

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)  
EN LA CARRETERA SICUANI-JULIACA, TRAMO SANTA ROSA-  
AYAVIRI, EMPLEANDO TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE  
SEÑALES MEDIANTE TRANSFORMADAS DE WAVELET,  
FOURIER Y HILBERT-HUANG, CUSCO, 2025**

**PRESENTADO POR:**

Br. JHORMAN JHANDERY RAMOS ARQUE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**ASESOR:**

Mgt. Ing. JUAN PABLO ESCOBAR MASIAS

**CUSCO – PERÚ  
2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** ...JUAN PABLO ESCOBAR MASIAS

..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: ANALISIS DEL INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL(IRI)EN LA CARRETERA SICUANI -JULIACA, TRAMO SANTA ROSA-AYAVIRI, EMPLEANDO TECNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES MEDIANTE TRANSFORMADAS DE WAVELET, FOURIER Y HILBERT -HUANG, CUSCO, 2025

Presentado por: JHORMAN JHANDERY RAMOS ARQUE, DNI No 74021639

Para optar el título Profesional/Grado Académico de: INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ....02..... veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de .....9.....%.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 16 ..... de ...ENERO... de 2026.....

Firma

Post firma...JUAN PABLO ESCOBAR MASIAS

Nro. de DNI...23847338.....

ORCID del Asesor: 0000-0002-9454-3414

#### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid: 27259: 542009467**

# JHORMAN JHANDERY RAMOS ARQUE

ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN LA CARRETERA SICUANI-JULIACA, TRAMO SANTA ROSA-AYAVIRI, EMPLEANDO TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES MEDIANTE TRANSFORMADAS DE WAVELET, FOURIER Y HILBERT-HUANG, CUSCO, 2025.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:542009467

Fecha de entrega

18 dic 2025, 3:53 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

16 ene 2026, 2:19 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS\_UNSAAC\_RAMOS\_ARQUE.pdf

Tamaño del archivo

41.1 MB

129 páginas

29.550 palabras

153.902 caracteres




# 9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe



- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

## Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad




### N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
70 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**  
114 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## Fuentes principales

8%	 Fuentes de Internet
0%	 Publicaciones
4%	 Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	hdl.handle.net	4%
2	Internet	repositorio.unsaac.edu.pe	2%
3	Trabajos entregados	unsaac on 2025-10-09	2%
4	Internet	www.overleaf.com	<1%
5	Trabajos entregados	uni on 2023-01-29	<1%
6	Internet	www.uandina.edu.pe	<1%
7	Internet	v1.overleaf.com	<1%
8	Trabajos entregados	uni on 2024-02-09	<1%
9	Internet	oa.upm.es	<1%
10	Trabajos entregados	uni on 2025-03-20	<1%
11	Internet	repositorio.continental.edu.pe	<1%

© 2025, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNSAAC a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Ramos Arque Jhorman Jhandery

160941@unsaac.edu.pe

968457649

*A mis padres, con amor eterno y la promesa de convertir su esfuerzo en progreso.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco sinceramente a Provías Puno, a la Escuela Profesional de Topografía de la UNSAAC, a la empresa FECSIL por su valioso trabajo en auscultación de pavimentos, y muy especialmente a mis padres, cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor impulso. A mi querida Facultad, por formarme no solo como ingeniero, sino también como persona, con valores, visión y compromiso.



## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>PRÓLOGO</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b>	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema . . . . .	1
1.2 Formulario de Problemas . . . . .	2
1.3 Justificación . . . . .	2
1.3.1 Conveniencia . . . . .	2
1.3.2 Relevancia Social . . . . .	3
1.3.3 Relevancias Prácticas . . . . .	3
1.3.4 Valor Teórico . . . . .	4
1.3.5 Utilidad Metodológica . . . . .	4
1.4 Objetivos de la Investigación . . . . .	5
1.4.1 Objetivo General . . . . .	5
1.4.2 Objetivos Específicos . . . . .	5
1.5 Delimitación de Estudio . . . . .	6
1.5.1 Delimitación Espacial . . . . .	6
1.5.2 Delimitación temporal . . . . .	6
<b>CAPÍTULO II: Estudio de Tránsito en el Corredor Santa Rosa – Ayaviri</b>	<b>8</b>
2.1 Introducción . . . . .	8
2.2 Índice Medio Diario Anual en las Estaciones E10 y E11 . . . . .	8
2.2.1 Gráfico del IMDA por Estación . . . . .	9
2.3 Distribución Vehicular por Tipología . . . . .	9
2.4 Volumen Vehicular Diario y Variación Horaria . . . . .	10
2.5 Nivel de Servicio en el Corredor . . . . .	10
2.6 Estimación Preliminar de ESAL . . . . .	11
2.7 Conclusiones del Análisis de Tránsito . . . . .	12

<b>CAPÍTULO III: FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL</b>	<b>14</b>
3.1 Antecedentes de Estudio . . . . .	14
3.1.1 Antecedentes Internacionales . . . . .	14
3.1.2 Antecedentes Nacionales . . . . .	18
3.1.3 Antecedentes Locales . . . . .	21
3.2 BASES TEÓRICAS . . . . .	24
3.2.1 Definición Conceptual . . . . .	24
3.2.2 Definición Operacional . . . . .	27
3.3 HIPÓTESIS . . . . .	28
3.3.1 Hipótesis General . . . . .	28
3.4 VARIABLES . . . . .	29
3.4.1 Cuadro de Operacionalización de Variables . . . . .	30
3.5 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS . . . . .	32
3.5.1 Índice de Rugosidad Internacional (IRI) . . . . .	32
3.5.2 Concepto de Rugosidad . . . . .	32
3.5.3 Métodos de Medición del IRI . . . . .	33
3.5.4 Cálculo del IRI . . . . .	33
3.5.5 Importancia del IRI en la Evaluación de Pavimentos . . . . .	33
3.5.6 Series de Fourier . . . . .	34
3.5.7 Series de Wavelet . . . . .	35
3.5.8 Método de Hilbert-Huang (HHT): . . . . .	36
<b>CAPÍTULO IV: MÉTODO</b>	<b>37</b>
4.1 ALCANCE DE ESTUDIO . . . . .	37
4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN . . . . .	38
4.3 POBLACIÓN . . . . .	38
4.4 MUESTRA . . . . .	39
4.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos . . . . .	39
4.5.1 Técnica . . . . .	39
4.5.2 Instrumento . . . . .	39
4.5.3 Procedimiento de la investigación . . . . .	40
<b>CAPÍTULO V: ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS</b>	<b>42</b>
5.1 Ensayo y recolección de datos . . . . .	42
5.2 RESULTADOS IRI RUGOSIMETRO III . . . . .	46
5.2.1 Resultados . . . . .	46
5.3 GRAFICOS ESTADISTICOS DE COMPORTAMIENTO IRI . . . . .	54

5.4	Procedimiento de montaje y toma de datos con perfilómetro láser . . . . .	58
5.4.1	Montaje del perfilómetro láser . . . . .	58
5.4.2	Verificaciones previas . . . . .	60
5.4.3	Procedimiento de toma de datos . . . . .	60
5.4.4	Verificación posterior y control de calidad . . . . .	61
5.5	Formato de datos del perfilómetro y programas utilizados . . . . .	61
5.5.1	Verificaciones previas . . . . .	62
<b>CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>		<b>64</b>
6.1	Análisis de perfiles longitudinales por técnicas de procesamiento de señales. Densidad espectral de potencia . . . . .	64
6.2	Caso de aplicación: análisis DEP para evaluar el comportamiento de pavimentos con diferentes niveles de rugosidad. . . . .	68
6.3	Transformada Wavelet Continua para el Análisis Multicanal del IRI . . . . .	74
6.4	Preparación de los Datos . . . . .	79
6.5	Procedimiento Computacional . . . . .	79
6.6	Análisis de Resultados . . . . .	81
6.7	Análisis de Resultados . . . . .	86
6.8	Análisis multiescala mediante la Transformada de Hilbert–Huang . . . . .	87
6.8.1	Fundamento conceptual . . . . .	87
6.8.2	Hilbert Spectrum vs. Hilbert Marginal Spectrum . . . . .	89
6.8.3	Preparación de datos: unificación de tramos . . . . .	90
6.8.4	Ponderación transversal de carriles . . . . .	90
6.8.5	Descomposición adaptativa (EMD/CEEMDAN) . . . . .	90
6.8.6	Cálculo de magnitudes instantáneas . . . . .	91
6.8.7	Generación del Hilbert Spectrum . . . . .	91
6.8.8	Generación del Hilbert Marginal Spectrum . . . . .	91
6.8.9	Interpretación conjunta . . . . .	92
6.8.10	Ventajas y limitaciones . . . . .	92
6.9	Evaluación estructural del pavimento . . . . .	96
6.9.1	Reconstrucción de la sección estructural . . . . .	97
6.9.2	Estimación del tráfico en ESAL . . . . .	97
6.9.3	Cálculo del número estructural existente . . . . .	98
6.9.4	Índice de capacidad estructural . . . . .	99
6.9.5	Integración con el análisis de rugosidad . . . . .	99
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>100</b>

<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>103</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>105</b>
ANEXO A: CÓDIGOS EN PYTHON . . . . .	105
Procesamiento del Perfil Longitudinal del Pavimento . . . . .	105
Funciones . . . . .	106

## RESUMEN

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es un indicador fundamental para la evaluación funcional de pavimentos por su relación con el confort, la seguridad vial y el desempeño estructural. No obstante, los métodos tradicionales presentan limitaciones para representar la complejidad espacial, no lineal y no estacionaria de las irregularidades del perfil longitudinal, especialmente en corredores de alto tránsito y condiciones geomorfológicas exigentes.

El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento del IRI en el tramo Santa Rosa–Ayaviri mediante la aplicación de las transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang, con el fin de identificar patrones de deterioro no detectados por los métodos convencionales. El estudio es de tipo aplicado, nivel explicativo y diseño no experimental, transversal y comparativo, basado en datos reales de perfilometría del corredor Cusco–Sicuani–Juliaca.

La Transformada Wavelet Continua permite identificar variaciones espaciales del IRI a múltiples escalas, la Transformada de Fourier determina frecuencias dominantes asociadas a irregularidades periódicas, y la Transformada de Hilbert–Huang analiza el comportamiento no lineal y no estacionario del perfil longitudinal.

Los resultados muestran que las técnicas Wavelet y Hilbert–Huang presentan mayor capacidad para identificar tramos críticos y fenómenos complejos de deterioro, con mejor correspondencia respecto a las condiciones reales del pavimento. En conclusión, el enfoque propuesto constituye una herramienta técnica confiable para optimizar la evaluación funcional y apoyar la gestión del mantenimiento vial.

**Palabras clave:** Índice de Rugosidad Internacional (IRI), Pavimentos flexibles, Procesamiento de señales, Transformadas tiempo-frecuencia.

## ABSTRACT

The International Roughness Index (IRI) is one of the most important indicators for functional pavement evaluation, as it is directly related to ride comfort, road safety, and pavement performance. However, traditional IRI analysis methods present limitations in capturing the spatial, nonlinear, and non-stationary characteristics of longitudinal pavement irregularities, particularly in high-traffic corridors with demanding environmental conditions.

The main objective of this research is to analyze the behavior of the IRI along the Santa Rosa–Ayaviri road section using Fourier, Wavelet, and Hilbert–Huang Transforms, in order to identify deterioration patterns that are not adequately represented by conventional methods.

This study is classified as applied research, with an explanatory level and a non-experimental, cross-sectional, and comparative design, since real pavement profile data are analyzed without variable manipulation, comparing advanced signal processing techniques with traditional IRI calculation methods.

The analysis is conducted using profilometry data collected from a representative section of the Cusco–Sicuani–Juliaca corridor, characterized by heavy traffic and severe environmental conditions. The Continuous Wavelet Transform enables multiscale spatial analysis of IRI variations, the Fourier Transform identifies dominant frequencies related to periodic irregularities, and the Hilbert–Huang Transform evaluates the nonlinear and non-stationary behavior of pavement roughness.

The results indicate that Wavelet and Hilbert–Huang techniques provide a superior capability to detect critical roughness sections and complex deterioration phenomena, showing greater consistency with actual pavement conditions compared to conventional IRI methods. Consequently, the proposed approach represents a reliable and efficient analytical tool to enhance functional pavement evaluation and support decision-making in road maintenance management.

**Keywords:** International Roughness Index (IRI), Fourier Transform, Wavelet Transform, Hilbert-Huang, longitudinal profile, road maintenance, spectral analysis.

## PRÓLOGO

La presente tesis nace de la convergencia entre dos pasiones: la ingeniería civil y el análisis computacional. A lo largo de mi formación profesional, siempre me llamó la atención la manera en que las infraestructuras viales reflejan no solo el desarrollo técnico de un país, sino también sus desafíos en sostenibilidad y mantenimiento. En este contexto, el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se presenta como una herramienta crucial para evaluar el estado de las carreteras, pero también como una oportunidad para innovar en su análisis.

Motivado por esta inquietud, decidí explorar el potencial de las transformadas matemáticas —Wavelet, Fourier y Hilbert-Huang— como métodos alternativos para interpretar el comportamiento del IRI, y así contribuir con nuevas perspectivas a la gestión vial. Este trabajo representa el esfuerzo por integrar teoría, aplicación y programación para el desarrollo de un modelo que permita un análisis más profundo y automatizado del perfil longitudinal de las carreteras.

Más allá de los resultados técnicos, esta investigación simboliza también un camino de aprendizaje, persistencia y crecimiento personal. Agradezco profundamente a quienes me acompañaron en este proceso: docentes, compañeros y familiares, cuyo apoyo constante fue esencial para alcanzar este objetivo.

Espero que este trabajo no solo cumpla con su propósito académico, sino que también inspire a futuras investigaciones que vinculen la ingeniería civil con las herramientas digitales emergentes.

## LISTA DE TABLAS

Tabla N° 3.1	Cuadro de Operacionalización de Variables. . . . .	30
Tabla N° 3.2	Matriz de operacionalización de variables. . . . .	31
Tabla N° 5.1	Datos extraídos del archivo Excel. . . . .	46
Tabla N° 6.1	Resumen de las acciones de conservación basadas en el análisis DEP . . . . .	73
Tabla N° 6.2	Sección típica de pavimento para el modelo estructural . .	97
Tabla N° 6.3	Parámetros de tráfico para el cálculo de ESAL . . . . .	98



## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1	Mapa de ubicación del área de estudio . . . . .	7
Figura N° 3.1	Representación gráfica del concepto de rugosidad . . . . .	32
Figura N° 3.2	Relación entre la rugosidad del pavimento (IRI) y la economía de combustible . . . . .	34
Figura N° 5.1	Componentes del rugómetro III utilizados para la adquisición de datos . . . . .	42
Figura N° 5.2	Controlador del rugómetro III . . . . .	43
Figura N° 5.3	Instalación del sensor en el eje trasero del vehículo sin IRS	44
Figura N° 5.4	Instalación del sensor en vehículo con sistema de suspensión independiente (IRS) . . . . .	44
Figura N° 5.5	Instalación del DMI en la rueda trasera . . . . .	45
Figura N° 5.6	Valor del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en el carril derecho (HD = “Hand Derecha” o carril derecho), en tramos de 100 metros. . . . .	54
Figura N° 5.7	Valor del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en el carril izquierdo (HI = “Hand Izquierda” o carril izquierdo), en tramos de 100 metros. . . . .	55
Figura N° 5.8	Valor individual del IRI en tramos de 100 metros. . . . .	56
Figura N° 5.9	Promedio móvil del IRI (para suavizar los datos y analizar tendencias locales), también expresado en m/Km. . . . .	57
Figura N° 5.10	Módulo Dynatest 8051 MK IV . . . . .	58
Figura N° 5.11	Módulo Rugosímetro III ARB . . . . .	60
Figura N° 5.12	Modelo de datos extraídos del perfilómetro visualizados en el software Notepad++ . . . . .	62
Figura N° 5.13	Procesamiento de datos del perfil longitudinal en el software ProVAL . . . . .	63
Figura N° 6.1	Esquematización de la descomposición de un perfil longitudinal del pavimento en funciones sinusoidales . . . . .	64
Figura N° 6.2	Perfiles longitudinales de los carriles izquierdo, central y derecho del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 0–43) . . . . .	79
Figura N° 6.3	Transformada wavelet continua (CWT) de la serie mensual de precipitaciones . . . . .	80
Figura N° 6.4	Gráfica de amplitud integrada correspondiente al análisis espectral del tramo . . . . .	81
Figura N° 6.5	Amplitud integrada obtenida del perfil longitudinal . . . . .	82
Figura N° 6.6	Potencia por bandas (WPS) representada en mosaicos . . . . .	83
Figura N° 6.7	Espectrograma Wavelet continuo (WPS) del tramo completo	84

Figura N° 6.8	Espectro Hilbert–Huang inicial del tramo analizado . . . . .	84
Figura N° 6.9	Potencia por bandas del análisis Hilbert–Huang (HHT) . . . . .	85
Figura N° 6.10	Espectro Hilbert–Huang final del tramo procesado . . . . .	85
Figura N° 6.11	Funciones de modo intrínseco (IMFs) obtenidas mediante EMD . . . . .	86
Figura N° 6.12	Perfil longitudinal utilizado como entrada del análisis HHT . . . . .	86
Figura N° 6.13	Espectro tiempo–frecuencia del perfil longitudinal mediante HHT . . . . .	88
Figura N° 6.14	Fundamento conceptual del método HHT . . . . .	89
Figura N° 6.15	Primer modo intrínseco obtenido mediante EMD . . . . .	92
Figura N° 6.16	Segundo modo intrínseco obtenido mediante EMD . . . . .	93
Figura N° 6.17	Tercer modo intrínseco obtenido mediante EMD . . . . .	93
Figura N° 6.18	Cuarto modo intrínseco obtenido mediante EMD . . . . .	94
Figura N° 6.19	Quinto modo intrínseco obtenido mediante EMD . . . . .	94
Figura N° 6.20	Sexto modo intrínseco obtenido mediante EMD . . . . .	95
Figura N° 6.21	Distribución conjunta de amplitud en función de la distancia y la frecuencia . . . . .	95
Figura N° 6.22	Amplitud integrada en función de la frecuencia . . . . .	96
Figura N° 6.23	Perfil de la ventana de 1 km utilizado para el análisis Hilbert–Huang . . . . .	96
Figura N° .1	Temperatura y CBR - Página 1 . . . . .	108
Figura N° .2	Temperatura y CBR - Página 2 . . . . .	109
Figura N° .3	Temperatura y CBR - Página 3 . . . . .	110
Figura N° .4	Temperatura y CBR - Página 4 . . . . .	111
Figura N° .5	Temperatura y CBR - Página 5 . . . . .	112
Figura N° .6	Temperatura y CBR - Página 6 . . . . .	113
Figura N° .7	Temperatura y CBR - Página 7 . . . . .	114
Figura N° .8	Resumen de ensayos subbase granular . . . . .	115
Figura N° .9	Ensayos de Laboratorio PLATAFORMA . . . . .	116
Figura N° .10	Planos de ubicación 1 . . . . .	117
Figura N° .11	Planos de ubicación 2 . . . . .	118
Figura N° .12	niveles de servicio 1 . . . . .	119
Figura N° .13	niveles de servicio 2 . . . . .	120
Figura N° .14	niveles de servicio 3 . . . . .	121
Figura N° .15	niveles de servicio 4 . . . . .	122
Figura N° .16	Volumen vehicular por día 1 . . . . .	123
Figura N° .17	Volumen vehicular por día 2 . . . . .	124
Figura N° .18	IMDA 1 . . . . .	125
Figura N° .19	IMDA 2 . . . . .	126

