



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

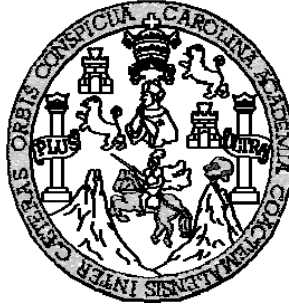
**USO DEL PERFILÓMETRO INERCIAL CON SENSORES LÁSER  
PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI Y SUS APLICACIONES EN  
LA INGENIERÍA VIAL**

Karla Giovanna Judith Pérez Loarca  
Asesorada por el Ing. Carlos Cordón Girón

Guatemala, octubre de 2005



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**USO DEL PERFILÓMETRO INERCIAL CON SENSORES LÁSER  
PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI Y SUS APLICACIONES EN  
LA INGENIERÍA VIAL**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**POR**

**KARLA GIOVANNA JUDITH PÉREZ LOARCA**

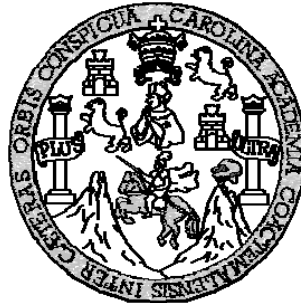
**ASESORADA POR: ING. CARLOS CORDÓN GIRÓN**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**GUATEMALA, OCTUBRE DE 2005**



# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **USO DEL PERFILÓMETRO INERCIAL CON SENSORES LÁSER PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI Y SUS APLICACIONES EN LA INGENIERÍA VIAL,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 01 de junio de 2004.

---

Karla Giovanna Judith Pérez Loarca





## **AGRADECIMIENTOS**

**A Ing. Carlos Córdn** Por su apoyo y colaboración en el asesoramiento del presente trabajo de graduación.

**A Ing. Carlos Gramajo** Por su apoyo y valiosa colaboración en el asesoramiento del presente trabajo de graduación.

**A CM Ingenieros**



## DEDICATORIA

- A DIOS** Por darme la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida.
- A mi papá** Víctor Hugo Pérez Guillén
- A mi mamá** Sandra Judith Loarca Hernández  
Por estar a mi lado brindándome su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.
- A mi esposo** Elder Alexander Iboy Herrera  
Por apoyarme para alcanzar esta meta.
- A mi nena** Gianna Alexandra  
Con mucho amor.
- A mis hermanos** Eldyn,  
Y en especial a Melissa, por apoyarme y compartir toda una vida conmigo.
- A mis sobrinos** Melanie y Rodrigo  
Con mucho amor.
- A mis abuelos** Estela Hernández Flores  
Elodia Guillén Arroyo (†)  
Virgilio Pérez Ovalle (†)  
Con mucho cariño y respeto.

**A mis tíos**            Por su apoyo, con cariño y aprecio.

**A mis primos**        Por su amistad y apoyo, con cariño.

**A mis amigos**        Por su amistad y apoyo incondicional.

**A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	III
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL .....	1
1.1 Generalidades .....	4
1.2 Definición de IRI .....	5
1.3 Conceptos derivados de la definición .....	8
1.4 El modelo del cuarto de carro ( <i>Quarter Car</i> ).....	9
2. EQUIPO A UTILIZAR .....	13
2.1 Características .....	13
2.1.1 Perfilómetro inercial con sensores láser (RSP) .....	15
2.1.2 Medidor de distancia (DMI).....	18
2.1.3 Mantenimiento .....	19
2.1.4 Calibración.....	19
3. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN .....	23
3.1 Normas de ensayo.....	23
3.1.1 Norma ASTM E 1170 .....	23
3.1.2 Norma ASTM E 950 .....	24
3.1.2.1 Requerimientos de precisión .....	26
3.1.2.2 Requerimientos de exactitud .....	28

3.1.3 Norma ASTM E 1364 .....	29
3.2 Precisión.....	31
3.3 Almacenamiento de datos .....	31
3.4 Velocidad de operación .....	32
3.5 Procedimiento para la medición .....	33
4. APLICACIÓN PRÁCTICA.....	37
4.1 Campos de aplicación .....	37
4.2 Usos del equipo.....	37
4.2.1 Parámetros de medición.....	37
4.2.2 Definición de secciones homogéneas .....	38
4.3 Uso de los parámetros .....	42
4.3.1 Recepción de obra .....	42
4.3.2 Control de calidad .....	42
4.3.3 Estudios de factibilidad técnica-económica .....	43
4.3.4 Sistemas para gerencia de pavimentos .....	43
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES.....	47
REFERENCIAS .....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	51
APÉNDICE .....	53
ANEXOS.....	65

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento .....	6
2	Modelo del cuarto de carro .....	10
3	Posición de sensores láser y acelerómetros de la viga del RSP .....	14
4	Sensor láser.....	16
5	Acelerómetro.....	17
6	Conexión del medidor de distancia en la rueda delantera .....	18
7	Definición de secciones homogéneas.....	38

### TABLAS

I	Intervalos longitudinales de almacenamiento de datos (ASTM E 950).	25
II	Resolución en mediciones verticales (ASTM E 950) .....	25
III	Requerimientos de precisión (ASTM E 950).....	27
IV	Requerimientos de exactitud (ASTM E 950).....	29
V	Requerimientos de resolución (ASTM E 1364).....	30
VI	Intervalos de almacenamiento de datos .....	32
VII	Número de medidas en 25 mm en función de la velocidad de operación del equipo .....	33
VIII	Intervalos de medición.....	34





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>mm/m</b>	Milímetro por metro
<b>m/km</b>	Metro por kilómetro
<b>pulg/mi</b>	Pulgada por milla
<b><math>\sigma</math></b>	Precisión (del equipo)
<b>@</b>	A cada



## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>AASHO</b>	American Association of State Highway Officials
<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ASTM</b>	American Society of Testing and Materials
<b>DMI</b>	Distance Measuring Instrument
<b>HDM- IV</b>	Highway Development and Management System
<b>IRI</b>	International Roughness Index
<b>IRRE</b>	International Road Roughness Experiment
<b>PSI</b>	Present Serviceability Index
<b>PSR</b>	Present Serviceability Rating
<b>RARS<sub>80</sub></b>	Reference Average Rectified Slope
<b>RN</b>	Ride Number
<b>RQCS</b>	Reference Quarter Car Simulation
<b>RSP</b>	Road Surface Profiler
<b>RTRRMS</b>	Response Type Road Roughness Measuring System



## GLOSARIO

<b>Acelerómetro</b>	Es el dispositivo que se encuentra colocado en la barra del RSP, encargado de convertir la aceleración vertical en una medida de referencia inercial.
<b>Ahuellamiento (<i>Rutting</i>)</b>	Es una depresión longitudinal continua a lo largo del rodamiento del tránsito, de longitud mínima de 6 m.
<b>Bache</b>	Desintegración total de la superficie de rodadura, que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando cavidad de bordes y profundidades irregulares.
<b>Capacidad estructural</b>	Es la capacidad que tiene un pavimento para soportar las cargas de tránsito actuales y futuras.
<b>Cuero de lagarto</b>	Es una falla estructural del pavimento y consiste en una serie de fisuras interconectadas, formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio de 30 mm.
<b>Manejabilidad (<i>Rideability</i>)</b>	Es la calidad de la carretera en términos de la comodidad, percibida por los usuarios luego de conducir sobre ella y calificarla en una escala predeterminada.

**Ride Number** Es un índice de perfil diseñado para indicar la manejabilidad en una escala predeterminada (similar a la del PSI).

**Secciones Homogéneas** Son secciones del pavimento de comportamiento similar obtenidas por el método de sumas acumuladas. Este método puede ser usado para una gran variedad de variables de respuesta medidas en un pavimento, tal como, la deflexión, serviciabilidad, resistencia al deslizamiento, índices, etc.

**Sensor Láser** Es el dispositivo que se encuentra colocado en la barra del RSP, usado para medir la distancia entre los acelerómetros y/o sensores láser y la superficie del pavimento.

**Serviciabilidad (Serviceability)** Es la capacidad de una sección específica de pavimento, en su condición existente, para ser utilizada por tráfico combinado, camiones y automóviles, a alta velocidad.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación consiste en la descripción de un ensayo realizado en pavimentos utilizado para determinar el Índice de Rugosidad Internacional, IRI, en los mismos y del equipo que se utiliza para realizar dicho ensayo. Se inicia con el origen y descripción del IRI y los ensayos que se llevaron a cabo para determinarlo. Además se describe el equipo que se utiliza para la medición y las normas establecidas por la ASTM *-American Society of Testing and Materials-*, tanto para la medición como para la calibración del equipo. Al final se detallan los campos de aplicación de los parámetros obtenidos del ensayo, además de una muestra de las gráficas que se obtienen al plotear dichos parámetros versus la longitud del tramo ensayado.

El equipo para llevar a cabo el ensayo es llamado Perfilómetro Inercial con Sensores Láser -RSP por sus siglas en inglés- y está compuesto de cinco sensores tipo láser y dos acelerómetros, este mide el perfil longitudinal y transversal de la superficie de la carretera para calcular la rugosidad. Además, despliega automáticamente parámetros como el IRI, *Ride Number* y Ahuellamiento y posee la ventaja de que lo realiza a la velocidad de circulación de la carretera. El RSP mide la rugosidad acumulada en términos de IRI en mm/m, m/km o pulg/mi. En general se utiliza el RSP para evaluar la condición de la superficie del pavimento antes de su recepción, para que de esta forma se pueda mantener la seguridad y comodidad de los usuarios. Además de la comodidad del usuario, la rugosidad influye directamente en los costos de operación de los vehículos, efectos sobre las mercancías transportadas y en las cargas dinámicas transmitidas por los vehículos pesados. Los parámetros medidos con el RSP son utilizados para recepción de obra, control de calidad, estudios de factibilidad técnica-económica y para gerencia de pavimentos.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Dar a conocer el Perfilómetro Inercial con Sensores Láser, así como sus campos de aplicación y específicamente su utilización en la determinación del Índice de Rugosidad Internacional, IRI, siguiendo un procedimiento basado en normas de ensayo establecidas.

### **Específicos**

1. Definir el IRI y la importancia de su determinación en la ejecución y recepción de obras viales.
2. Establecer las principales características del equipo y su procedimiento de operación.
3. Demostrar la calidad del ensayo en la determinación del IRI.



## INTRODUCCIÓN

En 1950, un grupo de expertos en pavimentos realizó una evaluación de la condición de la superficie de pavimentos de prueba. Esta evaluación se basó en: una inspección minuciosa, la experiencia de conducir sobre ellos y el uso de medidas tomadas con varios equipos de la época. La evaluación del grupo de expertos fue procesada para calificar al pavimento asignándole un solo número, el nombre que se le dio a ese número fue PSR *-Present Serviceability Rating, Grado de Serviciabilidad Presente-*. Este concepto fué utilizado para estudiar la variación del comportamiento del pavimento con el tiempo y para definir cuándo el pavimento estaba muy deteriorado y necesitaba rehabilitación. La estimación del PSR fue llamada PSI *-Present Serviceability Index, Índice de Serviciabilidad Presente-*, el cual está en función de la rugosidad y las fallas del pavimento [1]. Debido al concepto del PSI, surgió una gran cantidad de aparatos y equipos para su medición y con la reproducción de equipos, también, surgieron muchas escalas de medición; esto hacía difícil la comparación de resultados, por lo que en 1982, por medio de un estudio realizado en Brasil y patrocinado por el Banco Mundial, se determinó el Índice de Rugosidad Internacional IRI *-International Roughness Index-* como una medida estándar de la rugosidad. Éste perseguía unificar los diferentes parámetros existentes utilizados en diferentes países para determinar la rugosidad.

El Índice de Rugosidad Internacional se define como la acumulación del movimiento vertical no deseado que sufre la suspensión de una rueda -un cuarto de carro- cuando éste recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h. Es pues, un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que mejor percibe el usuario.

