

Evaluación de perfiles de pavimentos basados en la densidad espectral de potencia como un complemento al Índice De Rugosidad Internacional (IRI)

Evaluation of pavement profiles based on power spectral density as a complement to International Roughness Index (IRI)

J. Waldo Márquez S.^{1,*}, Rodrigo Díaz T.² Álvaro González V.³

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

² Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

³ Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

INFORMACIÓN
DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
16-04-2024
Publicado
25-04-2024

Palabras Clave:
Perfil longitudinal de pavimentos
Índice de Rugosidad Internacional (IRI)
Densidad Espectral de Potencia (DEP)
Características de ondas

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
16-04-2024
Available
25-04-2024

Keywords:
Longitudinal profile of pavements
International Roughness Index (IRI)
Spectral Power Density (DEP)
Wave Characteristics

Resumen

Los pavimentos tienen el propósito de dar un adecuado nivel de serviciabilidad hacia los usuarios. Este propósito tiene directa relación a su condición superficial siendo el perfil longitudinal la característica más incidente que puede afectar a los vehículos que usan las vías. La evaluación del perfil del pavimento se realiza utilizando equipos de perfilometría. Para analizar el perfil se ha estandarizado el uso del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) que evalúa las irregularidades superficiales del pavimento basados en el modelo denominado "cuarto de carro". Este modelo está diseñado para representar la respuesta vertical de un vehículo estandarizado en un rango específico de longitudes de onda relacionadas con la calidad del rodado. El IRI no permite discriminar la naturaleza de los daños que causan la irregularidad en términos de sus longitudes de onda componentes. El objetivo de este artículo es presentar como herramienta el análisis de la Densidad Espectral de Potencia (DEP), que permite analizar perfiles a fin de comprender de mejor manera la forma en que se tendría que definir acciones de conservación basados en el análisis de las longitudes de las ondas. Se describe el análisis DEP, el procedimiento que se aplica basado en la transformada de Fourier, los resultados obtenidos y su interpretación. Se aplica un caso de estudio en el cual se evalúan 4 secciones con distintos niveles de IRI. Como conclusión se puede apreciar la utilidad que tendrá el analizar la rugosidad de pavimentos utilizando la técnica DEP como complemento a los resultados obtenidos del IRI.

Abstract

The purpose of pavements is to provide an adequate level of serviceability to users. This purpose is directly related to its surface condition, being the longitudinal profile the most important characteristic that can affect the vehicles that use the roads. The evaluation of the pavement profile is carried out using profilometry equipment. To analyze the profile, the use of the International Roughness Index (IRI) has been standardized, which evaluates the surface irregularities of the pavement based on the "quarter car" model. This model is designed to represent the vertical response of a standardized vehicle over a specific range of wavelengths related to the quality of the pavement. The IRI does not allow discriminating the nature of the damage causing the irregularity in terms of its component wavelengths. The objective of this paper is to present as a tool the Spectral Power Density (DEP) analysis, which allows to analyze profiles in order to better understand how conservation actions should be defined based on the analysis of wavelengths. The DEP analysis, the procedure applied based on the Fourier transform, the results obtained and their interpretation are described. A case study is applied in which 4 sections with different IRI levels are evaluated. As a conclusion, the usefulness of analyzing pavement roughness using the DEP technique as a complement to the results obtained from the IRI can be appreciated.

* Corresponding author at: J. Waldo Márquez S., Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul - Santiago – Chile. E-mail address: jwmarque@uc.cl

RIOCI

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 01, pp. 1–8, Abril 2024

1. Introducción

En la infraestructura vial los pavimentos son considerados como “el elemento básico y fundamental”, ya que en torno a éstos se emplaza todo el resto de los elementos que conforman a un camino. Usualmente, los pavimentos demandan la mayor asignación de recursos tanto en su etapa de construcción como en su etapa de operación. Los pavimentos deben cumplir principalmente con los siguientes propósitos: i) soportar las cargas a las que estarán sometidos debido a las solicitaciones de tránsito y clima, y ii) entregar a los usuarios de los pavimentos una adecuada condición funcional (De Solminihac, et al., 2018). El segundo propósito es un “criterio cualitativo y subjetivo” ya que está enfocado en la capacidad que tendrá una sección del pavimento de entregar, a lo largo de su vida útil, una superficie de rodado que permita viajes confortables y seguros a los usuarios de la vía, es decir deberá entregar una adecuada serviciabilidad.

El concepto de “serviciabilidad” fue incorporado en la ingeniería de pavimentos desde la prueba AASHO realizada en Illinois en los años 50’s (Highway Research Board, 1962) y las mismas premisas han prevalecido hasta la actualidad. En Chile, la metodología AASHTO 93 es la que se encuentra vigente para el diseño estructural de pavimentos siendo uno de sus principales parámetros el Índice de Serviabilidad Presente (PSI por sus siglas en inglés) (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2020).