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### **SÍMBOLOS**

- $z(x)$  : Elevación del perfil longitudinal en función de la distancia horizontal  $x$
- $x$  : Distancia horizontal (posición a lo largo de la vía)
- $f$  : Frecuencia de la señal
- $X(f)$  : Transformada de Fourier del perfil longitudinal
- $\psi(t)$  : Función wavelet madre utilizada en la descomposición
- $W(a, b)$  : Coeficientes de la Transformada Wavelet Continua en escala  $a$  y traslación  $b$
- $a$  : Escala en la Transformada Wavelet
- $b$  : Traslación o posición en la Transformada Wavelet
- $c_i(t)$  :  $i$ -ésimo Modo Intrínseco (IMF) obtenido mediante EMD
- $r_n(t)$  : Residuo final de la descomposición por EMD
- $A(t)$  : Amplitud instantánea de una señal en la Transformada de Hilbert
- $\omega(t)$  : Frecuencia instantánea de una señal
- $v$  : Velocidad del vehículo de medición
- $T$  : Periodo de muestreo (intervalo de tiempo entre mediciones)
- $N$  : Número total de muestras en la señal
- $\Delta x$  : Resolución espacial entre puntos de medición del perfil

**SIGLAS**

ADT	: Average Daily Traffic (Tráfico Diario Promedio)
CWT	: Continuous Wavelet Transform (Transformada Wavelet Continua)
DEM	: Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevación)
DWT	: Discrete Wavelet Transform (Transformada Wavelet Discreta)
EMD	: Empirical Mode Decomposition (Descomposición en Modos Intrínsecos)
FFT	: Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
GPS	: Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
HHT	: Hilbert-Huang Transform (Transformada de Hilbert-Huang)
IMF	: Intrinsic Mode Function (Modo Intrínseco de Frecuencia)
IRI	: Índice de Rugosidad Internacional
PSD	: Power Spectral Density (Densidad Espectral de Potencia)
RMS	: Root Mean Square (Raíz del Valor Cuadrático Medio)

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del Problema

La rugosidad longitudinal del pavimento es uno de los parámetros más relevantes para evaluar el estado funcional de una carretera y la comodidad del usuario. Tradicionalmente, esta condición superficial se cuantifica mediante el *International Roughness Index* (IRI), un indicador ampliamente utilizado en normativas y sistemas de gestión vial. Sin embargo, el IRI presenta una limitación fundamental: es un valor global que no identifica la naturaleza física de las irregularidades ni su localización, amplitud, escala o comportamiento dinámico. Por ello, dos tramos pueden presentar el mismo IRI pero responder a deterioros completamente distintos, lo que conduce a decisiones de mantenimiento incompletas o imprecisas.

En tramos extensos —como el corredor Santa Rosa–Ayaviri, de aproximadamente 43 km— esta limitación se vuelve crítica. El pavimento puede exhibir deformaciones de baja frecuencia (asentamientos diferenciales, bombeo), defectos de media frecuencia (ondulaciones, corrugaciones) y alta frecuencia (textura, micro-rugosidad), cada uno con causas y consecuencias distintas en la operación del vehículo y en la priorización de intervenciones. El IRI, al consolidar todas estas irregularidades en un solo valor, oculta patrones esenciales para la gestión vial.

A pesar del desarrollo de herramientas modernas de perfilometría láser, que generan mediciones de alta resolución (0.025 m), la interpretación tradicional de estos perfiles continúa siendo predominantemente monoescalar. Esto impide aprovechar la información completa de la señal y limita la capacidad para identificar zonas críticas, caracterizar modos de vibración del pavimento y comprender su influencia en el confort vehicular y la degradación estructural.

Por ello surge la necesidad de aplicar métodos espectrales y multiresolutivos avanzados, como:

**Transformada de Fourier:** revela la energía global distribuida por frecuencia, pero pierde localización espacial.

**Transformada Wavelet Continua (CWT):** permite identificar irregularidades en escala y distancia, pero depende de una función base fija.

**Transformada Hilbert–Huang (HHT):** analiza señales no lineales y no estacionarias a través de modos intrínsecos (IMF), adaptándose a la forma real de la onda.

Sin embargo, no existe un procedimiento establecido que combine estas tres metodologías para analizar perfiles reales de carretera y revelar la estructura oculta del IRI a lo largo de grandes distancias.

## 1.2 Formulario de Problemas

### Problema general

#### Problema General

¿Cómo se comporta la rugosidad longitudinal del pavimento, expresada mediante el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, al ser analizada mediante métodos espectrales y multiresolución basados en las transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang?

### Problemas específicos

En esta sección se plantean los problemas específicos de la investigación, los cuales responden a las preguntas planteadas:

- **PE1:** ¿Qué variaciones espaciales y zonas críticas de la rugosidad longitudinal, expresada mediante el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), se identifican en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, mediante la aplicación de la Transformada Wavelet Continua?
- **PE2:** ¿Qué componentes frecuenciales dominantes del perfil longitudinal del pavimento se identifican en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, mediante la Transformada de Fourier, y cómo se asocian con irregularidades periódicas del pavimento?
- **PE3:** ¿Qué características no lineales y no estacionarias del comportamiento del IRI se identifican en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, mediante la Transformada de Hilbert–Huang?
- **PE4:** ¿En qué medida los resultados obtenidos mediante las transformadas Wavelet, Fourier y Hilbert–Huang mejoran la evaluación funcional del pavimento en comparación con el método convencional basado en valores promedio del IRI, en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025?

## 1.3 Justificación

### 1.3.1 Conveniencia

La presente investigación es altamente conveniente porque aporta una nueva perspectiva técnica al análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), una variable clave para evaluar la calidad del servicio de una carretera. Al aplicar transformadas

matemáticas avanzadas como Fourier, Wavelet y Hilbert-Huang, el estudio permite descomponer y analizar con mayor profundidad el comportamiento del perfil longitudinal del pavimento, algo que los métodos tradicionales no logran con igual nivel de detalle.

- Optimizar el mantenimiento vial, ya que permite detectar patrones ocultos o frecuencias críticas asociadas al deterioro del pavimento.
- Fortalecer la toma de decisiones de las entidades encargadas de la conservación vial, al brindar herramientas analíticas más precisas y económicas.
- Aportar una base metodológica para futuros desarrollos de software o sistemas de evaluación automatizados del IRI.
- Contribuir al conocimiento científico en el campo del transporte y la ingeniería civil, al vincular teoría matemática moderna con aplicaciones prácticas en infraestructura vial.

### 1.3.2 Relevancia Social

La creación de un modelo de predictibilidad del IRI y la investigación sobre su evolución son de gran relevancia social. La seguridad vial, el bienestar de los residentes, la accesibilidad para personas con movilidad reducida, el desarrollo urbano sostenible y la prosperidad económica de la comunidad se ven directamente afectados por el estado de las carreteras. Por lo tanto, además de abordar la infraestructura vial, este estudio busca mejorar la vida cotidiana de los habitantes de Cusco y promover un desarrollo urbano más seguro, accesible y próspero.

Además, es viable porque la parte seleccionada está disponible, los datos (DEM, IRI) están disponibles y se puede utilizar software académico o de código abierto para construir las herramientas analíticas.

### 1.3.3 Relevancias Prácticas

Este estudio tendrá un impacto directo en la mejora de la infraestructura vial, además de ofrecer información valiosa sobre el estado del pavimento. Aportará información crucial para realizar el mantenimiento y las reparaciones necesarias, mejorando la calidad de las carreteras y la experiencia de conducción de los usuarios. Asimismo, al localizar lugares con problemas estructurales o funcionales, mejorará la seguridad vial, reduciendo la probabilidad de accidentes de tráfico, permitiendo la implementación de medidas correctivas y mejorando la seguridad tanto de conductores como de peatones.

Esto también es posible gracias a la accesibilidad de la región elegida, el fácil ac-

ceso a los datos (DEM, IRI) y la posibilidad de desarrollar herramientas analíticas mediante software de código abierto o académico.

#### 1.3.4 Valor Teórico

La presente investigación posee un alto valor teórico, dado que contribuye a generar conocimientos fundamentales sobre el comportamiento del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y su relación con el confort de rodadura, un aspecto esencial en la evaluación de la calidad del servicio vial (Gillespie, 1992). Asimismo, propone metodologías avanzadas para la caracterización y análisis de la rugosidad mediante técnicas de procesamiento de señales, lo cual enriquece el cuerpo teórico de la ingeniería vial con nuevas herramientas analíticas (Oppenheim, 1999; Huang, 2001).

Desde una perspectiva práctica, esta investigación aportará datos empíricos, modelos computacionales y enfoques replicables que pueden ser aplicados en proyectos futuros de mantenimiento y planificación de infraestructura vial, tanto en la ciudad del Cusco como en otros entornos urbanos o interurbanos con condiciones similares. La identificación de patrones críticos de deterioro y el desarrollo de estrategias de intervención basadas en el análisis del IRI permitirán optimizar los recursos destinados a la conservación de pavimentos, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible de las vías (Elkins, 2008; Queiroz, 2013).

Por tanto, los resultados obtenidos no solo fortalecerán las decisiones técnicas en contextos locales, sino que también podrán ser extrapolados a nivel regional, contribuyendo a una mejora continua en las prácticas de ingeniería vial.

Esta tesis tiene como objetivo desarrollar un modelo de deterioro basado en el IRI, lo cual facilitará a las autoridades locales anticipar las necesidades de mantenimiento y optimizar la asignación de recursos. Con un modelo predictivo, se podrán implementar planes de conservación más eficientes, reducir los costos de rehabilitación a largo plazo y minimizar los riesgos de accidentes provocados por condiciones viales deficientes. En última instancia, este trabajo contribuirá a mejorar la sostenibilidad de la infraestructura vial en Cusco y a fortalecer la seguridad y calidad de vida de sus habitantes.

#### 1.3.5 Utilidad Metodológica

La utilidad metodológica de esta tesis radica en la aplicación y comparación de tres técnicas avanzadas de análisis de señales —Transformada de Fourier, Transformada Wavelet y Transformada Hilbert-Huang— para el estudio del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a lo largo de un tramo de carretera de alta velocidad. Esta aproximación ofrece un enfoque novedoso para la ingeniería vial, al permitir un análisis más detallado, multiescala y adaptativo del perfil longitudinal de la vía.



Desde el punto de vista metodológico, esta investigación:

- Proporciona un marco comparativo entre transformadas clásicas y no lineales para el análisis del IRI, lo cual puede ser replicado en otros contextos geográficos o tipos de pavimento.
- Establece un procedimiento técnico claro para el procesamiento de datos del IRI, incluyendo recolección, filtrado, normalización, aplicación de transformadas y análisis espectral o por componentes.
- Incorpora herramientas computacionales accesibles (como Python, MATLAB o R), fomentando el uso de técnicas reproducibles en futuros estudios.
- Demuestra cómo transformar datos de campo en información útil para el diagnóstico del estado de pavimentos, integrando teoría matemática con criterios de evaluación vial.

Esta metodología puede ser adaptada por otros investigadores, docentes y profesionales interesados en mejorar la caracterización del comportamiento superficial de las vías, especialmente cuando se busca un análisis más profundo que supere las limitaciones de métodos tradicionales.

#### 1.4 Objetivos de la Investigación

##### 1.4.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, mediante la aplicación de técnicas de procesamiento de señales basadas en las transformadas de Wavelet, Fourier y Hilbert–Huang.

##### 1.4.2 Objetivos Específicos

- **OE1:** Identificar las variaciones espaciales y zonas críticas de la rugosidad longitudinal, expresada mediante el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, mediante la aplicación de la Transformada Wavelet Continua.
- **OE2:** Determinar las componentes frecuenciales dominantes del perfil longitudinal del pavimento asociadas al IRI en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, mediante la Transformada de Fourier, para caracterizar irregularidades periódicas del pavimento.
- **OE3:** Analizar el comportamiento no lineal y no estacionario del IRI en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025,

mediante la Transformada de Hilbert–Huang, con la finalidad de identificar cambios abruptos y fenómenos complejos de rugosidad.

- **OE4:** Comparar los resultados obtenidos mediante las transformadas Wavelet, Fourier y Hilbert–Huang con los valores de IRI calculados por métodos convencionales, evaluando su consistencia y aplicabilidad para la gestión del mantenimiento vial en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025.

## 1.5 Delimitación de Estudio

### 1.5.1 Delimitación Espacial

La presente investigación se delimita espacialmente a la carretera Santa Rosa – Ayaviri, perteneciente a la Ruta Nacional PE-34J, en el departamento de Puno, Perú. Este tramo ha sido seleccionado debido a su importancia como corredor de transporte interregional y su variabilidad en condiciones de pavimentación. El estudio abarcará segmentos representativos de la vía para garantizar un análisis preciso del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

### 1.5.2 Delimitación temporal

En cuanto a la delimitación temporal, la presente investigación se desarrolló durante el período comprendido entre los meses de enero y diciembre de 2025, lapso en el cual se realizó la recolección, procesamiento y análisis de los datos de rugosidad del pavimento correspondientes al tramo Santa Rosa–Ayaviri de la carretera Cusco–Sicuani–Juliaca. Asimismo, en dicho periodo se efectuó la aplicación de las transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert-Huang, así como la validación y contrastación de los resultados obtenidos con los métodos convencionales de evaluación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

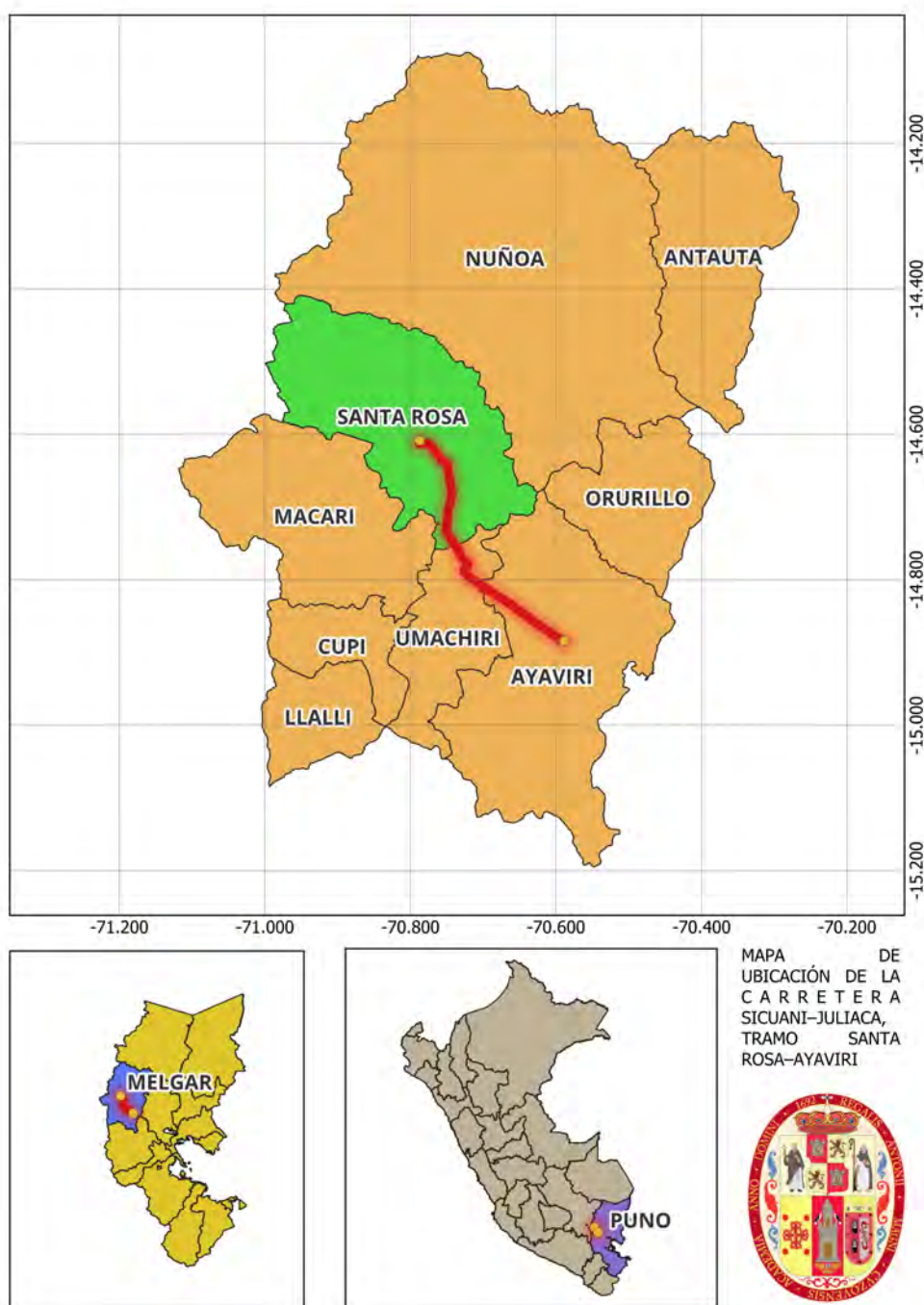


FIGURA N° 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio correspondiente al corredor Santa Rosa – Ayaviri.

