cálculo del IRI.</li> </ul>
9	14/05/2013	Ing. Hugo Chaves Ing. Aníbal Sanabria Ing. Beatriz Porras Ing. Ana Elena Hidalgo Ing. Roy Barrantes Ing. Gustavo Badilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Se procedió a revisar por segunda vez el informe preliminar "Propuesta para la definición de un procedimiento de medición y análisis del índice de regularidad internacional (IRI) LanammeUCR".</li> <li>· Se realizó una sesión de preguntas y respuestas con respecto al contenido de este informe.</li> <li>· Se facilitó a los miembros de la comisión esta versión preliminar en formato digital (PDF).</li> <li>· Se comentaron las conclusiones y recomendaciones del informe final de la comisión.</li> <li>· Se propone como fecha límite para la entrega del informe final del LanammeUCR el día 21/05/2013.</li> </ul>

## MARCO TEÓRICO

El desempeño funcional de la infraestructura vial, además de garantizar condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras, repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de pavimentos.

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 al deteriorarse más rápidamente la estructura.

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 valorar el confort y seguridad de los usuarios, se relaciona indirectamente con el desempeño estructural del pavimento y el costo de operación de los pavimentos.

Es posible encontrar investigaciones en las cuales se ha evaluado la influencia de valores iniciales de IRI con el comportamiento del pavimento a largo plazo. Estas demuestran que valores iniciales elevados de IRI ocasionan mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento. Aún solucionándose los deterioros iniciales, el pavimento siempre presentará fallas funcionales en el tiempo más graves que aquel pavimento que inició su vida útil con un valor de IRI menor.

### **Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)**

En la norma de ensayo ASTM E 867-06 Standard Terminology Relating to Vehicle Pavement Systems, se define el concepto de Roughness, cuya traducción al español es Regularidad y viene dada por: “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.”<sup>1</sup>.

De esta manera, se tiene que el índice de un perfil es un valor calculado que resume las variaciones en el perfil de la superficie. Los detalles del cálculo determinan el significado y significancia del

---

<sup>1</sup>Unidad de Investigación, LanammeUCR. “Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI”, Costa Rica, 2008.

índice. El valor del índice puede estar relacionado con un modelo matemático del movimiento de un vehículo o por otros índices comúnmente utilizados.

Se dice que un índice es portable y reproducible, cuando este puede ser calculado a partir de un perfil verdadero y por cualquier perfilógrafo válido. Además, se habla que es estable en el tiempo, cuando puede ser comparado en el tiempo; puesto que el concepto de perfil verdadero tiene el mismo significado año a año y la subsecuente transformación matemática del perfil verdadero también es estable con el tiempo.

De acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades, se expresa en m/km. Estas unidades indican la sumatoria del movimiento vertical de una masa suspendida sobre un amortiguador y suspensión (con características determinadas), producto de las irregularidades de la superficie del pavimento (perfil longitudinal), las cuales se expresan en metros por kilómetro.

El cálculo del Índice de Regularidad Internacional (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 Índice de Regularidad Internacional (IRI) como indicador estadístico de la irregularidad superficial de pavimento representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta,  $IRI = 0$ ) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

El perfil ideal 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<sup>2</sup>.

La longitud del tramo a medir es importante para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitud mayores ocultan niveles puntuales altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de Índice de Regularidad Internacional (IRI) satisfactorios. Por otra parte la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) puede detectar niveles puntuales altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

### **Consideraciones e implicaciones de la medición del Índice de Regularidad**

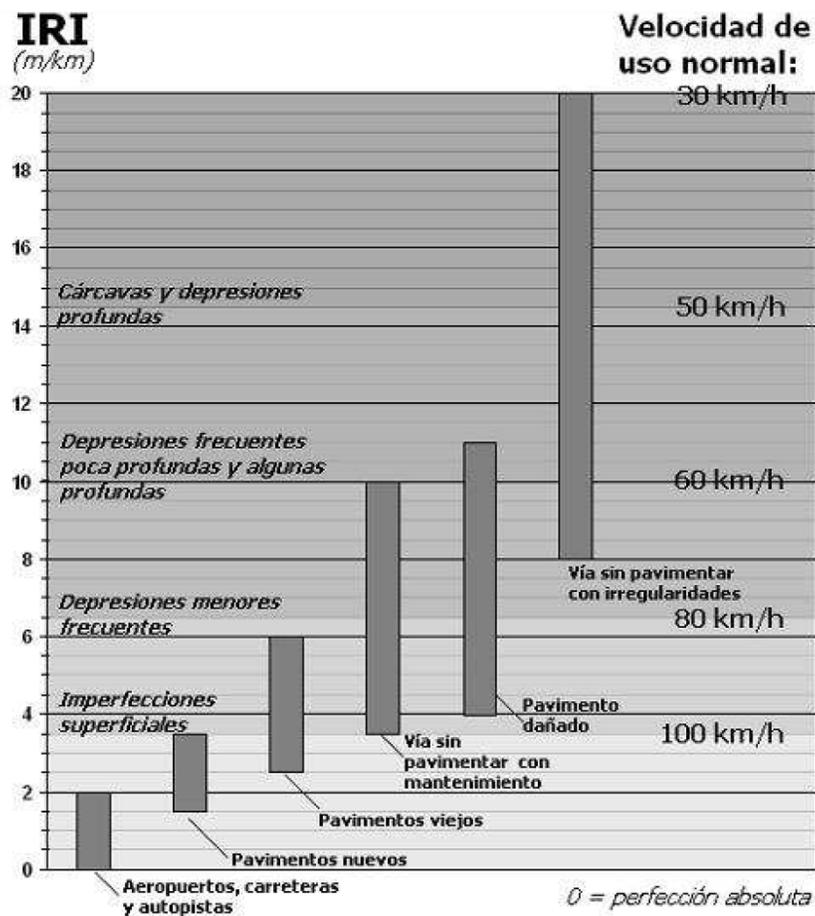
Las consideraciones más importantes sobre el Índice de Regularidad Internacional son<sup>3</sup>:

- a) El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil.

---

<sup>2</sup> y <sup>3</sup> Unidad de Investigación, LanammeUCR. "Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI", Costa Rica, 2008.

- b) Para el cálculo del IRI es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo utilizado.
- c) El cálculo matemático del IRI relaciona la acumulación de desplazamientos del sistema de suspensión de un vehículo modelo, dividida entre la distancia recorrida por el vehículo a una velocidad de 80 km/hora, y se expresa en mm/m o m/km. 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. A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala de medición de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías (ver Figura 32).



**Figura 32**

Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías (Unidad de Investigación, LanammeUCR. "Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI", Costa Rica, 2008)

## Especificaciones de IRI empleadas en otros países

Actualmente a nivel internacional se están llevando a cabo proyectos para afinar más aún el valor del Índice de Regularidad Internacional inicial en la construcción de pavimentos. Las investigaciones tienen como objetivo proponer nuevos valores iniciales del Índice de Regularidad Internacional para la recepción de pavimentos, proponer acciones de mantenimiento efectivas y recomendar especificaciones para controlar el Índice de Regularidad Internacional durante el proceso constructivo.

En el contexto latinoamericano países como Chile y México, utilizan el valor de Índice de Regularidad Internacional como uno de los parámetros de aceptación de proyectos de obra vial. En el contexto centroamericano, El Salvador especifica que el valor de Índice de Regularidad Internacional medido en tramos de 100m, no debe sobrepasar los 2,5 m/km. para pavimentos de concreto hidráulico de vías interurbanas<sup>4</sup>.

Más adelante se presentan en la Tabla 5, algunas de las especificaciones de Índice de Regularidad Internacional empleadas en otros países, así como el intervalo de medición empleado en cada uno.

---

4 Ventura Espinal José Antonio, Alvarenga Edwin. "Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Ministerio de Obras Públicas, Transporte y de Vivienda y de Desarrollo Urbano. El Salvador.

**Tabla 5. Especificaciones Internacionales de Índice de Regularidad Internacional (IRI)**

Lugar	Procedimiento general	Requerimientos de IRI según tipo de pavimento o superficie		
		Afalto	Hidráulico	Tratamiento superficial
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos $\leq 2.0$ m/km Promedio Individual $\leq 2.8$ m/km		Promedio de 5 tramos consecutivos $\leq 3.0$ m/km Promedio Individual $\leq 4.0$ m/km
	<b>Recepción de Obra Nueva</b>			
	No se indica el intervalo de medición	IRI $\leq 1.5$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 1.9$ m/km, en el 85% de los datos IRI $\leq 2.3$ m/km, en el 99% de los datos	IRI $\leq 2.0$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 85% de los datos IRI $\leq 2.8$ m/km, en el 99% de los datos	IRI $\leq 2.4$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.9$ m/km, en el 85% de los datos IRI $\leq 3.4$ m/km, en el 99% de los datos
CR-2002	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos $\leq 2.0$ m/km Promedio Individual $\leq 3.0$ m/km		----
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos con un intervalo de medición de 100 m	IRI $\leq 1.5$ m/km, en el 50% de los tramos del proyecto IRI $\leq 2.0$ m/km, en el 80% de los tramos del proyecto IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 100% de los tramos del proyecto		
WisDOT, Wisconsin Estados Unidos	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	<b>IRI m/km</b> $< 1.1$ $< 1.17$ $< 1.29$ $< 1.33$ $< 1.37$ $< 1.45$	<b>Tiempo Pav. nuevo</b> 1 Año 2 Años 3 Años 4 Años 5 Años	----
Suecia	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 200 m	IRI $\leq 1.4$ m/km IRI $\leq 2.4$ m/km		----
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	<b>Caminos Rurales</b>			
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI $\leq 3.0$ m/km	----	----
	<b>Vías Interurbanas</b>			
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI $\leq 2.0$ m/km	IRI $\leq 2.5$ m/km	----
Quebec, Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI $\leq 1.2$ m/km, en el 70% de los datos IRI $\leq 1.4$ m/km, en el 100% de los datos	----	----
Eslovenia	<b>Carreteras de alto tránsito</b>			
	IRI obtenido en tramos de 20 m	2.0 $\leq$ IRI $\leq 2.6$ m/km		----
	IRI obtenido en tramos de 100 m	1.2 $\leq$ IRI $\leq 1.8$ m/km		----
	<b>Carreteras de bajo tránsito</b>			
	IRI obtenido en tramos de 20 m	4.0 $\leq$ IRI $\leq 4.6$ m/km		----
	IRI obtenido en tramos de 100 m	3.0 $\leq$ IRI $\leq 3.8$ m/km		----
Portugal	No se indica el intervalo de medición	IRI $\leq 1.5$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 80% de los datos IRI $\leq 3.0$ m/km, en el 90% de los datos	IRI $\leq 2.0$ m/km, en el 50% de los datos IRI $\leq 2.5$ m/km, en el 75% de los datos IRI $\leq 3.0$ m/km, en el 100% de los datos	----

Fuente: Informe UI-03-08, Unidad de Investigación, LanammeUCR. "Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI", Costa Rica, 2008.

## Especificaciones de Índice de Regularidad Internacional (IRI) para Costa Rica

En el caso de Costa Rica se puede mencionar que el primer intento por introducir el parámetro de regularidad superficial (IRI) se dio en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica, CR-2002, pese a que este Manual no fue aprobado ni oficializado contiene especificaciones relacionadas con la regularidad superficial en las secciones 406.23 "Control de Regularidad (IRI)", esta sección incluye los requerimientos de regularidad superficial en pavimentos flexibles, y la sección 501.14 "Control del índice de regularidad Internacional (IRI)" para pavimentos en concreto.

Actualmente en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010, oficializado en el Decreto Ejecutivo N° 36388 MOPT del 20 de enero de 2011, como instrumento de aplicación y observancia técnico/jurídica en el desarrollo y ejecución de las obras públicas pertinentes contratadas por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y por el Estado costarricense, se incluye especificación del parámetro de regularidad (IRI) para diferentes trabajos, a continuación se citan algunas de las secciones del CR-2010 donde se encuentra esta información:

- 401.16 Control de regularidad (IRI) en carpetas de mezclas asfálticas en caliente
- 401.17 Control de regularidad (IRI) en sobrecapas, reciclajes con sobrecapas o sobrecapas sobre fresados, de mezcla asfáltica en caliente.
- Sección 410.) Mezclas Asfálticas Procesadas En Frío de Graduación Densa con Emulsión Asfáltica
- Sección 415.) Perfilado (Fresado) de Capas Asfálticas, Sección 415.06
- 501.14 Control de regularidad (IRI) en pavimentos de losas de hormigón hidráulico
- 503.15 Control de regularidad (IRI) en las sobrecapas de concreto.

### Base de medición de Índice de Regularidad Internacional (IRI)

Cuando se habla del valor del IRI de en una vía es necesario 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.

En vista de la importancia que reviste 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 inadecuada valores de IRI satisfactorios. Por otra parte la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

Si se requiere hacer un análisis a nivel de red (ejemplo: priorización de rutas para su intervención), entonces se suele utilizar una base de medición a cada 200m. Por otro lado, si se desea hacer una evaluación a nivel de proyecto (ejemplo: control de calidad y aceptación), entonces la base de

medición disminuye, por lo que aplicaría utilizar una base de medición a cada 100m, 50m y 10m, según el propósito de la medición.

A continuación en la Tabla 6 se muestra las bases de medición utilizadas por el equipo auditor para el análisis del IRI.

**Tabla 6. Bases de medición de IRI y su objetivo.**

Base de medición	Objetivo
Cada 200 m	Aplicación General (Por ejemplo: Evaluaciones realizadas para medir desempeño en evaluación a nivel de red)
Cada 100 m	Verificación de calidad general del proyecto, CR-2010 (Actividad de verificación de cumplimiento de especificaciones generalmente realizada por la Administración contratante)
Cada 50 m	Verificación de calidad específica del proyecto (Actividad de verificación de cumplimiento de especificaciones generalmente realizada por la Administración contratante en proyectos de alta importancia estratégica dentro de la Red Vial)
Cada 10 m	Control de calidad e identificación de defectos a nivel de proyecto (Actividad de control de calidad generalmente realizada por el contratista durante la ejecución de las obras)

Por tanto, el propósito final de realizar los cálculos de IRI con diferentes bases de medición, es tener una gama de escalas de evaluación de la regularidad superficial para el planteamiento de acciones correctivas y preventivas, según la aplicación que considere oportuna.

## **PROPUESTA PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) LANAMMEUCR**

El proceso de medición del Índice de Regularidad Internacional se basa en las Normas de ASTM E 950 "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference", la cual abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros; y la Norma ASTM E 1170 "Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces", la cual abarca el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera.

El IRI es un indicador independiente del equipo de medida. Depende únicamente de la medida de los datos de entrada de la elevación perfil longitudinal. Al existir diferentes equipos para la medición del perfil longitudinal, es importante definir los requisitos del perfil longitudinal, por lo que se recomienda que este sea reportando un valor del perfil longitudinal a un intervalo de 250 mm. (Intervalo de almacenamiento según ASTM E 950-98) que permita calcular el IRI con la precisión, exactitud y frecuencia requerida. Y un intervalo de medición vertical (Resolución de las medidas verticales según ASTM E 950-98) menor o igual a 0.1 mm (0.005 in). Los equipos que se utilicen deben asegurar

una medición del perfil longitudinal que sea precisa, exacta y reproducible, de forma que aseguren comparaciones confiables. Además del perfilómetro laser, se puede incluir equipo manual un poco más simple como el control con topografía o el Dipstick, que tienen un alto grado de precisión.