En el presente trabajo, básicamente, se realiza la descripción del Índice de Rugosidad Internacional IRI y del ensayo que se lleva a cabo para la medición del mismo, por medio del Perfilómetro Inercial con Sensores Láser, el cual mide con gran exactitud el perfil longitudinal y transversal de la carretera y calcula, además del IRI, parámetros, tales como el RN *-Ride Number-* y Ahuellamiento *-Rutting-*. Se describe el procedimiento que se debe llevar a cabo para la ejecución del equipo y las normas que se deben tomar en cuenta al realizar la medición. Se incluyen, además, características propias del equipo y de las partes que lo componen, así como, también, un detalle de la aplicación de los parámetros medidos con este equipo.

## 1. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL

Como parte del Ensayo de Carreteras de la AASHO (*American Association of State Highway and Officials*) (*AASHO Road Test*), realizado en los años cincuenta, fue desarrollado el concepto de funcionalidad, que se define como la capacidad que tiene un pavimento para cumplir su función principal que es servir al público que circula sobre él. De este ensayo surgió el término PSR (*Present Serviceability Index*, Grado de Serviciabilidad Presente), que fue el número promedio asignado a un pavimento de prueba en dicho ensayo, el cual se realizó por medio de una evaluación subjetiva, realizada por un grupo de expertos en pavimentos. La evaluación fue realizada conforme a la siguiente escala de calidad/comodidad al conducir sobre la superficie del pavimento:

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

El concepto de PSR fue utilizado para estudiar la variación del comportamiento del pavimento con el tiempo y para definir en qué momento el pavimento llega a un nivel de deterioro en donde es necesario realizar una rehabilitación. Sin embargo la evaluación hecha por el grupo de expertos fue simplificada y se estableció el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, *Present Serviceability Index*), el cual está en función de la rugosidad y los daños o fallas. El PSI fue originalmente definido a través de la siguiente expresión [1]:

Para pavimentos flexibles

$$PSI = 5.03 - 1.91 * \log(1 + SV) - 1.38RD^2 - 0.01\sqrt{C + P} \quad (1)$$

Para pavimentos rígidos

$$PSI = 5.41 - 1.78 * \log(1 + SV) - 0.09\sqrt{C + P} \quad (2)$$

Donde:

- PSI = Índice de serviciabilidad presente
- SV = Promedio de la variación de la pendiente
- RD = Profundidad media del ahuellamiento
- C = Área con agrietamientos del tipo cuero de lagarto
- P = Baches

Debido a este concepto surgió una gran cantidad de aparatos y equipos para la medición del PSI que actualmente se pueden agrupar, según su forma de operación, en dos tipos de sistemas:

- Sistemas inerciales para medir el perfil de la carretera (perfilómetros).
- Sistemas que miden la respuesta de un vehículo a la rugosidad del pavimento.

Con el surgimiento de una gran diversidad de técnicas y equipos surgió también un gran número de escalas de medición haciendo difícil la comparación de resultados y experiencias entre países. Como consecuencia de ello se planteó a nivel internacional el interés de desarrollar un índice único y común, que a su vez fuera independiente del equipo o técnica elegida para la obtención de la geometría del perfil y que, al mismo tiempo, representara significativamente el conjunto de las percepciones de los usuarios cuando circulan en un vehículo a una cierta velocidad media. Estas necesidades dieron lugar a la realización del experimento internacional denominado IRRE (*International Road Roughness Experiment*), uno de cuyos frutos fue el desarrollo del concepto, definición y método de cálculo del IRI (*International Roughness Index*)

Aunque en la literatura se encuentran distintas definiciones del IRI, se puede decir que el Índice de Rugosidad Internacional se define como la acumulación del movimiento vertical no deseado que sufre la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando éste recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h. Es pues, un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que mejor percibe el usuario.

Es de señalar que la rugosidad superficial es mucho más valorada por el usuario que la capacidad estructural, ya que ésta última tan solo la percibe en forma indirecta cuando se presentan deterioros en la superficie del pavimento como consecuencia de las deficiencias estructurales del mismo.

## 1.1 Generalidades

La norma E 867 de la ASTM (*American Society of Testing and Materials*), define la rugosidad como las desviaciones entre una superficie de pavimento y una superficie plana con dimensiones características que afecten la dinámica del vehículo, calidad en el desplazamiento, cargas dinámicas y drenaje, tal como, perfil longitudinal y perfil transversal [2]. La rugosidad del pavimento puede también ser definida como la distorsión de la superficie del pavimento que transmite aceleraciones verticales no deseadas en el vehículo que contribuyen a un desplazamiento incómodo y no deseable. Hay varios factores que contribuyen a la rugosidad del pavimento: cargas de tráfico, efectos ambientales, materiales y prácticas de construcción. La rugosidad del pavimento incrementa con un incremento en las cargas de tráfico.

La rugosidad del pavimento ha sido identificada como el factor más relevante en los análisis que toman en cuenta la calidad del camino versus costos de usuarios; en efecto, tiene directa influencia en la comodidad del usuario; costos de operación de los vehículos (consumo de combustible, desgaste); efectos sobre las mercancías transportadas y en las cargas dinámicas transmitidas por los vehículos pesados.

Últimamente la evaluación de la rugosidad del pavimento, a través del cálculo del IRI ha cobrado mucha importancia debido a que es uno de los indicadores exigidos a los concesionarios que postulan bajo bases de licitación. En la actualidad el valor del IRI es limitado al inicio y durante la operación de los tramos de carretera que son y serán administrados por concesionarios, esto a modo de asegurar un nivel de comodidad a los usuarios y establecer las sanciones que corresponda aplicar en el caso de incumplimiento.



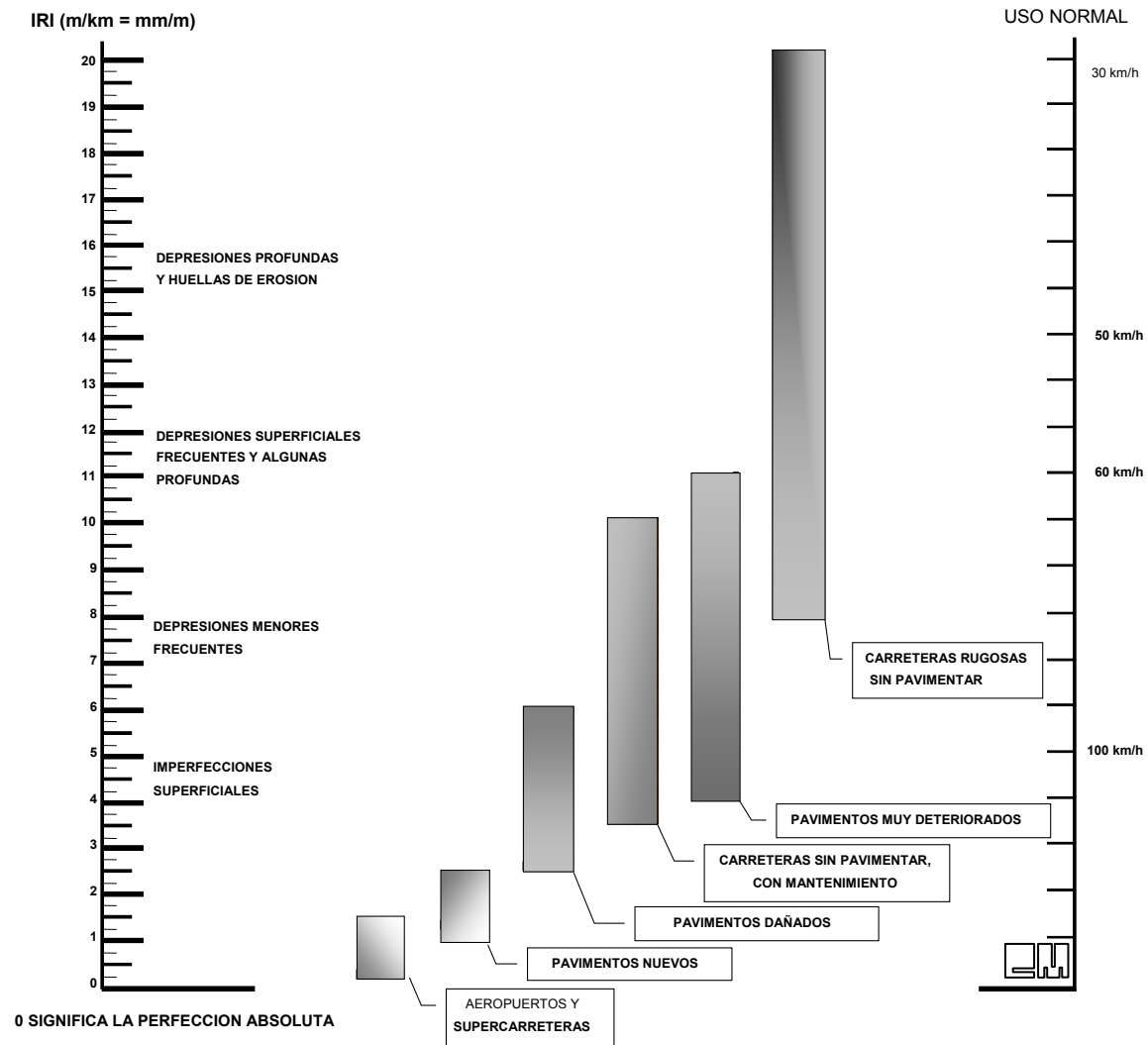
## 1.2 Definición de IRI

Paterson en 1986, establece que “El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico. Está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas ( $RARS_{80}$ , *Reference Average Rectified Slope*, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo del Cuarto de Carro, (RQCS, *Reference Quarter Car Simulation*), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h. Es calculado a partir de las elevaciones de la superficie medidas mediante un levantamiento topográfico o perfilometría” [3].

El IRI es el primer índice de perfil extensamente usado, en el cual el método de análisis está dirigido a trabajar con diferentes tipos de perfilómetros. Está definido como la propiedad del perfil real, y por lo tanto puede ser medido con cualquier perfilómetro válido. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y probadas para minimizar los efectos de los parámetros de medida de algunos perfilómetros como los intervalos de muestra. El Banco Mundial ha publicado ejemplos de programas por computadora que han sido usados por fabricantes de perfilómetros para probar nuevos programas y algoritmos que calculen el IRI.

Los valores de IRI se expresan como la variación acumulada del movimiento por unidad de longitud, es decir en mm/m (milímetros por metro), m/km (metros por kilómetro) o pulg/mi (pulgada por milla). La Figura 1 muestra los valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento.

**Figura 1.** Valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento



Fuente: CM Ingenieros

El IRI es la acumulación del movimiento entre la masa amortiguada y la no amortiguada, cuando se simula el paso del modelo del cuarto de carro, o técnicamente llamado RTRRMS (*Response Type Road Roughness Measuring System*), normalizado por el largo del perfil. El IRI, también llamado por su nombre técnico RARS<sub>80</sub>, definido en forma más completa por Sayers en 1995 [4], debe cumplir con las siguientes cinco condiciones:

- El IRI es calculado a partir de un solo perfil. El intervalo de muestreo del perfil deberá ser menor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de rugosidad, 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.
- Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
- El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos: la idea es 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.
- El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, RQCS, con sus parámetros específicos, a una velocidad de 80 km/h.
- El movimiento de la suspensión simulada es acumulado y dividido por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de esta forma que el IRI es expresado, generalmente en unidades m/km, mm/m o pulg/mi.

### **1.3 Conceptos derivados de la definición**

Si se cuenta con el IRI calculado de dos secciones contiguas, el IRI sobre la suma de esas dos secciones, es simplemente el promedio de los IRI de cada sección.