La serviciabilidad, si bien es un concepto cualitativo, se hace cuantitativo cuando se asocia a las características superficiales que tiene el pavimento. De estas características la principal variable es el perfil longitudinal. Esta variable corresponde a una representación bidimensional (longitud y altura) de la superficie de la vía, que se obtiene en una o varias líneas imaginarias (Sayers & Karamihas, 1998). El análisis usualmente se realiza a lo largo de la trayectoria de las huellas de las ruedas de los vehículos que harán uso de la vía, es decir, se acostumbra a analizar dos perfiles longitudinales por pista o carril. La serviciabilidad tiene directa incidencia en la calidad de rodado, la velocidad, la seguridad y los costos de operación que tendrán los vehículos que harán uso de la vía.

2. Metodología

Para la determinación del perfil longitudinal se utilizan diferentes métodos e instrumentos de medición, los cuales permiten establecer distancias longitudinales, elevaciones de referencia, y alturas. Entre los métodos usualmente considerados en la práctica están los basados en técnicas topográficas (mira y nivel), los que utilizan inclinómetros, acelerómetros, y distancias de paso (p.ej., Walking Profiler, otros), y los basados en perfilometría inercial (Figura 1).

Estos últimos equipos, usualmente conocidos como

“perfilómetros laser”, han cobrado cada vez más relevancia dado su alto rendimiento, alta precisión, y su alta confiabilidad.



Figura 1. Equipos para evaluación de perfiles longitudinales (Fuente: ARRB Brochures).

La medición de los perfiles longitudinales es sólo el insumo para el posterior procesamiento e interpretación de la información. Dichos datos se procesan a través varios índices que permiten evaluar la “rugosidad” definida como aquellas irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente la calidad de rodado, seguridad y a los costos de operación vehicular. A través de la rugosidad se puede evaluar la serviciabilidad de los pavimentos nuevos o de las reparaciones que se hayan realizado, también permite analizar zonas específicas que requieran actividades puntuales de mantenimiento y realizar estudios definidos de la condición existente.

Respecto a los índices basados en el perfil, existen varias alternativas: Índice de Serviabilidad Presente (PSI) (Highway Research Board, 1962), Ride Number (RN), Índice de Perfil (PI), Rugosidad NAASRA (Mann, MacManus, & Holden, 1997), Índice de Rugosidad Internacional (IRI) (Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1982), y una variación del mismo denominado como Índice de Rugosidad de Medio Carro (HRI) (Sayers & Karamihas, 1998). El IRI, es el índice que ha cobrado relevancia mundial y es ampliamente utilizado como un parámetro de referencia directamente asociado a la Serviabilidad. (Múcka, 2017). En Chile, de acuerdo con el manual de carreteras vigente, el IRI se puede correlacionar con la Serviabilidad actual (P_a) basado en las siguientes relaciones:

Pavimentos Flexibles:

$$P_a = 5.85 - 1.68 \cdot IRI^{0.5} \quad (1)$$

Pavimentos Rígidos:

$$P_a = 7.10 - 2.19 \cdot IRI^{0.5} \quad (2)$$

El IRI, es un índice del perfil longitudinal que permite evaluar

estadísticamente las irregularidades superficiales existentes en el pavimento que puedan impactar sobre la respuesta de la dinámica del vehículo. Este impacto corresponde a una simulación basada en un algoritmo matemático que idealiza el sistema de suspensión vehicular a partir de la aplicación del modelo denominado Cuarto de Carro o “Golden Car” sobre el perfil longitudinal permitiendo que se puedan evaluar los movimientos de las masas del vehículo respecto del eje de la rueda acumulando en una longitud preestablecida (Gillespie, Sayers, & Segel, 1980) (ASTM, 2001) (Ver Figura 2).

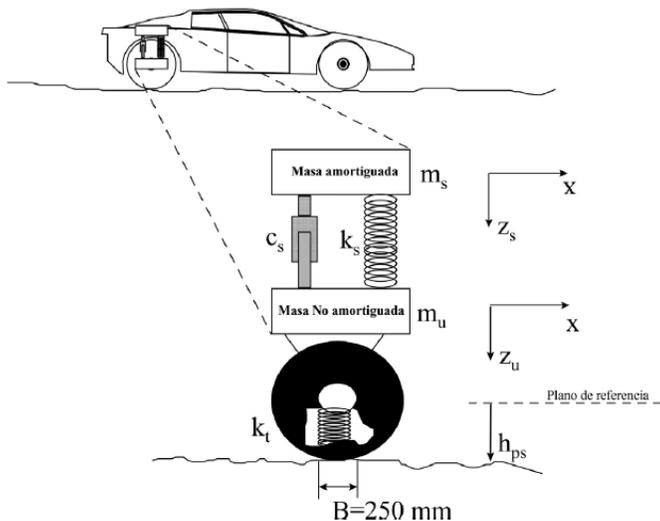


Figura 2. Modelo del cuarto de carro (ASTM, 2001) (De Solminiach, et al., 2018).