De igual manera para la medición de la regularidad debe considerarse lo establecido en el Apéndice E del Highway Performance Monitoring System Field Manual (“Measuring Pavement Roughness”) del Office of Highway Policy Information de la FHWA, el cual menciona que los valores de IRI deben ser obtenidos cuando existan buenas condiciones climáticas, preferiblemente cuando la superficie de la carretera se encuentre seca. Así mismo, la medición deberá determinarse en sectores homogéneos, que corresponden a un pavimento de estructuración uniforme y que no es dividido por puentes, líneas férreas, cruces de calles y otros que puedan alterar el perfil longitudinal del camino e incrementar el valor del IRI (singularidades). Es importante que la Administración establezca un circuito de tramos de control, que esté monitoreado constantemente con datos de la medición y cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Para los cuales cualquier contratista deba comparar y verificar sus resultados para certificar y verificar su equipo de medición y determinar su idoneidad en la medición del perfil longitudinal, así como también los procedimientos de análisis utilizados para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

El IRI se calculará a partir del perfil longitudinal en tramos de 100 metros. Para el promedio de cada 10 valores consecutivos (media móvil) el valor deberá coincidir con el establecido en la especificación de la normativa vigente, ya sea el CR-2010 o especificaciones especiales incluidas en el cartel de licitación.

En caso de presentarse valores mayores a los establecidos para el promedio de 10 valores consecutivos de IRI la Administración deberá establecer un plazo de tiempo que considere apropiado para que el Contratista, a partir del reporte del Órgano de Supervisión o entidad competente aceptada por el Contratante mejore la condición de la calzada y así obtener los valores aceptados. Posteriormente en el momento en que se dé la finalización oficial de la obra el Ingeniero de Proyecto ordenará la medición final de la regularidad en la totalidad de la obra como procedimiento de aceptación definitiva.

Se realizarán mediciones del perfil longitudinal, el cual corresponde a una serie de datos que permiten el posterior cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Con los datos del perfil longitudinal, es posible calcular el valor de IRI en tramos de cualquier longitud, lo que permite analizar la condición funcional del proyecto bajo cualquier nivel de detalle deseado.

Se recomienda que los datos obtenidos del perfil longitudinal sean guardados en un archivo en formato ERD5. Esto debido a que, estos archivos pueden ser analizados con programas tales como el RoadRuf o el PROVAL; los cuales permiten realizar análisis posteriores de los resultados obtenidos; por ejemplo usando otros intervalos o longitudes de evaluación, y de ser necesario permite analizar singularidades que podrían darse en el tramo evaluado.

Se debe considerar la presencia de “singularidades”, 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 el cálculo del IRI.

Se considerará como singularidades elementos que provoquen una alteración del perfil longitudinal del camino que no provenga de fallas constructivas o que su presencia sea ineludible para el Contratista y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. Se pueden citar puentes y cruces de ferrocarril, que por diseño geométrico alteran el perfil del camino.

Posteriormente identificadas las singularidades es importante eliminar los datos dentro del área de influencia de la singularidad con el objetivo que esta no afecte los datos de IRI. Se define área de influencia asociada a la singularidad como: El largo de una singularidad corresponde a la suma de su longitud más su área de influencia que son 40 m hacia delante en el sentido de la medición.

Por lo que como parte del proceso de análisis de datos de IRI, se debe eliminar el dato correspondiente a la singularidad y 40 metros después (área de influencia). En aquellas secciones donde la presencia de singularidades sea tan grande como para impedir una medición de un perfil longitudinal suficientemente representativo de la sección analizada, se podrían implementar procedimientos de medición que evalúen la sección en ambos sentidos de circulación, eliminando de esta forma la zona de influencia, sustituyendo aquellos datos dentro de las áreas de influencia de las singularidades en un sentido de circulación por los medidos en la evaluación en el otro sentido y considerando únicamente las singularidades como elementos aislados a ser eliminados del cálculo final del IRI.

Para reportar los resultados de la evaluación se sugiere seguir la norma AASHTO PP37-02 “Standard Practice for Quantifying Roughness of Pavements”, en la cual se reporta el valor promedio del IRI para los sensores izquierdo y derecho del perfilómetro láser, cuando se utilice este equipo, que corresponden a las huellas de las llantas del vehículo, reportando de esta manera el Índice de Regularidad Promedio (Mean Roughness Index, MRI), los resultados deberán expresarse en unidades de m/km con al menos un decimal. También es necesario que se incluya dentro del entregable en formato digital los datos del perfil longitudinal, tal y como se menciono anteriormente.

## RECOMENDACIONES

Le corresponde a la Administración definir e implementar el procedimiento que considere apropiado para la aplicación del mismo a nivel nacional. A continuación se indican algunas recomendaciones:

- El LanammeUCR recomienda establecer inicialmente rangos de cumplimiento, con el objetivo de flexibilizar la normativa y lograr mayor aceptación de la misma. Los valores establecidos en estos rangos deben ser tales que cumplan un estándar mínimo adecuado y aceptado de la regularidad de superficie; cuyo valor pueda ser reducido sucesivamente conforme se observe una mejoría en los estándares de la red vial y acorde con una política institucional a mediano y largo plazo de valor de IRI aceptable. Es decisión de la Administración establecer el valor mínimo requerido dentro del rango recomendado.

- Detallar la clasificación de la red de carreteras y caminos de Costa Rica en la cual se señalen claramente las rutas que deben ser evaluadas, por ejemplo:

Dependiendo del tipo de ruta que se desea intervenir, establecer un rango de valores de IRI.

Estas recomendaciones se pueden presentar en una tabla resumen como la descrita a continuación.

Clasificación	Tipo de superficie	Aplicación de IRI	Rango de IRI* (m/km)	Base de medición (m)
Red Vial Nacional				
Carreteras primarias	Pavimentada	Si	0 - 1,9	100
Carreteras secundarias	Pavimentada	Si	0 - 2,5	100
	Lastre	No	--	
Carreteras terciarias	Pavimentada	Si	0 - 3,0	100
	Lastre	No	--	
Rutas de travesía	Pavimentada	Si	0 - 3,0	100
Red Vial Cantonal				
Calles Locales	Pavimentada	Si	0 - 3,6	25*
Caminos Vecinales	Pavimentada	Si	0 - 3,6	25*
	Lastre	No		
Caminos no clasificados	Lastre o Tierra	No		

\*Es recomendable hacer esta medición con una base de medición menor debido a que en proyectos municipales existe mucha irregularidad.

†El dato de IRI reportado en esta tabla equivale al promedio de los datos obtenidos.

- Incluir dentro del procedimiento una tabla que describa dependiendo del tipo de intervención a realizar si se debe o no aplicar la especificación del parámetro del IRI.

Intervención	Aplicación de IRI
Obra nueva con estructura de pavimento	Si
Obras de mejoramiento de la estructura de pavimento existente	Si
Obras de reconstrucción de la estructura de pavimento.	Si
Carpetas sobre pavimentos existentes, con el establecimiento de cotas de rasante	Si

- Se recomienda que en los informes del consultor de calidad que realice la medición del perfil y calcule los datos de IRI, se presente a la Administración, además de los valores de IRI calculados en la base de medición solicitada por el Cartel, los datos del perfil longitudinal cada 250 mm, con el objetivo que la Administración sea capaz de calcular los datos de IRI con la base de medición que considere importante valorar.

- En estos informes también es necesario incluir fotografías y detalle de las singularidades detectadas por el consultor y del área de influencia establecida con el objetivo de que el Ingeniero de Proyecto por parte de la Administración valore la pertinencia de la misma.
- La Administración puede establecer y exigir recomendaciones mínimas admisibles de periodicidad de verificaciones y calibraciones de los equipos utilizados para la medición de perfiles longitudinales.
- La Administración puede establecer un tramo o sección de pavimento de control patrón en el cual el consultor de calidad que pretenda realizar la medición del perfil y cálculo del IRI pueda evaluar la idoneidad de sus equipos y procesos.
- Se sugiere que la Administración, en conjunto con el LanammeUCR y Contratistas evalúen la posibilidad de establecer algún curso de capacitación específico en la interpretación, análisis y procesamiento de información resultante de mediciones del Índice de Regularidad Superficial con la finalidad de evaluar, certificar y homologar las metodologías empleadas.

## CAPÍTULO 3. INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL EN EL PROYECTO CAÑAS - LIBERIA.



# CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN RELACIÓN CON LA ESPECIFICACIÓN DE IRI PARA EL PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO. 1, CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA (LPI NO. 2011LI-000004-0DI00) Y FUTUROS PROYECTOS DE SIMILAR CONDICIÓN

Paulina Leiva Padilla, Ana Elena Hidalgo

## INTRODUCCION

Este informe se presenta en complemento a la respuesta emitida por el LanammeUCR en el oficio LM-PI-0.26-2014, relacionada con la petición realizada por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), a través del Ing. Enrique Obed Sánchez Marín, presentada en el oficio UE-358-2014 y recibida en esta dependencia el día 05 de marzo de 2014.

Por medio del presente informe, el PITRA-LanammeUCR realizó un análisis complementario al planteado en el oficio LM-PI-026-2014, con respecto a la sección "Condiciones Especiales, Sección VI: Requisitos de las Obras" correspondiente al Índice de Regularidad Internacional (IRI) del Cartel de Licitación del proyecto: Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia (LPI No. 2011LI-000004-0DI00).

A su vez, dentro del análisis realizado se consideraron las especificaciones definidas en la sección 501.14 del CR-2010 correspondiente a: "Control de regularidad (IRI) en pavimentos de losas de hormigón hidráulico", así como normativa de referencia a nivel internacional en proyectos de este tipo.

Adicionalmente se analizó la experiencia nacional en cuanto a los valores del índice de regularidad internacional (IRI) en el desarrollo de proyectos viales cuya superficie de ruedo es de concreto hidráulico, con el objetivo de comparar estos valores con los solicitados en el Cartel de Licitación del proyecto en cuestión, y en la normativa nacional e internacional.

Se recomienda por tanto, que se tomen en cuenta las observaciones y recomendaciones que se describen en los siguientes apartados.

## FUNDAMENTACIÓN

De conformidad con las disposiciones del artículo 6 de la Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias y su reforma mediante la Ley 8603, dentro del Programa de Fiscalización de la Calidad de la Red Vial del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica (UCR), para lograr la eficiencia de la inversión pública, la Universidad de Costa Rica podrá celebrar convenios con el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) a fin de realizar, por intermedio de este laboratorio tareas como:

g) Asesoramiento técnico al jerarca superior de la Dirección de Vialidad del MOPT, así como al ministro y viceministro del sector.

h) Ejecución y auspicio de programas de cursos de actualización y actividades de transferencia de tecnología dirigidas a ingenieros e inspectores.

## OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este informe, tal y como se mencionó anteriormente, es complementar la respuesta a la solicitud del Ingeniero Enrique Obed Sánchez Marín expresada en el oficio UE-358-2014, donde solicita:

*...interpretación en cuanto a la especificación para el cálculo del IRI, del proyecto en referencia, en vista de que la especificación contractual puede dar lugar a varias interpretaciones con respecto a dos puntos específicos:*

*1) ¿Cuál es el valor máximo de IRI que debe considerarse?*

*2) La definición de las singularidades y su aplicación en el cálculo de IRI.*

*Ambos elementos son trascendentales para la correcta aplicación de las especificaciones vigentes para el proyecto.*

*Lo anterior, dado que el contratista mediante oficio FCC-INT-039-2014 interpreta que para sectores con una longitud igual o menor a 800 metros el IRI máximo permitido es de 2.5 m/km.*

*En esta misma nota el contratista solicita que se le reconozcan como singularidad las ventanas dejadas para el acceso a propiedades privadas y públicas, ventanas ocasionadas por servicios afectados no retirados en su momento, ventanas dejadas para construcción de alcantarillas por modificación al diseño, interrupciones en tramo por entrada y salida a carretera en tráfico, variación de espesores de la losa, interrupción de la pavimentación por lluvia...*

Por lo que se procura que este informe constituya un insumo para la Administración con el fin de colaborar en el desarrollo del proyecto en cuestión y de futuros proyectos, así mismo, una referencia que permita fortalecer los criterios técnicos de la Administración responsable de la calidad y mantenimiento de las obras viales.

## MARCO TEÓRICO

### Índice de Regularidad Internacional

#### Generalidades

Las pautas generales a nivel internacional para la determinación del IRI fueron definidas en el documento titulado: "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements [Guía para la Realización y Calibración de Mediciones de Regularidad en Carreteras]", desarrollado por M. Sayers, T. Gillespie, y W. Paterson, para el Banco Mundial en 1982 en Brasil. Parte de los aportes de la investigación es la escala estándar para diferentes tipos de vías que se muestra en Figura 33.

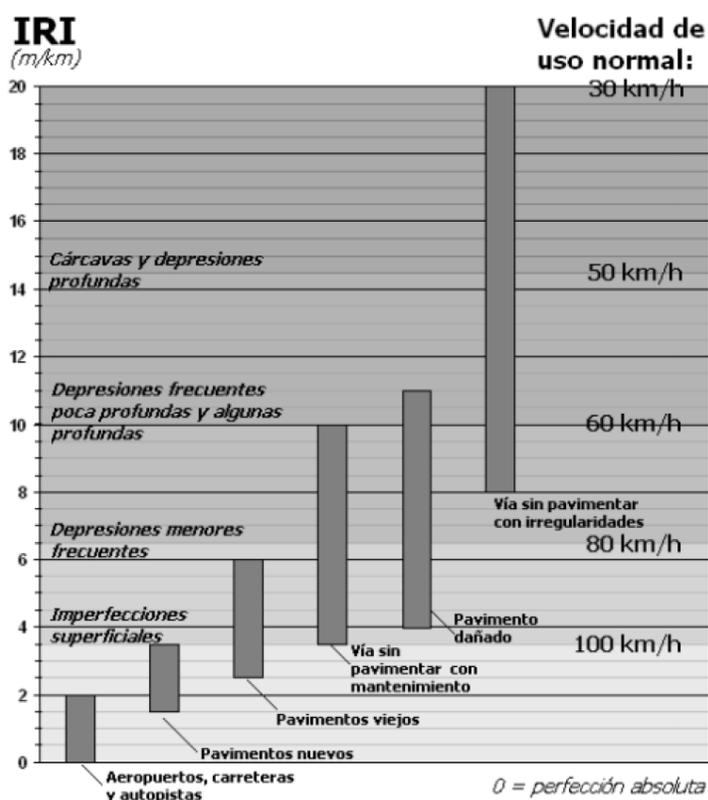


Figura 33

Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías (UMTRI Research Review, Vol. 33. Número 1. Enero-Febrero 2002, adaptado citado por (Badilla, Elizondo, & Barrantes, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI, 2008))

Otro de los resultados de la investigación se muestra a manera de resumen en la Figura 34, donde es posible ver la forma en que se puede correlacionar el valor de TPDA presente en el tramo analizado, con el valor límite de IRI según Sayers, Gillespie y Paterson (1982), adaptado por Orozco et al. (2004).

Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA)	Índice Internacional de Rugosidad, IRI (m/km)						
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	> 12
0 - 4 999	<i>Muy bueno</i>		<i>Bueno</i>				
5 000 - 9 999			<i>Regular</i>		<i>Malo</i>		
10 000 - 19 999						<i>Muy malo</i>	
> 20 000							

**Figura 34**

Recomendación para la selección de valores máximos admisibles de IRI en función del TPDA (Orozco y otros (2004))

Posteriormente en 1992, la forma de medición de este índice fue estandarizada por la Sociedad Norteamericana de Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), bajo la norma ASTM E1170, titulada: “Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces [Prácticas estándar para la simulación de la respuesta vehicular según los perfiles longitudinales superficiales]”.

A partir de este preámbulo, diferentes países han considerado ciertos valores de IRI para la aceptación de proyectos y como parámetro que apoya el tipo de gestión que se debe llevar a cabo en la red carretera.

En la Tabla 7, se resumen las especificaciones más recientes en el tema, en países como España, Suecia, Chile, El Salvador, Eslovenia, Canadá, Paraguay, Portugal, Uruguay, Perú, Argentina y Estados Unidos -por medio de uno de los siete estados que utilizan este parámetro para verificación de la calidad-.

Tabla 7. Especificaciones Internacionales de IRI

Lugar	Procedimiento general	Requerimientos de IRI según tipo de pavimento o superficie	
		Asfalto	Concreto
Chile <sup>6</sup>	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con intervalo de medición de 200 m	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 1.9 m/km en el 85% de los datos IRI ≤ 2.3 m/km en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km en el 85% de los datos IRI ≤ 2.8 m/km en el 99% de los datos
España <sup>7</sup>	IRI obtenido en tramos con intervalo de medición de 100 m	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.0 m/km en el 80% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km en el 100% de los datos	
Suecia <sup>8</sup>	IRI obtenido en intervalos de 20 m IRI obtenido en intervalos de 200 m	IRI ≤ 1.4 m/km IR ≤ 2.4 m/km	
El Salvador <sup>9</sup>	<b>Caminos rurales</b>		
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 3.0 m/km	----
	Vías interurbanas		
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 2.0 m/km	IRI ≤ 2.5 m/km
Eslovenia <sup>10</sup>	<b>Carreteras de alto tránsito</b>		
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	2.0 ≤ IRI ≤ 2.6 m/km 1.2 ≤ IRI ≤ 1.8 m/km	----
	<b>Carreteras de bajo tránsito</b>		
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	4.0 ≤ IRI ≤ 4.6 m/km 3.0 ≤ IRI ≤ 3.8 m/km	----
Canadá <sup>3</sup>	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 1.2 m/km, en el 70% de los datos IRI ≤ 1.4 m/km en el 100% de los datos	
Paraguay <sup>11</sup>	No indica intervalo de medición	IRI ≤ 2.0 m/km	IRI ≤ 3.0 m/km
Portugal <sup>5</sup>	No indica intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km en el 80% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km en el 90% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km en el 75% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km en el 100% de los datos
Uruguay <sup>12</sup>	No indica intervalo de medición	Muy bueno: IRI < 3.2 m/km Bueno: 3.2 ≤ IRI ≤ 3.9 Regular: 4.0 ≤ IRI ≤ 4.6 Malo: IRI > 4.6	Muy bueno: IRI < 2.8 m/km Bueno: 2.8 ≤ IRI ≤ 3.5 Regular: 3.6 ≤ IRI ≤ 4.3 Malo: IRI > 4.3
Perú <sup>3</sup>	No indica intervalo de medición	IRI < 2.0 m/km	IRI < 3.0 m/km
Argentina <sup>14</sup>	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI < 1.8 m/km	IRI < 3.6 m/km
Kentucky, Estados Unidos <sup>15</sup>	IRI obtenido en tramos de 160 m	Proyectos Clase A: IRI ≤ 1.1 m/km Proyectos Clase B: IRI ≤ 1.2 m/km	Proyectos Clase A: IRI ≤ 1.1 m/km Proyectos Clase B: IRI ≤ 1.3 m/km

### Conceptos importantes

Con la finalidad de esclarecer conceptos que son de importancia en la interpretación de las especificaciones relacionadas con el IRI, a continuación se presentan las definiciones que en la bibliografía recopilada se definen en el uso de este índice como parámetro de control de calidad en proyectos carreteros.

<sup>6</sup> (Etcheberry, Millan y Galilea 2003)

<sup>7</sup> Ministerio de Fomento, Orden Circular 308/89CyE, referente a la "Recepción definitiva de Obras" y la nota complementaria OC 308/89, referenciado por: (Solminihac, Cabrera y Bengo 2002)

<sup>8</sup> (Canadian Strategic Research Program (C-SHRP) 1999)

<sup>9</sup> (Ventura y Alvarenga 2005)

<sup>10</sup> (Badilla, Elizondo y Barrantes 2008)

<sup>11</sup> (Ministerio de Obras Públicas y Comunicación 2011)

<sup>12</sup> (Arriaga, Garnica y Rico 1998)

<sup>13</sup> (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2000)

<sup>14</sup> (Pagola y Giovanon 2011)

<sup>15</sup> (Kentucky Transportation Cabinet 2012)

Tramos o sectores homogéneos:

Según Álvarez (2012) los tramos homogéneos se definen como segmentos de la vía que presentan características similares, de acuerdo a un parámetro establecido; por ejemplo: características físicas como la geometría (número de carriles); estructura (espesores, módulos); resultados de evaluación en parámetros como auscultación visual, deflexiones, utilizados en la gestión de pavimentos.

Similar a esta definición, Bonilla y Dubón (2008), definen los sectores homogéneos en una carretera, como aquellos correspondientes a una estructuración uniforme, con exclusión de puentes, líneas férreas, cruces de calle y otros.

Singularidades:

Según el Laboratorio Nacional de Vías de Chile bajo la norma LNV 107-2000 se define singularidad como:

*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.*

Por otro lado, el Instituto Nacional de Vías en el Manual de Especificaciones Técnicas, artículo 460-7, que se refiere a fresado de pavimento asfáltico, define singularidades como:

*... todas aquellas alteraciones del perfil longitudinal de la carretera que incrementen el IRI y no provengan de deficiencias en el procedimiento de fresado, como pueden ser intersecciones con otras vías, puentes, pozos de inspección, etc., los cuales será definidos por el Interventor, con su ubicación respectiva (carril y abscisa), antes de proceder a la medida del perfil longitudinal. ...*

Con base en las definiciones anteriores, no se deben considerar como singularidades, defectos en la superficie del pavimento producto de procesos o procedimientos constructivos, ya sea asociados a la planificación y desarrollo del proyecto como a técnicas constructivas. Tampoco se deberán considerar como singularidades, las interrupciones producidas por condiciones climáticas o del ambiente, ya que estas no están asociadas al perfil de la carretera.

Base de medición o valores individuales:

Acorde con el informe de asesoría LM-PI-002-2013, cuando se habla del valor del IRI en una vía, es necesario indicar la longitud en que se determina dicho valor, ya que el IRI reportado es el valor medio de los valores de IRI unitarios o puntuales que se obtienen.

La base de medición -también llamada en algunas especificaciones nacionales (CR-2010) e internacionales como: "valores individuales"- corresponde al tramo que define la longitud de

medición, generalmente de 100 o 200 metros, esto de acuerdo al objetivo que se requiera (nivel de red o nivel de proyecto).

Debido a la importancia que implica la longitud de esta base de medición para la determinación del IRI, es necesario establecer la longitud del intervalo dentro de las especificaciones de manera adecuada. Intervalos de gran longitud pueden ocultar valores de regularidad superficial alta, mientras que aquellos de pequeña longitud pueden detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

#### Tramos consecutivos:

Se consideran tramos consecutivos al número de valores individuales que la especificación o normativa indique se deban promediar para cumplir con la especificación. A nivel de la normativa internacional se utilizan valores de tramos consecutivos de 1.00 km, que corresponden al promedio de diez valores individuales de 100m.

#### Importancia de las regulaciones al IRI

El desempeño funcional de la infraestructura vial, además de garantizar condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras, repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de pavimentos.

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 al deteriorarse más rápidamente la estructura.

Es posible encontrar investigaciones en las cuales se ha evaluado la influencia de valores de IRI en la aceptación de obra nueva, con el comportamiento del pavimento a largo plazo. Estas investigaciones demuestran que valores iniciales de IRI elevados ocasionan: mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento. Aún solucionándose los indeseables deterioros iniciales, el pavimento siempre presentará fallas funcionales en el tiempo más graves que aquel pavimento que inició su vida útil con un valor de IRI menor.

Acorde con Zaabar, I. and Chatti, K. (2013), en la investigación titulada: Estimating Vehicle Operating Costs Due To Pavement Surface Conditions [Estimación de los costos de operación de los vehículos debido a las condiciones superficiales del pavimento], se concluye que:

- El consumo del combustible es el costo más importante que se asocia con la regularidad, seguido está el de mantenimiento y reparación del vehículo y, en tercer lugar, el desgaste de las llantas.
- El incremento del IRI en 1.00 m/km aumenta el consumo de combustible en vehículos livianos entre un 2 y 3%, independientemente de la velocidad.
- Un aumento en los valores de IRI en 1.00 m/km genera un mayor consumo de combustible en camiones entre 1 y 2% a altas velocidades y entre 2 y 3% a bajas velocidades.
- El mantenimiento y reparación de vehículos es afectado por causa de la regularidad hasta que un valor de IRI igual a 3.00 m/km es alcanzado.
- Sobrepasando el valor de IRI anterior -3.00 m/km- y, para valores de IRI de 4.00 m/km, los costos por mantenimiento y reparación de los vehículos aumentan en un 10%, tanto para vehículos livianos como para camiones.
- Por encima de este valor -4.00 m/km- y, cuando los valores de IRI alcanzan los 5.00 m/km, el costo por mantenimiento y reparación aumenta en; un 40% para vehículos livianos y; un 50% para camiones.

## ESPECIFICACIÓN NACIONAL CON RESPECTO AL IRI (CR2010)

En el caso de Costa Rica se puede mencionar que el primer intento por introducir el parámetro de regularidad superficial (IRI) se dio en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2002). Pese a que este Manual no fue aprobado ni oficializado contiene especificaciones relacionadas con la regularidad superficial en las secciones 406.23 "Control de Regularidad (IRI)", esta sección incluye los requerimientos de regularidad superficial en pavimentos flexibles, y la sección 501.14 "Control del índice de regularidad Internacional (IRI)" para pavimentos en concreto.

Actualmente, en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010, oficializado en el Decreto Ejecutivo N° 36388 MOPT del 20 de enero de 2011, como instrumento de aplicación y observancia técnico/jurídica en el desarrollo y ejecución de las obras públicas pertinentes contratadas por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y por el Estado costarricense; se incluye la especificación del parámetro de regularidad (IRI) para diferentes trabajos. A continuación se citan algunas de las secciones del CR-2010 donde se encuentra esta información:

- 401.16 Control de regularidad (IRI) en carpetas de mezclas asfálticas en caliente
- 401.17 Control de regularidad (IRI) en sobrecapas, reciclajes con sobrecapas o sobrecapas sobre fresados, de mezcla asfáltica en caliente
- Sección 410.) Mezclas Asfálticas Procesadas En Frío de Graduación Densa con Emulsión Asfáltica

- Sección 415.) Perfilado (Fresado) de Capas Asfálticas, Sección 415.06
- 501.14 Control de regularidad (IRI) en pavimentos de losas de hormigón hidráulico
- 503.15 Control de regularidad (IRI) en las sobrecapas de concreto

Específicamente en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica (CR-2010), en la sección 501.14 que se refiere a: Control de regularidad (IRI) en pavimentos de losas de hormigón hidráulico, establece lo siguiente con respecto al IRI en pavimentos nuevos de concreto:

- El cálculo del IRI lo hará el Contratista como parte de su control de calidad, con equipos clasificados como clase 1 según criterio del Banco Mundial.
- Podrán utilizarse los datos de autocontrol para la preevaluación una vez que los datos por parte de la verificación concuerden estadísticamente con estos.
- La preevaluación se hará con las medias fijas de los valores de diez tramos consecutivos de 100 metros.
- De no ser posible contar con diez valores consecutivos, se considerará como representativo del tramo, el valor medio de ellos, que se deberá comparar con el valor límite exigido para los promedios, debiendo cumplir cada valor con las exigencias para los valores individuales.
- Cuando se disponga de un solo valor, se exigirá solamente que este cumpla con el valor límite individual de la especificación.
- Se considerará una regularidad de la superficie aceptable cuanto los promedios consecutivos de diez valores de IRI son inferiores a los establecidos en la siguiente tabla, definida por percentiles del total de datos.

**Tabla 8. Valores IRI por percentil para los promedios**

Porcentaje de m/km	Rodadura e intermedia	
	Tipo de vía	
	Autopistas y Vías concesionadas	Resto de vías
50	< 1.5	< 1.5
80	< 1.8	< 2.0
100	< 2.0	< 2.5

- vii. Ninguno de los diez valores individuales del tramo deberá ser superior a 3.0m/km.
- viii. Irregularidades que excedan las tolerancias de la Tabla 8, y zonas de retención de agua, deberán corregirse según las indicaciones del Ingeniero del Proyecto.
- ix. En autopistas y vías concesionadas el IRI medio será máximo 1.69 y el resto de las vías 1.85 m/km, con una desviación estándar de 0.39 m/km -asumiendo una distribución normal de los datos-.
- x. En caso de incumplir la exigencia en valores individuales, el ingeniero del proyecto ordenará al Contratista hacer las reparaciones necesarias para llegar a un valor de IRI menor al límite máximo establecido para un valor individual -3.0 m/km-. (De no repararse, afectarán el cálculo del IRI del tramo, ya que deberán tomarse en consideración).
- xi. De haber deficiencias en la medias fijas, el Contratista podrá solicitar al Ingeniero del proyecto, la autorización para corregirlas, quien estará facultado para autorizar o rechazar estas reparaciones en tramos de 100 metros. Finalizadas las reparaciones, autocontrol y verificación deberán realizar una nueva medición de los sectores reparados.
- xii. No se exigirá cumplir con el control del IRI en bermas ni singularidades –alteraciones del perfil longitudinal que no provengan de fallas constructivos y que incrementen el valor del IRI en el tramo en que se encuentren-. Se consideran como singularidades: cuellos de empalme, accesos, puentes, badenes, cámaras u otras, autorizadas por el Ingeniero del proyecto.
- xiii. Las singularidades que se pudieran presentar afectarán el tramo completo de 100 metros en la pista en que se encuentran ubicadas, y no deberá considerarse tal tramo en la evaluación. Los tramos de 100 metros que no se consideren en la evaluación por efecto de singularidades, no dividirán el sector homogéneo en que se encuentran

## EXPERIENCIA NACIONAL EN CUANTO A LA REGULARIDAD EN PROYECTOS DE OBRA VIAL

Es importante mencionar la experiencia que en el LanammeUCR se ha desarrollado con respecto al Índice de Regularidad Internacional desde hace ya varios años.