A una velocidad de simulación de 80 km/h, la inicialización afecta la respuesta del modelo del cuarto de carro. La mejor forma de tratar con este problema es comenzar a medir el perfil 200 m antes de la sección a evaluar.

El cálculo del IRI está linealmente relacionado con las variaciones en el perfil, es decir si las elevaciones del perfil aumentan al doble, el resultado del cálculo del IRI también aumentará al doble.

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

Aunque los sitios de prueba utilizados en el desarrollo del concepto IRI contaban con un largo mínimo 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 variación de rugosidad a lo largo del camino y el largo del camino sobre el cual la rugosidad es promediada.

#### 1.4 El modelo del cuarto de carro (*Quarter Car*)

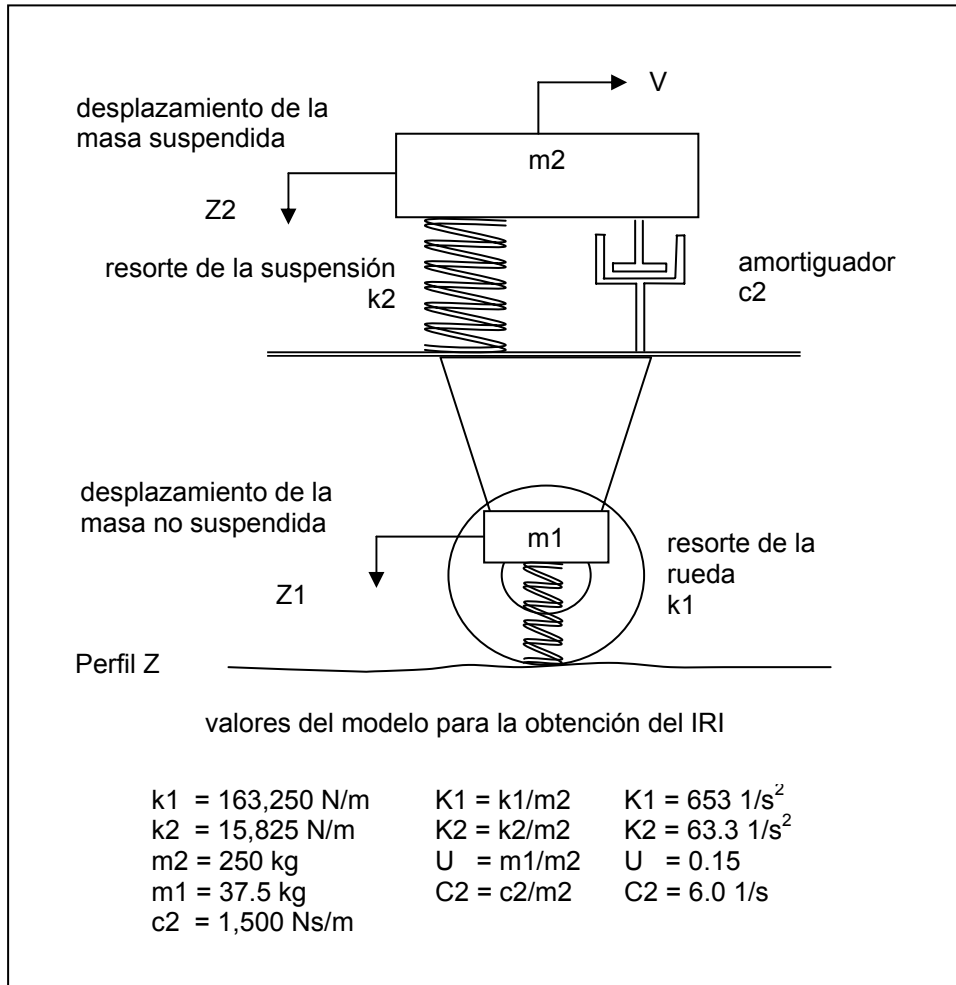
La definición del IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; en base a ella un vehículo se puede modelar, simplificada, por un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera, mediante resortes y amortiguadores.

El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas. Todo el sistema queda regido por la 1ª ley de Newton: fuerza = masa x aceleración.

Asumida esta forma de simular el comportamiento de los vehículos sobre la carretera, el vehículo se simplifica, por simetría, como un cuarto de carro, se modela por la magnitud de sus masas y constantes de resorte y de amortiguación.

La masa del cuarto de carro se divide en dos partes, la superior, soportada por el sistema de suspensión (masa suspendida) y la parte inferior, independiente de la suspensión (masa no suspendida). La suspensión se esquematiza por un resorte ( $k_2$ ) y por un amortiguador ( $c_2$ ) y la parte no suspendida (prácticamente la rueda) se esquematiza, a su vez, por un resorte ( $k_1$ ) que representa la deformabilidad o rigidez del neumático. La Figura 2 muestra el modelo de cuarto de carro, que sirve de base para la definición del IRI y otros muchos estudios relacionados con la dinámica de automóviles.

**Figura 2.** Modelo del cuarto de carro



Fuente: Benjamín Soto Nuñez, **Control de Calidad en Pavimentos**, Tesis.

Si a los valores de los parámetros  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , y  $c_2$  se les asignan los valores correspondientes al modelo denominado “Golden Quarter Car”, y se fija como velocidad de referencia 80 km/h, se tienen establecidas las bases para obtener el IRI. Cualquier modificación en los valores numéricos de los parámetros o de la velocidad de referencia desvirtuaría la definición del IRI.

Teniendo en cuenta lo anterior, el IRI en cada punto se define como el valor absoluto de la variable  $|z'_2 - z'_1|$  de las masas suspendida y no suspendida. A la variable  $|z'_2 - z'_1|$  se le denomina “pendiente rectificada de perfil filtrado”, porque en definitiva es la pendiente de un perfil (distinto, pero derivado del perfil de la carretera), filtrado por las características del modelo de cuarto de carro “*Golden Quarter Car*”.

Si además se tiene en cuenta que los datos del perfil son discretos, es decir, son adquiridos mediante muestreo (una cota cada determinado intervalo), el IRI es la media aritmética de la sumatoria de todos los valores de la variable  $|z'_2 - z'_1|$  en la longitud de evaluación.

La expresión algebraica que permite obtener el IRI en forma discreta es:

$$IRI = \frac{\sum^n |z'_2 - z'_1|}{n} \quad (2)$$

Si por cualquier circunstancia se dispusiera de una función que definiera el perfil en forma continua, la expresión anterior se convierte en:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |z'_2 - z'_1| \cdot dx \quad (3)$$

Donde:

n = Número de puntos

L = Longitud de análisis

$|z'_2 - z'_1|$  = Valor absoluto de la pendiente rectificadora

El cálculo de las expresiones anteriores es bastante laborioso y debe realizarse mediante computadora. A tal efecto se ha desarrollado una aplicación computacional llamada CALIRI que en función de las ordenadas del perfil, leída de un fichero ASCII, calcula el valor del IRI para cualquier longitud y para cualquier intervalo de muestreo.



## 2. EQUIPO A UTILIZAR

Dentro de la generación más reciente de equipos para medición directa del perfil para calcular la rugosidad de un pavimento, así como su ahuellamiento, se encuentra el perfilómetro inercial con sensores láser (*RSP, Road Surface Profiler*) modelo 5051 Mark IV L5.2+ fabricado por Dynatest, compuesto de 5 sensores y dos acelerómetros. De acuerdo con los certificados emitidos por la fábrica, este perfilómetro se clasifica como Clase 1 de acuerdo a la norma ASTM E 950 (véase sección 3.1.2). Es decir que:

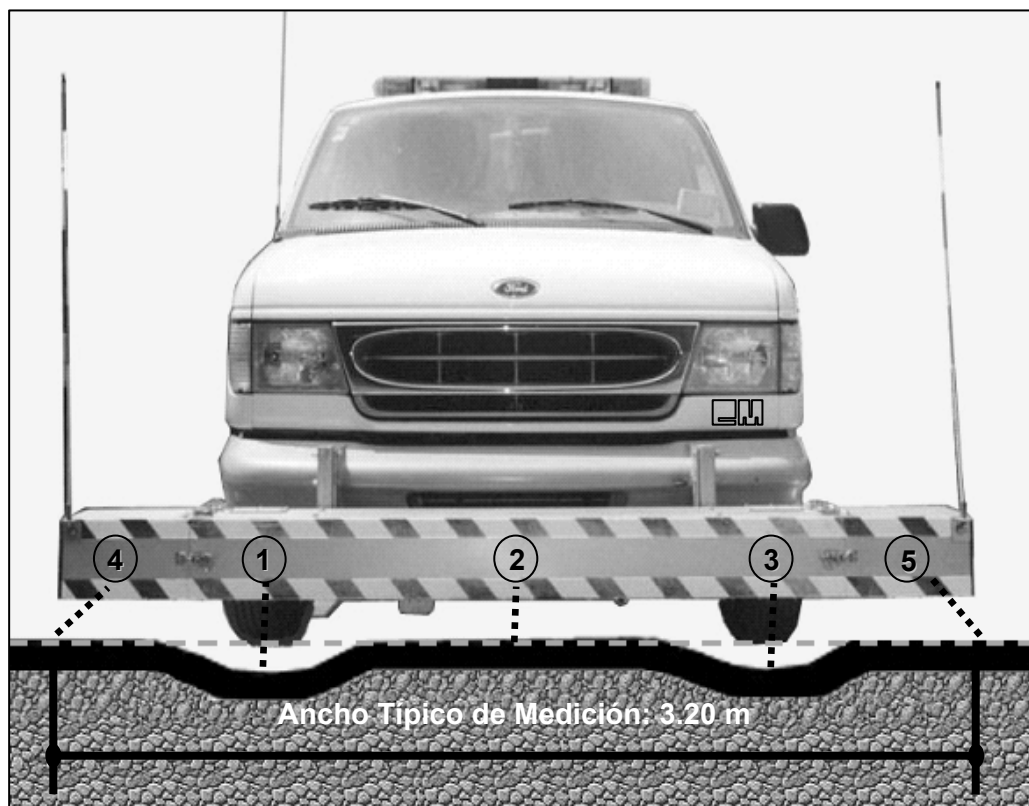
- Al comparar el perfil obtenido por el equipo con el obtenido por nivelación topográfica, se tiene una desviación menor a 2.5 mm (0.1 pulgadas).
- Al comparar distintas mediciones del mismo tramo con el perfilómetro láser se tiene una precisión tal que la desviación estándar de las mediciones es menor de 2.5 mm (0.1 pulgadas).

### 2.1 Características

Con el Perfilómetro inercial con sensores láser RSP, se puede recolectar información del estado de la carretera, midiendo con exactitud el perfil longitudinal y transversal de la misma. Este equipo calcula, almacena y despliega automáticamente parámetros como el IRI, RN (*Ride Number*) y Ahuellamiento (*Rutting*), además de registrar la velocidad de operación del equipo; todo esto lo realiza en tiempo real y a la velocidad de circulación de la carretera.

Dentro de la viga del RSP se tienen instalados 5 sensores láser y 2 acelerómetros colocados estratégicamente para medir todo el ancho de la pista. Estos dispositivos miden, por triangulación, la distancia entre la barra del RSP y la superficie de la carretera, ubicados según lo indica la Figura 3.

**Figura 3.** Posición de sensores láser y acelerómetros de la viga del RSP



Fuente: CM Ingenieros

De la figura 3 se puede hacer notar que para la medición del IRI se utilizan los sensores colocados en las posiciones 1, 2 y 3, mientras que para la medición de ahuellamiento es necesario utilizar además, los dos sensores restantes, colocados (de manera inclinada) en las posiciones 4 y 5 respectivamente.

Los dos acelerómetros se encuentran ubicados en la posición de los sensores láser 1 y 3, los cuales se encargan de convertir la aceleración vertical en una medida de referencia inercial.