Como se puede apreciar la aplicación del modelo del cuarto de carro corresponde a un filtro desarrollado principalmente para coincidir con la respuesta que tendrán los vehículos livianos buscando correlacionar 3 variables: respuesta de la suspensión, aceleración vertical del pasajero y carga del neumático. Para lograr la conjunción de estas tres variables el modelo se centra en un tipo específico de perfiles longitudinales que tengan longitudes de onda que puedan ocasionar que los movimientos entre los sistemas de masas y ejes no induzcan movimientos significativos al sistema de suspensión del vehículo.

La respuesta del filtro del modelo del cuarto de carro a las longitudes de onda expresado en metros (o su inverso el número de onda expresado en ciclos/metro) se presenta en la Figura 3. La sinusoide de salida corresponde a la amplitud de la entrada multiplicada por la ganancia. Como se puede apreciar el resultado de la aplicación del modelo para determinar el parámetro IRI se ve influenciado por longitudes de onda que van desde 1.2 a 30 m, aproximadamente.

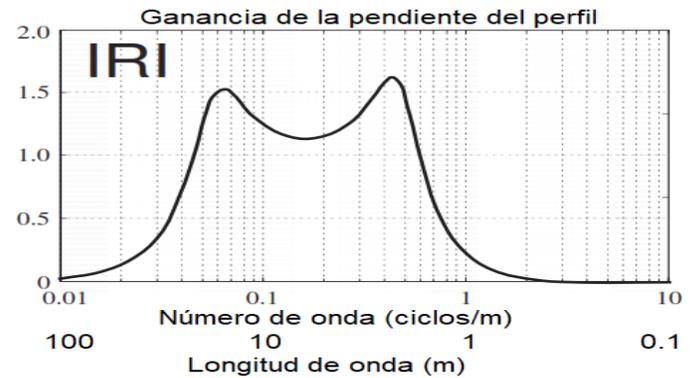


Figura 3. Respuesta del modelo del cuarto de carro al número de onda o longitud de onda. (Mann, MacManus, & Holden, 1997).

El modelo del IRI tiene una máxima sensibilidad a longitudes de onda de aproximadamente 2.4 m y 15 m donde la respuesta esperada del parámetro IRI es prácticamente el mismo. Esta situación es ejemplificada por Sayers & Karamihas, 1998, donde comparan dos perfiles de pavimento obteniendo valores del IRI similares siendo que claramente la forma de los perfiles es diferente (Figura 4). El perfil con IRI = 2.46 m/km es probable que corresponda a un pavimento nuevo en operación y el otro perfil (IRI = 2.18 m/km) correspondería a una superficie con daños superficiales.

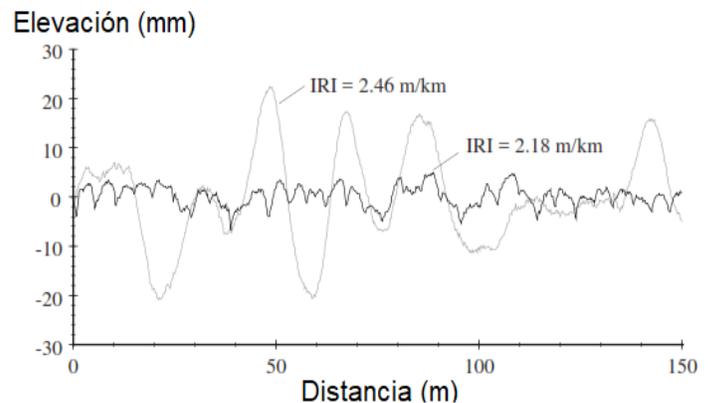


Figura 4. Comparación de perfiles longitudinales y valores de IRI. (Sayers & Karamihas, 1998).

Como se puede apreciar el parámetro IRI, si bien permite determinar objetivamente el estado de la rugosidad superficial del pavimento, no permite discriminar la razón por la que se están presentando los valores de rugosidad. El poder identificar el porqué de las variaciones es información valiosa ya que permitiría poder definir las acciones de conservación basadas en criterios objetivos fundamentados en el análisis del perfil longitudinal. Este análisis se puede realizar través de procesos de descomposición del perfil que permitirá estudiar la composición del mismo basado en técnicas analíticas.

En este artículo se presenta como herramienta complementaria al parámetro IRI, el análisis de la Densidad Espectral de Potencia (DEP) que permite analizar los perfiles utilizando técnicas de procesamiento de señales. Por medio de esta técnica se podrá comprender de mejor manera la forma en que se tendría que definir acciones de conservación basados en el análisis de las características de las ondas utilizando un herramienta disponible y gratuita como es el software para el análisis y visualización de perfiles – PROVAL (www.roadprofile.com).