## CAPÍTULO II: Estudio de Tránsito en el Corredor Santa Rosa – Ayaviri

### 2.1 Introducción

El corredor vial Santa Rosa–Ayaviri forma parte del eje interdepartamental que articula las regiones de Cusco y Puno, cumpliendo una función estratégica en la integración territorial y el transporte regional. Su relevancia económica y logística se explica por la presencia de un tránsito mixto, caracterizado por la predominancia de vehículos ligeros y una proporción significativa de vehículos pesados, condición que influye de manera directa en el comportamiento estructural y funcional del pavimento, debido a los efectos acumulativos de carga repetida asociados al tránsito pesado (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2018; Garber Hoel, 2015; Huang, 2004).

En este capítulo se desarrolla un análisis detallado del comportamiento del tránsito en el corredor, con base en la información obtenida de las estaciones de conteo permanente E10 (Santa Rosa) y E11 (Ayaviri), cuyos registros permiten estimar el Índice Medio Diario Anual (IMDA), la composición vehicular, el volumen horario equivalente y el nivel de servicio proyectado hasta el año 2046.

El objetivo de este capítulo es caracterizar cuantitativamente la demanda vehicular del corredor, proporcionando una base sólida para los análisis posteriores de rugosidad, IRI y transformadas espectrales (Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang), permitiendo distinguir los efectos funcionales de aquellos asociados a carga repetida y estructura.

### 2.2 Índice Medio Diario Anual en las Estaciones E10 y E11

La Tabla presenta los valores de IMDA para ambas estaciones, obtenidos a partir de los conteos vehiculares consignados en los documentos del expediente técnico.

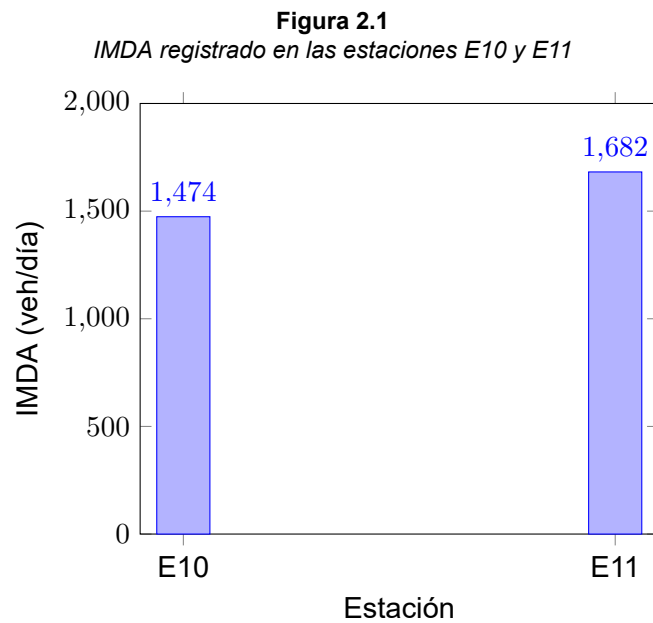
**Tabla 2.1**  
*IMDA en las estaciones E10 (Santa Rosa) y E11 (Ayaviri)*

Estación	IMDA total (veh/día)	% pesados	IMDA pesados (veh/día)
E10 – Santa Rosa	1474	29.0 %	427
E11 – Ayaviri	1682	28.7 %	483

*Nota.* El Índice Medio Diario Anual (IMDA) corresponde al volumen promedio de tránsito diario, expresado en vehículos por día, para las estaciones E10 (Santa Rosa) y E11 (Ayaviri). La participación del tránsito pesado es relevante para el análisis del comportamiento funcional del pavimento. *Fuente:* Elaboración propia a partir del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Provías Nacional (2021).

Los resultados evidencian que el corredor presenta un tránsito medio, con una proporción de vehículos pesados que supera el 28 %, porcentaje que resulta relevante para el deterioro por fatiga del pavimento y para la generación progresiva de rugosidad estructural a lo largo del tiempo, de acuerdo con el análisis realizado a partir de los datos del Estudio de Tráfico del expediente técnico correspondiente al año 2021 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2021).

### 2.2.1 Gráfico del IMDA por Estación



*Nota.* IMDA total expresado en veh/día para las estaciones E10 (Santa Rosa) y E11 (Ayaviri).  
*Fuente:* Elaboración propia a partir de Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Provías Nacional (2021).

### 2.3 Distribución Vehicular por Tipología

Según el expediente técnico, la distribución vehicular promedio muestra una predominancia de vehículos ligeros (autos, station wagon, pick up), seguida de camiones 2E, 3E y buses. Esta composición vehicular influye directamente en las solicitudes estructurales del pavimento.

**Tabla 2.2**  
*Distribución vehicular típica en la estación E10 (Santa Rosa)*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Porcentaje</b>
Vehículos ligeros	71 %
Vehículos pesados	29 %
Camiones de 2 ejes	12–15 % del total
Camiones de 3 ejes	4–6 % del total
Buses interprovinciales	2–4 % del total

*Nota.* La distribución vehicular corresponde a una caracterización típica del tránsito en la estación E10 (Santa Rosa), diferenciando entre tránsito ligero y pesado, así como la participación relativa de las principales categorías de vehículos pesados. Esta información constituye un insumo fundamental para la estimación de cargas equivalentes y el análisis del comportamiento funcional y estructural del pavimento. *Fuente:* Elaboración propia a partir del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Proviás Nacional (2021).

## 2.4 Volumen Vehicular Diario y Variación Horaria

El volumen diario registrado en distintos días del año permite observar una variación moderada del flujo vehicular. A continuación, se presenta un esquema interpretativo elaborado a partir del análisis de los datos consignados en el Estudio de Tráfico del expediente técnico correspondiente al año 2021 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2021).

## 2.5 Nivel de Servicio en el Corredor

El expediente técnico presenta el análisis de los niveles de servicio (LOS) para el periodo comprendido entre los años 2018 y 2046. En todos los escenarios evaluados, tanto en las estaciones E10 como E11, el nivel de servicio se mantiene en la categoría **A**, lo que indica condiciones de flujo libre y adecuada capacidad operacional del corredor, de acuerdo con los resultados consignados en el Estudio de Tráfico del expediente técnico correspondiente al año 2021 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2021).

**Tabla 2.3**  
*Síntesis del nivel de servicio (LOS) reportado para el corredor*

Estación	Velocidad media (km/h)	Densidad (veh/km)	LOS
E10 – Salida	62.9	1.4–2.1	A
E10 – Entrada	63.2	1.5–2.0	A
E11 – Salida	81.9	1.2–2.0	A

*Nota.* El nivel de servicio (LOS) se ha estimado a partir de la velocidad media de circulación y la densidad vehicular, conforme a los criterios establecidos en el *Highway Capacity Manual*. Los resultados corresponden a las estaciones E10 y E11 y evidencian condiciones de operación estables, baja interacción entre vehículos y adecuada fluidez del tránsito, características asociadas a un nivel de servicio A. *Fuente:* Elaboración propia a partir del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Proviás Nacional (2021) y Transportation Research Board (2016).

**Interpretación:** El análisis confirma que la operación vial del corredor es óptima y que la rugosidad longitudinal observada no está asociada a congestión vehicular ni a restricciones de capacidad, sino a condiciones estructurales del pavimento.

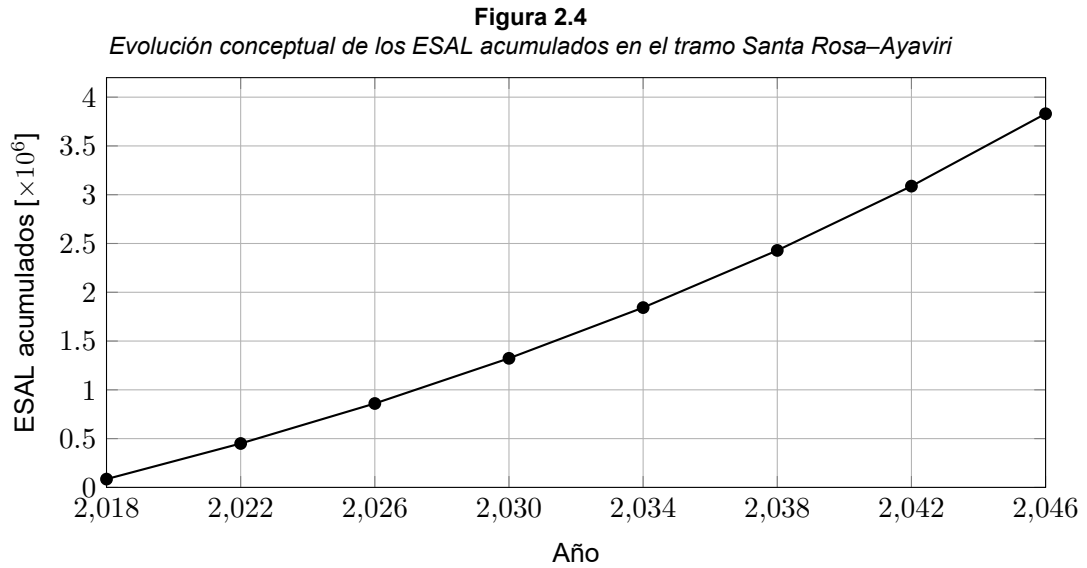
## 2.6 Estimación Preliminar de ESAL

Dado que la proporción de vehículos pesados registrada en el corredor es cercana al 29 %, es posible realizar una estimación preliminar de los ejes equivalentes (ESAL), la cual se desarrolla como parte del presente análisis a partir de los datos de tránsito consignados en el Estudio de Tráfico del expediente técnico correspondiente al año 2021 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2021).

El cálculo preliminar se aproxima mediante:

$$N \approx IMDA_{\text{pesados}} \cdot 365 \cdot F_g \cdot F_d \cdot F_c \cdot FE$$

donde: -  $IMDA_{\text{pesados}} = 427\text{--}483$  veh/día -  $F_g$  = factor de crecimiento (asumido 3 %) -  $F_d = 0.5$  -  $FE$  = factor de equivalencia estructural por eje (AASHTO)



*Nota.* Los ESAL (Equivalent Single Axle Loads) representan las cargas equivalentes de eje simple estándar acumuladas a lo largo del periodo de análisis. El gráfico muestra una evolución conceptual del tránsito pesado acumulado para el tramo Santa Rosa–Ayaviri, con fines ilustrativos y de apoyo al análisis del deterioro estructural del pavimento. *Fuente:* Elaboración propia a partir de criterios del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018) y de la American Association of State Highway and Transportation Officials (1993).

## 2.7 Conclusiones del Análisis de Tránsito

- El corredor presenta un Índice Medio Diario Anual (IMDA) comprendido entre 1474 y 1682 veh/día, con una proporción significativa de vehículos pesados cercana al 29 %, condición que contribuye al deterioro estructural del pavimento, de acuerdo con los resultados del Estudio de Tráfico del expediente técnico correspondiente al año 2021 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2021).
- El nivel de servicio del corredor se mantiene en la categoría **A** en todos los escenarios analizados para el periodo 2018–2046, lo que indica la ausencia de congestión vehicular y de limitaciones de capacidad, conforme a los resultados consignados en el expediente técnico (MTC, 2021).
- La rugosidad longitudinal observada en el corredor no puede atribuirse a problemas operacionales del tránsito, sino principalmente a la condición estructural del pavimento y a los efectos acumulativos de la carga repetida, resultado del análisis integrado de tránsito y condición funcional desarrollado en la presente investigación.
- El análisis de tránsito desarrollado proporciona los insumos necesarios para integrar la evaluación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con la in-



interpretación espectral mediante transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang, fortaleciendo el análisis funcional del pavimento desde una perspectiva multiescala.

### CAPÍTULO III: FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El Capítulo II desarrolla el sustento teórico que respalda el análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) aplicado al corredor vial de estudio. En primer lugar, se revisan antecedentes internacionales, nacionales y locales que muestran la evolución del estudio de la rugosidad, los métodos de medición utilizados y la creciente incorporación de técnicas avanzadas de procesamiento de señales en ingeniería vial. Esta revisión permite identificar vacíos, como la limitada caracterización física de las irregularidades cuando se emplea únicamente el IRI convencional.

Posteriormente, se presentan las bases teóricas esenciales sobre la rugosidad longitudinal, su naturaleza, sus componentes de baja, media y alta frecuencia, y su relación con el desempeño funcional del pavimento. Se incluyen definiciones conceptuales y operacionales que permiten delimitar claramente las variables del estudio.

El capítulo formula la hipótesis general, orientada a demostrar que el procesamiento de señales mediante Fourier, Wavelet y la Transformada Hilbert–Huang permite identificar patrones y características no visibles a través del IRI tradicional.

Asimismo, se describen las variables del estudio y su operacionalización, precisando cómo cada una será medida y analizada.

Finalmente, se desarrollan los términos básicos indispensables: definición del IRI, métodos de medición, factores que influyen en la rugosidad, importancia del IRI en la evaluación de pavimentos, así como una descripción detallada de las herramientas de análisis de señales (Fourier, Wavelet y HHT). Esta sección establece el marco técnico que sustenta el uso de transformadas avanzadas para complementar y profundizar la interpretación del IRI a lo largo del tramo evaluado.

#### 3.1 Antecedentes de Estudio

Este capítulo presenta conceptos relacionados a nuestro método o abordaje de modo que el lector pueda familiarizarse con los temas expuestos.

##### 3.1.1 Antecedentes Internacionales

###### Título:

EVALUACIÓN FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO DE LA VÍA MANUELITA SAENZ DESDE LA INTERSECCIÓN CON LA AV. QUIZ QUIZ HASTA LA INTERSECCIÓN CON LA AV. JOSÉ PERALTA (Salinas, 2019).

**Autor:** Br. Salinas Villegas Edison Xavier

**Institución:**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA  
CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Fecha:** 2019

**Lugar:** Ambato-Ecuador

**Resumen:**

El objetivo de este proyecto técnico es llevar a cabo la inspección del funcionamiento y las condiciones estructurales del pavimento de una vía colectora importante al sur de Ambato. La primera etapa involucró la determinación del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) mediante un análisis del flujo vehicular, que incluyó conteos y categorización de los vehículos que transitan por la carretera. Para evaluar la condición funcional del pavimento, se aplicó el método PCI (Pavement Condition Index), el cual se basa en una inspección visual de las imperfecciones en la capa de rodadura de los pavimentos para calcular de forma cuantitativa el nivel de deterioro presente en la misma. Para complementar la información anterior, se llevaron a cabo mediciones de deflexiones en el pavimento utilizando la viga Benkelman para verificar

si se cumplían las deformaciones admisibles. Además, se realizó un estudio del suelo donde se confirmó que las propiedades de la capa de partículas en la estructura del pavimento cumplían con las especificaciones propuestas por el MTOP. En cuanto al análisis del hormigón asfáltico, se determinó el porcentaje de bitumen en varias muestras extraídas de dos secciones de la vía. Se observó que, en el hormigón asfáltico antiguo, el porcentaje de asfalto era inferior al óptimo, mientras que la sección repavimentada cumplía con las especificaciones requeridas. Finalmente, el trabajo se concluyó con la elaboración de un presupuesto para los tramos más deteriorados. (Salinas, 2019).

**Implicaciones para la presente investigación:**

- El antecedente demuestra la importancia de integrar una evaluación funcional (PCI) con información estructural (calicatas, núcleos y deflexiones) para interpretar de forma integral el desempeño del pavimento. En la presente investigación, esto respalda la necesidad de contrastar el IRI (indicador funcional) con evidencia de condición del pavimento y tráfico, evitando interpretaciones aisladas.

- La identificación de una estructura típica (carpeta asfáltica, base y subbase, y recubrimientos adicionales en zonas repavimentadas) sugiere que la rugosidad puede variar espacialmente por cambios de sección y por intervenciones previas. Para el tramo Santa Rosa–Ayaviri, ello justifica el análisis multiescala del perfil/IRI, a fin de detectar transiciones y cambios de comportamiento asociados a variaciones constructivas.
- Los valores elevados de TPDA y su proyección a un horizonte de diseño evidencian la relación entre demanda vehicular y degradación del pavimento. Esto sustenta que en el tramo de estudio (corredor de alta importancia) es esperable la aparición de patrones de irregularidad asociados a solicitudes repetitivas, lo cual puede expresarse como componentes dominantes en frecuencia (Fourier) y como concentraciones por escala y ubicación (Wavelet).
- La clasificación funcional obtenida mediante PCI en secciones diferenciadas muestra que la condición del pavimento no es homogénea. Esta idea respalda el enfoque central de la presente investigación: el IRI, por sí solo, puede ocultar variaciones locales, por lo que se requiere caracterizar la rugosidad por escalas y por tramos mediante Wavelet y Hilbert–Huang.
- La priorización de intervención y la estimación presupuestal focalizada en los tramos más deteriorados evidencia el valor de identificar zonas críticas. En ese sentido, la presente investigación busca aportar una herramienta analítica (Fourier–Wavelet–HHT) que permita localizar segmentos con comportamiento anómalo del IRI para apoyar la toma de decisiones de mantenimiento.

**Título:**

“EVALUACIÓN FUNCIONAL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA VÍA ESPINAL – SUAREZ MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO PCI – 2020” (Serrano, 2020).

**Autor:** Br. Jean Pierre Mora Guarnizo Br. Juan Sebastian Serrano Palma

**Institución:**

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA – SECCIONAL ALTO MAGDALENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

**Fecha:** 2020

**Lugar:** Alto Magdalena-Colombia

**Resumen:**

El proyecto "Evaluación funcional de un pavimento flexible en la vía Espinal Suarez mediante la aplicación del método PCI – 2020" tiene como objetivo examinar y describir los daños actuales en el pavimento flexible, utilizando la metodología PCI (Índice de Condición del Pavimento) a través de una inspección visual técnica para identificar los distintos tipos de deterioro establecidos en el manual PCI del ingeniero civil Luis Ricardo Vásquez Varela. Este análisis se llevará a cabo en una longitud de 3 kilómetros dividida en intervalos de 38,3 metros a lo largo de la carretera que conecta el municipio del Espinal con el municipio de Suarez, ambos ubicados en el departamento del Tolima. El proyecto incluirá la implementación de la fase III "Análisis de la información" que forma parte del capítulo 5 y se refiere a la metodología mencionada. Después, se llevarán a cabo dos conteos de tráfico, uno en un día normal de mercado y otro en un día festivo, en un punto principal de la vía. Con los resultados obtenidos, se calculará el tránsito promedio diario (TPD) y se determinará el número acumulado de ejes simples equivalentes de 80tn en el carril de diseño (NESE) y el número acumulado de ejes simples equivalentes de 130kn en el carril de diseño (NE). Utilizando los datos recopilados de los tramos dentro de los 3 kilómetros evaluados, se elaborará un gráfico PCI vs TRAMOS para visualizar el estado actual de la vía según las categorías de clasificación del PCI y para sugerir posibles técnicas de mejora. Finalmente, se entregará este informe en formato físico (impreso) y digital (CD) a la universidad, con todos los cálculos, procesos y resultados mencionados que fueron fundamentales para la realización exitosa de este proyecto de investigación. (Serrano, 2020).