El RSP tiene un medidor de distancia (*DMI, Distance Measurement Instrument*) con resolución de 1 mm, con el que se establecen las mediciones longitudinales o intervalos de medición (por ejemplo: a cada 100 m, a cada 200 m, etc.)

### **2.1.1 Perfilómetro inercial con sensores láser (RSP)**

El perfilómetro inercial con sensores láser RSP, está compuesto de cinco sensores tipo láser y dos acelerómetros, para realizar la medición continua de las variaciones de la superficie, las cuales pueden ser procesadas en tiempo real, para convertirlas en valores de rugosidad expresados en términos del Índice de Rugosidad Internacional, IRI, así como la variación del perfil transversal para establecer el ahuellamiento en milímetros.

Los sensores láser, como el que se muestra en la Figura 4, están dispuestos de manera que se tenga un sensor al centro de la pista, uno bajo la huella de cada una de las llantas y dos inclinados en cada extremo, de manera que pueda cubrir todo el ancho de la pista.

**Figura 4.** Sensor láser



Fuente: Dynatest 5051 Mark III/IV Road Surface Profiler Test Systems-Owner's Manual. Version 1.08. Dynatest International 2005

El sensor en un perfilómetro mide la distancia vertical del vehículo a la carretera por medio de un punto de luz invisible que es proyectado sobre la superficie de la carretera, este punto es reflejado a través de un lente a un sensor de desplazamiento sensible a la luz. La distancia al pavimento es obtenida por triangulación. El punto de luz láser es llamado marca del sensor, y mide normalmente de 1 a 5 mm (0.04 a 0.20 pulgadas) de diámetro.

La resolución de un sensor es la unidad de distancia más pequeña que puede ser medida con precisión. Las investigaciones han mostrado que es necesario que los sensores tengan una resolución de por lo menos 0.5 mm (0.02 pulgadas) para obtener perfiles que sean lo suficientemente exactos para ser usados en el cálculo del IRI y del *Ride Number* [5].

El acelerómetro, como el mostrado en la Figura 5, es utilizado en un perfilómetro para establecer una referencia inercial de la cual puedan hacerse las medidas de altura. La aceleración vertical medida por el acelerómetro es integrada dos veces para establecer su posición vertical. Los acelerómetros son usualmente colocados sobre los sensores que están alineados con las llantas del vehículo de medición y deben ser orientados verticalmente.

**Figura 5.** Acelerómetro



Fuente: Dynatest 5051 Mark III/IV Road Surface Profiler Test Systems-Owner's Manual. Version 1.08. Dynatest International 2005

### 2.1.2 Medidor de distancia (DMI)

El medidor de distancia en el perfilómetro debe ser capaz de medir exactamente la distancia longitudinal de la medición. Al hacer mediciones en construcciones nuevas, la ubicación de los lugares para acciones correctivas es determinada a partir de los datos del perfil. Por lo tanto, la medida exacta de la distancia longitudinal relativa a marcas fijas es muy importante. La Figura 6 muestra la conexión del medidor de distancia (DMI) en la rueda delantera.

**Figura 6.** Conexión del medidor de distancia en la rueda delantera



Fuente: CM Ingenieros

### **2.1.3 Mantenimiento**

Además del vehículo, las actividades propias de mantenimiento de los dispositivos láser no son intensivas si se opera adecuadamente.

Las principales actividades son:

- Revisar que los cables estén conectados adecuadamente.
- Comprobar que la distancia de la barra del RSP al suelo sea la adecuada.
- Verificar que todas las tuercas estén debidamente ajustadas.
- Limpiar todas las partes del RSP, incluyendo la parte exterior en los lentes de los dispositivos láser.
- Chequear la presión de inflado de las llantas.
- Chequear que las llantas no estén muy desgastadas.

### **2.1.4 Calibración**

Es necesario realizar las prácticas correctas de calibración para el buen desempeño del RSP. Los procedimientos de calibración siguen los métodos recomendados por el fabricante pero además, deben cumplir con normas que para dicho propósito ha establecido la ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Las siguientes partes del RSP deben ser calibradas:

- Medidor de distancia (DMI): un DMI que no está calibrado calculará índices de uniformidad incorrectos, además presentará problemas al localizar características de rugosidad que son mostradas en el perfil en el campo. Para calibrar el DMI se debe contar con una sección de pavimento de longitud conocida, con el inicio y el final bien demarcados. El perfilómetro es conducido sobre la sección y los datos del inicio y final de la sección de prueba son grabados en el sistema de adquisición de datos. La longitud correcta de la sección de prueba es ingresada en el software, y el software calcula un factor de calibración para el DMI.
- Acelerómetros: estos son calibrados estáticamente utilizando la gravedad de la tierra como parámetro (se toman dos lecturas de aceleración, una con los acelerómetros colocados con la cabeza hacia abajo, y la otra con la cabeza hacia arriba, la diferencia entre las lecturas debe corresponder a dos veces la gravedad de la tierra).
- Dispositivos Láser: se utiliza una “barra de calibración” que se coloca a dos niveles diferentes (separados 100 mm), esta distancia es medida por los dispositivos láser y es utilizada automáticamente para su calibración.

La calibración del equipo debe realizarse mensualmente si su uso es constante. En caso de que el uso disminuya, la frecuencia de calibración puede disminuirse.



Es importante tener claro, que los únicos procedimientos de calibración a los que se somete el RSP, son los recomendados por el fabricante porque en sus procedimientos se pueden establecer los ajustes que sean necesarios. Los ensayos de verificación que se le deben realizar al RSP, se hacen con el objetivo de verificar la precisión y la desviación de las mediciones del equipo, y no de calibrar. En caso de que el equipo brinde valores errados, no se le puede hacer ningún ajuste, lo que procede es comunicarse con el fabricante. Los ensayos de correlación son necesarios para equipos de medición de tipo respuesta<sup>1</sup>, no así para equipos inerciales como el RSP.

---

<sup>1</sup> Equipos para medir rugosidad, que no funcionan en base a la medición de un perfil.



### 3. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN

#### 3.1 Normas de ensayo

La medición del Índice de Rugosidad Internacional debe realizarse con base en las siguientes Normas de ensayo: 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*” y ASTM E 1364 “*Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*”.

##### **3.1.1 Norma ASTM E 1170 “*Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces*”**

Esta norma abarca el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera, utilizando un determinado programa de simulación vehicular. Tiene aplicación en el cálculo del IRI.

El IRI es la medición del desplazamiento de la masa suspendida respecto a la no suspendida en el modelo del cuarto de carro y es reportado en unidades de desplazamiento por longitud. El método del cálculo del IRI utiliza el modelo estándar de respuesta de un cuarto de carro (véase sección 1.4).

Para el cálculo del IRI es necesario considerar los siguientes puntos citados en la Norma ASTM E 1170:

- El perfil debe ser obtenido con base en la Norma ASTM E 950.
- Para alcanzar la velocidad de arribo, se recomienda iniciar el ensayo al menos 160 m antes del tramo por evaluar.
- El equipo debe tener un filtro (dispositivo de selección de datos) que permita el cálculo, sin atenuación de, frecuencias tan pequeñas como 0.1 Hz a velocidades de 15 a 90 km/h.

### **3.1.2 Norma ASTM E 950 “*Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*”**

Esta norma abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros. Los equipos que se utilizan para medir el perfil se dividen en clases, según ciertas especificaciones de exactitud.

En la norma se destacan los siguientes puntos:

- El rango de los acelerómetros debe ser suficiente para los niveles de aceleración esperados, debidos al movimiento del vehículo, típicamente  $\pm 1$  g.

- Los dispositivos láser tienen que medir la distancia vertical a la superficie continuamente, o tomar datos a intervalos no mayores que los permitidos para cada clase, como se muestra en la Tabla I<sup>2</sup>. La resolución vertical debe reunir los requerimientos de la Tabla II<sup>3</sup>.

**Tabla I.** Intervalos longitudinales de almacenamiento de datos (ASTM E 950)

Clase	Requerimiento
Clase 1	Menor o igual a 25 mm (1 in)
Clase 2	Mayor que 25 mm (1 in) hasta 150 mm (6 in)
Clase 3	Mayor que 150 mm (6 in) hasta 300 mm (12 in)
Clase 4	Mayor que 300 mm (12 in)

**Tabla II.** Resolución en mediciones verticales (ASTM E 950)

Clase	Requerimiento
Clase 1	Menor o igual a 0.1 mm (0.005 in)
Clase 2	Mayor que 0.1 mm (0.005 in) hasta 0.2 mm (0.010 in)
Clase 3	Mayor que 0.2 mm (0.010 in) hasta 0.5 mm (0.020 in)
Clase 4	Mayor que 0.5 mm (0.020 in)

<sup>2</sup> El RSP promedia valores de perfil cada 25 mm y los almacena, por lo que pertenece a la Clase 1.

<sup>3</sup> El RSP mide los valores de perfil con resolución de 0.1 mm, cumpliendo así con los requisitos de la Clase 1.

- La exactitud del medidor de distancia (DMI) se establece por calibración, donde un error mayor al 0.1% de la distancia que actualmente tiene como referencia, no es permitido.
- Los filtros utilizados deben permitir el cálculo de las elevaciones de perfil sin atenuación o amplificación para longitudes de onda de al menos 60 m a velocidades de ensayo de 25 a 95 km/h.

#### **3.1.2.1 Requerimientos de precisión según Norma ASTM E 950**

La precisión en la medición de elevaciones de perfil, se refiere a la variación entre mediciones repetidas de un mismo perfil. La precisión se expresa como el promedio de múltiples desviaciones estándar de valores observados en un punto específico, a lo largo del perfil evaluado.

Para verificar la precisión del equipo, se debe mantener fijo: la longitud del tramo evaluado, la ubicación de los puntos donde se evalúa y el número de mediciones.

La longitud del tramo de ensayo para calcular la precisión del equipo debe ser 322 m (1,056 pies). A lo largo de este tramo deben tomarse 1,057 mediciones de perfil, separadas cada 0.305 m (1 pie). Deben ser usadas por lo menos 10 repeticiones de medición de perfil, para calcular la precisión.

Cuando se realiza este ensayo, las variables independientes que afectan el proceso de medición deben ser estrictamente controladas, por ejemplo el pasar las 10 veces sobre los mismos puntos, siguiendo las huellas de los vehículos. Para asegurarse de que las mediciones se tomen en los mismos puntos, el inicio puede ser marcado con cinta o marcas de localización automática<sup>4</sup>.

La Tabla III muestra los requerimientos de precisión para los equipos que miden perfil. Los valores mostrados en la tabla no deben excederse, según sea la clasificación del equipo.

**Tabla III.** Requerimientos de precisión (ASTM E 950)

Clasificación del equipo	Precisión ( $\sigma$ )
1	0.38 mm (0.015 in)
2	0.76 mm (0.030 in)
3	2.50 mm (0.100 in)

---

<sup>4</sup> El RSP cuenta con una fotocelda para iniciar la toma de datos, la cual se activa con la colocación de cinta reflectiva en el pavimento, con lo que se asegura un mismo punto de inicio en las mediciones.

### **3.1.2.2 Requerimientos de exactitud según Norma ASTM E 950**

Exactitud en la medición del perfil de un pavimento, se refiere a la diferencia entre el valor promedio de repetidas mediciones de perfil en puntos específicos del tramo evaluado y un valor de referencia (asumido como real) calculado para esos puntos. De esta manera la exactitud para un punto específico, corresponde al valor promedio medido en ese punto menos el valor de referencia. Un valor de referencia debe ser derivado de un método de medición de perfil aceptado (por ejemplo: mira y nivel, ASTM E 1364 (véase sección 3.1.3)).

La medición de un perfil longitudinal debe ser la sumatoria en valor absoluto de las mediciones individuales en los múltiples puntos donde fue medido el perfil, entre el número total de puntos de medición.