2.2 Análisis de perfiles longitudinales por técnicas de procesamiento de señales. Densidad espectral de potencia

Los perfiles longitudinales de la superficie del pavimento obtenidos a partir de técnicas de perfilometría, pueden ser analizados por métodos de procesamiento de señales los cuales permiten, analíticamente, realizar una caracterización numérica de los perfiles (Hesami & Mcmanus, 2009). De acuerdo con la literatura, existen diferentes métodos de procesamiento de señales: Transformada de Hilbert, Transformada de Wavelet, Distribución de Wigner, Transformada de Fourier, otros. Cada técnica tiene sus propias ventajas y limitaciones, sin embargo, la Transformada de Fourier es el método más popular ya que permite ser aplicada a señales estacionarias en los cuales tanto la media y la desviación estándar no cambian a lo largo del tiempo.

El análisis de la Densidad Espectral de Potencia (DEP), se basa en la transformada de Fourier como método de procesamiento de señales (Irvine, 2000). En este caso el perfil longitudinal del pavimento queda representado por una construcción matemática de serie de funciones sinusoidales con diferentes longitudes de onda, amplitudes y fases como se puede apreciar en la Figura 5.

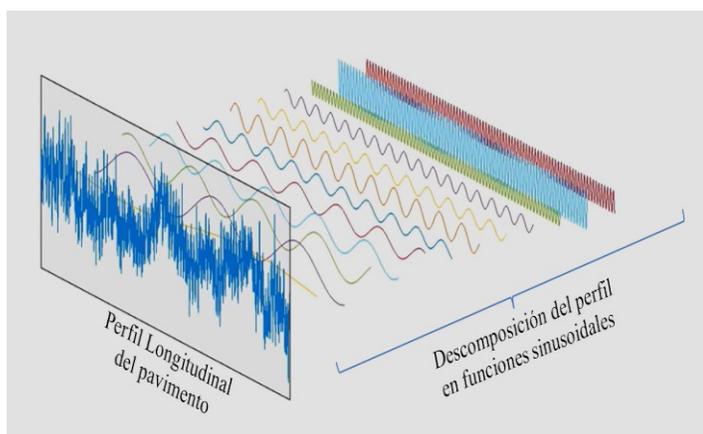


Figura 5. Esquematación de la descomposición de un perfil longitudinal del pavimento en funciones sinusoidales.

La densidad espectral es una función que indica como la varianza del perfil es “distribuida” sobre las diferentes sinusoides que,

sumadas, aproximan el perfil. En otras palabras, es una representación estadística de la importancia (en términos de amplitud) de las diferentes longitudes de onda componentes del perfil longitudinal. La gráfica de estas amplitudes respecto de sus longitudes de onda correspondientes se denomina periodograma o gráfico de densidad espectral de potencia DEP (o PSD por sus siglas en inglés, *Power Spectral Density*). La función de PSD (ISO, 2016) puede calcularse tanto sobre el perfil de elevaciones como sobre el perfil de pendientes, en este último caso, las amplitudes resultantes son más uniformes sobre el espectro de las longitudes de onda componentes, permitiendo una mejor visualización de las diferentes características de la irregularidad (Sayers and Karamihas, 1998).

El cálculo de la DEP se realiza en tres etapas:

- i. Transformada de Fourier: Primero se aplica una transformada de Fourier a la señal de perfil longitudinal del pavimento. La transformada de Fourier descompone la señal en sus componentes de frecuencia, lo que permite analizar la rugosidad del pavimento en función de la longitud de onda de las irregularidades.
- ii. Cálculo del espectro de potencia: A partir de la transformada de Fourier se calcula el espectro de potencia como el cuadrado de las amplitudes obtenidas para cada longitud de onda, lo que proporciona una medida de la variación de la rugosidad del pavimento a lo largo de diferentes longitudes de onda (a mayores irregularidades, mayor varianza de las cotas, y en consecuencia, la transformada de Fourier devolverá mayores amplitudes).
- iii. Cálculo de la DEP: Finalmente, se calcula la DEP dividiendo el espectro de potencia por la frecuencia. La DEP proporciona información sobre la distribución de las diferentes longitudes de onda componentes del perfil longitudinal y se utiliza para identificar las características de los defectos que original la rugosidad del pavimento.

En análisis DEP se puede realizar considerando dos enfoques: el primero basado en el perfil de elevaciones y el segundo basado en el perfil de pendientes. Se evalúan m^2 -m/ciclo y en mm^2 (m/ciclo) respectivamente versus la longitud de onda o de la frecuencia. En la Figura 6 se puede apreciar ambos enfoques considerando dos tipos de perfiles que corresponden a un camino en buenas condiciones recién construido con un IRI de 1.67 m/km y el otro a un camino con un deterioro representativo de IRI = 6.23 m/km.