**Implicaciones para la presente investigación:**

- El antecedente evidencia que la inspección visual y el método PCI permiten caracterizar el deterioro superficial y clasificar el estado del pavimento por tramos. Para la presente investigación, esto funciona como referencia comparativa: las zonas con peor PCI deberían tender a manifestar mayor rugosidad y, por tanto, incrementos del IRI o patrones críticos detectables con Wavelet y HHT.
- El registro de deterioros específicos (por ejemplo, agrietamiento tipo piel de cocodrilo y parcheo) sugiere que ciertos daños gene-

ran irregularidades repetitivas o localizadas en el perfil longitudinal. Esto respalda el uso de Fourier para detectar periodicidades y de Wavelet para ubicar espacialmente las irregularidades asociadas a defectos puntuales o tramos con daño concentrado.

- La división del tramo en unidades regulares (intervalos) y la construcción de gráficos PCI vs tramo muestran un enfoque segmentado para la evaluación. En la presente investigación, esto justifica trabajar con ventanas o segmentos del perfil/IRI (por ejemplo, por subtramos) para comparar firmas espectrales y multiescala, identificando zonas críticas a lo largo del tramo Santa Rosa–Ayaviri.
- La incorporación de conteos de tráfico y estimación de cargas equivalentes respalda la necesidad de considerar el tránsito como factor explicativo del deterioro. Por ello, la presente investigación puede interpretar picos del IRI y concentraciones energéticas (HHT) como respuesta a solicitudes repetitivas de carga, especialmente en sectores con tráfico pesado.
- Las propuestas de intervención (parcheo, reparación profunda o reconstrucción en casos severos) resaltan que el diagnóstico debe distinguir entre deterioros localizados y deterioros extendidos. En la presente investigación, la combinación Wavelet–HHT permite diferenciar componentes locales (alta variación en corta distancia) frente a tendencias de mayor longitud de onda (baja frecuencia), aportando criterio técnico para seleccionar tratamientos.

### 3.1.2 Antecedentes Nacionales

**Título:**

EVALUACIÓN DE LAS DEFLEXIONES DE LA VÍA DE EVITAMIENTO PANAMERICANA NORTE KM 578 AL KM 583, UTILIZANDO LA VIGA DE BENKELMAN" (Herrera, 2017).

**Autor:**

Br. Escobedo Eubio, Jhordan Brayan

Br. Herrera Aguilar, Diego Alonso

**Institución:**

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Fecha:** 2017

**Lugar:** Trujillo – Perú

**Resumen:**

La tesis tiene como objetivo evaluar las deflexiones de la carretera Panamericana Norte en el tramo Ovalo Huanchaco – El Milagro, desde el kilómetro 578 al kilómetro 583, utilizando la Viga Benkelman. Esto permitirá verificar la condición de la capa de rodadura y la subrasante del pavimento. El proyecto describe las características de la Viga Benkelman, que cuenta con un cuerpo de sostén apoyado en el terreno mediante tres puntos de apoyo (dos delanteros fijos A y uno trasero fijo B), y un brazo móvil conectado al cuerpo fijo a través de una articulación de giro o pivote C. Uno de los extremos del brazo apoya en el terreno (punto D), mientras que el otro está en contacto con un extensómetro de movimiento vertical (punto E). Además, se explicará cómo utilizar eficazmente la Viga Benkelman en la evaluación de pavimentos

Este enfoque es no invasivo, lo que significa que no causa daños al pavimento durante la realización de los ensayos, aunque es poco común en nuestra zona. Se llevarán a cabo 5 ensayos con la Viga Benkelman, uno por cada kilómetro, donde se tomarán muestras cada 40 metros. Con los resultados obtenidos, se podrá determinar la condición del tramo analizado y decidir si es necesario llevar a cabo un mantenimiento de la carretera o una rehabilitación completa. (Herrera, 2017)

**Implicaciones para la presente investigación:**

- El antecedente confirma la utilidad de los ensayos de deflexión con Viga Benkelman como indicador de condición estructural (capacidad portante), complementario a indicadores funcionales. Para la presente investigación, esto respalda la idea de que el IRI debe interpretarse con criterio, pues un pavimento puede presentar irregularidad (alto IRI) sin necesariamente tener el mismo nivel de debilidad estructural, y viceversa.
- La clasificación porcentual del tramo según combinaciones de resistencia (rodadura fuerte/débil y subrasante fuerte/débil) evidencia la heterogeneidad estructural. Esto es relevante para la presente investigación porque cambios en soporte pueden reflejarse como variaciones del perfil longitudinal, captables como componentes de baja frecuencia (Fourier) o cambios de régimen (HHT).
- La aplicación de mediciones a espaciamientos regulares refuerza la importancia de un muestreo consistente para interpretar resul-

tados. En la presente investigación, el muestreo del perfil longitudinal (alta resolución) es condición necesaria para aplicar adecuadamente Wavelet y Hilbert–Huang, evitando sesgos por falta de densidad de datos.

**Título:**

“EVALUACIÓN DEL ESTADO FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE MEDIANTE LA METODOLOGÍA PCI TRAMO QUICHUAY - INGENIO DEL KM 0+000 AL KM 1+000 2014”

**Autor:** Br. Antony Luis Vergara Vicuña

**Institución:**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Fecha:** 2015

**Lugar:** Huancayo – Perú

**Resumen:**

En esta investigación se emplea la Metodología PCI (Índice de Condición del Pavimento) como una herramienta objetiva para inspeccionar visualmente y calificar el estado del pavimento. Se ha realizado un estudio detallado de un kilómetro de carretera utilizando esta metodología para evaluar el estado general de la vía. A través de este análisis, es posible identificar el estado actual del pavimento, las fallas más críticas que afectan su condición, y con el valor del PCI determinar el tipo de mantenimiento y rehabilitación más eficiente y económico. De esta manera, se busca mejorar el estado del pavimento para garantizar la comodidad y seguridad de los usuarios, que es su principal propósito.

**Implicaciones para la presente investigación:**

- El antecedente evidencia que el PCI permite cuantificar la severidad y extensión de fallas y traducirlo en una clasificación global del tramo. Para la presente investigación, esto aporta un marco para contrastar si los segmentos con peor condición (PCI bajo) coinciden con incrementos del IRI y con firmas multiescala más intensas.
- La identificación de fallas predominantes (por ejemplo, peladura por intemperismo, corrugación y baches) sugiere que distintos mecanismos de deterioro generan patrones distintos en la rugo-



sidad. Esto respalda el enfoque de la presente investigación de analizar el IRI como señal: corrugaciones pueden reflejarse en frecuencias dominantes, mientras que baches y depresiones pueden aparecer como eventos localizados identificables con Wavelet.

- La conclusión de condición crítica y la necesidad de intervenciones mayores refuerzan la importancia de detectar oportunamente tramos con deterioro acelerado. La presente investigación busca justamente aportar un análisis espectral y multiescala que ayude a priorizar mantenimiento en segmentos críticos del tramo Santa Rosa–Ayaviri.
- La diferenciación entre fallas funcionales y estructurales proporciona criterio para interpretar resultados. En la presente investigación, esto sirve para no atribuir automáticamente incrementos del IRI a causas estructurales; por ello, el análisis multiescala (Wavelet/HHT) permitirá inferir si predominan componentes superficiales (alta frecuencia) o deformaciones de mayor longitud de onda (baja frecuencia).

**Título:****3.1.3 Antecedentes Locales**

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN LA PROLONGACIÓN DE LA AV. LA CULTURA TRAMO (4TO PARADERO DE SAN SEBASTIÁN – GRIFO MOBIL DE SAN JERÓNIMO)

**Autor:** Br. Auccahuaqui Yanque, Irvin Kenyo

Br. Corahua Hilaquita, Ronald Yuseut

**Institución:**

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Fecha:** 2016

**Lugar:** Cusco - Perú

**Resumen:**

El propósito de esta investigación es evaluar las deflexiones de la carretera Panamericana Norte en el tramo Ovalo Huanchaco - El Milagro, desde el kilómetro 578 al kilómetro 583, utilizando la Viga Benkelman,

con el fin de inspeccionar tanto la capa de rodadura como la subrasante del pavimento. La Viga Benkelman cuenta con un diseño que incluye un cuerpo de sostén con tres apoyos (dos delanteros fijos A y uno trasero fijo B), así como un brazo móvil unido al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote C, con un extremo apoyado en el terreno (punto D) y el otro en contacto con un extensómetro de movimiento vertical (punto E). Se explicará cómo utilizar esta herramienta en pavimentos. A pesar de ser un método no destructivo que no causa daños al pavimento durante el ensayo, es poco común en nuestra región. Se llevarán a cabo 5 ensayos con la Viga Benkelman, uno por kilómetro, tomando muestras cada 40 metros. Con los resultados obtenidos, se podrá determinar el estado del tramo evaluado y decidir si se requiere realizar mantenimiento en la carretera o una rehabilitación completa.

### **Implicaciones para la presente investigación:**

- El antecedente local aporta evidencia de evaluación del pavimento en un contexto urbano del Cusco, lo cual permite reconocer que la condición del pavimento puede estar influenciada por tránsito, drenaje y mantenimiento no uniforme. Para la presente investigación, esto refuerza la necesidad de analizar el IRI por tramos y no solo mediante promedios.
- La incorporación de indicadores estructurales (por ejemplo CBR *in situ*) y funcionales (PCI/defectos) permite interpretar mejor las causas del deterioro. En el tramo Santa Rosa–Ayaviri, esta lógica respalda el enfoque de contrastar patrones del IRI con información complementaria del expediente técnico o de campo.
- La identificación de un deterioro predominante (como el ahuellamiento) sugiere que existen mecanismos que afectan la regularidad longitudinal y el confort de marcha. En la presente investigación, esto justifica buscar firmas específicas en el análisis multi-escala: deformaciones extendidas pueden expresarse como componentes de baja frecuencia, mientras que daños puntuales pueden concentrarse en escalas cortas.
- Los resultados asociados a cargas equivalentes (ESAL) y composición vehicular evidencian el rol del tránsito pesado en el deterioro. Para la presente investigación, ello sustenta que las variaciones del IRI pueden relacionarse con solicitaciones repetitivas, lo cual puede reflejarse en frecuencias dominantes (Fourier) y en cambios de energía instantánea (HHT).

**Título:**

USO DEL MÉTODO PCI PARA EVALUAR LA FUNCIONALIDAD DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA AVENIDA LA CULTURA EN EL SECTOR SAN SEBASTIÁN

**Autor:** Br. Jhunior Felix Alonzo Lanado

**Institución:**

UNIVERSIDAD CONTINENTAL FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Fecha:** 2023

**Lugar:** Cusco - Perú

**Resumen:**

La investigación se enfoca en evaluar la calidad del pavimento flexible en la Avenida La Cultura, en San Sebastián, a través del uso del Método de Índice de Condición del Pavimento (PCI). El estudio emplea un diseño de investigación mixta que combina enfoques cuantitativos y cualitativos con el objetivo de describir y explicar la situación. Se establecen objetivos específicos que incluyen la identificación visual de defectos en el pavimento, el cálculo del PCI, la evaluación del tráfico vehicular y el análisis de posibles acciones de mantenimiento o rehabilitación. La recolección de datos se realizará mediante técnicas como la observación visual, la aplicación sistemática del Método PCI y entrevistas estructuradas. Estos enfoques proporcionarán una comprensión completa de la calidad del pavimento y su impacto en la operatividad de la vía. Se anticipa que los hallazgos serán fundamentales para la toma de decisiones estratégicas en cuanto a estrategias de mantenimiento y/o rehabilitación, especialmente en entornos con infraestructuras viales similares. Este estudio no solo enriquecerá el campo de la ingeniería vial, sino que también tendrá consecuencias prácticas al suministrar información precisa para mejorar la gestión de las infraestructuras viales, asegurando su durabilidad y eficiencia operativa a lo largo del tiempo. Palabras Clave: Uso del Método PCI para evaluación del pavimento, Funcionalidad de pavimento flexible.

**Implicaciones para la presente investigación:**

- El antecedente reafirma que el método PCI permite identificar y clasificar fallas que afectan la funcionalidad del pavimento y la calidad del servicio. Para la presente investigación, esto aporta

un marco comparativo para interpretar el IRI como indicador de confort: sectores con mayor severidad de fallas deberían reflejar incrementos del IRI o eventos localizados en la señal.

- La diversidad de defectos identificados (agrietamientos, parcheos, corrugación, ahuellamiento, depresiones, etc.) evidencia que el deterioro no es uniforme ni responde a una sola causa. Esto respalda el enfoque multiescala de la presente investigación: Wavelet y HHT permiten descomponer la señal del perfil/IRI y distinguir componentes asociadas a diferentes tipos de irregularidad.
- El vínculo entre tránsito y deterioro descrito en el antecedente sostiene la necesidad de considerar el tránsito como variable explicativa. En la presente investigación, esto justifica interpretar frecuencias dominantes (Fourier) o concentraciones energéticas (HHT) como posibles respuestas a solicitudes repetitivas, especialmente en sectores con mayor demanda vehicular.
- Las recomendaciones de intervención resaltan la importancia de un diagnóstico segmentado y priorizado. En el tramo Santa Rosa–Ayaviri, la presente investigación pretende contribuir identificando segmentos críticos mediante firmas espectrales y multiescala del IRI, con potencial aplicación directa en la planificación de mantenimiento.

## 3.2 BASES TEÓRICAS

### 3.2.1 Definición Conceptual

**Pavimento** Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas y aproximadamente planas, las cuales son diseñadas y construidas utilizando materiales adecuados y debidamente compactados. Estas capas se disponen sobre la subrasante de una vía, cuya calidad se logra mediante los trabajos de movimiento de tierras realizados durante la etapa de preparación. La estructura del pavimento debe ser capaz de resistir de forma eficiente las solicitudes y esfuerzos generados por el tránsito repetitivo de vehículos durante el período de servicio para el cual fue diseñada. (Fonseca Montejo, Ingeniería de pavimentos para carreteras , 2002).

#### 3.2.1.1 Rugosidad del pavimento y comportamiento funcional

La rugosidad del pavimento constituye una de las principales características funcionales de una vía, ya que influye directamente en el confort de rodadura, la seguridad

vial, los costos de operación vehicular y la percepción del usuario. Desde un punto de vista físico, la rugosidad se manifiesta como un conjunto de irregularidades longitudinales que generan excitaciones dinámicas en el sistema vehículo–pavimento. Estas irregularidades pueden presentarse en diferentes escalas espaciales, desde deformaciones de gran longitud de onda, como asentamientos o hundimientos, hasta irregularidades de pequeña escala asociadas a la textura superficial.

El comportamiento funcional del pavimento se ve afectado por la superposición de estas irregularidades, las cuales no siempre tienen un origen común ni generan los mismos efectos sobre la respuesta dinámica del vehículo. En consecuencia, la evaluación de la rugosidad requiere herramientas capaces de capturar tanto la magnitud global del deterioro como su variabilidad espacial a lo largo del tramo analizado.

### 3.2.1.2 Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es un indicador estandarizado que cuantifica la rugosidad longitudinal del pavimento y se expresa generalmente en metros por kilómetro (m/km). Su cálculo se basa en la simulación de la respuesta de un modelo dinámico conocido como *vehículo cuarto de carro* (Quarter-Car Model), el cual representa de manera simplificada el comportamiento vertical de un vehículo circulando sobre un perfil longitudinal medido.

El IRI se ha consolidado como un indicador ampliamente utilizado a nivel internacional debido a su reproducibilidad, comparabilidad y relación con el confort del usuario. No obstante, al tratarse de un valor promedio acumulado a lo largo de un tramo, el IRI presenta limitaciones inherentes, ya que no permite identificar la localización exacta de irregularidades ni distinguir entre diferentes tipos de deterioro que pueden generar valores similares del índice.

Esta característica monoescalar del IRI implica que información relevante contenida en el perfil longitudinal se pierde durante el proceso de cálculo, lo que limita su capacidad para apoyar diagnósticos detallados y estrategias de mantenimiento focalizadas. Por esta razón, resulta pertinente complementar el análisis tradicional del IRI con técnicas que permitan explorar la estructura interna de la señal del perfil o del propio índice.

### 3.2.1.3 Procesamiento de señales aplicado al análisis del pavimento

El perfil longitudinal del pavimento y el IRI pueden ser interpretados como señales espaciales, susceptibles de ser analizadas mediante técnicas de procesamiento de señales. Estas herramientas permiten estudiar la variación de la señal en distintos dominios, revelando características que no son evidentes en el dominio original de

la distancia.

La Transformada de Fourier constituye una de las técnicas más utilizadas para el análisis espectral de señales, ya que permite descomponer una señal en sus componentes de frecuencia. En el contexto del pavimento, este enfoque facilita la identificación de frecuencias dominantes asociadas a irregularidades periódicas, como ondulaciones o patrones repetitivos. Sin embargo, la Transformada de Fourier asume que la señal es estacionaria, lo cual no siempre se cumple en pavimentos reales, donde las características del perfil varían a lo largo del tramo.

Para superar esta limitación, la Transformada Wavelet introduce el concepto de análisis multiresolución, permitiendo estudiar la señal simultáneamente en el dominio espacial y en diferentes escalas. Esta técnica resulta especialmente adecuada para identificar irregularidades localizadas y cambios abruptos en el perfil longitudinal, ya que conserva información sobre la posición de los eventos en la señal. En el análisis de la rugosidad, la Transformada Wavelet permite relacionar ciertas escalas con mecanismos específicos de deterioro del pavimento.