Para calcular la desviación en las mediciones de perfil longitudinal, deben ser controladas ciertas variables: la longitud del tramo de ensayo debe ser de 322 m (1,056 pies), se realizan 1,057 mediciones a lo largo del tramo, las cuales deben estar separadas cada 305 mm (1 pie).

La Tabla IV muestra los requerimientos de exactitud para los equipos que miden perfil. Los valores mostrados en la tabla no deben excederse, según sea la clasificación del equipo.



**Tabla IV.** Requerimientos de exactitud (ASTM E 950)

Clasificación del equipo	Exactitud
1	1.25 mm (0.050 in)
2	2.50 mm (0.100 in)
3	6.25 mm (0.250 in)

**3.1.3 Norma ASTM E 1364 “*Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*”**

Esta norma abarca la medición del perfil longitudinal de una carretera utilizando un nivel estático para obtener el índice de rugosidad. Aplica para cualquier tipo de carretera, pavimentada o no pavimentada.

Este método requiere una labor intensiva respecto a otros métodos de medición de perfil longitudinal. Es utilizado principalmente para validar otros métodos de medición de perfil y calibrar equipos de respuesta que miden la regularidad superficial.

El método incluye dos niveles de exactitud, los cuales deben ser escogidos de acuerdo al uso de los datos. El primer nivel de exactitud, Clase 1, es necesario, cuando los datos van a ser utilizados en la validación de perfilómetros inerciales. En la Tabla V se muestran los requerimientos de resolución para el equipo topográfico que se vaya a utilizar.

**Tabla V.** Requerimientos de resolución (ASTM E 1364)

Rango del IRI (m/km)	Resolución requerida (mm)	
	Clase 1	Clase 2
$0 \leq \text{IRI} < 0.5$	0.125	0.25
$0.5 \leq \text{IRI} < 1$	0.25	0.5
$1 \leq \text{IRI} < 3$	0.5	1.0
$3 \leq \text{IRI} < 5$	1.0	2.0
$5 \leq \text{IRI} < 7$	1.5	3.0
$7 \leq \text{IRI}$	2.0	4.0

Los perfiles obtenidos con mira y nivel y aquellos obtenidos con el perfilómetro inercial, no son comparables directamente. El equipo láser, utiliza un sistema de filtración (longitud de onda) que no se aplica en mediciones topográficas, por lo que los datos de topografía deben ser filtrados<sup>5</sup> mediante algún programa.

---

<sup>5</sup> La empresa fabricante brinda una hoja de cálculo que utiliza el sistema de filtración del RSP. Con esta hoja se filtran los datos de perfil obtenidos por métodos estáticos, para hacerlos comparables con los datos del RSP.

### **3.2 Precisión**

Hay dos categorías de equipo para medir el perfil longitudinal con el máximo nivel de precisión, y son diferenciadas entre sí por la velocidad o rendimiento con que miden y no por la precisión con que lo hacen. Están los de bajo rendimiento que son llamados estáticos y los equipos de alto rendimiento. Entre los de bajo rendimiento se pueden incluir el nivel y mira, el perfilómetro transversal y el perfilómetro portátil con inclinómetro más conocido como *DipStick* que es más rápido que el método de nivel y mira. Entre los de alto rendimiento se puede mencionar el perfilómetro óptico y el perfilómetro láser. El RSP, por ser un perfilómetro de alto rendimiento, no solo trabaja a alta velocidad, sino que requiere cierta velocidad para un buen funcionamiento. El RSP toma datos del perfil longitudinal y transversal con precisión de 0.1 mm. Al comparar el perfil obtenido por el RSP con el obtenido por nivelación topográfica, se tiene una desviación menor a 2.5 mm (0.1 pulgadas).

### **3.3 Almacenamiento de datos**

El usuario del RSP selecciona el intervalo al cual desea almacenar cada uno de los parámetros medidos o calculados. En la Tabla VI se muestra el intervalo mínimo y máximo disponible para cada parámetro.

**Tabla VI.** Intervalos de almacenamiento de datos

Parámetro	Intervalo mínimo (m)	Intervalo máximo (km)
Velocidad	1.000	1.609 (1 milla)
Elevación del láser	0.025	1.609 (1 milla)
Calidad del láser	1.000	1.609 (1 milla)
Elevaciones de perfil	0.025	1.609 (1 milla)
IRI	10.000	1.609 (1 milla)
<i>Ride Number</i>	10.000	1.609 (1 milla)

Los resultados que despliega el equipo se basan en datos medidos cada 25 mm, promediados cada 20 mm para el IRI, cada 10 m para el Ahuellamiento (*Rutting*), y cada 20 m para el *Ride Number*.

### **3.4 Velocidad de operación**

Por recomendación del fabricante, el vehículo no debe ser operado a velocidades inferiores a 25 km/h cuando se está realizando el ensayo.

El RSP toma 16,000 mediciones de perfil por segundo haciendo las mediciones de los datos cada 25 mm, que es el intervalo de almacenamiento de datos. El número de mediciones está en función de la velocidad de operación del equipo como aparece en la Tabla VII. El valor almacenado corresponde al promedio del número de mediciones tomadas en 25 mm.

**Tabla VII.** Número de medidas en 25 mm en función de la velocidad de operación del equipo

Velocidad de operación (km/h)	Número de lecturas en un intervalo de 25 mm
40	36
50	28
60	24
70	20
80	18

### 3.5 Procedimiento para la medición

El IRI es un valor promedio sobre un tramo de carretera de longitud L. Los valores de IRI dependen del valor elegido para L. Generalmente, se utiliza un intervalo de reporte de IRI (L) de 100 m, para evaluación de proyectos nuevos y un intervalo más amplio, 200 m, para evaluación a nivel red vial.

En la Tabla VIII se presentan los intervalos con los que se realizan las mediciones de perfil e IRI, utilizando el RSP.

**Tabla VIII.** Intervalos de medición

Parámetro	Intervalo (m)
Perfil longitudinal	@ 0.025
IRI	@ 100 (proyectos nuevos)
IRI	@ 200 (evaluación red vial)

En los archivos de medición de IRI y Ahuellamiento, debe incluirse la siguiente información:

- Fecha en que se realizaron las mediciones de perfil
- Localización y descripción del tramo evaluado
- Nombre/Iniciales del operador
- Carril evaluado, dirección
- Velocidad de medición
- IRI medido por cada sensor láser
- Ahuellamiento (si fue medido)
- Información especial (dependiendo del proyecto)

En los informes de medición de IRI y Ahuellamiento, debe incluirse la siguiente información:

- Fecha en que se realizaron las mediciones de perfil
- Localización y descripción del tramo evaluado
- Carril evaluado
- Resumen estadístico, incluyendo IRI promedio y desviación estándar; para todo el tramo y para las secciones homogéneas
- Gráficas de IRI, IRI promedio e IRI promedio + desviación estándar, con sus respectivas secciones homogéneas

- Gráficas de diferencias acumuladas y definición de secciones homogéneas para IRI
- Resumen estadístico, incluyendo Ahuellamiento promedio y desviación estándar; para todo el tramo y para las secciones homogéneas (si fue medido el Ahuellamiento)
- Gráficas de Ahuellamiento, Ahuellamiento promedio y Ahuellamiento promedio + desviación estándar, con sus respectivas secciones homogéneas (si fue medido el Ahuellamiento)
- Gráficas de diferencias acumuladas y definición de secciones homogéneas para Ahuellamiento (si fue medido Ahuellamiento)
- Información especial (dependiendo del proyecto)





## **4. APLICACIÓN PRÁCTICA**

### **4.1 Campos de aplicación**

El RSP se usa para evaluar en forma práctica, rápida y conveniente la superficie de un pavimento o comparar la condición de la superficie de distintos proyectos; teniendo como resultado una serie de parámetros que nos permiten interpretar el estado en que se encuentra la superficie del pavimento, por medio de un método no destructivo para evaluación de pavimentos.

El RSP mide la rugosidad acumulada en términos de IRI en mm/m, m/km o pulg/mi. En general, se utiliza el RSP para evaluar la condición de la superficie del pavimento antes de su recepción para que de esta forma se mantenga la seguridad y comodidad de los usuarios.

### **4.2 Usos del equipo**

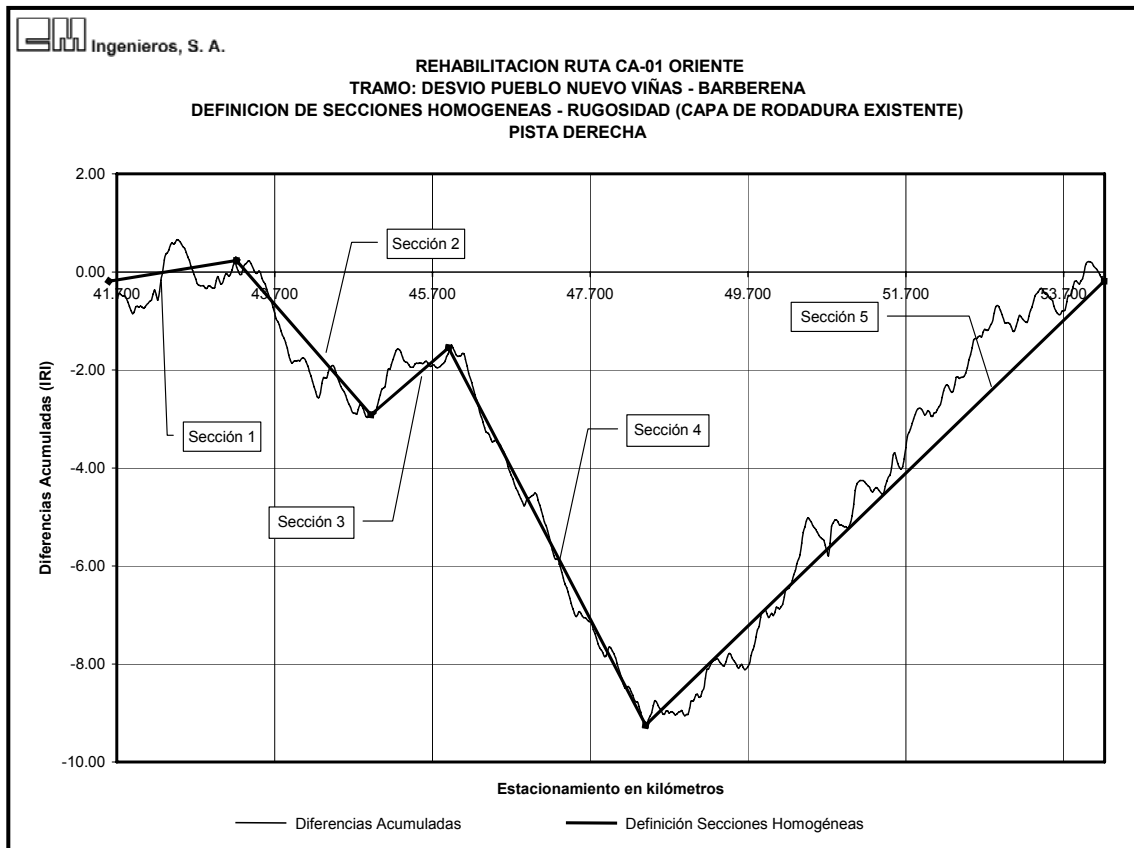
#### **4.2.1 Parámetros de medición**

Los parámetros tales como el IRI, Ahuellamiento y *Ride Number*, son medidos automáticamente por el equipo, ya que el mismo calcula, almacena y despliega dichos parámetros. El equipo además registra la velocidad de operación del equipo en tiempo real.

## 4.2.2 Definición de secciones homogéneas

Algunas características propias de un pavimento (ej. rugosidad y resistencia al deslizamiento, etc.), varían a lo largo de la longitud de la carretera, y el patrón de variación puede ser muy diferente de un tipo de parámetro a otro. Secciones homogéneas son secciones del pavimento de comportamiento similar, como se muestra en la Figura 7, obtenidas por el método de sumas acumuladas (Véase Apéndice J en anexos).