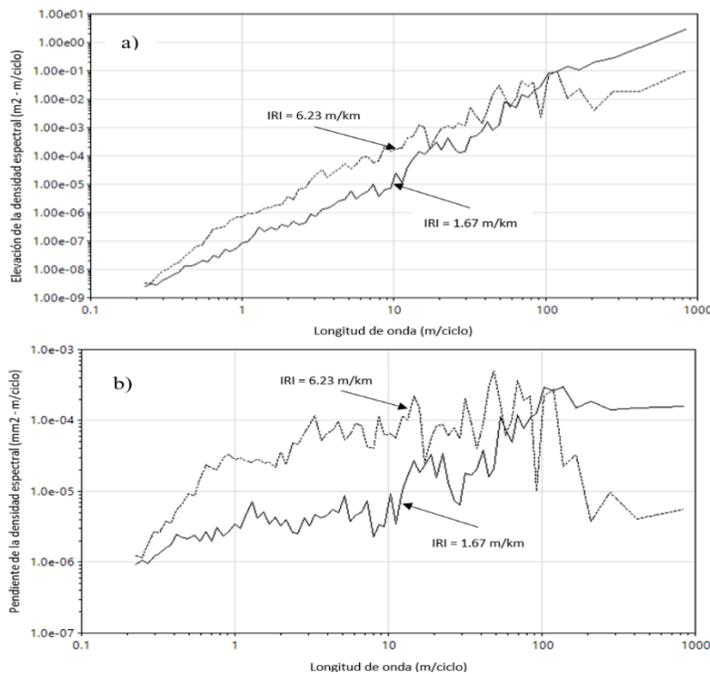


Figura 6. a) DEP - elevación de la densidad espectral. b) DEP - pendiente de la densidad espectral.

Como se puede apreciar en la Figura 6.a), cuando la longitud de onda va incrementando, la elevación de la densidad espectral también se incrementa. Esto se debe a que la amplitud de las longitudes de onda largas es mayor que las de ondas cortas, por ende, son las que van a tener mayores variaciones de altura en el perfil longitudinal. Esto tiene especial relevancia al momento de definir qué acción de conservación será la apropiada para poder lograr que la rugosidad pueda estar dentro de los parámetros o umbrales de cumplimiento ya que si eventualmente se aplica alguna estrategia de intervención que pueda remover las longitudes de onda largas, las variaciones en el perfil podrían reducirse a milímetros.

Respecto al análisis de la pendiente de la densidad espectral, Figura 6.b), este se obtiene a partir de la primera derivada (pendiente) del perfil longitudinal sobre el cual se aplica el procedimiento para obtener el DEP. Al momento de analizar el gráfico, se evidencia que quedan eliminadas las tendencias que se podrían apreciar en el DEP de elevaciones. De esta forma, se facilita el análisis pudiendo visualizar las distribuciones de las longitudes de onda que están presentes en un perfil longitudinal y pudiendo identificar más claramente la longitud de onda predominante.

Para la interpretación de los gráficos DEP obtenidos a partir del perfil longitudinal del pavimento existen diversas metodologías siendo las más utilizadas aquellas que consideran la caracterización a partir de discretizaciones basadas de rangos de

longitud de onda. En la Tabla 1 se presenta una forma de discretizar en base a criterios representativos de longitudes de onda (Mann, et al., 1997).

Tabla 1. Discretización de bandas en base a criterios representativos de longitudes de onda.

Longitud de onda (m)	Número de onda (m/ciclo)	Descripción
0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	Pavimentos rugosos con daños superficiales en su superficie.
1.0 - 2.0	0.5 - 1.0	
2.0 - 10.0	0.1 - 0.5	Superficies con formación de deformaciones diferenciales.
10.0 - 35.0	0.01 - 0.1	
35.0 - 100.0	0.03 - 0.01	Longitud de onda en pavimentos recién construidos.

Para cada rango se determina el valor de la media cuadrática (RMS por sus siglas en inglés) del valor la pendiente DEP y estos resultados pueden ser utilizados para comparar con valores de otros perfiles para obtener aproximaciones sobre la rugosidad.

3. Caso de aplicación: análisis DEP para evaluar el comportamiento de pavimentos con diferentes niveles de rugosidad.

Para ejemplificar el análisis DEP, se aplicó del método a 4 secciones de pavimentos de aproximadamente 400 m los cuales se encuentran emplazados en el distrito de Cieneguilla de la ciudad de Lima - Perú. Estas secciones fueron identificadas de tal manera que permitan contar con distintos niveles de rugosidad evaluados a partir del parámetro IRI. De esta forma se identificó perfiles longitudinales cuyo IRI tenga valores Buenos, Regulares, Malos y Muy Malos como se puede apreciar en la Figura 7.