Se puede mencionar en este sentido, el trabajo de investigación desarrollado mediante el informe: UI-03-08 "Determinación de un Procedimiento de Ensayo para el Cálculo del IRI", desarrollado por la Unidad de Materiales y Pavimentos -antigua Unidad de Investigación- en el mes de noviembre del 2008 y, donde se describen elementos de importancia a considerar en el abordaje de este tema.

Por otro lado desde el 2004, y como una de las tareas que por ley se le asignan al LanammeUCR, la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional ha incluido en sus evaluaciones bianuales la valoración de este parámetro.

A estos esfuerzos se les puede sumar el trabajo realizado por la Unidad de Evaluación de la Red Vial Municipal, en el 2012, quien bajo el estudio: LM-PI-GM-08-12 *"Comparación de métodos de análisis: notas de calidad (FWD-VIZIR), notas calidad (FWD-IRI) y PCI, para escogencia del tipo intervención en las redes viales cantonales"*; determinó los rangos de IRI para la evaluación y gestión de las rutas municipales –este estudio se encuentra actualmente en un proceso de uso y calibración-.

Finalmente en la Unidad de Auditoría Técnica, desde el segundo semestre del año 2009 ha elaborado informes a nivel de proyecto, a cargo de la Gerencia de Construcción de Vías y Puentes del CONAVI, donde se evaluó el cumplimiento del Índice de Regularidad Internacional (IRI) según las especificaciones nacionales -CR-2002 o actualmente el CR-2010-manual vigente, teniendo presente que a nivel contractual, este no era un requerimiento para los proyectos evaluados. Lo anterior se ha hecho con el objetivo de evidenciar el nivel de regularidad alcanzado por los contratistas mediante la aplicación de sus propios procesos constructivos en obras viales y el nivel de regularidad que a su vez, la Administración ha aceptado en los proyectos de mejoramiento y reconstrucción recibidos, al no incluir dentro de las especificaciones cartelarias este índice. Adicionalmente como parte de la transferencia de tecnología que ha asumido el LanammeUCR, el objetivo ha sido mostrar las ventajas que ofrece la consideración de este parámetro, tales como: su relación directa con la vida útil del pavimento, los costos de operación, confort y seguridad de la ruta, entre otros.

Entre los proyectos que se han evaluado se pueden mencionar:

- Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 10, Sección Cartago-Paraíso.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 102, Sección San Vicente de Moravia-San Isidro de Coronado.
- Evaluación del IRI, Mejoramiento Ruta No. 204, sección Zapote-San Francisco.
- Evaluación de Regularidad Superficial (IRI) y deterioros prematuros. Proyecto San Francisco-Colina.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 613 Sección Sabalito-Las Mellizas.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 167, sección Librería Universal - La Salle.
- Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 34, sección Quepos-Barú.

Para el caso específico de pavimentos rígidos -objetivo principal de este informe-, se cuenta con información de los proyectos: Zapote- San Francisco, San Francisco-La Colina y la sección de Librería Universal-La Salle.

En la Tabla 9, se presenta la distribución de los datos del IRI para cada uno de los proyectos en mención, así como, los valores promedios para años anteriores.

Como se puede observar en las tablas anteriores, los valores de IRI en los proyectos costarricenses han sido mayores a los establecidos en las especificaciones internacionales y superando casi en el

doble los valores especificados en el CR-2010, es por tanto que, la Tabla 10 constituye un insumo para la mejora de especificaciones posteriores, en procura de una adecuación pertinente a las condiciones nacionales.

**Tabla 9. Porcentaje de m/km del valor del IRI para proyectos de pavimento rígido**

Porcentaje de m/Km	CR-2010 (Resto de Vías) m/Km	Proyectos de obra vial analizados		
		Resto	Resto	Resto
50	1.5	4.6	4.4	3.
80	2.0	4.7	4.5	3.5
100	2.5	4.8	4.7	4.0

Nota: Base de medición es de 100m, año de medición: 2009, tomado del Informe LM-PI-AT-042-12

**Tabla 10. IRI característico de los proyectos en estudio en el año 2009 para una base de medición cada 100m**

Proyecto	MRI @100m	Desviación estándar
Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 204, sección: Zapote - San Francisco	4.7	0.4
Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 211, sección: San Francisco - La Colina	4.4	0.85
Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 167, sección Universal - La Salle	3.3	0.4

Nota: Tomado del Informe LM-PI-AT-042-12

## PROYECTO CAÑAS – LIBERIA

### Descripción Del Proyecto

El proyecto fue adjudicado el 08 de noviembre del 2011 a la Constructora Consorcio FCC – Interamericana Norte y de acuerdo con el Cartel de Licitación, el alcance del proyecto es la realización de las actividades constructivas para la ampliación a 4 carriles, (2 en cada sentido de circulación) y la rehabilitación de la carretera existente, de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas – Liberia, con una longitud de 50,610 kilómetros (cincuenta kilómetros seiscientos diez metros), iniciando en el kilómetro 166+300 (aproximadamente 600 metros antes del Río Cañas) y finaliza en el kilómetro 216+910 (aproximadamente 600 metros después de la Quebrada Piches). El proyecto cuenta con una longitud de 50,610 kilómetros y 9 puentes peatonales (Figura 35).



**Figura 35**

Ubicación del proyecto sobre la Ruta Nacional N°1, sección: Cañas-Liberia

A manera de antecedente, es importante mencionar que la Administración planteó la posibilidad de que el oferente cotizara para 2 (dos) alternativas de pavimento: Semirígido (superficie de ruedo con carpeta de concreto asfáltico) o Rígido (superficie de ruedo con losas de hormigón de concreto hidráulico); por tanto, cada oferente podía presentar de acuerdo con sus intereses particulares oferta para una o para ambas alternativas de pavimento.

La estructura contratada fue la de pavimento rígido con una base estabilizada con cemento BE-35 y el diseño que se colocará en el proyecto es el siguiente:

*Estructura de pavimento para la vía existente:* Recuperar un espesor promedio de 20 cm de la estructura de pavimento existente, incorporarle cemento, homogenizar y compactar para obtener una base mejorada BE-35.

Sobre esta superficie de base mejorada con la resistencia mínima para una BE-35, construir una losa de concreto hidráulico de 25 cm de espesor.

*Estructura de pavimento para la ampliación:* Realizar las excavaciones, limpiezas y obras necesarias.

Sobre la subrasante conformada y compactada, colocar un espesor de 20 cm de material de préstamo seleccionado para acabado caso 2, con un CBR mayor o igual a 10, compactados al 95% de la densidad máxima establecida en la prueba AASHTO T-99 para materiales no granulares, en caso de que el material sea granular, se deberá compactar al menos hasta obtener el 95% de la densidad máxima establecida en la prueba AASHTO T-180.

Sobre el material de préstamo compactado se colocará un espesor de 20 cm de subbase graduación B, compactados al 95% de la densidad máxima establecida en la prueba AASHTO T-180.

Sobre la subbase compactada se construirá una capa de 20 cm de base estabilizada BE-35, de acuerdo con las características definidas en las especificaciones especiales del contrato.

Sobre esta superficie de base estabilizada construir una losa de concreto de 25 cm de espesor.

Los trabajos deberán ejecutarse con el adecuado control y manejo de tráfico para garantizar la fluida circulación vehicular en al menos dos carriles durante la totalidad de la ejecución de las obras.

Durante la etapa de construcción del proyecto podrá haber otros contratistas, en la construcción de Puentes y Pasos a Desevel. Dado lo anterior 100 metros antes y después de cada puente, no se efectuarán actividades constructivas correspondientes a la estructura del pavimento.

Igualmente en los pasos a desevel (Cañas-Bagaces-Liberia), no habrá intervención entre las siguientes estaciones:

- Para el paso a desevel de Cañas desde la estación 167+00 hasta la estación 168+200.
- Para el paso a desevel de Bagaces desde la estación 188+980 hasta la estación 189+900.
- Para el paso a desevel de Liberia desde la estación 214+600 hasta la estación 215+800.

El monto original del contrato es de ₡48.251.641.725,43 (colones), y el plazo de ejecución inicial es de 730 días naturales contados a partir de la orden de inicio, que según la Orden de Servicio N° 1, se dio el 14 de mayo del 2012. La Figura 36 muestra una parte de la losa en construcción del proyecto.



**Figura 36**

Construcción de losas de concreto en el proyecto Cañas-Liberia

## Especificaciones del Cartel de Licitación

Para desarrollar esta sección del informe se analiza la sección VI. Requisitos de las obras "Control de Regularidad" del Cartel de Licitación del proyecto en mención, donde se definen las especificaciones para la medición del perfil longitudinal y cálculo del IRI, estableciéndose que:

*...Se medirá en forma continua en tramos de 200 metros, o fracción en caso de que el último tramo de un sector homogéneo no alcance a los 200 m. Se informará el IRI (m/Km.) con un decimal. La rugosidad se medirá longitudinalmente por pista mediante un sistema perfilométrico de precisión; se medirá la elevación del perfil al milímetro y con una frecuencia igual o superior a cuatro puntos por metro, es decir, cada 250 mm, como máximo, y ejecutando el programa del IRI. Alternativamente, este control se podrá efectuar con rugosímetros del tipo respuesta, debidamente calibrados con algún sistema perfilométrico que cumpla las mismas características mencionadas anteriormente, o bien, mediante nivel y mira con la precisión y frecuencia señaladas.*

*La evaluación del IRI se realizará por tractos de cinco tramos consecutivos. Se entenderá que la superficie del pavimento tiene una rugosidad aceptable si todos los promedios consecutivos de cinco valores de IRI tienen un valor igual o inferior a 1,5 m/km, y ninguno de los valores individuales supera 2,0 m/Km. En caso de incumplimiento de esta última condición, el Contratista deberá efectuar las reparaciones necesarias para llegar a un valor de IRI bajo el límite máximo establecido. En caso contrario, se aplicará una multa del 40% del costo del Pavimento de hormigón asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19mm, de 15 cm de espesor (sic). (Lo subrayado no es del texto original).*

*En caso de incumplimiento de la condición del promedio de cinco muestras consecutivas (200 m cada una), se aplicará la siguiente tabla de multas sobre el valor de la superficie de rodamiento:*

**Tabla 11. Multas por deficiencias en la rugosidad**

IRI (m/km) ASTM E-70	Multas con respecto al valor de la capa de carpeta asfáltica en el área afectada
$1,5 > \text{IRI}$	0%
$1,5 \leq \text{IRI} < 1,75$	5%
$1,75 \leq \text{IRI} < 2,0$	10%
$2,0 \leq \text{IRI} < 2,5$	20%
$2,5 \leq \text{IRI}$	40%

Si el sector homogéneo tiene una longitud inferior o igual a 800 m, sólo regirá la condición de que ninguno de los valores individuales medidos supere el IRI máximo permitido. En caso de incumplimiento, el Contratista deberá efectuar las reparaciones necesarias para llegar a un valor de IRI bajo el límite máximo establecido. En caso contrario, se aplicará una multa del 40% del costo del Pavimento de hormigón asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19mm, de 15 cm de espesor (sic)

En caso de que el IRI supere el valor de 4.0m/Km., para un tramo particular, dicho tramo deberá ser demolido y reconstruido sin costo adicional para la Administración. El contratista deberá suministrar los informes de índice de rugosidad (IRI) para la totalidad de los tramos del proyecto. El informe será suministrado como requisito para el trámite de estimaciones de pago que involucren el costo Pavimento de hormigón asfáltico en caliente con tamaño máximo nominal de 19mm, de 15 cm de espesor (sic)...

(Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), 2011)

## OBSERVACIONES

Del contraste de las especificaciones del cartel, el CR-2010 y la revisión bibliográfica con respecto a la realidad en proyectos internacionales, se puede determinar lo siguiente:

### Con respecto a la normativa nacional CR-2010

- La bibliografía recopilada, con respecto a las especificaciones de aceptación del IRI en proyectos nuevos a nivel internacional, muestra que los valores de las especificaciones del CR-2010, se encuentran dentro de umbrales aceptables para la realidad nacional, no solamente en los valores máximos definidos para rangos de valores individuales y medias móviles, sino también, en la base de medición -tramos de 100 m- y, en el uso de un requerimiento de la distribución estadística de los datos por medio de diferentes percentiles.
- Otro aspecto importante de señalar es que tanto en la bibliografía recopilada, como en la normativa nacional (CR-2010), el índice de regularidad internacional es utilizado principalmente como un factor de aceptación o rechazo y no como un factor de pago.
- Actualmente la Comisión de Revisión Permanente del CR-2010 se encuentra en un proceso de revisión de la especificación de regularidad superficial para pavimentos flexibles y rígidos.

### Con respecto al cartel de licitación del proyecto analizado

Es importante aclarar que en este apartado se incluye un análisis complementario al planteado en el oficio LM-PI-026-2014.

En primera instancia, se pudo observar a lo largo del análisis realizado en la especificación del Cartel de Licitación para el IRI, que se presentan algunas ambigüedades en la descripción de la especificación, por lo que es importante que la Administración preste especial atención al proceso de elaboración de carteles de licitación, ya que podrían afectar de manera directa la aplicación de un parámetro de condición funcional como lo es el IRI y por ende incidir en el calidad del proyecto.

De acuerdo con el Cartel de Licitación: LPI No. 2011LI-000004-0DI00 "La Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No.1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia" -sección VI: Requisitos de las obras, página 116, Control de rugosidad (IRI)-; la interpretación que realiza el PITRA-LanammeUCR con el objetivo de aclarar posibles inconsistencias o situaciones que puedan generar confusión y de acuerdo con la lectura es la siguiente:

#### Tramos de más de 1000 m

Se siguen los dos requisitos establecidos en el cartel de licitación para valores promedios -1.5 m/km- y para valores individuales -2.0 m/km-.

#### Tramos de 800m a 1000m

Se medirá en forma continua en tramos de 200 metros, o fracción en caso de que el último tramo de un sector homogéneo no alcance a los 200 m.

Si el tramo evaluado tiene una longitud mayor de 800 metros pero menor a 1000m el último tramo de la sección se toma como una fracción, y se considera representativo del tramo el valor medio de ellos, (último tramo) el cual se comparará con el valor límite exigido tanto para los promedios -1.5 m/km- como para los valores individuales -2.0 m/km-.

#### Tramos menos de 800m

Tal y como menciona la especificación del Cartel de Licitación si el tramo es menor a 800m, solamente se considera la condición de valores individuales, la cual indica que ninguno de los valores individuales (base de medición 200m) debe superar 2,0 m/km. Si esto no se cumple el Contratista deberá realizar las reparaciones correspondientes para que este llegue al valor límite máximo requerido -2,0 m/km -, en caso contrario se aplicará la multa correspondiente.