**Figura 7.** Definición de secciones homogéneas



Fuente: CM Ingenieros

Subdividir una longitud de pavimento en subsecciones razonablemente uniformes, cada una de las cuales puedan ser tratadas como un proyecto de rehabilitación independiente el uno del otro, puede resultar difícil, y esta decisión debe estar basada en el criterio ingenieril.

Para casi cualquier parámetro del pavimento, puede hacerse una división automática en subsecciones usando diferentes procedimientos estadísticos, el procedimiento de diferencias acumuladas sugerido por la AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, contenido en el apéndice J de la AASHTO, *Guide for Design of Pavement Structures*, edición 1993, permite definir secciones homogéneas o de similar comportamiento. El parámetro a ser analizado es plotado versus la longitud de la carretera, y el total del área bajo la curva es calculado. La diferencia acumulada es calculada para cada punto, como la diferencia entre el área bajo la curva hasta el punto considerado, y el área promedio hasta el mismo punto.

$$A = \sum_{j=1}^n x_j (l_j - l_{j-1}) \quad (5)$$

$$CD = \sum_{j=1}^n x_j (l_j - l_{j-1}) - \frac{A}{L} l_j \quad (6)$$

Donde:

A = es el área total bajo la curva

n = es el número de puntos

$x_j$  = es el valor del parámetro al punto j

$l_j$  = es la distancia al punto j

CD = es la distancia acumulada

L = es la distancia total

Los límites de las secciones homogéneas se encuentran donde la pendiente de la diferencia acumulada cambia de signo. Puede hacerse una subdivisión en el límite basada en las consideraciones prácticas de construcción y en los límites para otros parámetros.

Otro método para subdividir un parámetro (medido con intervalos equidistantes) fue desarrollado por Lebas, Peybernard y Cartas (1981). Con este método una sección de carretera es dividida en subsecciones teniendo la misma distribución normal del parámetro considerado. El método hace uso de la estadística:

$$u = (1 - r) \sqrt{\frac{n-1}{n-2}} \quad (7)$$

$$r = 0.5 * \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (x_{j+1} - x_j)^2}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (9)$$

Donde:

$n$  = es el número de puntos

$x_j$  = es el valor del parámetro al punto  $j$

Primero  $u$  es calculada para el número total de puntos en la sección del pavimento. Este valor es comparado, entonces, con los límites  $u_\alpha$  y  $u_{1-\alpha}$  de la distribución.  $\alpha$  es el riesgo de subdividir erróneamente una sección que es normalmente distribuida. Entre más alto sea el nivel de confianza requerido, mayor será el número de secciones homogéneas.

Si  $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$ , entonces la población sigue una distribución normal. Si  $u > u_{1-\alpha}$ , entonces los datos tienen variaciones sistemáticas o periódicas y pueden ser subdivididos en el punto donde la función  $g(i)$  tiene un máximo:

$$g(i) = \frac{n}{i(n-i)} \left[ \sum_{j=1}^n y_j \right]^2 \quad (10)$$

$$y_j = x_j - \bar{x} \quad (11)$$

Los cálculos son repetidos para cada una de las dos secciones homogéneas.

Si  $u < u_{\alpha}$ , entonces los datos contienen fluctuaciones rápidas y no pueden ser subdivididos, pero pueden merecer una inspección más minuciosa.

### **4.3 Uso de los parámetros**

#### **4.3.1 Recepción de obra**

Para la recepción una obra se debe realizar una medición de la rugosidad ya que normalmente se requiere que la construcción o refuerzo de un pavimento se haga de manera que la rugosidad promedio no exceda un valor especificado. Para garantizar la uniformidad del proyecto, se determina adicionalmente que la desviación estándar sea menor a un valor establecido.

#### **4.3.2 Control de calidad**

Como un control interno del contratista, que le permita realizar mediciones sobre las distintas capas que conforman la estructura de un pavimento, siempre y cuando, sean capas estabilizadas, bituminosas o de concreto rígido. Esto se hace con el propósito de tomar medidas correctivas a tiempo. Este procedimiento permite identificar los puntos o zonas defectuosas donde se debe ejercer mayor control durante la colocación de la siguiente capa.

### **4.3.3 Estudios de factibilidad técnica-económica**

Para poder determinar la viabilidad económica de las obras que se planea ejecutar, deben realizarse estudios de factibilidad técnica-económica. Para hacer estos estudios es necesario tener un banco de datos, el cual se puede obtener haciendo mediciones periódicas de distintos parámetros del pavimento y otros factores que afectan su comportamiento. Estas mediciones permitirían conocer el estado en que se encuentra la red vial, para poder establecer prioridades en cuanto a la reparación de la misma y así poder utilizar de forma óptima los recursos con que se cuentan para esa actividad.

### **4.3.4 Sistemas para gerencia de pavimentos**

La ejecución de mediciones periódicas (anuales o bianuales), permite alimentar un programa de administración de red pavimentada como el HDM-IV<sup>6</sup> (*Highway Development and Management System*), este programa fue desarrollado por el Banco Mundial y la PIARC (Asociación Mundial de la Carretera) y permite combinar la evaluación técnica y económica de los proyectos de carreteras. El HDM-IV realiza tres tipos de análisis: el análisis estratégico, que planifica estratégicamente los gastos en redes de carreteras a mediano y largo plazo; el análisis de programa, que asigna prioridades a una lista de proyectos bajo restricciones presupuestarias; y el análisis de proyecto, que evalúa proyectos, ya sea para conservación, mejoramiento o rehabilitación de los mismos y también evalúa la viabilidad económica para invertir en proyectos de carreteras.

---

<sup>6</sup> Es un sistema de software utilizado para investigar las alternativas existentes para invertir en infraestructura vial.





## CONCLUSIONES

1. El Perfilómetro Inercial con Sensores Láser, RSP, es un equipo que, actualmente, posee mucha importancia al ser utilizado para evaluar en forma rápida y efectiva, las condiciones en que se encuentra la superficie de un pavimento terminado o de cada una de las capas de la estructura del mismo durante su construcción.
2. El RSP posee las siguientes ventajas:
  - es un método no destructivo de evaluación de pavimentos, que permite determinar el grado de rugosidad del pavimento;
  - calcula, almacena y despliega automáticamente parámetros como el IRI, RN *-Ride Number-* y Ahuellamiento *-Rutting-*;
  - realiza la medición en tiempo real y a la velocidad de circulación de la carretera.
3. El estudio realizado con el equipo RSP se utiliza para tomar medidas correctivas durante la construcción y, de esta forma, asegurar la calidad de la superficie de la carretera para que la misma sea cómoda y segura para los usuarios.



## RECOMENDACIONES

1. Llevar un control de calidad al construir la carretera, realizando mediciones sobre las distintas capas que conforman la estructura de un pavimento, cuando éstas sean capas estabilizadas, bituminosas o de concreto rígido, para poder hacer las correcciones necesarias a tiempo y que las lecturas del IRI en la carpeta de rodadura puedan estar dentro del rango requerido.
2. Continuar realizando el banco de datos de medidas de rugosidad y ahuellamiento de la red vial pavimentada, por lo menos cada dos años, para que pueda ser utilizado para realizar estudios de factibilidad técnica-económica y, de esta forma, poder asignar prioridad a las obras y así optimizar los recursos.
3. Aplicar sanciones a los contratistas si no se cumple con un IRI máximo requerido, asimismo, otorgar premios o bonificaciones si le logra un buen IRI. Este procedimiento es utilizado en Estados Unidos, Europa y otras partes del mundo.



## REFERENCIAS

- 1  
Carey, W.M., Irick, P.E. **The Pavement Serviceability Performance Concept.** HRB Bulletin 250, Highway Research Board. (Washington, D.C., 1960)
- 2  
Annual Book of ASTM Standards, Volume 4.03. Road and Paving Materials. American Society of Testing and Materials. (Philadelphia, PA, 1999)
- 3  
Paterson, W.D.O. et. al. **Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements.** World Bank Technical Paper No. 46. (Washington D.C. 1986)
- 4  
Sayers, M. W. **On the calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile.** Transportation Research Record 1501. (1995)
- 5  
Karamihas, S.M., et. al. **Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement.** NCHRP Report 434. Transportation Research Board. (Washington D.C., 1999)
- 6  
American Association for State Highway and Transportation Officials (AASHTO). **Guide for Design of Pavement Structures.** Appendix J. 1993.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Gillespie, T.D. "Everything you always wanted to know about the IRI, but were afraid to ask!". **Meeting of the Road Profile Users Group**. (Lincoln, Nebraska) Septiembre 22-24, 1992.
2. Kerall, Henry G.R. **Visión General de HDMIV**. (Volumen 1). Washington D.C. 2001.
3. Pérez Guillén, Ranfis Virgilio. Evaluación de Rugosidad en Pavimentos Flexibles Utilizando El Metro Mays. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1988.
4. Sayers, M.S., T.D. Gillespie, C. Queiroz. "International Experiment to Establish Correlations and Standard Calibration Methods for Road Roughness Measurements". **World Bank Technical Paper 45**. Washington D.C. 1986.
5. Sayers, M.W., S.M. Karamihas. "The Little Book of Profiling". **Report from The University of Michigan Transportation Research Institute**. Septiembre 1998.
6. Sayers, W.D., T.D. Gillespie, W.D.O. Paterson. "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements". **World Bank Technical Paper No. 46**. Washington D.C. 1986.
7. Soto Nuñez, Benjamín. Control de Calidad en Pavimentos. Tesis Ing. Civil. Chile, Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Obras Civiles, 2002.





# APÉNDICE

ALGUNAS FOTOGRAFÍAS DEL EQUIPO RSP\*



\* Fotografías proporcionadas por CM Ingenieros

VISTA FRONTAL DE LA BARRA CONTENIENDO EL EQUIPO RSP



**VISTA INTERIOR DEL VEHÍCULO MOSTRANDO LA COMPUTADORA PORTÁTIL QUE CONTROLA LA OPERACIÓN DEL EQUIPO RSP**



VISTA LATERAL DE LA BARRA CONTENIENDO EL EQUIPO RSP, NÓTESE ADEMÁS EL LÁSER EXTERNO Y LA CONEXIÓN DEL MEDIDOR DE DISTANCIA (DMI) EN LA RUEDA DELANTERA