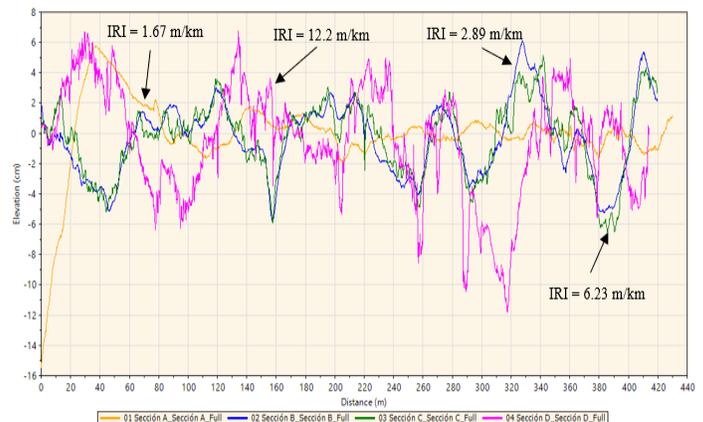


Figura 7. Perfiles longitudinales de las cuatro secciones con diferentes valores de rugosidad (IRI).

Para todas las secciones, el perfil longitudinal fue evaluado con un perfilómetro laser digital clasificado como Clase I de acuerdo con los criterios del Banco Mundial. Este equipo cuenta con láseres de alta resolución (0.01 mm) y con acelerómetros que tienen la capacidad de trabajar en rangos de aceleración de ± 6 g. En la Figura 1 se presenta una imagen representativa del equipo. El procesamiento de los perfiles longitudinales se realizó utilizando el software PROVAL en su versión 3.61.

En las Figuras 8 y 9 se presentan los gráficos DEP, elevación y pendiente, para las 4 secciones evaluadas. La discretización de las bandas se realizó en base a criterios representativos de longitudes de onda (Tabla 1). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

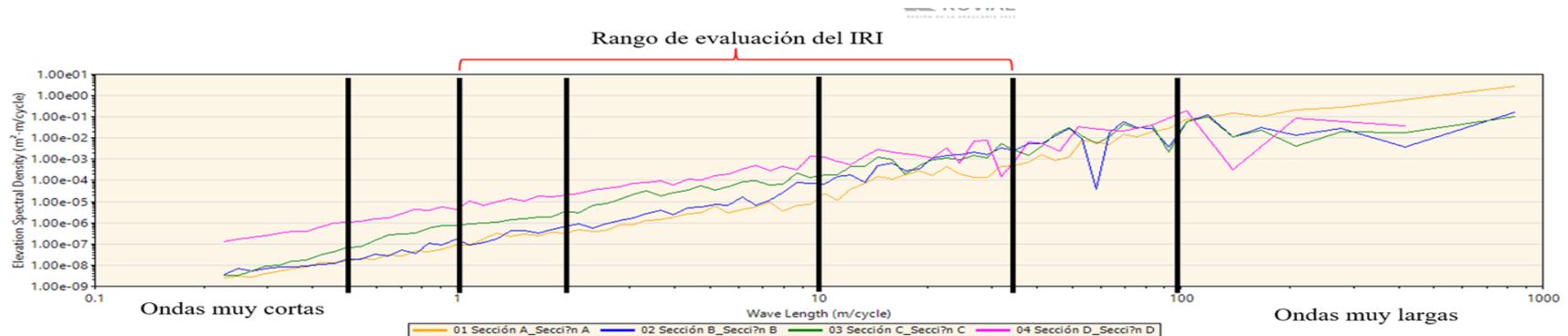


Figura 8. Densidad Espectral del Perfil de Elevaciones para las 4 secciones evaluadas.