Cabe recalcar que en esta redacción se le da la oportunidad al Contratista de realizar las reparaciones necesarias al tramo medido para su respectiva aceptación y pago, de no ser así la Administración tiene el poder de aplicar la multa respectiva (ya sea el 40% del valor del pavimento o el rechazo si este tiene valores mayores a 4.0m/km), esto fundamentado en los datos de verificación de la calidad.

En el CR-2010 sección 501.14 " Control de regularidad (IRI) en pavimentos de losas de hormigón hidráulico" se maneja el mismo concepto que en el Cartel de Licitación del proyecto en mención en cuanto al tratamiento de valores individuales. En esta sección se menciona que: *"... Si no es posible disponer de diez valores consecutivos para la evaluación de las medias fijas y se cuente sólo con menos valores, se considerará como representativo del tramo el valor medio de ellos, el cual se comparará con el valor límite exigido para los promedios, debiendo también cumplir cada uno de los valores con las exigencias para valores individuales. En el caso que se disponga de un solo valor, éste no tendrá más exigencia que el valor límite individual considerado en la especificación..."*

Por otra parte, en el cartel de licitación del proyecto en cuestión (LPI No. 2011LI-000004-ODI00), se menciona que: *"... El control de IRI (índice de rugosidad internacional) se realizará por sectores homogéneos, correspondientes a un mismo tipo de superficie de ruedo. No se considerarán puentes, vados otras singularidades determinadas por la Ingeniería de Proyecto, que afecten la medición..."*

A partir de lo anterior, se considera sector o tramo homogéneo como la sección de un pavimento de estructura uniforme y que no es dividido por puentes, líneas férreas, cruces de calles y otros que puedan alterar el perfil longitudinal del camino e incrementar el valor del IRI (singularidades). Con base en la lectura de la especificación del cartel donde describe el procedimiento para medir tramos menores a 800m, es posible medir cualquier sección de proyecto que la Ingeniería de Proyecto considere y aplicando las singularidades aprobadas por ésta. Es criterio del LanammeUCR que el hecho de que en un proyecto existan singularidades, dichas singularidades no segmentan al mismo, ya que existe un procedimiento para eliminar el efecto de éstas en la medición del IRI.

Como se mencionó, una singularidad corresponde a elementos que provoquen una alteración del perfil longitudinal del camino, que no provenga de fallas constructivas o, que su presencia sea ineludible para el Contratista, incrementando el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. En caso de que exista una singularidad, se recomienda eliminar los datos dentro del área de influencia de la singularidad con el objetivo que esta no afecte los datos de IRI. Se define área de influencia asociada a la singularidad como la suma de su longitud más su área de influencia de 40 m hacia delante en el sentido de la medición. Por lo que la medición de un tramo que contenga una singularidad se puede hacer sin problemas, solamente se recomienda que se sigan los pasos descritos anteriormente.

Es importante realizar la medición del perfil longitudinal y cálculo del IRI en secciones, esto le permite a la Administración conocer el estado del proyecto y al contratista realizar las reparaciones necesarias para garantizar el cumplimiento de la especificación y entrar en un proceso de aprendizaje y mejora continua sobre el procedimiento y acciones necesarias para cumplir con lo requerido.

Si bien es cierto y tal como se mencionó anteriormente, la continuidad del proceso constructivo influye directamente sobre la calidad de la superficie de ruedo y, esta continuidad se ve reflejada en el cálculo del perfil longitudinal (IRI), se debe prestar especial atención en no confundir los defectos que resulten de los problemas constructivos o de planificación con las singularidades.

En el CR-2010 se menciona que además de realizar la medición y cálculo de IRI por secciones del proyecto dando la oportunidad al Contratista de reparar secciones con incumplimientos, se debe de realizar una medición una vez finalizado el proyecto en su totalidad, de esta forma el IRI obtenido podrá reflejar defectos constructivos provocados por problemas durante el proceso constructivo que no se puede observar cuando la medición del IRI se realiza por secciones. Textualmente indica:

*"... En el momento que se dé la finalización oficial de la obra el Ingeniero de Proyecto ordenará la medición final de la regularidad en la totalidad de la obra como procedimiento de aceptación definitiva..."*

## Recomendaciones por parte del LanammeUCR

Partiendo de lo expuesto en la sección anterior, que corresponde meramente a la interpretación del texto del cartel, se hace importante para el PITRA-LanammeUCR, mencionar una serie de recomendaciones que, desde la perspectiva técnica, es necesario realizar a las especificaciones definidas en el cartel:

- i. Contraponiendo lo estipulado en el cartel de licitación (con respecto a que los valores promedio de los cinco tramos consecutivos de 200 m sea menor a 1.5 m/km), con lo establecido en el CR-2010 (para las medias fijas de 10 valores consecutivos en tramos de 100 m, según los percentiles definidos en la Tabla 8 y, que definen un valor promedio de 1.85 m/km), se determina que: por un lado, la especificación del cartel es más estricta en términos del valor establecido; mientras que por el otro, el CR-2010 es más estricto en términos de la longitud del tramo. Tomando en cuenta ambas consideraciones, sigue siendo la especificación del cartel un poco más rigurosa, por lo que es necesario valorar para éste y futuros proyectos que la especificación de IRI se adapte a la realidad nacional en materia de la técnica en construcción de pavimentos de concreto.
- ii. En complemento a lo anterior y tomando en cuenta las especificaciones internacionales y la reciente experiencia en Costa Rica en proyectos de este tipo, para el proyecto en cuestión se recomienda considerar para valores promedio consecutivos de cinco valores un valor de IRI  $\leq 1.8$  m/km para las medias móviles, en lugar del 1.5 m/km definido en el cartel para los promedios fijos, conservando la longitud de 200 m del tramo de medición, que se considera es aceptable, si se compara con las especificaciones de Chile --(Tabla 7), que pueden asociarse como una buena referencia. Debe quedar claro que el IRI máximo permitido para valores promedio consecutivos de cinco valores de IRI recomendado es: IRI  $\leq 2.0$  m/km.
- iii. Con respecto a los valores individuales de los datos considerados en las medias móviles del inciso anterior (ii), se recomienda que estos cumplan con valores de IRI  $< 2.5$  m/km. Debe quedar claro que el IRI máximo permitido para valores individuales recomendado es: IRI  $\leq 2.5$  m/km.
- iv. Bajo la modificación anterior se hace necesaria la redefinición de la tabla de multas del cartel de licitación como se propone en la Tabla 12, estableciendo multas de 40% del costo del pavimento de concreto hidráulico de 25 cm de espesor -según lo que se establece en el reglón de pago correspondiente- para valores de IRI entre 3.5 y 4.0 m/km, 20% entre 3.0 y 3.5 m/km, 10% entre 2.5 y 3.0 m/km, 5% entre 2.0 y 2.5 m/km, sin multa cuando son menores a 2.0 m/km y su reparación al ser superiores a 4.0 m/km.

**Tabla 12. Modificación propuesta a la tabla de multas del cartel**

IRI (m/km)	Multas
$2.0 > \text{IRI}$	0%
$2.0 \leq \text{IRI} < 2.5$	5%
$2.5 \leq \text{IRI} < 3.0$	10%
$3.0 \leq \text{IRI} < 3.5$	20%
$3.5 \leq \text{IRI} < 4.0$	40%
$4.0 \leq \text{IRI}$	Se repara

- v. Finalmente, para una interpretación adecuada de la especificación, es necesario definir los siguientes conceptos:
- a. Sectores homogéneos: sectores en la red o ruta específica con el mismo tipo de superficie de ruedo.
  - b. Singularidades: alteraciones al perfil longitudinal, para este proyecto se toman en cuenta además de: cruces de calles, puentes, badenes, tapas de alcantarillas, cuñas y las ventanas para el acceso a propiedades privadas y caminos públicos, debido a que se han contabilizado 500 entradas, lo que es poco usual en proyectos de este tipo, adicionalmente es importante mencionar que debido al material que es utilizado en este proyecto para construir la superficie de ruedo (concreto), el proceso constructivo necesario para completar las ventanas mencionadas anteriormente influye directamente en el perfil del proyecto y por lo tanto en este caso específico se consideran como singularidades. Por otro lado no se deben considerar como singularidades, las interrupciones producidas por condiciones climáticas o del ambiente, ya que estas no están asociadas al perfil de la carretera.. El área de influencia a considerar en cada singularidad corresponderá a los 40 metros posteriores.
- vi. De forma similar a lo establecido en el CR 2010, las singularidades que se pudieran presentar afectarán el tramo completo, en este caso de 200 metros en la pista en que se encuentran ubicadas, y no deberá considerarse tal tramo en la evaluación. Tramos de 200 metros que no se consideren por estas singularidades, no deberán dividir el sector homogéneo en que se encuentran.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ante el análisis desarrollado en el presente informe, se concluye que la especificación del IRI del proyecto Cañas Liberia es ambigua en su redacción y, comparativamente con los estándares internacionales es más rigurosa, máxime si se contemplan en específico las condiciones del proyecto -alrededor de 500 entradas, que no es común en proyectos de este tipo- y la experiencia nacional en la construcción de pavimentos de concreto en la que el IRI característico alcanzado está en el rango de 3.3 a 4.7 m/km. En virtud de lo anterior, se recomienda para éste y futuros proyectos, valorar técnicamente la idoneidad de la especificación establecida en el Cartel de Licitación LPI No. 2011LI-000004-0DI00.

Finalmente, la Tabla 13 a continuación muestra a manera de resumen, los parámetros establecidos en el Cartel de Licitación, el CR2010 y la propuesta que se describe en el presente documento.

**Tabla 12. Resumen comparación de especificaciones de IRI**

	Cartel de Licitación	CR-2010	Consideraciones técnicas para el proyecto en cuestión, en relación con la especificación del IRI	
Valor individual	2.0 m/km	3.0m/km	2.5 m/km	
Media móvil IRI	---	Percentiles 50: IRI < 1.5 m/km 80: IRI < 1.8 m/km 100: IRI < 2.0 m/km		
Promedio IRI	1.5 m/km	1.85 m/km	2.0 m/km	
Longitud tramo	200 m	100 m	200 m	
Tabla de pago	NA Se concibe como factor de aceptación o rechazo		IRI (m/km)	Multas
			1.5 > IRI	0%
			1.5 ≤ IRI < 1.75	5%
			1.75 ≤ IRI < 2.0	10%
			2.0 ≤ IRI < 2.5	20%
			2.5 ≤ IRI	40% o se repara
		IRI (m/km)	Multas	
		2.0 > IRI	0%	
		2.0 ≤ IRI < 2.5	5%	
		2.5 ≤ IRI < 3.0	10%	
		3.0 ≤ IRI < 3.5	20%	
		3.5 ≤ IRI < 4.0	40%	
		4.0 ≤ IRI	Se repara	

Por tanto, corresponderá a la Administración definir y utilizar los mecanismos que considere aplicables y convenientes a nivel legal y administrativo, para el buen desarrollo y término del proyecto en cuestión, así como para futuros proyectos de similar condición.



# EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Paulina Leiva Padilla, Ana Elena Hidalgo

## INTRODUCCIÓN

En la ejecución adecuada de un proyecto de construcción, es necesario aplicar un control de calidad de procesos donde se pretenda dar la capacidad necesaria a la obra, a los menores costos de inversión requeridos.

Para lograr este objetivo, es necesaria la introducción de especificaciones técnicas, que a partir del fundamento técnico ingenieril, permitan identificar anomalías en la ejecución del proyecto, que puedan ser corregidas para el mejoramiento de los procedimientos constructivos, prolongando al mismo tiempo la durabilidad de la obra.

Por ejemplo, a nivel de comodidad, seguridad y costos de operación del usuario, el Índice de Regularidad Internacional (IRI), se ha convertido actualmente en uno de los controles receptivos más importantes. Con este, es posible valorar el acabado superficial del pavimento a través de la evaluación de su rugosidad.

A causa de la entrada en ejecución de especificaciones técnicas con respecto a IRI en el control de calidad de proyectos nuevos en Costa Rica, el PITRA-LanammeUCR, a través de su Unidad de Materiales y Pavimentos, con la finalidad de dar a los profesionales involucrados, herramientas que les permitan comprender y definir la forma en que se debe abordar este tema en sus proyectos, ha generado el presente documento, que contiene un ejemplo de evaluación de IRI con base en la aplicación de la metodología chilena LNV 107-2000 y la utilizada en la Unidad de Auditoría Técnica del PITRA-LanammeUCR.

Cabe destacar que para este ejemplo, se ha definido una especificación especial similar a establecida en proyectos reales en el país, que pueden tener diferencias con las formuladas en el CR2010, al ser adaptadas a las condiciones específicas de cada proyecto.

### Objetivo del estudio

Desarrollar un ejemplo de cálculo que permita comprender la forma de evaluación del IRI en proyectos carreteros nuevos.

## INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

### Modelo matemático del IRI

Para comprender la forma en que se debe interpretar y utilizar el término IRI (Índice de Regularidad Internacional) es importante partir del concepto de perfil longitudinal. Según (Badilla, Elizondo, & Barrantes, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI, 2008) este puede entenderse como: "... una representación en dos dimensiones de la superficie del mismo, a lo largo de un línea imaginaria. Por lo tanto, la medición del perfil es una serie de números que representan elevaciones relativas respecto a un nivel de referencia."

Por lo tanto, el índice de este perfil es un valor calculado, que contiene las variaciones del perfil superficial y, su valor se relaciona con un modelo matemático de un vehículo en movimiento.

Ya que el IRI es un índice es por tanto portable y reproducible -es decir que puede ser calculado a partir del perfil verdadero- (Badilla, Elizondo, & Barrantes, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI, 2008), esto quiere decir que de un simple perfil pueden calcularse muchos índices de regularidad, empleando transformaciones matemáticas de cuatro pasos (Badilla, Elizondo, & Barrantes, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI, 2008):

- a. **Medición física del perfil longitudinal:** medición de las cotas o elevaciones de terreno que permiten representar el perfil real de camino a través de un sistema clasificador asociado a la precisión obtenida por parte del instrumento utilizado en la auscultación del camino.
- b. **Filtrado de longitudes de onda y datos:** análisis estadístico (media móvil) y adecuaciones matemáticas para un nuevo perfil, posible de ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades observadas. Un filtrado de la regularidad por media móvil se define como la sumatoria de:

$$h_{ps}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} h_p(j)$$

Ecuación 1

$$k = \max [1, \text{nint}(L_B / \Delta)]$$

Donde:

hp= elevación del perfil.