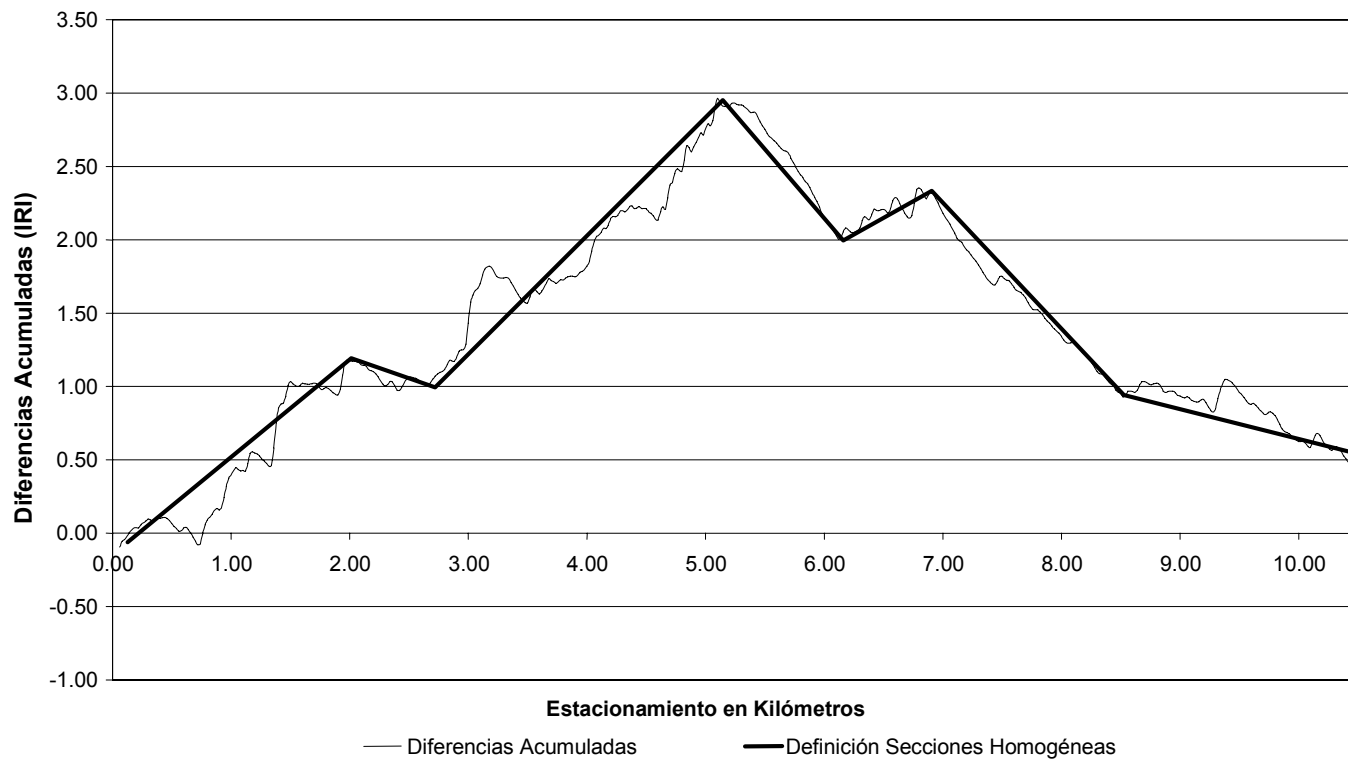


**GRÁFICAS DE RESULTADOS OBTENIDOS CON  
PERFILÓMETRO INERCIAL CON SENSORES LÁSER  
(RSP)  
PROYECTO CA-01 SANTA CLARA LA LAGUNA**



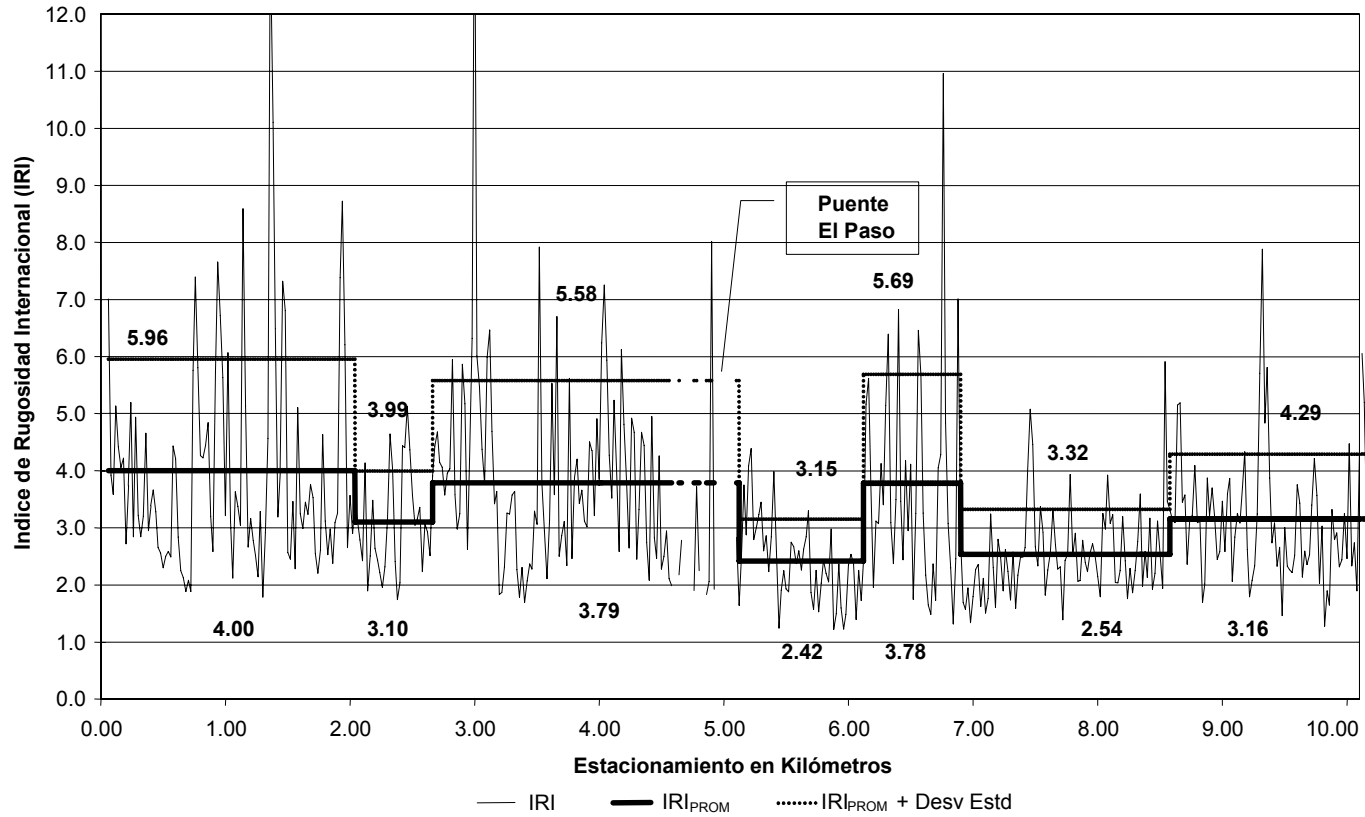


Proyecto: CA-01 - Santa Clara La Laguna  
Definición Secciones Homogéneas  
IRI (Izq/Cen/Der)  
PISTA DERECHA



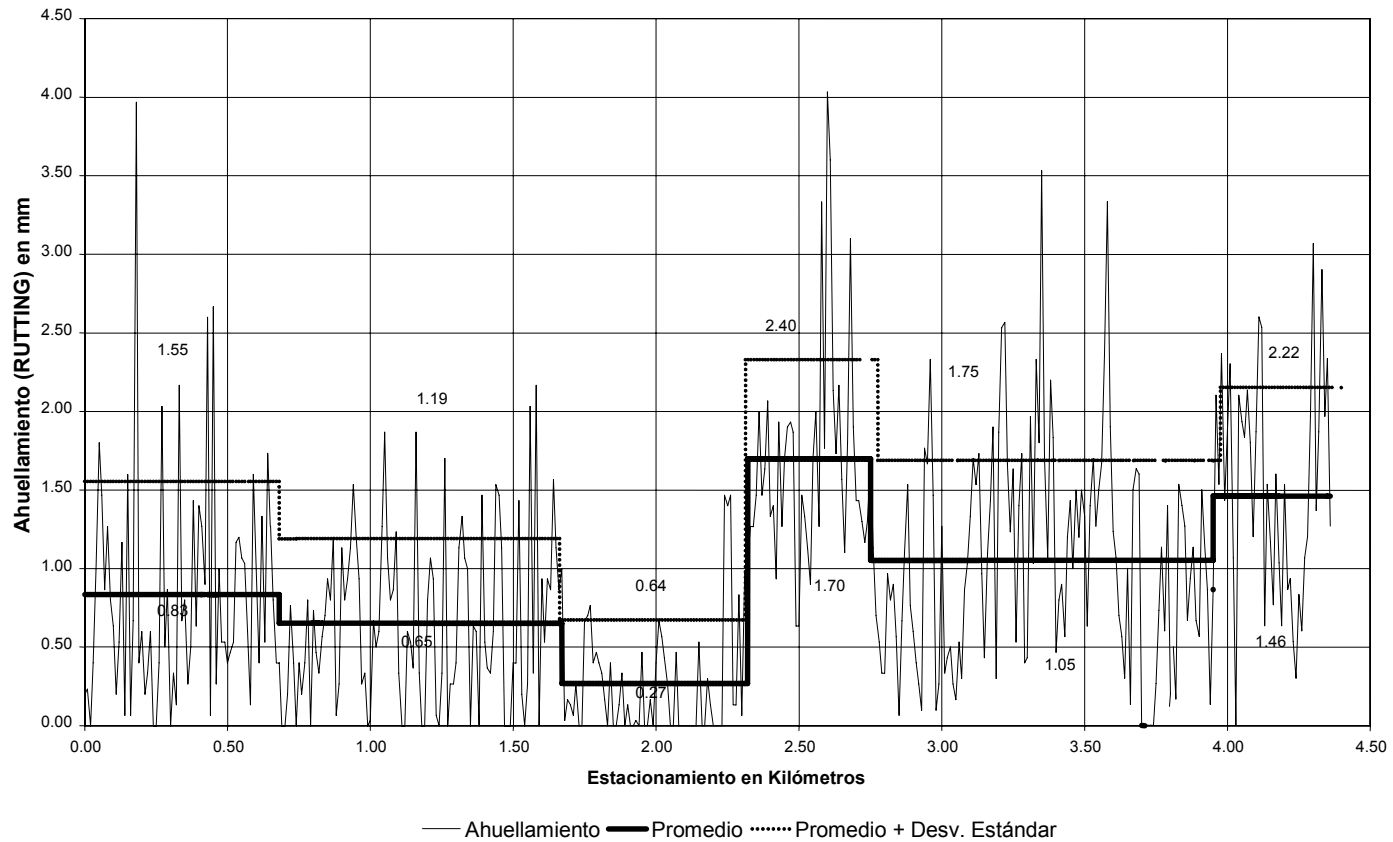
**GRAFICA 1. Definición de Secciones Homogéneas para IRI, Proyecto: CA-1 – Santa Clara La Laguna**

Proyecto: CA-01 - Santa Clara La Laguna  
 RUGOSIDAD SOBRE LA PISTA DERECHA



GRAFICA 2. Rugosidad (IRI) sobre Pista Derecha, Proyecto: CA-1 – Santa Clara La Laguna

**Proyecto: CA-01 - Santa Clara La Laguna**  
**AHUELLAMIENTO SOBRE PISTA DERECHA**



**GRAFICA 3. Ahuellamiento (Rutting) sobre Pista Derecha, Proyecto: CA-1 – Santa Clara La Laguna**



# **ANEXOS**



**GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO, AASHTO**  
**APÉNDICE J <sup>[6]</sup>**  
**ANÁLISIS DE DELINEACIÓN UNITARIA POR DIFERENCIAS ACUMULADAS**

**J-1 LOS FUNDAMENTOS DE LA APROXIMACIÓN**

Un método analítico para delinear estadísticamente unidades homogéneas de medidas de un pavimento a lo largo de un sistema de carretera es la aproximación de diferencias acumuladas. Mientras la metodología presentada es fundamentalmente fácil de visualizar, la implementación del manual para grandes bases de datos se convierte en un consumo de tiempo y puede resultar muy laborioso. Sin embargo, la aproximación es presentada debido a que es fácilmente adaptable a una solución computarizada y a un análisis gráfico. Esta aproximación puede ser utilizada para una gran diversidad de variables de respuesta medidas en un pavimento, tal como, la deflexión, serviciabilidad, resistencia al deslizamiento, índices, etc.