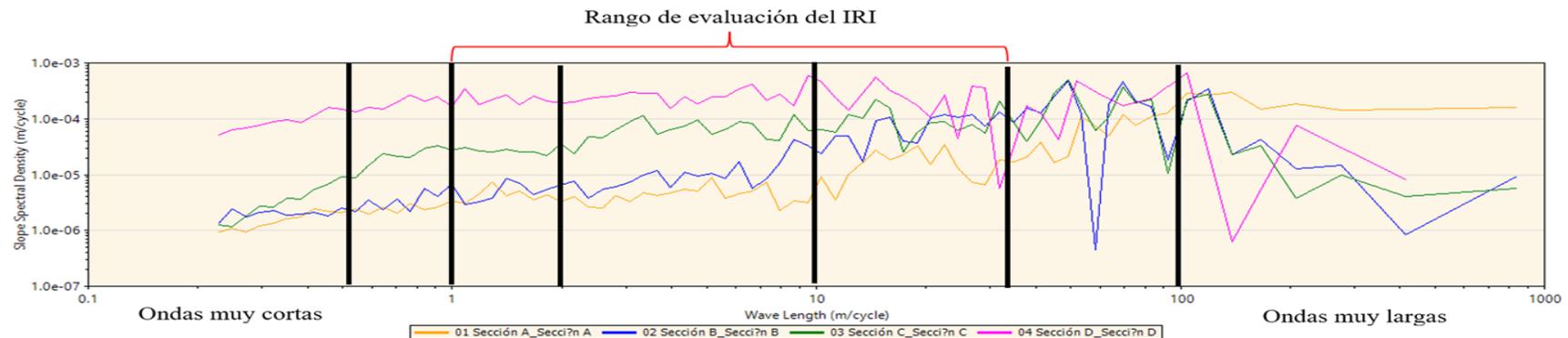


Figura 9. Densidad Espectral del Perfil de Pendiente para las 4 secciones evaluadas.

Si bien en los gráficos DEP se aprecian las longitudes de onda muy largas (o mayores a 100 mts) y muy cortas (o menores a los 0.5 m), estas no se consideran para el análisis de la rugosidad en pavimentos. Las ondas con longitud de onda mayor a los 100 m corresponden al diseño geométrico de la vía y las ondas muy cortas se analizan a partir de la mega, macro y micro textura del pavimento no siendo incidentes para evaluar las irregularidades que afecten a la serviciabilidad.

Tabla 2. Resultados IRI y RMS para las secciones

Descripción	IRI (m/km)	Longitudes de Onda (m)				
		0.5 - 1	1 - 2	2 - 10	10 - 35	35 - 100
Sección A	1.67	2.61E-04	4.58E-04	4.67E-04	1.91E-03	8.08E-03
Sección B	2.89	4.06E-04	5.58E-04	1.57E-03	8.53E-03	2.46E-02
Sección C	6.23	2.36E-03	2.77E-03	7.26E-03	1.12E-02	2.35E-02
Sección D	12.2	1.95E-02	2.37E-02	2.91E-02	2.86E-02	2.49E-02

A partir de los resultados, claramente se puede apreciar las diferencias que existen entre las 4 secciones, siendo las más notorias las correspondientes a las secciones A y D. En estos casos, donde a parte de una evidente diferenciación de la rugosidad basado en el parámetro IRI, se puede apreciar que las longitudes de onda presentes en el perfil son consistentes con la condición de la superficie del pavimento.

La sección A presenta bajas amplitudes en todas las longitudes de onda componentes que afectan la calidad de rodado, lo que indica un perfil regular o con baja rugosidad, como el existente en un pavimento nuevo o en excelentes condiciones lo cual se ve reflejado en el valor de IRI = 1.67 (m/km).

La sección B presenta un incremento de las amplitudes en irregularidades mayores a 2 m de longitud de onda, lo que indica la existencia de defectos en el perfil que afectan la calidad de rodado, característica de un pavimento que ya se encuentra en operación durante un cierto periodo de tiempo llegando a tener algún grado de deterioro. Está condición que se ve reflejada en el valor de IRI de 2.89 (m/km). Dado que el incremento de las amplitudes se produce principalmente en longitudes de onda mayores 6 m, para la corrección del perfil se recomienda un recapeo utilizando en la pavimentadora nivelación asistida mediante promediación de larga referencia (viga flotante o de contacto), de lo contrario el efecto correctivo del recapeo no será tan efectivo (Díaz-Torrealba, et al, 2022). Otra alternativa de conservación efectiva sería una rectificación previa del perfil mediante fresado y luego ejecutar la reposición de la misma.

La sección C presenta un incremento aún mayor de las amplitudes en irregularidades desde los 2 m de longitud de onda, lo que indica un perfil irregular con mala calidad de rodado, características de un pavimento que presenta daños asociados a baches, ahuellamientos y/o deformaciones superficiales. Está condición que se ve reflejada en el valor de IRI de 6.23 (m/km). En este caso, previo a cualquier recapeo se deberán considerar reparaciones previas de la superficie de rodado, si bien una colocación de nueva carpeta sin nivelación automática podrá reducir considerablemente el IRI, los mejores resultados se conseguirían con el uso de nivelación asistida. Al igual que en la sección B, otra alternativa de conservación efectiva sería una rectificación previa del perfil mediante fresado de la capa de rodadura y luego ejecutar una reposición de la misma.

Los resultados asociados a la sección D, son consistentes con un pavimento muy dañado en donde todas las longitudes de onda presentan valores altos de RMS, lo que indica un perfil muy irregular con muy mala calidad de rodado, condición que se ve reflejada en el elevado valor de IRI = 12.2. Esto implica que la definición de la acción de conservación para esta sección estaría asociada a un proceso de reciclaje o de una reconstrucción que permita una reconfiguración completa del pavimento existente. Importante hacer notar que esta decisión deberá ser acompañada de una evaluación estructural del pavimento.