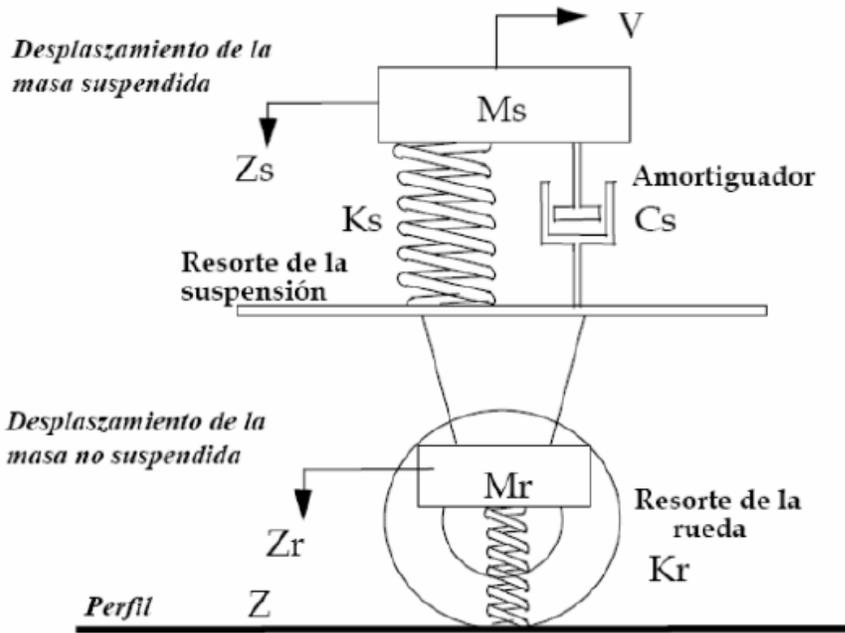
hps= elevación del perfil suavizado.

max= valor máximo de 2 argumentos.

nint= entero más cercano.

LB= longitud base de la media móvil, 250 mm.

- c. **Segundo filtro:** aplicación del modelo de cuarto de coche, a través del cual se registran las características asociadas al camino con base en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar. Por tanto, el IRI se asocia a la mecánica vibratorio de sistemas dinámicos, que modelan de forma simple un vehículo, como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en estas masas, que permiten la medición de movimientos verticales no deseados que se atribuyen a la irregularidad del camino (Figura 37).



**Figura 37**

Modelo de cuarto de carro ((Badilla, Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional. (IRI), 2009))

El modelo de cuarto de carro utiliza los parámetros del "Carro de Oro":

$$k_1 = \frac{k_r}{M_s} = 653 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$c = \frac{c_s}{M_s} = 6 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\mu = \frac{M_r}{M_s} = 0.15 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$k_2 = \frac{k_s}{M_s} = 63.3 \quad \text{Ecuación 5}$$

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.

Donde los movimientos sobre el perfil se asocian a los desplazamientos verticales, velocidad y aceleración de masas, y el sistema se rige entonces por la primera ley de Newton:  $F=m*a$ .

- a. Escalonamiento del índice: convertir el valor acumulado a una escala apropiada -para normalizar la regularidad por la longitud cubierta (Ecuación 6)- (Badilla, Elizondo, & Barrantes, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI, 2008). De esta manera es que el IRI se expresa en unidades de mm/m o m/km.

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_r| dt \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$z_s$ = elevación (coordenada vertical) de la masa suspendida.

$z_r$ = elevación (coordenada vertical) de la masa no suspendida.

$L$ = longitud  $L$  para la normalización.

### 3.1.2. Elementos que intervienen en la determinación del IRI

Como se mencionó previamente, el IRI es un valor promedio de sus valores unitarios o puntuales, cada cierta longitud; es por tanto necesaria la determinación de esta longitud específica, es común el uso de un valor unitario cada 250 mm, el un valor global depende de las especificaciones establecidas en cada país, por ejemplo en Costa Rica, según el CR-2010, el valor del intervalo global de medición definido es cada 100 m.

Es importante tomar conciencia de que la longitud del intervalo es un elemento importante, ya que intervalos de longitudes grandes podrían ocultar valores altos de regularidad superficial en pavimentos, llevando entonces a valores satisfactorios de IRI que realmente no lo son. Intervalos de longitudes menores por otra parte, pueden llevar a la detección de irregularidades indeseables, contribuyendo a la generación de mejores niveles de seguridad y confort (Badilla, Elizondo, & Barrantes, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI, 2008).

Como se ha mencionado, el IRI contempla la diferencia entre el perfil longitudinal teórico y el existente, donde pueden presentarse singularidades que afecten la medición del IRI. Haciendo referencia al documento LM-PI-UJP-A-007, que precede el presente informe y el informe UI-03-08, según el Laboratorio Nacional de Vías de Chile bajo la norma LNV 107-2000 se define singularidad como:

*"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"*

Esta metodología define el área de influencia que se asocia a cada singularidad como:

*"El largo de una singularidad corresponde a la suma de su longitud más su área de influencia que son 40 m hacia adelante [sig] en el sentido de medición"*

## **Ejemplo de evaluación de IRI**

Con la finalidad de considerar los aspectos comentados en los apartados anteriores, y aclarar la forma que se realiza la evaluación de los datos de IRI en un proyecto nuevo, a continuación se describe un ejemplo de aplicación, tomando en cuenta la forma considerada para Chile y para Costa Rica en la evaluación del parámetro IRI:

Considere un proyecto nuevo de un pavimento de concreto de 3000 km de longitud, en el que se desea evaluar el parámetro IRI para el control de calidad del proyecto. A lo largo de la longitud del proyecto, se han identificado dos singularidades puntuales en los estacionamientos 0+650 m y 1+995 m.

## **CASO DE EVALUACIÓN SEGÚN NORMATIVA CHILENA (Montes, 2001):**

Antes de iniciar con la evaluación se definirán los siguientes términos, con la finalidad de que sirvan de ayuda en la interpretación:

Valor unitario de medición: longitud del intervalo individual para el registro del valor de IRI calculado, para este ejemplo, para el ejemplo: 100 mm (10 cm).

Tramo base: longitud global del tramo a considerar para la estimación del IRI, para el ejemplo: 200 m.

Subtramo: tramos en que se divide el tramo base ante la existencia de una singularidad, para el ejemplo: 50 m.

Sector homogéneo: intervalo definido internacionalmente para la estimación promedio de los valores de IRI, cuyas condiciones son homogéneas a lo largo del proyecto y que no está dividido por la existencia de una singularidad, para el ejemplo: 1000 m (1 km), promedio fijo de 10 valores consecutivos -generalmente se utiliza la media móvil, este aplica a este ejemplo-.

A continuación, se numerarán los pasos requeridos durante el proceso de evaluación del IRI:

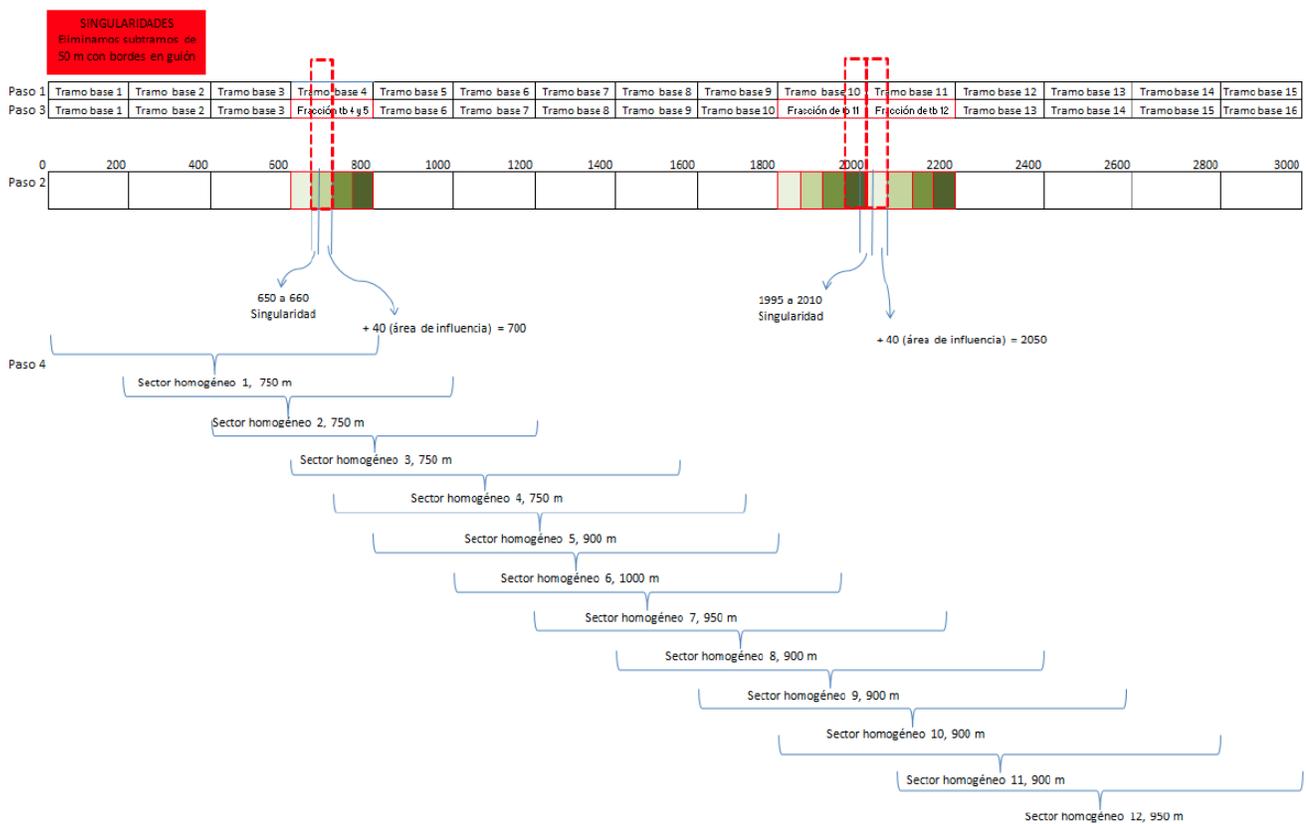
Paso 1: Procesamiento en el sentido del tránsito de cada pista por separado en tramos de 200 m o fracción en caso de que un tramo determinado al inicio o al término no alcance los 200 m.

**Paso 2:** Definición e identificación de singularidades. El largo de la singularidad será su longitud propia más un área de influencia de 40 m hacia adelante en el sentido de la medición. En el caso de que exista alguna singularidad en uno de los tramos de 200 m, se dividirá el tramo en 4 subtramos de 50 m cada uno, y se eliminará de la evaluación los subtramos en que se encuentre la singularidad o su área de influencia, lo restante será considerado como fracción del tramo base y se evaluará de acuerdo a lo establecido en las especificaciones.

**Paso 3:** Redefinición de los tramos de 200 metro o fracción, considerando el efecto de las singularidades.

**Paso 4:** Definición de sectores homogéneos. Se definirán los sectores de 5 tramos base consecutivos, para la evaluación por media o media móvil, según haya sido establecido en las especificaciones del proyecto. Se considerará una regularidad aceptable si los valores obtenidos para las medias cumplen con las especificaciones del contrato y, ninguno de los valores individuales supera los límites establecidos en el mismo. En caso contrario, se procede a la aplicación de los factores de pago y rechazo, de acuerdo a lo establecido en el pliego de especificaciones del contrato.

Con base en lo anterior, un esquema general del proyecto se muestra en la Figura 38:



**Figura 38**

Esquema del ejemplo utilizando la metodología chilena para la evaluación del IRI

Los datos del ensayo de control, y el procesamiento correspondiente se muestran en la Tabla 14:

**Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno**

Estación		MRI (m/ km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos	
Ini	Fin						
0	10	3.1	Tramo base 1 200 m	Tramo base 1	Sector homogéneo 1	750 m	Cumple
10	20	3.3					
20	30	3.5					
30	40	3.2					
40	50	2.2					
50	60	3.1					
60	70	1.3					
70	80	1.4					
80	90	2.5					
90	100	1.2					
100	110	3.1					
110	120	2.0					
120	130	2.5					
130	140	2.1					
140	150	1.2					
150	160	1.1					
160	170	3.4					
170	180	3.2					
180	190	3.4					
190	200	2.3					
200	210	1.1	Tramo base 2 200 m	Tramo base 2	Sector homogéneo 2	750 m	Cumple
210	220	3.3					
220	230	1.1					
230	240	2.1					
240	250	1.4					
250	260	3.2					
260	270	3.1					
270	280	3.4					
280	290	1.2					
290	300	2.4					
300	310	1.0					
310	320	1.2					
320	330	3.4					
330	340	1.2					
340	350	2.2					
350	360	1.2					
360	370	1.3					
370	380	1.2					
380	390	2.3					
390	400	1.5					

Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno

Estación		MRI (m/ km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos										
Ini	Fin															
400	410	1.2	Tramo base 3 200 m		Tramo base 3 200 m 1.9 Cumple			Sector homogéneo 3 750 m 1.7 Cumple								
410	420	1.5														
420	430	2.4														
430	440	1.2														
440	450	2.5														
450	460	2.2														
460	470	1.1														
470	480	2.3														
480	490	2.1														
490	500	2.1														
500	510	1.4														
510	520	1.3														
520	530	2.1														
530	540	2.0														
540	560	2.4														
560	570	1.2														
570	580	2.1														
580	590	2.5														
590	600	2.4														
600	610	1.0	Tramo base 4 200 m	Sing. 1				Sector homog. 4 750 m 1.8 Cumple								
610	620	2.2														
620	630	1.5														
630	640	2.4														
640	650	2.4														
650	670	4.5														
670	680	4.1														
680	690	3.0														
690	700	2.8														
700	710	2.0	Área de influencia					Sector homogéneo 4 900 m 1.9 Cumple								
710	720	1.4														
720	730	1.4														
730	740	2.2														
740	750	1.1														
750	760	1.1														
760	770	1.4														
770	780	1.3														
780	790	1.3														
790	800	1.2														
800	810	2.4														
810	820	2.1								Tramo base 5 200 m					Sector homogéneo 6	
820	830	1.2														
830	840	2.2														
840	850	1.2														
850	860	2.0														

Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno

Estación		MRI (m/km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos															
Ini	Fin																				
860	870	2.5			1.8																
870	880	2.1			Cumple																
880	890	2.0																			
890	900	1.2																			
900	910	1.5																			
910	920	1.3																			
920	930	1.1																			
930	940	2.0																			
940	950	1.5																			
950	960	2.1																			
960	970	1.2																			
970	980	1.2																			
980	990	2.3																			
990	1000	2.2																			
1000	1010	1.1																			
1010	1020	1.3																			
1020	1030	2.5																			
1030	1040	1.1																			
1040	1050	2.5																			
1050	1060	2.0																			
1060	1070	2.2																			
1070	1080	1.3																			
1080	1090	1.0																			
1090	1100	1.5																			
1100	1110	2.1																			
1110	1120	2.1																			
1120	1130	1.3																			
1130	1140	1.2																			
1140	1150	1.2																			
1150	1160	2.0																			
1160	1170	1.3																			
1170	1180	1.3																			
1180	1190	2.4																			
1190	1200	2.4																			
1200	1210	2.3																			
1210	1220	1.2																			
1220	1230	1.1																			
1230	1240	2.2																			
1240	1250	2.4																			
1250	1260	1.2																			
1260	1270	3.4																			
1270	1280	2.0																			
1280	1290	1.5																			
1290	1300	3.2																			
1300	1310	1.4																			
1310	1320	1.3																			

Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno

Estación		MRI (m/km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos						
Ini	Fin											
1320	1330	3.3	Tramo base 8									
1330	1340	1.3										
1340	1350	3.1										
1350	1360	3.3										
1360	1370	1.5										
1370	1380	3.0										
1380	1390	3.0										
1390	1400	2.1										
1400	1410	1.5										
1410	1420	2.0										
1420	1430	2.1										
1430	1440	3.1										
1440	1450	3.5										
1450	1460	3.1										
1460	1470	2.3										
1470	1480	2.0										
1480	1490	3.0										
1490	1500	1.1										
1500	1510	2.0										
1510	1520	3.1										
1520	1530	2.2										
1530	1540	2.4										
1540	1550	1.2										
1550	1560	3.1										
1560	1570	1.1										
1570	1580	2.3										
1580	1590	3.5										
1590	1600	3.0										
1600	1610	1.5										
1610	1620	1.3										
1620	1630	2.2										
1630	1640	1.4										
1640	1650	2.2										
1650	1660	1.5										
1660	1670	3.3										
1670	1680	2.0										
1680	1690	1.4										
1690	1700	1.4										
1700	1710	1.1										
1710	1720	2.1										
1720	1730	2.5										
1730	1740	1.2										
1740	1750	3.0										
1750	1760	3.4										
1760	1770	3.5										
1770	1780	1.2										

Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno

Estación		MRI (m/km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos									
Ini	Fin														
1780	1790	1.4	Tramo base 10	Fracción de tramo 10	Sector homogéneo 11	900 m	1.9	Cumple	Eliminado	Sector homogéneo 12	950 m	2.1	No cumple		
1790	1800	2.4													
1800	1810	1.2													
1810	1820	1.4													
1820	1830	2.1													
1830	1840	1.5													
1840	1850	1.5													
1850	1860	2.3													
1860	1870	1.0												200 m	
1870	1880	1.2													
1880	1890	1.1													
1890	1900	1.1													
1900	1910	2.4													
1910	1920	1.4													
1920	1930	1.3													
1930	1940	2.1													
1940	1950	2.1													
1950	1960	2.1	Tramo base 11	Fracción de tramo 11	Sector homogéneo 12	950 m	2.1	No cumple	Eliminado	Sector homogéneo 12	950 m	2.1	No cumple		
1960	1970	1.4													
1970	1980	1.3													
1980	1990	1.3													
1990	2000	5.0												Sing. 2	
2000	2010	3.9												Sing. 2	
2010	2020	3.5												Área de influencia	
2020	2030	3.0													
2030	2040	2.5													
2040	2050	2.1													
2050	2060	1.2													
2060	2070	2.4													200 m
2070	2080	1.4													
2080	2090	1.1													
2090	2100	1.3													
2100	2110	2.3													
2110	2120	1.1													
2120	2130	2.4													
2130	2140	1.5													
2140	2150	2.4													
2150	2160	1.4													
2160	2170	1.4													
2170	2180	2.2													
2180	2190	2.5													
2190	2200	1.0													
2200	2210	1.5	Tramo base 12	Tramo base 13	Sector homogéneo 12	950 m	2.1	No cumple	Eliminado	Sector homogéneo 12	950 m	2.1	No cumple		
2210	2220	1.4													
2220	2230	2.3													
2230	2240	1.0													

Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno

Estación		MRI (m/km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos			
Ini	Fin								
2240	2250	2.5	200 m		200 m 1.8 Cumple				
2250	2260	2.1							
2260	2270	1.2							
2270	2280	2.1							
2280	2290	1.1							
2290	2300	2.0							
2300	2310	2.3							
2310	2320	2.1							
2320	2330	2.0							
2330	2340	2.3							
2340	2350	1.2							
2350	2360	2.4							
2360	2370	1.2							
2370	2380	2.4							
2380	2390	2.5							
2390	2400	1.1							
2400	2410	2.1							
2410	2420	2.4							
2420	2430	2.3							
2430	2440	1.3							
2440	2450	2.1							
2450	2460	1.0							
2460	2470	2.5							
2470	2480	3.2							
2480	2490	3.1							
2490	2500	1.0							
2500	2510	2.1							
2510	2520	1.3							
2520	2530	2.2							
2530	2540	1.3							
2540	2550	1.4							
2550	2560	2.2							
2560	2570	3.2							
2570	2580	3.5							
2580	2590	1.3							
2590	2600	3.5							
2600	2610	2.4							
2610	2620	1.2							
2620	2630	3.4							
2630	2640	1.3							
2640	2650	3.1							
2650	2660	1.3							
2660	2670	3.3							
2670	2680	2.2							
2680	2690	3.2							
2690	2700	1.2							
			Tramo base 13		Tramo base 14				
					200 m				
					2.2				
					No cumple				
			Tramo base 14		Tramo base 15				
					200 m				
					2.1				
					No cumple				

Tabla 14. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso chileno

Estación		MRI (m/km)	Paso 1:	Paso 2:	Paso 4:	Paso 3: Definición de sectores homogéneos		
Ini	Fin							
2700	2710	1.3						
2710	2720	2.1						
2720	2730	2.2						
2730	2740	1.2						
2740	2750	1.1						
2750	2760	2.4						
2760	2770	1.3						
2770	2780	1.5						
2780	2790	3.2						
2790	2800	3.1						
2800	2810	2.2		Tramo base 15				Tramo base 16
2810	2820	2.4						
2820	2830	3.3						
2830	2840	1.0						
2840	2850	3.5						
2850	2860	3.4						
2860	2870	3.2						
2870	2880	2.5						
2880	2890	2.2						
2890	2900	3.1						
2900	2910	3.3	200 m	200 m 2.5 No cumple				
2910	2920	3.0						
2920	2930	3.1						
2930	2940	3.4						
2940	2950	1.2						
2950	2960	3.1						
2960	2970	2.3						
2970	2980	1.5						
2980	2990	2.2						
2990	3000	1.0						

## CASO DE EVALUACIÓN EN COSTA RICA:

Antes de iniciar con la evaluación se definirán los siguientes términos, con la finalidad de que sirvan de ayuda en la interpretación:

Valor unitario de medición: longitud del intervalo individual para el registro del valor de IRI calculado, para este ejemplo: 100 m (10 cm).

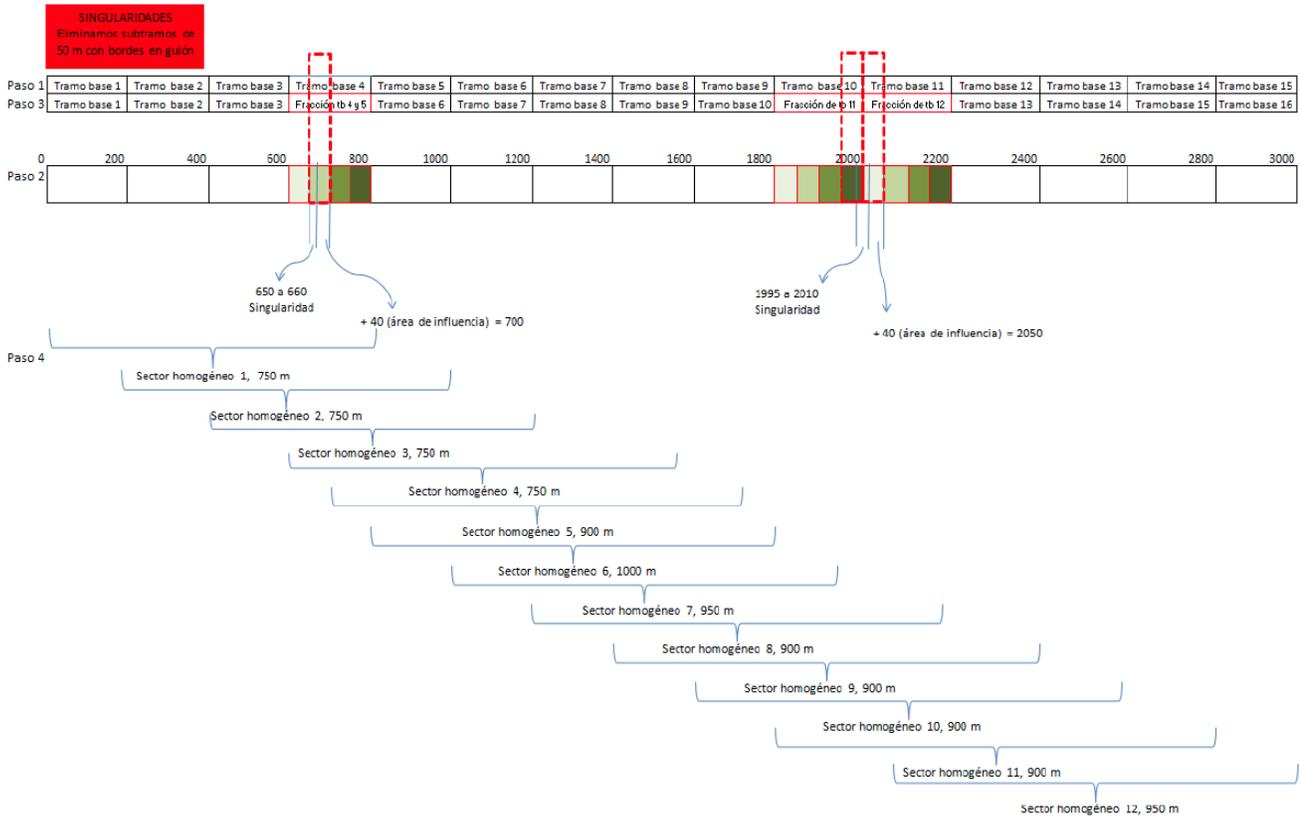
Media móvil: intervalo definido internacionalmente para la estimación promedio de los valores de IRI, para el ejemplo: 1000 m (1 km), promedio fijo de 10 valores consecutivos -generalmente se utiliza la media móvil, este aplica a este ejemplo-.

Sector homogéneo: tramo con condiciones homogéneas a lo largo del proyecto y que no está dividido por la existencia de una singularidad, para el ejemplo: todo el proyecto, por ser la misma superficie de rudo (concreto).

A continuación, se numerarán los pasos requeridos durante el proceso de evaluación del IRI:

Paso 1 y 2 (se dan de manera simultánea): (1) Procesamiento en el sentido del tránsito de cada sentido por separado en tramos de 200 m o fracción en caso de que un tramo determinado al término no alcance los 200 m. (2) Definición e identificación de singularidades. La longitud de la singularidad será su longitud propia más un área de influencia de 40 m hacia adelante en el sentido de la medición. En el caso de que exista alguna singularidad en uno de los tramos de 200 m, se dividirá el tramo en el punto de inicio, y se completará lo restante hasta alcanzar los 200 m.

Paso 3: Cálculo de las medias móviles de los cinco valores consecutivos (tramos promedio), o menor en el caso de que se trate el último tramo promedio y que no disponga este de 5 valores consecutivos. Con base en lo anterior, un esquema general del proyecto se muestra en la Figura 39:



**Figura 39**

Esquema del ejemplo utilizando la metodología costarricense propuesta para la evaluación del IRI

Los datos del ensayo de control, y el procesamiento correspondiente se muestran en la Tabla 15:

Tabla 15. Datos del ensayo y procesamiento. Ejemplo del caso costarricense

Estación		MRI (m/ km)	Paso 2:	Paso 1:	Paso 3:		
Ini	Fin						
0	10	3.1	No cumple	Tramo base 1	Media movil 1000 m	Cumple	
10	20	3.3		200 m	1.9		Cumple
20	30	3.5					
30	40	3.2					
40	50	2.2					
50	60	3.1					
60	70	1.3					
70	80	1.4					
80	90	2.5					
90	100	1.2					
100	110	3.1					
110	120	2.0					
120	130	2.5					
130	140	2.1					
140	150	1.2					
150	160	1.1					
160	170	3.4					
170	180	3.2					
180	190	3.4					
190	200	2.3					
200	210	11	Tramo base 2	Media movil 1000 m	Cumple		
210	220	3.3	200 m	1.9			
220	230	1.1					
230	240	2.1					
240	250	1.4					
240	250	1.4			Cumple		

Estación			Paso 2:	Paso 1:	Paso 3:			
Ini	Fin	MRI (m/km)						
250	260	3.2						
260	270	3.1						
270	280	3.4						
280	290	1.2						
290	300	2.4						
300	310	1.0						
310	320	1.2						
320	330	3.4						
330	340	1.2						
340	350	2.2						
350	360	1.2						
360	370	1.3						
370	380	1.2						
380	390	2.3						
390	400	1.5						
400	410	1.2		<b>Tramo base 3</b>  200m 1.9 Cumple			<b>Media móvil 1000 m</b>  1.9 Cumple	
410	420	1.4						
420	430	2.4						
430	440	1.2						
440	450	2.5						
450	460	2.2						
460	470	1.1						
470	480	2.3						
480	490	2.1						
490	500	2.1						
500	510	1.4						
510	520	1.3						
520	530	2.1						
530	540	2.0						
540	550	1.3						
550	560	2.4						
560	570	1.2						
570	580	2.1						
580	590	2.5						
590	600	2.4						
600	610	1.0		<b>Inicio de Tramo base 4</b>  50 m 1.6 Cumple			<b>Media móvil 1000 m</b>  1.9 Cumple	
610	620	2.2						
620	630	1.5						
630	640	2.4						
640	650	2.4						
650	660	4.5	<b>Singularidad 1</b> <b>Área de influencia</b>		<b>ELIMINAR</b>			
660	670	4.1						
670	680	3.0						
680	690	2.8						
690	700	2.0						
700	710	1.5		<b>Continuación Tramo base 4</b>				
710	720	1.4						
720	730	1.4						
730	740	2.2						
740	750	1.1						
750	760	1.1						
760	770	1.4						
770	780	1.3						
780	790	1.3						
790	800	1.2						
800	810	2.4						
810	820	2.1						
820	830	1.2						
830	840	2.2						
840	850	1.2						
850	860	2.0		<b>Tramo base 5</b>  200m 1.7 Cumple			<b>Media móvil 1000 m</b>  2.0 Cumple	
860	870	2.5						
870	880	2.1						
880	890	2.0						
890	900	1.2						
900	910	1.5						
910	920	1.3						
920	930	1.1						
930	940	2.0						
940	950	1.5						