Por su parte, la Transformada de Hilbert–Huang (HHT) se basa en la Descomposición Empírica de Modos (EMD), una técnica adaptativa diseñada para analizar señales no lineales y no estacionarias. A diferencia de Fourier y Wavelet, la HHT no utiliza funciones base predefinidas, sino que extrae modos intrínsecos directamente de la señal. Esto permite obtener frecuencias instantáneas y analizar la evolución energética de la señal con alta sensibilidad a cambios locales, lo cual resulta particularmente útil para el estudio de pavimentos sometidos a condiciones variables de tránsito y deterioro.

#### 3.2.1.4 Integración conceptual para el análisis del IRI

Desde una perspectiva teórica, el análisis del IRI mediante técnicas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang permite complementar la información contenida en el índice tradicional, proporcionando una visión más detallada del comportamiento de la rugosidad del pavimento. Mientras el IRI resume la respuesta dinámica global del sistema vehículo–pavimento, las técnicas de procesamiento de señales permiten explorar la estructura interna de la señal, identificar patrones multiescala y localizar zonas críticas a lo largo del tramo evaluado.

Esta integración teórica sustenta el desarrollo de modelos computacionales orientados a una evaluación más precisa y automatizada del estado funcional del pavimento, contribuyendo a mejorar la toma de decisiones en el mantenimiento vial y a optimizar la gestión de infraestructuras de transporte, especialmente en corredores de alta importancia estratégica como el tramo Santa Rosa–Ayaviri.

### 3.2.2 Definición Operacional

#### **Variable Independiente: Análisis del IRI mediante Series de Fourier**

**Definición Operacional** El análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mediante Series de Fourier consiste en medir la rugosidad del pavimento a lo largo de la prolongación de la Avenida La Cultura, en la ciudad de Cusco. Los datos de rugosidad, obtenidos como perfiles de elevación de la superficie del pavimento, se transforman mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) con el objetivo de descomponer la señal y analizar los componentes de frecuencia, los cuales pueden estar asociados con diferentes tipos de deterioro superficial y estructural del pavimento (Oppenheim et al., 1999).

#### **Indicadores**

- IRI promedio por segmento: Nivel general de rugosidad en cada tramo de la avenida.
- Componentes de frecuencia: Frecuencias predominantes en el perfil de rugosidad, que reflejan características del pavimento, como baches, ondulaciones y deterioro estructural.

#### **Instrumentos**

- Perfilómetro láser o inercial para recolectar datos del perfil longitudinal de la superficie del pavimento.
- Software de procesamiento de señales como MATLAB o Python, para aplicar la Transformada de Fourier y analizar los datos obtenidos (Smith, 2007)

#### **Procedimiento**

1. Recoger datos de rugosidad (IRI) en tramos de la prolongación de la Avenida La Cultura.
2. Aplicar la Transformada de Fourier a los datos de perfil recolectados para identificar frecuencias.
3. Analizar las frecuencias obtenidas para asociarlas con posibles patrones de deterioro.

#### **Variable Dependiente: Optimización de Estrategias de Mantenimiento**

**Definición Operacional** La optimización de estrategias de mantenimiento se define como el proceso de desarrollar un plan de intervención para los tramos de la Avenida La Cultura en función del análisis de Fourier de la rugosidad. El objetivo es priorizar y diseñar intervenciones de mantenimiento basadas en el tipo y magnitud de deterioro identificado por las frecuencias predominantes.

### Indicadores

- Costo de mantenimiento estimado por tramo: Presupuesto asignado a cada tramo en función del deterioro detectado.
- Tiempo de ejecución de intervenciones: Duración planificada para llevar a cabo las reparaciones en cada segmento de la avenida.
- Prolongación de la vida útil del pavimento: Proyección de la vida útil posterior al mantenimiento en función de la intervención propuesta.

### Instrumentos

- Hojas de cálculo para el análisis de costos y tiempo de intervención.
- Software de simulación para proyectar la vida útil extendida del pavimento tras el mantenimiento.

### Procedimiento

1. Clasificar los tramos según las frecuencias predominantes y el tipo de deterioro identificado.
2. Estimar los costos y el tiempo de intervención necesarios para cada tramo.
3. Evaluar la vida útil proyectada en función del tipo de intervención y la gravedad del deterioro.

## 3.3 HIPÓTESIS

### 3.3.1 Hipótesis General

**HG:** La aplicación de las transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang al análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, permitirá identificar componentes espectrales dominantes asociadas al deterioro del pavimento, mejorando en al menos un 25 precisión en la clasificación de tramos respecto al método convencional basado exclusivamente en valores promedio del IRI.



### 3.3.1.1 Hipótesis Específica

1. **HE1:** La aplicación de la Transformada Wavelet Continua permitirá identificar zonas críticas de la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, donde el IRI supera los 3.0 m/km, en al menos el 85 % de los casos asociados a deterioro estructural observable del pavimento.
2. **HE2:** La aplicación de la Transformada de Fourier permitirá clasificar los tramos de la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, con un error menor al 15 % respecto a la clasificación visual del pavimento, identificando frecuencias dominantes asociadas a irregularidades periódicas de largo plazo.
3. **HE3:** La Transformada de Hilbert–Huang permitirá identificar variaciones abruptas del IRI con mayor sensibilidad en los tramos de la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, donde el gradiente de cambio del IRI supera 0.8 m/km por cada 20 m, mejorando la capacidad predictiva del mantenimiento vial en al menos un 30 % respecto a las otras transformadas.
4. **HE4:** La integración de los resultados obtenidos mediante las transformadas Wavelet, Fourier y Hilbert–Huang permitirá proponer estrategias de mantenimiento vial más eficientes para la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, durante el año 2025, logrando una reducción estimada de costos entre el 25 % y el 30 % respecto a los enfoques convencionales.

### 3.4 VARIABLES

**Variable Independiente:** Técnicas de análisis del IRI mediante transformadas matemáticas (Fourier, Wavelet y Hilbert-Huang). Estas transformadas se aplican para descomponer y caracterizar el comportamiento del IRI en distintos dominios (frecuencia, tiempo y frecuencia adaptativa).

**Variable Dependiente:** Optimización de las estrategias de mantenimiento. Se evalúa cómo la interpretación avanzada del IRI puede influir en una mejor toma de decisiones respecto a la priorización de intervenciones, estimación de costos y proyección de la vida útil del pavimento.

## 3.4.1 Cuadro de Operacionalización de Variables

Variable	Tipo de Variable	Dimensiones	Indicadores
Análisis del IRI mediante Series de Fourier	Variable Independiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de Rugosidad</li> <li>• Transformada de Fourier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de rugosidad (IRI)</li> <li>• Frecuencia predominante</li> <li>• Amplitud de las frecuencias</li> </ul>
Optimización de Estrategias de Mantenimiento	Variable Dependiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prioridad de intervención</li> <li>• Costo de mantenimiento</li> <li>• Duración de vida útil proyectada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clasificación de tramos críticos</li> <li>• Costo estimado de intervención</li> <li>• Prolongación de vida útil (en años)</li> <li>• Tipo de intervención recomendado</li> </ul>

TABLA N° 3.1: Cuadro de Operacionalización de Variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CON-CEPTUAL	DEFINICIÓN OPE-RACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Variable Independiente: Procesamiento del IRI mediante transformadas de señales (Fourier, Wavelet, Hilbert-Huang)	Es el análisis del perfil longitudinal del pavimento que refleja el nivel de rugosidad, evaluado mediante técnicas avanzadas de procesamiento de señales que permiten descomponer la señal del IRI en diferentes escalas o frecuencias para identificar patrones de deterioro.	Se aplicarán las transformadas al IRI recolectado para obtener los componentes espectrales y multiescales. Se interpretarán los resultados para clasificar tramos y zonas críticas del pavimento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transformada de Fourier</li> <li>Transformada de Wavelet</li> <li>Transformada de Hilbert-Huang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frecuencias predominantes (0.1–0.4 Hz)</li> <li>Energía espectral por tramo</li> <li>Gradiente de IRI (&gt;0.8 m/km por 20 m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfilómetro o acelerómetro</li> <li>Software MATLAB, Python o R para análisis espectral</li> <li>Base de datos recolectados del IRI</li> </ul>
Variable Dependiente: Condición estructural y funcional del pavimento.	Refleja las características funcionales y estructurales del pavimento mediante el índice de rugosidad que influye en la comodidad del usuario y la necesidad de mantenimiento.	Se medirá la variabilidad del IRI y se clasificará el pavimento según rangos de deterioro, determinando los tramos críticos que requieren intervención.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado funcional</li> <li>Estado estructural</li> <li>Proyección de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IRI &gt;3.0 m/km = zona crítica</li> <li>Clasificación en niveles de deterioro</li> <li>Longitud de tramo crítico (m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observación y análisis en software</li> <li>Tablas y gráficos comparativos</li> <li>Sistema GIS para mapeo de tramos</li> </ul>

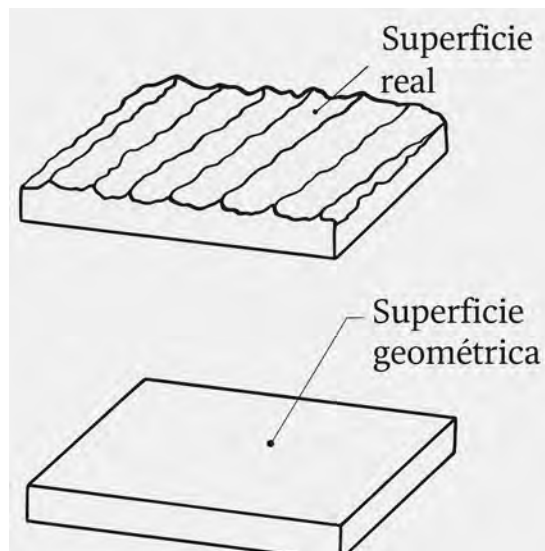
TABLA N° 3.2: Matriz de operacionalización de variables.

### 3.5 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

#### 3.5.1 Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI, por sus siglas en inglés) es una métrica ampliamente utilizada para medir la calidad de la superficie de los pavimentos de las carreteras. Fue desarrollado en 1986 por el Banco Mundial y se ha convertido en un estándar internacional debido a su capacidad para representar la rugosidad de la superficie en términos de la comodidad del usuario y el impacto sobre los vehículos. El IRI se expresa en metros por kilómetro (m/km), y los valores más bajos indican una superficie más suave.

FIGURA N° 3.1: *Representación gráfica del concepto de rugosidad*



**Nota.** Esquema conceptual que diferencia la superficie geométrica ideal de la superficie real del pavimento, utilizada para explicar el concepto de rugosidad superficial. **Fuente:** Wikipedia (s. f.).

El IRI se basa en el perfil longitudinal de una carretera, que es una representación de las variaciones verticales de la superficie a lo largo de su longitud. Para calcular el IRI, se utiliza un perfilómetro inercial o un sistema de medición láser que recoge datos de la altura de la superficie a intervalos regulares. Luego, estos datos son procesados para determinar el IRI, que representa la respuesta de un "vehículo de referencia" que recorre la carretera.

#### 3.5.2 Concepto de Rugosidad

La rugosidad de un pavimento se refiere a las irregularidades en la superficie que afectan la comodidad de los usuarios y el desempeño de los vehículos. Se clasifica

en:

### 3.5.3 Métodos de Medición del IRI

1. **Perfilómetros inerciales:** Utilizan sensores de aceleración y desplazamiento montados en vehículos, permitiendo una medición precisa del perfil longitudinal del pavimento (Sayers, 1998).
2. **Vehículos instrumentados:** Incorporan sistemas láser y sensores que registran la altura del pavimento a intervalos regulares (Federal Highway Administration [FHWA], 2006).
3. **Métodos móviles de bajo costo:** Se basan en aplicaciones móviles y acelerómetros integrados en dispositivos inteligentes, siendo útiles en caminos rurales o de bajo tráfico (Medina et al., 2019).

### 3.5.4 Cálculo del IRI

El cálculo del IRI se basa en la respuesta de un modelo de vehículo de "cuarto de carro". Este modelo representa el movimiento de una masa suspendida (carrocería) y otra no suspendida (rueda) sobre el perfil de la carretera.

$$IRI = \frac{\sum_{i=1}^n |z_{i+1} - z_i|}{L} \quad (3.1)$$

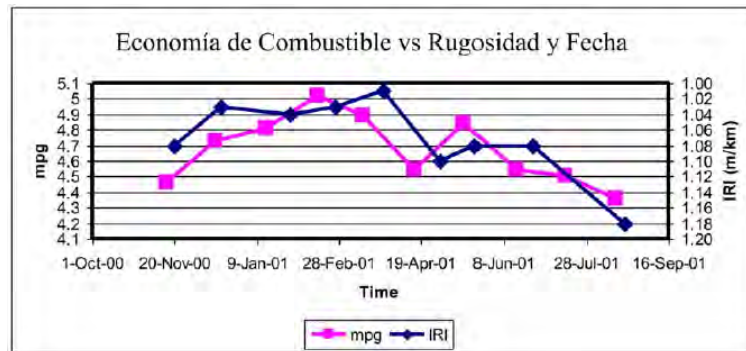
donde:

- $z_i$  y  $z_{i+1}$ : alturas consecutivas del perfil.
- $L$ : longitud del tramo medido.

### 3.5.5 Importancia del IRI en la Evaluación de Pavimentos

El IRI se ha convertido en una métrica estándar por las siguientes razones:

- **Estandarización global:** Facilita la comparación entre carreteras de distintas regiones.
- **Indicador de mantenimiento:** Valores altos indican necesidad de intervención.
- **Impacto económico y de seguridad:** Mejores valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se asocian con menores costos de operación vehicular y un mayor nivel de confort y seguridad para los usuarios (Sayers, 1998).

FIGURA N° 3.2: *Relación entre la rugosidad del pavimento (IRI) y la economía de combustible*

**Nota.** La figura muestra la relación entre la economía de combustible, expresada en millas por galón (mpg), y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), expresado en m/km, para un mismo tramo vial. Se observa una tendencia inversa entre ambas variables, donde el incremento de la rugosidad del pavimento se asocia con una disminución de la eficiencia del combustible, como consecuencia del aumento de las pérdidas por vibración y de la resistencia a la rodadura. Este comportamiento evidencia la influencia del estado funcional del pavimento sobre los costos de operación vehicular y el confort de circulación. **Fuente:** Elaboración propia.

### s que Afectan el IRI **Cargas Vehiculares**

El tránsito pesado genera deformaciones en el pavimento, especialmente cuando no ha sido diseñado adecuadamente para soportar dichas cargas.

### Condiciones Climáticas

Los ciclos de congelación y deshielo, así como las temperaturas extremas, contribuyen significativamente al deterioro superficial del pavimento.

### Materiales y Construcción

La calidad de los materiales utilizados y los procedimientos constructivos aplicados tienen un impacto directo en la rugosidad a largo plazo. (Akaike, 1973)

#### 3.5.6 Series de Fourier

Las series de Fourier permiten descomponer funciones periódicas como suma de senos y cosenos. Una función  $f(x)$  de período  $T$  puede expresarse como:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) \right) \quad (3.2)$$

donde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \quad (3.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) dx \quad (3.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) dx \quad (3.5)$$

### Aplicación en Rugosidad Vial

Permite transformar los datos del IRI al dominio de la frecuencia, identificando patrones recurrentes, como deformaciones periódicas relacionadas al tránsito o la geometría de la vía. (Benavente Jiménez, 2015)

#### Ventajas

- Identificación de patrones repetitivos.
- Localización de anomalías.
- Reducción de ruido.

#### 3.5.7 Series de Wavelet

A diferencia de Fourier, las Wavelets permiten analizar señales no estacionarias. Son ideales para estudiar el IRI porque permiten analizar cambios locales en múltiples escalas.

La función wavelet está dada por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.6)$$

La transformada continua de wavelet (CWT):

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (3.7)$$

### Aplicaciones

- Filtrado de ruido en datos de IRI.
- Detección de irregularidades locales.
- Comparación entre tramos viales.

Las Wavelets ofrecen un enfoque multiescalar útil para identificar detalles finos y cambios bruscos en el perfil de una carretera (Mallat, 2009).

#### 3.5.8 Método de Hilbert-Huang (HHT):

El método HHT es una técnica adaptativa ideal para señales no lineales y no estacionarias. Se compone de dos etapas principales:

- Decomposición Empírica en Modos (EMD)
- Transformada de Hilbert

#### **Decomposición Empírica en Modos (EMD)**

- Detecta máximos y mínimos locales en la señal.
- Interpola estos extremos para obtener envolventes superior e inferior.
- Calcula la media de las envolventes y la resta de la señal original.
- Repite el proceso hasta obtener un Modo Intrínseco de Función (IMF).
- Continúa con el residuo hasta llegar a una tendencia monótona.

#### **Transformada de Hilbert**

Se aplica a cada IMF para obtener las siguientes características:

- Frecuencia instantánea.
- Amplitud instantánea.

#### **Aplicación en el IRI**

El HHT es especialmente útil para analizar la variabilidad compleja de la rugosidad (IRI). Permite:

- Detectar deterioros localizados en el pavimento.
- Analizar las variaciones multiescales del perfil longitudinal.(Fleiss, 1981)



## CAPÍTULO IV: MÉTODO

### 4.1 ALCANCE DE ESTUDIO

La presente investigación tiene un alcance descriptivo–analítico, ya que se orienta a caracterizar, analizar e interpretar el comportamiento del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible en la carretera Sicuani–Juliaca, tramo Santa Rosa–Ayaviri, sin intervenir físicamente la estructura del pavimento.

El estudio se centra en el análisis funcional del pavimento, utilizando datos de perfiles longitudinales obtenidos mediante un rugosímetro inercial láser, procesados conforme a la norma ASTM E1926-08. A partir de dichos perfiles, se aplica un enfoque multiescala de procesamiento de señales, incorporando la Transformada de Fourier, la Transformada Wavelet Continua y la Transformada de Hilbert–Huang, con el fin de identificar patrones de rugosidad en diferentes rangos de frecuencia y longitud de onda.