En la Tabla 3, se presenta un resumen de las acciones de conservación para las 4 secciones evaluadas en base al análisis DEP.

Tabla 3. Resumen de las acciones de conservación basadas en el análisis DEP.

Sección	Condición	Acción de conservación recomendada en base al análisis DEP
A	Buena	Pavimento nuevo.
B	Regular	Recapeo utilizando pavimentadora con sistema de nivelación asistida mediante viga de nivelación o fresado para recomponer el perfil longitudinal y reposición de la capa superficial.
C	Mala	Reparaciones de daños superficiales y posterior colocación de una capa de refuerzo o fresado para recomponer el perfil longitudinal y reposición de la capa superficial.
D	Muy Mala	Reconfiguración (Reciclaje o reconstrucción).

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con lo expuesto, el modelo del cuarto de carro con el cual se determina el parámetro IRI, tiene consideraciones específicas respecto a las longitudes de onda que deben ser tomadas en cuenta al momento de su interpretación principalmente en lo que respecta a la toma de decisiones asociadas a las acciones de conservación a aplicar. El indicador IRI está orientado a evaluar la rugosidad del pavimento que impacta a la respuesta del vehículo, por ende, es apropiado cuando se analiza costos de operación vehicular, calidad de rodado, dinámica del vehículo y otros. Sin embargo, el utilizar este parámetro no permite evaluar las causas que han ocasionado la rugosidad. Para esto se utiliza el análisis de la densidad espectral de potencia (DEP) como una herramienta para la interpretación del perfil longitudinal del pavimento.

El análisis DEP entrega información detallada de las características del perfil longitudinal de la vía en cuanto a sus longitudes de onda componentes; lo que permite analizar de forma específica las características del perfil que afectan aspectos como la calidad de rodado, vibraciones, defectos constructivos, etc. lo que permite diseñar actuaciones específicas de conservación a la medida de los defectos identificados. Esto facultará que los tomadores de decisiones puedan fundamentar de mejor manera las acciones de conservación que definan para una sección de pavimento.

En análisis DEP puede ser relativamente fácil de implementar en la práctica ya que, si bien tienen un sustento matemático importante, es un resultado que puede ser obtenido a partir de la utilización del software gratuito PROVAL como se expuso en el caso de aplicación, donde claramente la comprensión de las longitudes de onda permite seleccionar la acción de mantenimiento más apropiada.

Por último, y a modo de recomendación sería importante poder difundir e incorporar dentro de los estándares de auscultación de pavimentos, la aplicación del análisis DEP a los perfiles longitudinales en las evaluaciones funcionales. Esto permitirá tener no solamente una determinación de la rugosidad y la razones que sustentan los valores obtenidos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa COINCRUZ Innovación & Ingeniería SAC por su apoyo proporcionando los datos de las secciones para el caso de aplicación del presente artículo.

6. Referencias

- ASTM. (2001). Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces ASTM E1170-97(2017). Retrieved from <https://www.astm.org/e1170-97r17.html>
- De Solminihaç, H., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial - 3ra Edición*. Santiago: Universidad Católica de Chile.
- Diaz-Torrealba, R., Marcobal, J., & Gallego, J. (2022). Modelling asphalt overlay as-built roughness based on profile transformation. Case for wheeled paver laydown operation. *International Journal of Pavement Engineering*. doi:10.1080/10298436.2022.2074416
- Gillespie, T., Sayers, M., & Segel, L. (1980). *Calibration of response - type road roughness measuring systems - NCHRP 228*. Washington D.C.: National Research Council.
- Hesami, R., & Mcmanus, K. (2009). Signal processing approach to road roughness analysis and measurement. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceeding*, 1-6.
- Highway Research Board. (1962). *The AASHO Road Test*. Illinois.
- Irvine, T. (2000). *An Introduction to Spectral Functions*.
- ISO. (2016). Standard N° 8608:2016. Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting measured data. Switzerland.
- Mann, A., MacManus, K., & Holden, J. (1997). Power spectral density analysis of road profiles for road defect assessment. *Road & Transport Research Vol 5 Nro 3*, 36-47.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2020). *Manual de Carreteras Volumen N° 3. Instrucciones y criterios de diseño*. Santiago.
- Múcka, P. (2017). International Roughness Index specifications around the world. *Road Materials and Pavement Design 18(4)*, 929 - 965.
- Mucka, P. (2018). Simulated road profiles according to ISO 8608 in vibration analysis. *Journal of Testing and Evaluation Vol 46*, 405-418.
- Sayers, M., & Karamihas, S. (1998). *The Little Book of Profiling*. Michigan: University of Michigan.
- Sayers, M., Gillespie, T., & Queiroz, C. (1982). *The International Road Roughness Experiment - WTP -45*. Washington D.C.: World Bank.