Estación			Paso 2:	Paso 1:	Paso 3:				
Ini	Fin	MRI (m/km)							
950	960	2.1							
960	970	1.2							
970	980	1.2							
980	990	2.3							
990	1000	2.2							
1000	1010	1.1							
1010	1020	1.3							
1020	1030	2.5							
1030	1040	1.1							
1040	1050	2.5							
1050	1060	2.0	<b>Tramo base 6</b> <b>200m</b> 1.7 Cumple	<b>Media móvil 1000 m</b>  2.0 Cumple					
1060	1070	2.2							
1070	1080	1.3							
1080	1090	1.0							
1090	1100	1.5							
1100	1110	2.1							
1110	1120	2.1							
1120	1130	1.3							
1130	1140	1.2							
1140	1150	1.2							
1150	1160	2.0							
1160	1170	1.3							
1170	1180	1.3							
1180	1190	2.4							
1190	1200	2.4	<b>Tramo base 7</b> <b>200m</b> 2.3 No cumple	<b>Media móvil 1000 m</b>  2.0 Cumple					
1200	1210	2.3							
1210	1220	1.2							
1220	1230	1.1							
1230	1240	2.2							
1240	1250	2.4							
1250	1260	1.2							
1260	1270	3.4							
1270	1280	2.0							
1280	1290	1.5							
1290	1300	3.2							
1300	1310	1.4							
1310	1320	1.3							
1320	1330	3.3							
1330	1340	1.3							
1340	1350	3.1	<b>Tramo base 8</b> <b>200m</b> 2.2 No cumple	<b>Media móvil 1000 m</b>  1.9 Cumple					
1350	1360	3.3							
1360	1370	1.5							
1370	1380	3.0							
1380	1390	3.0							
1390	1400	2.1							
1400	1410	1.5							
1410	1420	2.0							
1420	1430	2.1							
1430	1440	3.1							
1440	1450	3.5							
1450	1460	3.1							
1460	1470	2.3							
1470	1480	2.0							
1480	1490	3.0							
1490	1500	1.1							
1500	1510	2.0							
1510	1520	3.1							
1520	1530	2.2							
1530	1540	2.4							
1540	1550	1.2							
1550	1560	3.1							
1560	1570	1.1							
1570	1580	2.3							
1580	1590	3.5							
1590	1600	3.0							
1600	1610	1.5							
1610	1620	1.3							
1620	1630	2.2							
1630	1640	1.4							
1640	1650	2.2							

Estación			Paso 2:	Paso 1:	Paso 3:													
Ini	Fin	MRI (m/km)																
1650	1660	1.5		Tramo base 9 200m 1.9 Cumple						Media móvil 1000 m 1.9 Cumple								
1660	1670	3.3																
1670	1680	2.0																
1680	1690	1.4																
1690	1700	1.4																
1700	1710	1.1																
1710	1720	2.1																
1720	1730	2.5																
1730	1740	1.2																
1740	1750	3.0																
1750	1760	3.4																
1760	1770	3.5																
1770	1780	1.2																
1780	1790	1.4																
1790	1800	2.4																
1800	1810	1.2																
1810	1820	1.4																
1820	1830	2.1																
1830	1840	1.5																
1840	1850	1.5																
1850	1860	2.3	Singularidad 2 Área de influencia	Inicio de Tramo base 10 140 m 1.6 Cumple						Media móvil 1000 m 2.0 Cumple								
1860	1870	1.0																
1870	1880	1.2																
1880	1890	1.1																
1890	1900	1.1																
1900	1910	2.4																
1910	1920	1.4																
1920	1930	1.3																
1930	1940	2.1																
1940	1950	2.1																
1950	1960	2.1																
1960	1970	1.4																
1970	1980	1.3																
1980	1990	1.3																
1990	2000	5.0																
2000	2010	3.9																
2010	2020	3.5																
2020	2030	3.0																
2030	2040	2.5																
2040	2050	2.1																
2050	2060	1.2																
2060	2070	2.4		Continuación Tramo base 10 60m														
2070	2080	1.4																
2080	2090	1.1																
2090	2100	1.3																
2100	2110	2.3																
2110	2120	1.1										Tramo base 11 200m 1.8 Cumple						Media móvil 890 m 2.1 No cumple
2120	2130	2.4																
2130	2140	1.5																
2140	2150	2.4																
2150	2160	1.4																
2160	2170	1.4																
2170	2180	2.2																
2180	2190	2.5																
2190	2200	1.0																
2200	2210	1.5																
2210	2220	1.4																
2220	2230	2.3																
2230	2240	1.0																
2240	2250	2.5																
2250	2260	2.1																
2260	2270	1.2																
2270	2280	2.1																
2280	2290	1.1																
2290	2300	2.0																
2300	2310	2.3																
2310	2320	2.1		Tramo base 12 200m														
2320	2330	2.0																
2330	2340	2.3																

Estación		MRI (m/km)	Paso 2:	Paso 1:	Paso 3:			
Iní	Fin							
2340	2350	1.2		2.0				
2350	2360	2.4		No cumple				
2360	2370	1.2						
2370	2380	2.4						
2380	2390	2.5						
2390	2400	1.1						
2400	2410	2.1						
2410	2420	2.4						
2420	2430	2.3						
2430	2440	1.3						
2440	2450	2.1						
2450	2460	1.0						
2460	2470	2.5						
2470	2480	3.2						
2480	2490	3.1						
2490	2500	1.0						
2500	2510	2.1						
2510	2520	1.3						
2520	2530	2.2						
2530	2540	1.3						
2540	2550	1.4						
2550	2560	2.2						
2560	2570	3.2						
2570	2580	3.5						
2580	2590	1.3						
2590	2600	3.5						
2600	2610	2.4						
2610	2620	1.2						
2620	2630	3.4						
2630	2640	1.3						
2640	2650	3.1						
2650	2660	1.3						
2660	2670	3.3						
2670	2680	2.2						
2680	2690	3.2						
2690	2700	1.2						
2700	2710	1.3						
2710	2720	2.1						
2720	2730	2.2						
2730	2740	1.2						
2740	2750	1.1						
2750	2760	2.4						
2760	2770	1.3						
2770	2780	1.5						
2780	2790	3.2						
2790	2800	3.1						
2800	2810	2.2						
2810	2820	2.4						
2820	2830	3.3						
2830	2840	1.0						
2840	2850	3.5						
2850	2860	3.4						
2860	2870	3.2						
2870	2880	2.5						
2880	2890	2.2						
2890	2900	3.1						
2900	2910	3.3						
2910	2920	3.0						
2920	2930	3.1						
2930	2940	3.4						
2940	2950	1.2						
2950	2960	3.1						
2960	2970	2.3						
2970	2980	1.5						
2980	2990	2.2						
2990	3000	1.0						
				<b>Tramo base 13</b> 200m 2.2 No cumple				
				<b>Tramo base 14</b> 200m 2.4 No cumple				
				<b>Fracción de Tramo base 15</b> 200m 2.3 No cumple				

## CONCLUSIONES

Considerando la evaluación realizada respecto a cada una de las metodologías descritas anteriormente y, de los conceptos básicos que se ven involucrados en el tema del IRI, se puede comentar lo siguiente:

- El IRI es uno de los parámetros más importantes en el control de recepción de proyectos nuevos, con este se pretende procurar una buena calidad en el acabado del pavimento, que se ve reflejado en el confort, la seguridad y los costos de operación.
- El IRI se obtiene por medio de cálculo matemático -no se mide-, a partir de las ordenadas o cotas de un perfil longitudinal, que no depende de la técnica o equipo utilizado para obtenerlo.
- El presente documento se desarrolla con la finalidad de facilitar el entendimiento de la correcta aplicación del método en la evaluación de un proyecto nuevo, como una de las tareas necesarias en la recepción de proyectos.
- Según el análisis de los resultados con ambas metodologías, se puede mencionar que la costarricense es más sencilla, en el sentido de que siempre se puede disponer de tramos de 200 metros completos, y por tanto los 1000 metros correspondientes a los intervalos consecutivos para la estimación de los cinco de la media.
- Por otro lado, la metodología chilena presenta la ventaja de no perder el estacionamiento en la definición de los tramos base; sin embargo, requiere de más cuidado a la hora de la verificación de los datos.
- Considerando ambas metodologías se puede determinar que ambas cumplen con el objetivo de tomar en cuenta la mayor cantidad de datos posibles y válidos en la evaluación del IRI. En este punto se hace realmente importante mencionar, que lo que debe imperar es evitar la pérdida de intervalos de datos en el cálculo del IRI; ya que como ha sido mencionado, su evaluación se realiza considerando los promedios de valores tomados cada cierto intervalo, por lo que en sí misma la evaluación no considera la totalidad de la superficie, como se desearía en las condiciones más ideales.
- Se considera válida la aplicación de cualquiera de las metodologías expuestas; sin embargo, por el contexto, se recomienda aplicar la metodología costarricense.
- Ante el trabajo generado en este tema, a través de la Unidad de Transferencia de Tecnología del LanammeUCR se podrá someter a revisión la propuesta de procedimiento para la evaluación del IRI, de manera sea un complemento a la especificación de IRI que actualmente está establecida en el CR-2010 y que está en proceso de revisión ante la Comisión de Revisión Permanente de actualización de manuales.



# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, M. (2012). Metodología para la evaluación de pavimentos flexibles de carreteras para proyectos de rehabilitación en Cuba, a partir de la medida de deflexiones con viga Benkelman. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Arriaga, M., Garnica, P., & Rico, A. (1998). Índice internacional de rugosidad en la red carretera de México. Sanfandila. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Awasthi, G., & Singh, T. (n.d.). On Pavement Roughness Indices. Retrieved diciembre 19, 2007, from IE (I) Journal-CV.: <http://www.ieindia.org/publish/cv/0503/may03cv6.pdf>
- Badilla, G. (2009). Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional. (IRI). Revista Infraestructura Vial No.21 , 26-33.
- Badilla, G. (2013). Propuesta para la definición de un procedimiento de medición y análisis del índice de Regularidad Internacional. San José, Costa Rica: LM-PI-002-2013. Informe de asesoría.
- Badilla, G., Elizondo, F., & Barrantes, R. (2008). Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI. Proyecto No. UI-03-08, PITRA-LanammeUCR.
- Badilla, G., Elizondo, F., & Barrantes, R. (2008). Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI. San José: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Bonilla, C., & Dubón, C. (2008). Manual de procesos constructivos para pavimentos de baja intensidad de tráfico en El Salvador, utilizando concreto hidráulico simple y emulsiones asfálticas. San Salvador: Universidad del Salvador.
- Budras, J. (2001, Agosto). A Synopsis on the Current Equipment Used for Measuring Pavement Smoothness. Retrieved diciembre 11, 2007, from <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/smoothness/rough.cfm>
- Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP). (1999). Summary of Pavement Smoothness Specifications in Canada and Around the World. Technical Brief #16. Canada.
- Canadian Strategic Research Program (C-SHRP). (1999). Summary of Pavement Smoothness Specifications in Canada and Around the World. Transportation Association of Canada.
- Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). (2011). La Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Nacional No. 1, Carretera Interamericana Norte, sección Cañas-Liberia . Cartel de Licitación LPI No. 2011LI-000004-0DI00.

- Crespo del Río, R. (2003). Variación del IRI según la longitud de evaluación. Área de Gestión de Infraestructura. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España.
- Dirección de Vialidad Chile. (2001). LNV 107-2000. Determinación de la rugosidad de los pavimentos mediante perfilometría longitudinal. Especificaciones y métodos de muestreo, ensayo y control. Volumen 8. Manual de carreteras.
- Etcheberry, J., Millan, G., & Galilea, S. (2003). Manual de carreteras. Departamento manual de carreteras. Dirección de Vialidad - MOP- Chile.
- Federal Highway Administration . (2012). Highway Performance Monitoring System. U.S. Department of Transportation.
- González, W. (2009). Propuesta de I+D+I de instrumentos de medición de niveles de serviciabilidad de carreteras asfaltadas: un aporte de innovación tecnológica al mantenimiento de obras de infraestructura vial. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2007). Fresado en pavimento asfáltico. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo, Bogotá.
- Kentucky Transportation Cabinet. (2012). Supplemental Specifications to the Standard Specifications for Road and Bridge Construction. Retrieved Marzo 5, 2014, from <http://transportation.ky.gov/Pages/default.aspx>
- Leiva, P., & Hidalgo, A. (2014). CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN RELACIÓN CON LA ESPECIFICACIÓN DE IRI PARA EL PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO. 1, CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN CAÑAS-LIBERIA. San Pedro de Montes de Oca: Informe de asesoría. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicación. (2011). Normas para la estructura del pavimento. Manual de Carreteras del Paraguay.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2000). Especificaciones generales para construcción de carreteras (EG - 2000). Retrieved marzo 4, 2014, from [http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos\\_ferro/manual/eg-2000/index.htm](http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/eg-2000/index.htm)
- Montes, R. (2001). Determinación de la Rugosidad de los Pavimentos mediante Perfilometría Longitudinal. Chile: Sub-Unidad de Normalización, Laboratorio Nacional de Vialidad.
- Ningyuan, L., Marciello, F., & Kazmicrowski, T. (sf). Quality Assurance Applied in Measuring Pavement Roughness of Ontario Provincial Roads. Retrieved diciembre 18, 2007, from <http://pms.nevadadot.com/2002presentations/47.pdf>
- Orozco, J., Téllez, R., Solorio, R., Pérez, A., Sánchez, M., & Torras, S. (2004). Sistemas de Evaluación de Pavimentos. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Pagola, M., & Giovanon, O. (2011). Aspectos a considerar al momento de definir exigencias de rugosidad en calzadas pavimentadas. Brasil: XVI Congreso Iberoamericano del Asfalto.

- Sayers, M. (1995). On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. Washington, DC. No. 1501, pp 1-12: Transportation Research Record, Transportation Research Board (TRB).
- Sayers, M., & Karamihis, S. (1998). The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan.
- Sayers, M., Gillespie, T., & Paterson, W. (1982). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. Washington, D.C.: World Bank.
- Solminihaç, H., Cabrera, C., & Bengo, E. (2002). Evaluación de la capacidad estructural y funcional del pavimento durante el proceso de construcción. Chile: 6to Congreso Internacional PROVIAL.
- Swanlund, M. (2000). Enhancing Pavement Smoothness. Public Roads, FEderal Highway Administration , Vol. 64, No. 2.
- Townsend, E., & Veliz, C. (n.d.). Determinación de umbrales de rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos. Retrieved diciembre 2007, 19, from [http://www2.udec.cl/~provial/trabajos\\_pdf/43EdgardoTownsendUmbralesrugosidad.pdf](http://www2.udec.cl/~provial/trabajos_pdf/43EdgardoTownsendUmbralesrugosidad.pdf)
- UMTRI Research Review. (Enero - Marzo 2002). The Shape of Roads to Come: MEasuring and Interpreting Road Roughness Profiles. Volumen 33. No. 1.
- Ventura, J., & Alvarenga, E. (2005). Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerior de Obras Públicas, Transporte y de Vivienda y Desarrollo Urbano.
- 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.
- Vialidad Ecuador. (n.d.). Evaluación Funcional y Operativa de Vías y Pavimentos. Retrieved febrero 14, 2014, from <http://www.vialidad.ec/sites/default/files/archivos/tecnicos/gestionVialDescentralizada2/Evalvias/iri.html>
- Zaabar, I., & Chatti, K. (2013). Estimating vehicle operating costs due to pavement surface conditions. Washington. D.C.: 93rd Annual Meeting of Transportation Research Board.
- Zanghloul, S. (1996, Vol. 65). Benefits of Constructing Smoother Pavements. Journal of the Assosiation of Asphalt Paving Tecnologists , pp. 747 - 770.



**LanammeUCR**

---

**LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**