Además, se consideran condiciones controladas del tramo vial para evitar que factores externos alteren los resultados, reforzando el carácter explicativo del estudio. En la figura anterior se observa que:

$$u_{iT} = u_g + u_b + u_i \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{iT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_b + \ddot{u}_i \quad (4.1a)$$

$$u_{bT} = u_g + u_b \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{bT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_b \quad (4.1b)$$

Remplazando y simplificando se puede llegar a una expresión matricial de la forma:

$$M_s \ddot{u}_s(t) + M_s \tau \ddot{u}_b(t) + C_s \dot{u}_s(t) + K_s u_s(t) = -M_s \tau \ddot{u}_g(t) \quad (4.2)$$

Donde  $M_s$  es la matriz de masa de la superestructura y se obtiene de la ecuación 4.1a y 4.1b,  $C_s$  es la matriz de amortiguamiento y viene dada por la ecuación 4.3,  $K_s$  es la matriz de rigidez y  $\tau = [1, 1, \dots, 1]^T$  es un vector de  $n \times 1$ .

A continuación se muestra la 4.3.

$$\overline{M} \ddot{u}(t) + \overline{C} \dot{u}(t) + \overline{K} u(t) + \overline{R}(t) = -v \ddot{u}_g(t) \quad (4.3)$$

Donde:

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} M_s & M_s \tau \\ \tau^T M_s & m_{tot} \end{bmatrix}; \quad \overline{C} = \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix}; \quad \overline{K} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix}; \quad (4.4a)$$

$$\overline{R}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ R(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_s(t) \\ u_b(t) \end{bmatrix}; \quad v = \begin{bmatrix} M_s \tau \\ m_{tot} \end{bmatrix} \quad (4.4b)$$

## 4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolla bajo un **diseño no experimental**, de tipo **transversal**, debido a que las variables de estudio no son manipuladas, sino observadas y analizadas tal como se presentan en el pavimento durante el periodo de medición.

Asimismo, el diseño es de nivel **descriptivo-analítico**, dado que se orienta, por un lado, a describir el comportamiento del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a lo largo del tramo de estudio y, por otro, a analizar los perfiles longitudinales mediante técnicas avanzadas de procesamiento de señales, tales como la Transformada de Fourier, la Transformada Wavelet Continua y la Transformada de Hilbert-Huang, permitiendo la identificación de patrones de irregularidad en diferentes escalas espaciales.

El enfoque de la investigación es **cuantitativo**, ya que se emplean datos numéricos obtenidos a partir de mediciones directas en campo mediante un rugosímetro inercial láser, los cuales son procesados y analizados mediante herramientas computacionales especializadas.

## 4.3 POBLACIÓN

La población de estudio se define como la totalidad de tramos de pavimento de la carretera Sicuani – Juliaca, sobre la cual se llevará a cabo el análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mediante las técnicas de Wavelet, Fourier y Hilbert-Huang, con el objetivo de desarrollar un modelo computacional en Python que permita evaluar y optimizar el mantenimiento de la vía.

**UNIDAD DE ESTUDIO:** La unidad de análisis es cada tramo de pavimento del tramo Santa Rosa – Ayaviri en la carretera Sicuani – Juliaca, en el que se medirá el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y se analizará la señal obtenida mediante la Transformada de Fourier, Wavelet y Hilbert-Huang para identificar tipos de deterioro específicos.

#### 4.4 MUESTRA

La muestra de la presente investigación es de tipo **no probabilística**, específicamente del tipo **muestreo de expertos o decisional**. Esta elección se basa en que el tramo de carretera seleccionado, *Sicuani – Juliaca*, fue escogido a criterio del investigador, considerando aspectos técnicos y logísticos que lo hacen pertinente para el cumplimiento de los objetivos del estudio.

Entre los criterios considerados para la selección destacan los siguientes: la clasificación de la vía como carretera de alta velocidad, la disponibilidad de datos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), su accesibilidad y la relevancia del tramo en el contexto de la red vial nacional. Además, este tramo permite aplicar técnicas avanzadas de análisis de señales, como las transformadas de Wavelet, Fourier y Hilbert-Huang, lo que facilita una evaluación detallada de la evolución de la rugosidad en función del tiempo.

Cabe señalar que, al no buscar generalizar los resultados a toda la red vial nacional, sino más bien realizar un estudio de caso en profundidad, el muestreo no probabilístico resulta adecuado. El enfoque decisional garantiza la pertinencia técnica del caso seleccionado para el desarrollo del análisis propuesto.

#### 4.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

##### 4.5.1 Técnica

La técnica principal utilizada en la presente investigación es la **observación estructurada**, dado que permite recolectar datos cuantitativos de manera sistemática y objetiva. Esta técnica se basa en el monitoreo y análisis de registros previamente obtenidos a través de instrumentos tecnológicos, como sensores de rugosidad y estaciones meteorológicas, además de fuentes secundarias oficiales que proveen datos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera *Sicuani – Juliaca*.

La observación estructurada es adecuada para este estudio ya que permite evaluar fenómenos concretos y medibles, como la variación del IRI a lo largo del tiempo, relacionándolo con factores como el volumen de tráfico y las condiciones climáticas. Además, se complementa con el uso de herramientas de procesamiento digital de señales, que permiten una observación profunda del comportamiento dinámico de los datos.

##### 4.5.2 Instrumento

El instrumento empleado es una **matriz de análisis**, diseñada específicamente para registrar, organizar y procesar los datos recolectados. Esta matriz contiene una estructura de variables clave que permiten relacionar cada medición del IRI

con parámetros espaciales y temporales. Las principales variables incluidas son:

- Fecha y hora de recolección del dato
- Coordenadas geográficas del punto medido
- Valor del IRI (en m/km)
- Condiciones climáticas (temperatura, precipitación, humedad)
- Flujo vehicular (volumen promedio diario)
- Transformada aplicada (Wavelet, Fourier, Hilbert-Huang)
- Resultados del análisis espectral

Esta matriz será implementada digitalmente y alimentada con los datos procesados en Python, lo que permitirá un análisis estructurado, repetible y replicable, facilitando la interpretación de los resultados.

#### 4.5.3 Procedimiento de la investigación

El procedimiento metodológico de la presente investigación se desarrolló de manera sistemática y secuencial, con el objetivo de garantizar la coherencia entre la obtención de datos, su procesamiento y el análisis avanzado del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Dicho procedimiento se estructuró en etapas claramente definidas, las cuales permitieron transformar los datos brutos de rugosidad en información analítica útil para la evaluación del estado funcional del pavimento.

En una primera etapa, se realizó la recopilación de la información de campo correspondiente al perfil longitudinal del pavimento en el tramo Santa Rosa–Ayaviri. Para ello, se emplearon registros obtenidos mediante un perfilómetro láser inercial, asegurando una resolución espacial constante y una cobertura continua del tramo evaluado. Esta etapa tuvo como finalidad disponer de una base de datos confiable y representativa del comportamiento real de la superficie de rodadura.

Posteriormente, los perfiles longitudinales obtenidos fueron procesados utilizando el software especializado ProVAL, mediante el cual se calculó el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) conforme a los procedimientos estandarizados. El cálculo del IRI se realizó segmentando el tramo en intervalos homogéneos, lo que permitió generar series espaciales del índice y facilitar su análisis comparativo entre distintos sectores de la vía.

En la siguiente etapa, los valores de IRI fueron sometidos a un proceso de preprocesamiento, orientado a mejorar la calidad de la señal para su análisis posterior.

Este proceso incluyó la revisión de consistencia de los datos, la eliminación de valores atípicos cuando fue necesario y la aplicación de técnicas de suavizado, como el promedio móvil, con el fin de identificar tendencias locales del comportamiento de la rugosidad y reducir el efecto de fluctuaciones no representativas.

Una vez preprocesada la información, se procedió al análisis espectral del IRI mediante la Transformada de Fourier. Esta etapa permitió identificar las frecuencias dominantes presentes en la señal, asociadas a irregularidades periódicas del pavimento, proporcionando una visión global del comportamiento frecuencial del tramo estudiado.

De manera complementaria, se aplicó la Transformada Wavelet Continua con el propósito de realizar un análisis multiescala del IRI. Esta técnica permitió estudiar simultáneamente la variación espacial y la escala de las irregularidades, facilitando la identificación de eventos localizados y cambios abruptos en la rugosidad que no pueden ser detectados mediante el análisis convencional.

Posteriormente, se desarrolló el análisis no lineal y no estacionario del IRI mediante la Transformada de Hilbert–Huang. A través de la Descomposición Empírica de Modos, la señal fue separada en componentes intrínsecos, permitiendo evaluar la frecuencia instantánea y la distribución energética del IRI a lo largo del tramo, con mayor sensibilidad frente a variaciones locales del pavimento.

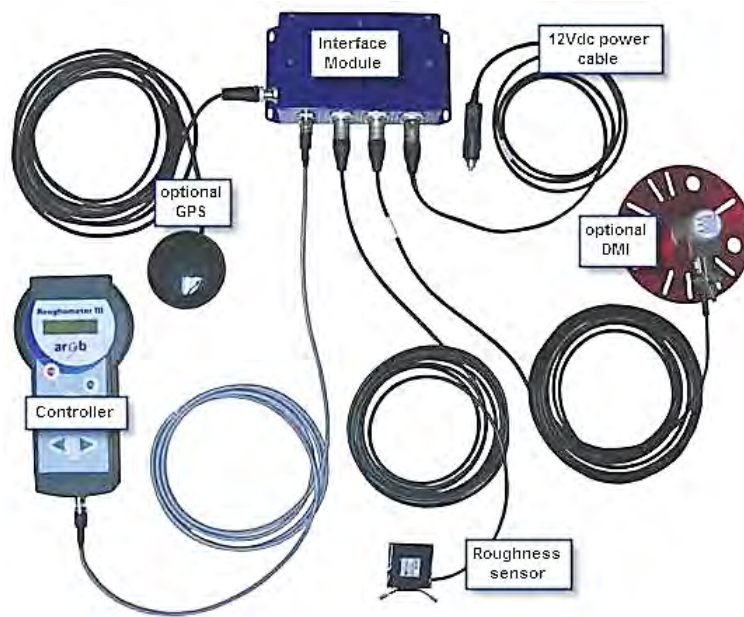
Finalmente, los resultados obtenidos a partir de las transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang fueron comparados e interpretados de manera integrada, contrastándolos con los valores tradicionales del IRI. Esta etapa permitió evaluar la capacidad de las técnicas de procesamiento de señales para complementar el análisis convencional, identificar zonas críticas y aportar criterios técnicos para la toma de decisiones en el mantenimiento vial.

## CAPÍTULO V: ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

### 5.1 Ensayo y recolección de datos

El proceso de instalación del hardware del Rugosímetro III se compone de varias etapas necesarias para su correcto funcionamiento. A continuación, se describe el procedimiento de forma resumida pero detallada.

FIGURA N° 5.1: Componentes del rugómetro III utilizados para la adquisición de datos



**Nota.** Se muestran los componentes principales y la configuración general del sistema Rugómetro III empleados en la medición de la rugosidad longitudinal del pavimento, incluyendo el sensor inercial, el sistema de adquisición de datos y los elementos de referencia de distancia. **Fuente:** Adaptado de *Rugometer III: User manual* (ARRB Group, 2016).

#### Instalación del sensor de rugosidad

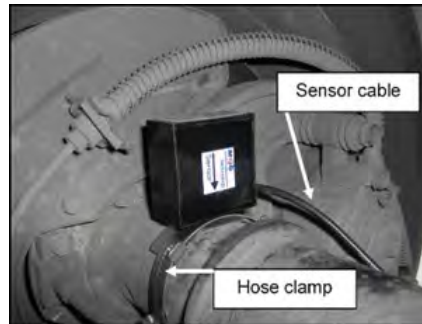
El sistema incluye el controlador, el acelerómetro, el módulo de interfaz, los cables de conexión y componentes opcionales como el receptor GPS y el instrumento de medición de distancia (DMI). Todos estos elementos deben conectarse conforme al manual del usuario, utilizando las piezas suministradas.

FIGURA N° 5.2: *Controlador del rugómetro III*

**Nota.** Se presenta el dispositivo de control y registro del sistema Rugómetro III, utilizado para la configuración del equipo, el monitoreo del funcionamiento y la visualización en tiempo real de los datos de rugosidad durante el proceso de medición en campo. **Fuente:** Adaptado de *Rugometer III: User manual* (ARRB Group, 2016).

#### Instalación del sensor de rugosidad

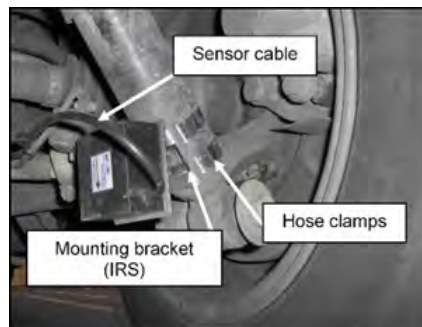
Para vehículos sin suspensión trasera independiente (IRS), el sensor debe instalarse en el eje trasero, próximo a la rueda del lado del conductor. Se utiliza un nivel de burbuja para garantizar su orientación vertical, con la flecha del sensor apuntando hacia abajo. El soporte se fija al eje mediante una abrazadera de manguera.

FIGURA N° 5.3: *Instalación del sensor en el eje trasero del vehículo sin IRS*

**Nota.** Se muestra el esquema de instalación del sensor del sistema Rugómetro III sobre el eje trasero de un vehículo sin sistema de suspensión independiente (IRS), configuración empleada para la medición de la rugosidad longitudinal del pavimento bajo condiciones reales de operación.

**Fuente:** Adaptado de *Rugometer III: User manual* (ARRB Group, 2016).

En vehículos con IRS, el sensor se fija a una placa plana usando tornillos y arandelas. El conjunto se monta en el amortiguador con abrazaderas, cuidando que el sensor quede en posición vertical y no interfiera con el movimiento del amortiguador.

FIGURA N° 5.4: *Instalación del sensor en vehículo con sistema de suspensión independiente (IRS)*

**Nota.** Se presenta el esquema de instalación del sensor del sistema Rugómetro III en un vehículo con sistema de suspensión independiente (IRS), configuración que permite una adecuada transmisión de las irregularidades longitudinales del pavimento hacia el sistema de medición, mejorando la estabilidad del registro y la representatividad de los datos obtenidos. **Fuente:** Adaptado de *Rugometer III: User manual* (ARRB Group, 2016).

#### Enrutamiento del cableado

El cable del sensor debe asegurarse con bridas de nailon y protegerse mediante un conducto flexible. Es crucial evitar su contacto con partes calientes, como el tubo



de escape.

### Sensor de distancia y DMI

En caso de conexión al odómetro del vehículo, se emplea un cable de interfaz con terminales de conexión rápida. Si la señal es débil, puede incorporarse un amplificador de pulsos en línea.

Cuando se instala un DMI opcional, este se monta en la rueda trasera del lado del conductor utilizando una placa personalizada. El rodamiento de soporte se fija al vehículo mediante un soporte universal o una ventosa tipo \*Power Grip\*.

FIGURA N° 5.5: *Instalación del DMI en la rueda trasera*



**Nota.** Se muestra la instalación del indicador de distancia (DMI), instrumento de medición acoplado a la rueda trasera del vehículo, utilizado para el registro preciso de la distancia recorrida durante la adquisición de datos de rugosidad longitudinal del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

### Configuración del módulo de interfaz

El módulo de interfaz debe configurarse de acuerdo con el tipo de sensor de distancia utilizado: odómetro, DMI o codificador de eje incremental. Si se reemplaza el sensor, es necesario ajustar internamente la configuración del módulo.

### Instalación del GPS y alimentación

El receptor GPS (opcional) debe colocarse sobre el techo o tablero del vehículo. En caso de no utilizar GPS, el sistema funcionará sin georreferenciación. La alimentación del sistema se realiza mediante una fuente de 12 V CC, ya sea a través del conector del encendedor o directamente desde la batería.

### Encendido y configuración del controlador

Al encender el sistema, debe verificarse que el módulo de interfaz esté activo y que el controlador supere las comprobaciones de arranque. Luego, desde el menú del controlador, se accede a funciones como calibración, diagnóstico, configuración de entradas, y ajuste de fecha y hora.

Este procedimiento debe ser realizado por personal capacitado, con el fin de garantizar la seguridad y evitar interferencias con los sistemas propios del vehículo.

## 5.2 RESULTADOS IRI RUGOSIMETRO III

### 5.2.1 Resultados

TABLA N° 5.1: Datos extraídos del archivo Excel.