La Figura J-1 ilustra el concepto de aproximación total usando la suposición inicial de un valor de respuesta ( $r_i$ ) continuo y constante dentro de varios intervalos ( $0$  a  $x_1$ ;  $x_1$  a  $x_2$ ;  $x_2$  a  $x_3$ ) a lo largo de la longitud del proyecto. De esta Figura, es obvio que existen tres únicas unidades, teniendo diferentes magnitudes de respuesta ( $r_1$ ,  $r_2$ , y  $r_3$ ) a lo largo del proyecto. La Figura J-1 (a) ilustra cómo resultaría una gráfica respuesta-distancia. Si se quiere determinar la tendencia del área acumulada bajo la línea del cuadro respuesta-distancia, tendría como resultado la Figura J-1 (b). La línea sólida indica los resultados de las curvas actuales de respuesta. Debido a que las funciones son continuas y constantes dentro de una unidad, el área acumulada, en cualquier punto  $x$ , es simplemente la integral o,

$$A = \int_0^{x_1} r_1 \cdot dx + \int_{x_1}^x r_2 \cdot dx \quad (\text{J-1})$$

donde cada integral es continua dentro de los respectivos intervalos:

$$(0 \leq x \leq x_1) \text{ y } (x_1 \leq x \leq x_2)$$

En la Figura J-1 (b), la línea punteada representa el área acumulada provocada por la respuesta total promediada del proyecto. Debe reconocerse que las pendientes (derivadas) de las curvas del área acumulada son simplemente el valor de respuesta para cada unidad ( $r_1$ ,  $r_2$ , y  $r_3$ ) mientras que la pendiente de la línea punteada es el valor de respuesta promedio total de la longitud completa del proyecto considerado. En la distancia,  $x$ , el área acumulada de la respuesta promedio del proyecto es:

$$A_x = \int_0^x r \cdot dx \quad (\text{J-2})$$

Con

$$\bar{r} = \frac{\int_0^{x_1} r_1 \cdot dx + \int_{x_1}^{x_2} r_2 \cdot dx + \int_{x_2}^{x_3} r_3 \cdot dx}{L_p} = \frac{A_T}{L_p}$$

Y además

$$A_x = L_p \times A_T$$

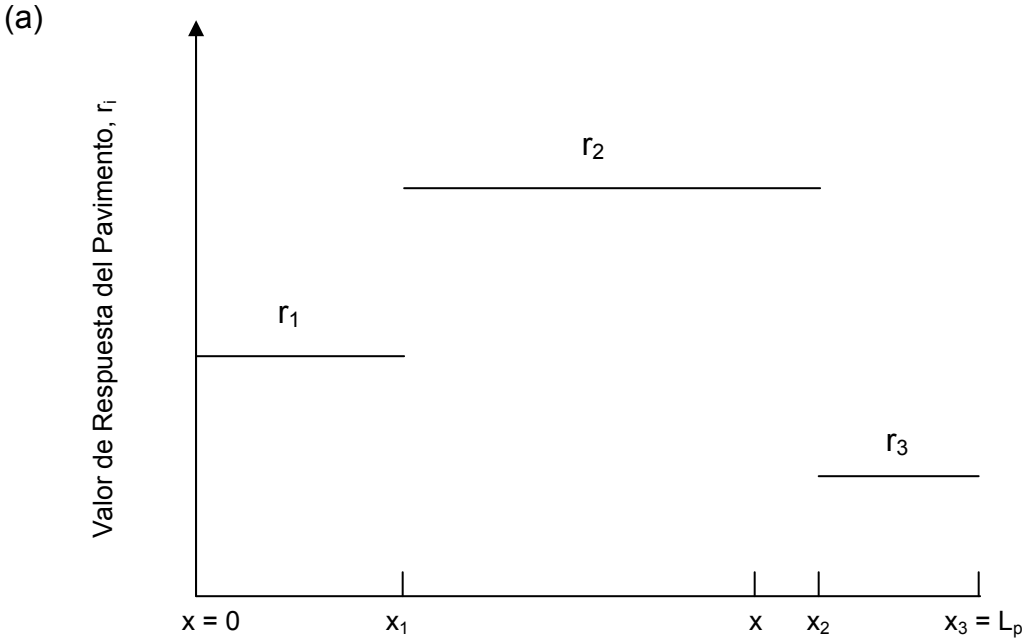


Conocer  $A_x$  y  $\bar{A}_x$ , permite la determinación de la variable  $Z_x$  de la diferencia acumulada de:

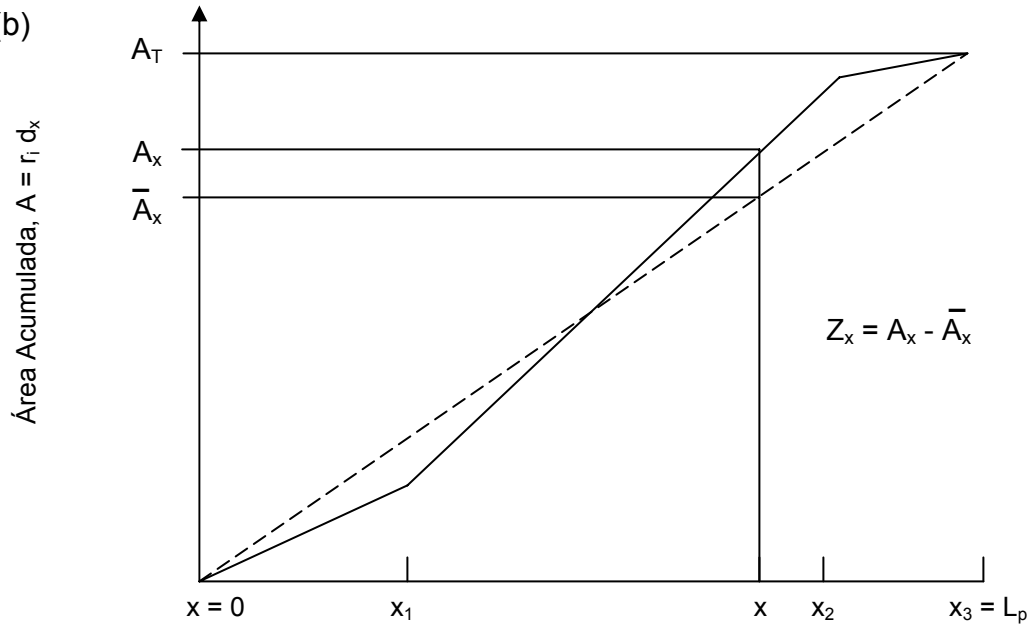
$$Z_x = A_x - \bar{A}_x$$

Como se nota en la Figura J-1 (b),  $Z_x$  es simplemente la diferencia en los valores de área acumulada, en un punto  $x$  dado, entre la línea promedio del proyecto y la línea actual. Si el valor  $Z_x$  es ploteado, a su vez, versus la distancia,  $x$ , resultaría la Figura J-1 (c). Una evaluación de esta gráfica demuestra que la ubicación de los límites siempre coincide con la ubicación (a lo largo de  $x$ ) en donde la pendiente de  $Z_x$  cambia de signo (de negativo a positivo o viceversa). Este concepto fundamental es la base esencial usada para determinar analíticamente la ubicación del límite para las unidades de análisis.

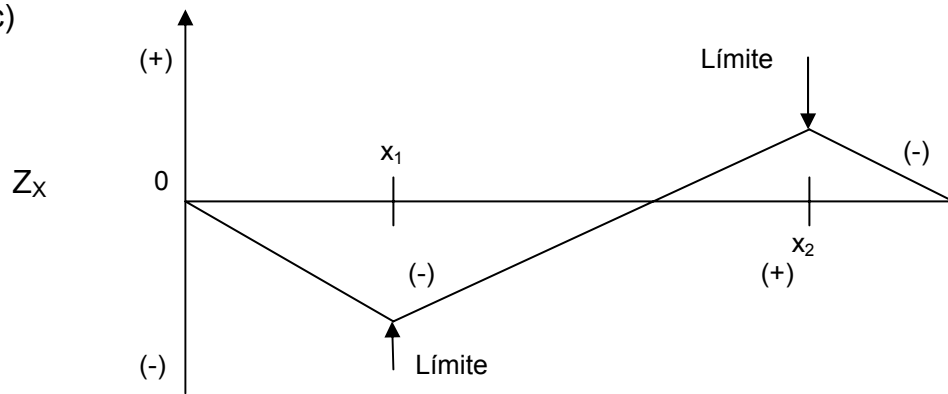
**Figura J-1.** Conceptos de aproximación de diferencia acumulada para análisis de delineación unitaria



(b)



(c)



## J-2 APLICACIÓN A VARIABLES DISCONTINUAS

Las figuras esquemáticas mostradas en la Figura J-1 son altamente idealizadas. En la práctica, las medidas son normalmente discontinuas (puntos de medida), frecuentemente obtenidos a intervalos desiguales y nunca constantes, aunque dentro de una unidad. A fin de aplicar los principios en una solución metodológica capaz de tratar con estas condiciones, debe ser usada una aproximación de diferencia numérica. La forma de la función  $Z_x$  es:

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{L_p} \sum_{i=1}^n x_i$$

Con

$$a_i = \frac{(r_{i-1} + r_i) \times x_i}{2} = \bar{r}_i \times x_i \quad (\text{J-6})$$

(NOTA: dejar  $r_0 = r_1$  para el primer intervalo)

donde:

- $n$  = la  $n^{\text{ésima}}$  medida de respuesta del pavimento,
- $n_t$  = número total de medidas de respuesta del pavimento tomadas en el proyecto,
- $r_i$  = valor de respuesta del pavimento de la  $i^{\text{ésima}}$  medida,
- $\bar{r}_i$  = Promedio de los valores de respuesta del pavimento entre las pruebas  $(i - 1)$  e  $i^{\text{ésima}}$ , y
- $L_p$  = Longitud total del proyecto.

Si se utilizan intervalos de prueba iguales:

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{n}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} a_i$$

### **J-3 SECUENCIA DE SOLUCIÓN TABULAR**

La Tabla J-1 es una tabla que ilustra cómo la secuencia de solución progresa y los pasos computacionales necesarios que se requieren para el análisis de un intervalo desigual. La tabla y las entradas son aclaratorias por sí mismas.

**Tabla J-1.** Aproximación de Diferencia Acumulada

Col. 1 Estación (Distancia)	Col. (2) Valor de Respuesta del Pavimento ( $r_i$ )	Col. (3) Intervalo de Número (n)	Col. (4) Intervalo de Distancia ( $\Delta x_i$ )	Col. (5) Intervalo de Distancia Acumulada ( $\sum \Delta x_i$ )	Col. (6) Intervalo de Respuesta Promedio ( $r_i$ )	Col. (7) Intervalo de Área Actual ( $a_i$ )	Col. (8) Área Acumulada $\sum a_i$	Col. (9) Valor $Z_x$ $Z_x = \text{Col. (8)} - F * \text{Col. (5)}$
1	$r_1$	1	$\Delta x_1$	$\Delta x_1$	$\bar{r}_1 = r_1$	$a_1 = \bar{r}_1 \Delta x_1$	$a_1$	$Z_{x1} = a_1 - F * \Delta x_1$
		2	$\Delta x_2$	$(\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\bar{r}_2 = \frac{(r_1 + r_2)}{2}$	$a_2 = \bar{r}_2 \Delta x_2$	$a$	$Z_{x2} = (a_1 + a_2) - F * (\Delta x_1 + \Delta x_2)$
2	$r_2$							
		3	$\Delta x_3$	$(\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3)$	$\bar{r}_3 = \frac{(r_2 + r_3)}{2}$	$a_3 = \bar{r}_3 \Delta x_3$	$a_1 + a_2 + a_3$	
3	$r_3$							
		$N_t$	$\Delta x_{nt}$	$(\Delta x_1 + \dots + \Delta x_1)$	$\bar{r}_{nt} = \frac{(r_{n-1} + r_n)}{2}$	$a_{nt} = \bar{r}_{nt} \Delta x_{nt}$	$a_1 + \dots + a_{2t}$	$Z_{xnt} = (a_1 + \dots + a_{nt}) - F * (\Delta x_1 + \dots + \Delta x_{nt})$
LP	$r_n$							
							$A_t = \sum_{i=1}^{h_t} a_i$	
							$F* = \frac{A_t}{L_p}$	