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
4+500	4+600	0,100	2.56	3.83	3.20	2.56
4+600	4+700	0,100	2.63	3.85	3.24	2.74
4+700	4+800	0,100	2.81	3.58	3.19	2.78
4+800	4+900	0,100	2.75	3.19	2.97	2.81
4+900	5+000	0,100	3.07	2.87	2.97	2.90
5+000	5+100	0,100	3.09	2.90	3.00	3.09
5+100	5+200	0,100	2.37	2.96	2.66	3.03
5+200	5+300	0,100	1.98	2.47	2.23	2.93
5+300	5+400	0,100	2.36	3.38	2.87	2.93
5+400	5+500	0,100	1.48	2.02	1.75	2.81
5+500	5+600	0,100	2.78	3.29	3.03	2.79
5+600	5+700	0,100	2.68	3.36	3.02	2.77
5+700	5+800	0,100	2.35	2.43	2.39	2.69
5+800	5+900	0,100	2.78	2.52	2.65	2.66
5+900	6+000	0,100	2.01	2.15	2.08	2.57
6+000	6+100	0,100	1.99	1.89	1.94	2.46

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
6+100	6+200	0,100	2.22	2.76	2.49	2.44
6+200	6+300	0,100	2.52	2.71	2.62	2.48
6+300	6+400	0,100	1.86	2.12	1.99	2.40
6+400	6+500	0,100	1.35	2.13	1.74	2.39
6+500	6+600	0,100	1.47	1.55	1.51	2.24
6+600	6+700	0,100	1.71	1.94	1.83	2.12
6+700	6+800	0,100	2.60	2.84	2.72	2.16
6+800	6+900	0,100	2.09	2.16	2.13	2.10
6+900	7+000	0,100	2.30	3.53	2.91	2.19
7+000	7+100	0,100	2.05	2.37	2.21	2.21
7+100	7+200	0,100	1.67	2.18	1.93	2.16
7+200	7+300	0,100	1.87	2.08	1.97	2.09
7+300	7+400	0,100	1.96	2.08	2.02	2.10
7+400	7+500	0,100	2.23	2.76	2.50	2.17
7+500	7+600	0,100	2.38	2.15	2.27	2.25
7+600	7+700	0,100	1.45	1.53	1.49	2.21
7+700	7+800	0,100	1.92	2.29	2.10	2.15
7+800	7+900	0,100	2.05	1.89	1.97	2.14
7+900	8+000	0,100	1.50	2.09	1.79	2.02
8+000	8+100	0,100	1.84	1.72	1.78	1.98
8+100	8+200	0,100	1.23	1.19	1.21	1.91
8+200	8+300	0,100	1.26	1.44	1.35	1.85
8+300	8+400	0,100	1.44	1.49	1.47	1.79
8+400	8+500	0,100	1.56	1.45	1.50	1.69
8+500	8+600	0,100	1.31	1.59	1.45	1.61
8+600	8+700	0,100	1.34	1.37	1.36	1.60

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
8+700	8+800	0,100	0.99	1.02	1.00	1.49
8+800	8+900	0,100	1.01	0.91	0.96	1.39
8+900	9+000	0,100	0.94	1.07	1.01	1.31
9+000	9+100	0,100	1.55	5.46	3.50	1.48
9+100	9+200	0,100	0.99	1.25	1.12	1.47
9+200	9+300	0,100	1.10	1.36	1.23	1.46
9+300	9+400	0,100	0.99	1.36	1.18	1.43
9+400	9+500	0,100	1.06	1.53	1.29	1.41
9+500	9+600	0,100	1.11	1.32	1.22	1.39
9+600	9+700	0,100	2.91	2.62	2.76	1.53
9+700	9+800	0,100	2.13	2.16	2.15	1.64
9+800	9+900	0,100	2.64	1.99	2.32	1.78
9+900	10+000	0,100	2.88	2.70	2.79	1.96
10+000	10+100	0,100	2.70	2.23	2.47	1.85
10+100	10+200	0,100	1.79	2.27	2.03	1.94
10+200	10+300	0,100	1.73	2.16	1.95	2.01
10+300	10+400	0,100	2.00	2.31	2.15	2.11
10+400	10+500	0,100	2.06	2.00	2.03	2.19
10+500	10+600	0,100	1.26	1.30	1.28	2.19
10+600	10+700	0,100	1.20	1.08	1.14	2.03
10+700	10+800	0,100	1.02	1.09	1.06	1.92
10+800	10+900	0,100	1.28	1.30	1.29	1.82
10+900	11+000	0,100	1.15	1.07	1.11	1.65
11+000	11+100	0,100	1.00	1.08	1.04	1.51
11+100	11+200	0,100	1.17	1.44	1.31	1.44
11+200	11+300	0,100	1.16	1.13	1.14	1.35

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
11+300	11+400	0,100	1.19	1.56	1.38	1.28
11+400	11+500	0,100	0.99	1.00	1.00	1.17
11+500	11+600	0,100	1.15	1.17	1.16	1.16
11+600	11+700	0,100	1.43	1.49	1.46	1.19
11+700	11+800	0,100	1.08	1.17	1.13	1.20
11+800	11+900	0,100	1.46	1.50	1.48	1.22
11+900	12+000	0,100	1.13	1.54	1.33	1.24
12+000	12+100	0,100	1.18	1.15	1.16	1.25
12+100	12+200	0,100	1.09	1.30	1.19	1.24
12+200	12+300	0,100	0.85	1.03	0.94	1.22
12+300	12+400	0,100	2.46	3.02	2.74	1.36
12+400	12+500	0,100	1.66	1.93	1.79	1.44
12+500	12+600	0,100	2.25	2.08	2.16	1.54
12+600	12+700	0,100	1.76	1.88	1.82	1.58
12+700	12+800	0,100	2.84	3.13	2.99	1.76
12+800	12+900	0,100	1.39	1.42	1.40	1.75
12+900	13+000	0,100	1.46	1.57	1.52	1.77
13+000	13+100	0,100	1.29	1.34	1.31	1.79
13+100	13+200	0,100	1.77	2.28	2.02	1.87
13+200	13+300	0,100	1.38	1.52	1.45	1.92
13+300	13+400	0,100	1.50	1.45	1.48	1.79
13+400	13+500	0,100	1.30	1.32	1.31	1.75
13+500	13+600	0,100	1.30	1.23	1.26	1.66
13+600	13+700	0,100	1.79	1.97	1.88	1.66
13+700	13+800	0,100	1.06	1.12	1.09	1.47
13+800	13+900	0,100	1.68	1.56	1.62	1.49

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
13+900	14+000	0,100	1.40	1.70	1.55	1.50
14+000	14+100	0,100	1.09	1.22	1.16	1.48
14+100	14+200	0,100	1.08	1.10	1.09	1.39
14+200	14+300	0,100	1.09	1.24	1.17	1.36
14+300	14+400	0,100	1.07	1.21	1.14	1.33
14+400	14+500	0,100	1.09	1.09	1.09	1.30
14+500	14+600	0,100	1.97	2.04	2.00	1.38
14+600	14+700	0,100	1.28	1.10	1.19	1.31
14+700	14+800	0,100	1.22	1.18	1.20	1.32
14+800	14+900	0,100	1.53	1.46	1.50	1.31
14+900	15+000	0,100	1.26	1.26	1.26	1.28
15+000	15+100	0,100	3.20	2.82	3.01	1.46
15+100	15+200	0,100	2.23	2.39	2.31	1.59
15+200	15+300	0,100	1.37	2.01	1.69	1.64
15+300	15+400	0,100	1.99	2.54	2.26	1.75
15+400	15+500	0,100	2.11	2.18	2.14	1.86
15+500	15+600	0,100	2.89	2.82	2.86	1.94
15+600	15+700	0,100	1.98	1.89	1.94	2.02
15+700	15+800	0,100	1.72	1.85	1.79	2.08
15+800	15+900	0,100	1.87	1.81	1.84	2.11
15+900	16+000	0,100	1.97	2.14	2.06	2.19
16+000	16+100	0,100	1.87	1.93	1.90	2.08
16+100	16+200	0,100	1.75	2.07	1.91	2.04
16+200	16+300	0,100	1.08	1.53	1.31	2.00
16+300	16+400	0,100	0.87	1.49	1.18	1.89
16+400	16+500	0,100	1.27	1.68	1.47	1.82

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
16+500	16+600	0,100	2.64	3.42	3.03	1.84
16+600	16+700	0,100	2.30	2.73	2.51	1.90
16+700	16+800	0,100	2.09	2.40	2.25	1.95
16+800	16+900	0,100	2.06	1.96	2.01	1.96
16+900	17+000	0,100	3.22	3.01	3.12	2.07
17+000	17+100	0,100	2.52	3.27	2.89	2.17
17+100	17+200	0,100	1.85	2.26	2.06	2.18
17+200	17+300	0,100	1.17	1.75	1.46	2.20
17+300	17+400	0,100	1.30	1.83	1.56	2.24
17+400	17+500	0,100	1.42	1.97	1.69	2.26
17+500	17+600	0,100	1.01	3.09	2.05	2.16
17+600	17+700	0,100	1.08	1.40	1.24	2.03
17+700	17+800	0,100	0.96	1.22	1.09	1.92
17+800	17+900	0,100	1.28	1.58	1.43	1.86
17+900	18+000	0,100	0.66	1.38	1.02	1.65
18+000	18+100	0,100	0.94	1.69	1.32	1.49
18+100	18+200	0,100	2.18	2.61	2.39	1.53
18+200	18+300	0,100	1.68	1.87	1.77	1.56
18+300	18+400	0,100	1.67	2.15	1.91	1.59
18+400	18+500	0,100	1.75	2.05	1.90	1.61
18+500	18+600	0,100	1.66	1.62	1.64	1.57
18+600	18+700	0,100	1.61	1.78	1.69	1.62
18+700	18+800	0,100	2.01	2.13	2.07	1.72
18+800	18+900	0,100	1.48	2.18	1.83	1.76
18+900	19+000	0,100	1.61	2.19	1.90	1.84
19+000	19+100	0,100	2.90	2.89	2.90	2.00

PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
19+100	19+200	0,100	2.95	2.87	2.91	2.05
19+200	19+300	0,100	1.51	1.43	1.47	2.02
19+300	19+400	0,100	0.95	1.55	1.25	1.96
19+400	19+500	0,100	1.15	1.43	1.29	1.90
19+500	19+600	0,100	1.50	2.22	1.86	1.92
19+600	19+700	0,100	0.97	1.57	1.27	1.87
19+700	19+800	0,100	1.04	1.48	1.26	1.79
19+800	19+900	0,100	1.41	1.50	1.45	1.76
19+900	20+000	0,100	0.93	1.12	1.03	1.67
20+000	20+100	0,100	3.23	3.53	3.38	1.72
20+100	20+200	0,100	2.70	2.42	2.56	1.68
20+200	20+300	0,100	2.65	3.24	2.95	1.83
20+300	20+400	0,100	3.44	4.33	3.88	2.09
20+400	20+500	0,100	3.15	3.47	3.31	2.30
20+500	20+600	0,100	2.52	3.04	2.78	2.39
20+600	20+700	0,100	3.40	3.97	3.69	2.63
20+700	20+800	0,100	3.07	2.89	2.98	2.80
20+800	20+900	0,100	2.65	2.54	2.60	2.91
20+900	21+000	0,100	2.35	2.72	2.53	3.07
21+000	21+100	0,100	2.36	2.31	2.33	2.96
21+100	21+200	0,100	2.11	2.22	2.16	2.92
21+200	21+300	0,100	2.24	3.21	2.73	2.90
21+300	21+400	0,100	2.76	4.28	3.52	2.86
21+400	21+500	0,100	2.77	3.88	3.33	2.86
21+500	21+600	0,100	2.90	3.48	3.19	2.91
21+600	21+700	0,100	2.87	3.32	3.09	2.85

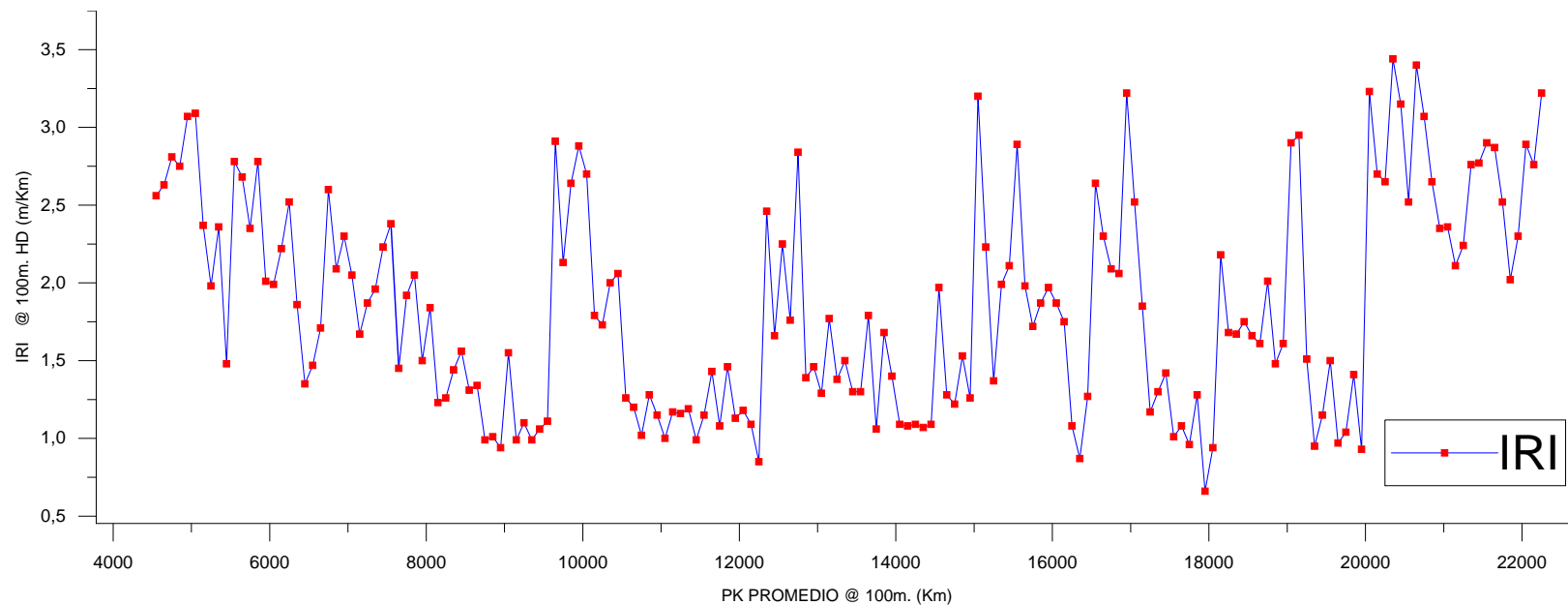


PK Inicio @ 100m (Km)	PK Final @ 100m (Km)	Longitud del Tramo (Km)	IRI @ 100m HD (m/Km)	IRI @ 100m HI (m/Km)	IRI Individual (m/Km)	IRI Media Móvil (m/Km)
21+700	21+800	0,100	2.52	4.39	3.45	2.89
21+800	21+900	0,100	2.02	4.27	3.14	2.95
21+900	22+000	0,100	2.30	3.80	3.05	3.00
22+000	22+100	0,100	2.89	3.49	3.19	3.09
22+100	22+200	0,100	2.76	3.85	3.30	3.20
22+200	22+250	0,50	3.22	2.99	3.10	3.24

*Nota.* La tabla presenta los resultados del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculados cada 100 m a partir de los datos registrados en campo mediante el Rugómetro III. Se incluyen los valores de IRI por carril derecho (HD) e izquierdo (HI), así como el IRI individual y el IRI suavizado mediante media móvil, los cuales permiten analizar la variabilidad longitudinal de la rugosidad del pavimento e identificar tramos con comportamiento funcional diferenciado. Elaboración propia.

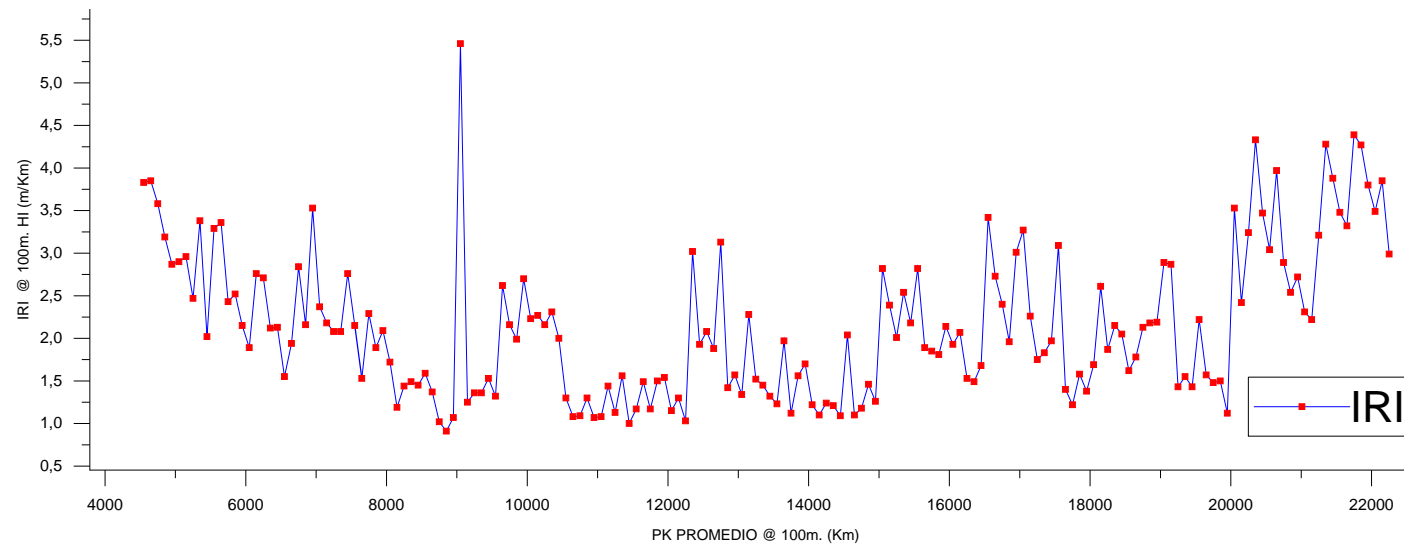
### 5.3 GRAFICOS ESTADISTICOS DE COMPORTAMIENTO IRI

FIGURA N° 5.6: Valor del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en el carril derecho (HD = “Hand Derecha” o carril derecho), en tramos de 100 metros.



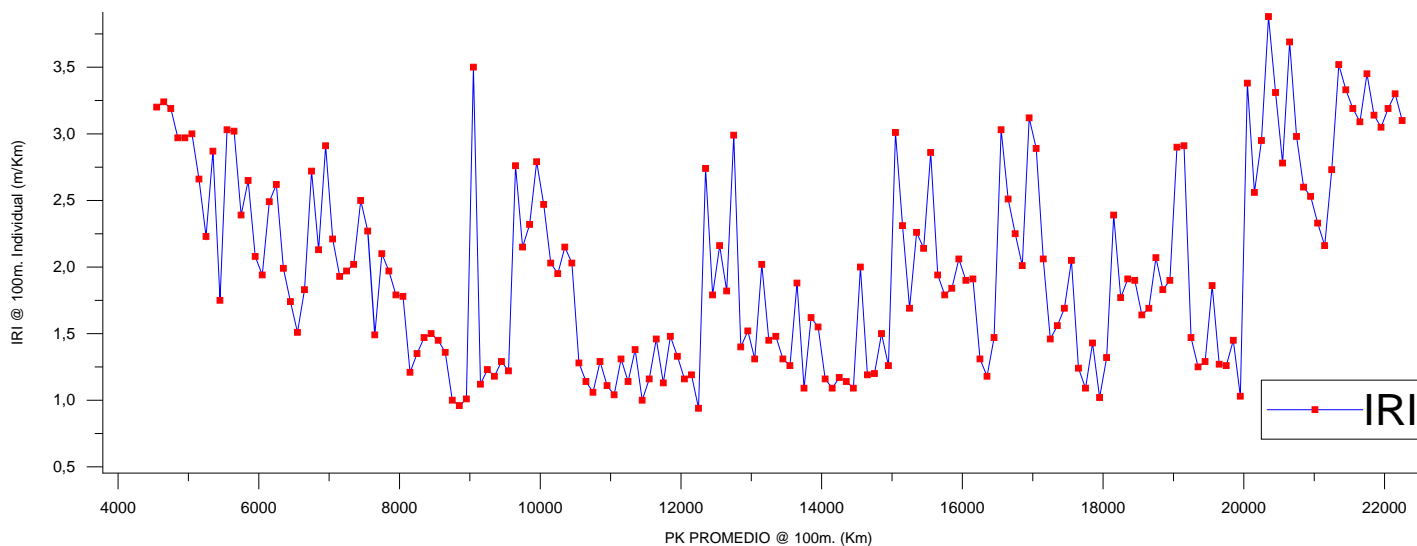
*Nota.* La figura muestra la variación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculado cada 100 m en el carril derecho del tramo evaluado. Los valores evidencian una alta variabilidad espacial de la rugosidad, con la presencia de incrementos puntuales asociados a irregularidades superficiales y zonas de deterioro localizado, así como tramos con comportamiento funcional más uniforme. Estos resultados permiten identificar sectores críticos del pavimento y constituyen un insumo fundamental para la evaluación del confort de rodadura y la priorización de intervenciones de mantenimiento. Elaboración propia.

FIGURA N° 5.7: Valor del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en el carril izquierdo (HI = “Hand Izquierda” o carril izquierdo), en tramos de 100 metros.



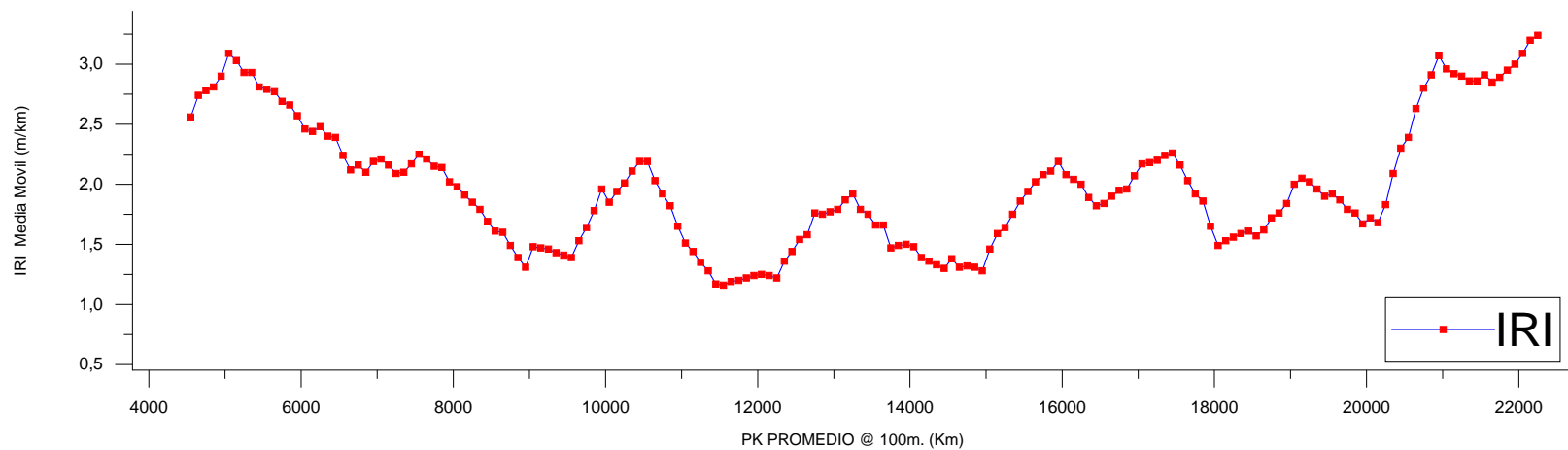
*Nota.* La figura representa la variación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculado cada 100 m en el carril izquierdo del tramo analizado. Se observa una marcada variabilidad espacial de la rugosidad, con picos aislados que evidencian irregularidades localizadas del pavimento, así como sectores con valores más homogéneos que reflejan mejores condiciones funcionales. El análisis comparativo de estos resultados permite identificar diferencias de comportamiento entre carriles y constituye un insumo relevante para la evaluación del confort de rodadura y la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento vial. Elaboración propia.

FIGURA N° 5.8: Valor individual del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para cada tramo de 100 metros, calculado como valor específico representativo del tramo.



*Nota.* La figura presenta el valor individual del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculado para cada tramo de 100 m, obtenido a partir de las mediciones realizadas con el Rugómetro III. Estos valores representan de manera específica el comportamiento funcional de cada segmento del pavimento, permitiendo identificar variaciones locales de la rugosidad que pueden no ser evidentes en indicadores promediados. El análisis del IRI individual constituye una herramienta fundamental para la detección de irregularidades puntuales, la delimitación de tramos críticos y la priorización de intervenciones de mantenimiento vial. Elaboración propia.

FIGURA N° 5.9: Promedio móvil del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para el análisis de tendencias locales, expresado en m/Km.



*Nota.* La figura muestra el promedio móvil del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculado a partir de los valores individuales obtenidos cada 100 m mediante el Rugómetro III. La aplicación del promedio móvil permite suavizar las fluctuaciones de corto alcance y resaltar las tendencias longitudinales del comportamiento funcional del pavimento, facilitando la identificación de tramos con deterioro progresivo o mejoras relativas en la condición superficial. Estos resultados constituyen un insumo relevante para el análisis del desempeño del pavimento y la planificación de intervenciones de mantenimiento a escala de tramo. Elaboración propia.

#### 5.4 Procedimiento de montaje y toma de datos con perfilómetro láser

El siguiente procedimiento describe el montaje del perfilómetro láser y la metodología aplicada para obtener perfiles longitudinales del tramo evaluado. El objetivo es asegurar datos consistentes, estables y útiles para el cálculo del IRI y para los análisis por Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang.

FIGURA N° 5.10: Módulo Dynatest 8051 MK IV



**Nota.** Se presenta el módulo Dynatest 8051 MK IV instalado en la progresiva inicial del tramo de estudio, previo al inicio de las mediciones de rugosidad longitudinal del pavimento. El registro fue realizado durante la etapa de trabajo de campo, a las 10:00 a. m., bajo condiciones operativas normales, como parte del procedimiento de adquisición de datos para la determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). **Fuente:** Elaboración propia.

##### 5.4.1 Montaje del perfilómetro láser

El perfilómetro se instala sobre un soporte rígido fijado al vehículo de medición. La estructura debe ser estable y sin juego, de modo que la vibración del chasis no altere la lectura del sensor. La altura nominal entre el sensor láser y la superficie del pavimento se fija generalmente entre 20 cm y 40 cm. Esta altura se registra al inicio del día de medición para evitar variaciones entre sesiones. El sensor de-

be orientarse casi perpendicular al pavimento, con un pequeño ángulo que impida reflexiones directas pero sin desviar la lectura.

El encoder de rueda se acopla a una rueda secundaria o de medición, garantizando que el conteo de pulsos por metro se mantenga constante durante todo el recorrido. Previo al trabajo de campo, se determina la circunferencia efectiva de la rueda para asegurar que la distancia registrada corresponda con precisión al avance real. El acelerómetro vertical se ubica cerca del eje de medición y se conecta al registrador para complementar la corrección dinámica.

El sistema de adquisición integra los tres componentes: láser, encoder y acelerómetro. Todas las señales son sincronizadas por un único reloj interno. En caso de emplearse GPS, este se usa únicamente para referencia de posición y marcado de eventos, sin intervenir en la distancia principal del perfil.

La medición se realiza a una velocidad estable comprendida entre 50 km/h y 80 km/h. Este rango permite mantener un paso espacial cercano a los 2.5 cm cuando el láser trabaja en una frecuencia de muestreo adecuada. La distancia se controla exclusivamente mediante el encoder, ya que la velocidad del vehículo puede presentar pequeñas fluctuaciones. El archivo de salida se genera en formato RSP, que incluye los encabezados 5001 y 5002 con la información del proyecto, la configuración del equipo y los parámetros del ensayo, mientras que los registros 5405 contienen la serie principal del perfil.

FIGURA N° 5.11: *Módulo Rugosímetro III ARB*

**Nota.** Se presenta el módulo Rugosímetro III ARB dispuesto en la progresiva inicial del tramo de estudio, como parte del equipamiento empleado para la medición de la rugosidad longitudinal del pavimento. El registro fue realizado durante la etapa de trabajo de campo, a las 10:00 a. m., bajo condiciones operativas normales, previo al inicio del recorrido de evaluación para la determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). **Fuente:** Elaboración propia.

#### 5.4.2 Verificaciones previas

Antes de iniciar un tramo, se realiza una verificación breve sobre una superficie plana o un segmento corto de prueba. Aquí se confirma que el láser registra sin saltos, que el encoder entrega una distancia acumulada correcta y que la señal del acelerómetro no presenta saturación. También se revisa la presión de los neumáticos, el estado de la suspensión y cualquier factor que pueda alterar la estabilidad del montaje. Una vez validado, se registra en bitácora la altura del sensor, la inclinación, las condiciones ambientales y cualquier ajuste particular del día.

#### 5.4.3 Procedimiento de toma de datos

El vehículo se posiciona unos metros antes del punto inicial. La adquisición se activa unos segundos antes de iniciar el movimiento para registrar una línea base. A partir de ello, el conductor alcanza la velocidad objetivo y la mantiene lo más estable posible. Durante el recorrido se sigue la línea de rodadura prevista para el carril evaluado, evitando maniobras bruscas, frenadas o cambios repentinos de trayectoria.

Los eventos importantes del tramo, como puentes, juntas, baches o interrupciones de tráfico, se marcan mediante el sistema de registro o se anotan en la bitácora.



Al llegar al punto final, se continúa grabando unos segundos adicionales antes de detener la adquisición. Esto asegura que el perfil no quede cortado justo al finalizar.

Cuando se necesita evaluar más de un carril o sentido, el proceso se repite manteniendo la misma configuración del equipo para asegurar comparabilidad. En caso de trayectos muy largos, puede añadirse un punto de control intermedio para verificar que el encoder no presenta desviaciones acumuladas.

#### 5.4.4 Verificación posterior y control de calidad

Al concluir la jornada se ejecuta nuevamente un tramo corto de control. Este segundo registro permite comparar la estabilidad del sistema entre el inicio y el final del día. Si la diferencia en la elevación registrada es mínima, los datos del recorrido principal se consideran confiables. Los archivos se respaldan inmediatamente y se anotan condiciones especiales del tráfico, clima, vibración o interferencias que pudieran explicar comportamientos particulares del perfil.

En el posproceso, el archivo crudo RSP se conserva intacto. Se trabaja únicamente sobre una copia en la que se aplican detrend, revisión de valores atípicos y los análisis correspondientes. La consistencia del paso espacial se vuelve a verificar antes de proceder con Fourier, Wavelet o Hilbert–Huang, ya que cualquier variación en la distancia afectaría la interpretación de las frecuencias y escalas.

#### 5.5 Formato de datos del perfilómetro y programas utilizados

El perfilómetro utilizado en la presente investigación genera sus mediciones en el formato RSP, estándar de los sistemas Dynatest para el registro de perfiles longitudinales. Este formato almacena la información en bloques consecutivos que incluyen la configuración del ensayo, las condiciones del equipo y la serie principal del perfil. Su estructura facilita la trazabilidad completa desde la toma de datos hasta el análisis espectral, pues conserva los valores crudos de elevación sin alteraciones externas.

El archivo RSP se organiza mediante encabezados identificados con los códigos 5001 y 5002. El encabezado 5001 contiene la información general del proyecto, el tramo evaluado, el sentido de avance, los datos del operador y la fecha de adquisición. Por su parte, el encabezado 5002 agrupa los parámetros del equipo, tales como la frecuencia de muestreo, la velocidad objetivo aproximada y las calibraciones de altura e inclinación del sensor. Estos valores permiten recuperar las condiciones exactas bajo las cuales fue generado el perfil.

FIGURA N° 5.12: Modelo de datos extraídos del perfilómetro visualizados en el software Notepad++

```

1 5001,36.00,1.40,"RepWin 2.8.12",6.00,"GUID-SIMULADO"
2 5002,"INN-2SI","EMBEDDED","5051-SIM"
3 5003,"OPERATOR","PROJECT","SIMFILE","RSP"
4 5010,0,0,0,0,0,0,3,1,0,0,0,0,0,0,0,0,"SI","kilometers"
5 5020,0,0,0.100,0.50,9.820,1,11,1,21,11,21,0,25,5,26.9,5,17
6 5030,"Sim-User"
7 5031,"Sim-Street","AI","Motorway","ACC"
8 5405,0.000000,0.025000,-822.45,-818.19,-833.90
9 5405,0.025000,0.050000,-822.82,-818.47,-834.36
10 5405,0.050000,0.075000,-822.53,-818.29,-834.06
11 5405,0.075000,0.100000,-822.66,-818.42,-834.22
12 5405,0.100000,0.125000,-822.88,-818.59,-834.48
13 5405,0.125000,0.150000,-822.50,-818.15,-833.89
14 5405,0.150000,0.175000,-822.43,-818.17,-834.23
15 5405,0.175000,0.200000,-822.58,-818.15,-833.89
16 5405,0.200000,0.225000,-823.21,-818.68,-834.36
17 5405,0.225000,0.250000,-822.82,-818.33,-834.07
18 5405,0.250000,0.275000,-822.74,-818.40,-834.16
19 5405,0.275000,0.300000,-823.21,-818.99,-834.70
20 5405,0.300000,0.325000,-822.77,-818.26,-833.96
21 5405,0.325000,0.350000,-822.52,-818.25,-833.91
22 5405,0.350000,0.375000,-823.16,-818.63,-834.17
23 5405,0.375000,0.400000,-822.45,-818.08,-833.73
24 5405,0.400000,0.425000,-823.08,-818.58,-834.14
25 5405,0.425000,0.450000,-822.72,-818.32,-833.95
26 5405,0.450000,0.475000,-822.82,-818.41,-833.99
27 5405,0.475000,0.500000,-822.51,-818.02,-833.74
28 5405,0.500000,0.525000,-822.49,-818.03,-833.55
29 5405,0.525000,0.550000,-822.36,-817.90,-833.69
30 5405,0.550000,0.575000,-823.20,-818.62,-834.35
31 5405,0.575000,0.600000,-823.07,-818.48,-834.27
32 5405,0.600000,0.625000,-823.06,-818.55,-834.37
33 5405,0.625000,0.650000,-822.63,-818.04,-833.82
34 5405,0.650000,0.675000,-822.52,-818.02,-834.04

```

**Nota.** Se presenta la estructura del archivo de datos generado a partir de las mediciones del perfilómetro, en el que se registran los valores de elevación del perfil longitudinal del pavimento a intervalos regulares de muestreo. Los datos, visualizados mediante el software Notepad++, corresponden a información cruda utilizada como insumo para las etapas de procesamiento, filtrado y análisis posterior del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), incluyendo procedimientos de detrending y segmentación del perfil. **Fuente:** Elaboración propia.

### 5.5.1 Verificaciones previas

La información principal del pavimento se almacena en los registros 5405, que representan cada punto del perfil según el paso espacial definido por el encoder. Cada registro contiene la distancia acumulada y la irregularidad vertical asociada a ese punto. La secuencia completa de registros constituye la señal longitudinal sobre la cual se estiman los índices de rugosidad y se desarrollan los análisis espectrales. En esta investigación se ha preservado íntegramente la señal cruda para asegurar la validez de las transformaciones y evitar pérdidas de información.

El análisis del archivo RSP se realiza mediante dos tipos de herramientas. La primera corresponde a los programas especializados en perfil longitudinal. Entre ellos destaca ProVAL, que permite verificar la consistencia del paso espacial, explorar visualmente la señal, estimar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y revisar la repetibilidad entre pasadas. Su uso garantiza que los datos cumplan con los lineamientos técnicos para estudios de pavimentos.

FIGURA N° 5.13: *Procesamiento de datos del perfil longitudinal en el software ProVAL*

**Nota.** Se presenta la interfaz del software ProVAL durante la etapa de procesamiento de los datos del perfil longitudinal obtenidos en campo, en la que se visualizan los perfiles de elevación en función de la distancia para diferentes secciones del tramo evaluado. Este procesamiento permite la verificación de la calidad de los datos, la comparación entre perfiles y la preparación de la información para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el análisis posterior del comportamiento funcional del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

La segunda categoría incluye los programas de análisis científico empleados para estudiar las características ondulatorias del perfil. En esta investigación se han utilizado Python y MATLAB como entornos principales. Ambos permiten aplicar transformadas de Fourier, análisis Wavelet continuo y el método Hilbert–Huang mediante descomposición empírica en modos (EMD). Estas herramientas posibilitan desglosar el perfil en componentes de frecuencia variable, identificar patrones de deformación y representar la energía del pavimento en el dominio tiempo–frecuencia.

El procesamiento se realiza únicamente sobre una copia del archivo, manteniendo el RSP original como respaldo. Los códigos generados permiten leer los registros 5405, reconstruir la señal longitudinal a partir de la distancia y la irregularidad, verificar la continuidad de los datos y preparar la serie para los análisis espectrales. Gracias a esta metodología, el flujo completo entre el perfil tomado en campo y los resultados gráficos de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang se mantiene ordenado, reproducible y científicamente verificable.

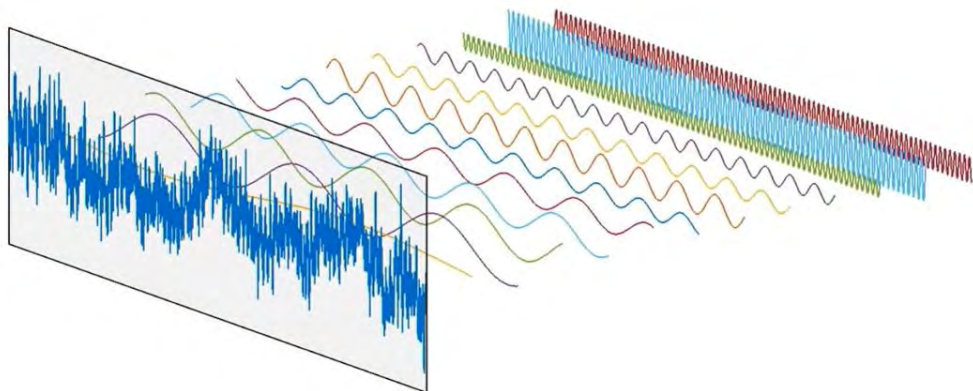
## CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 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 6.1.

FIGURA N° 6.1: *Esquematización de la descomposición de un perfil longitudinal del pavimento en funciones sinusoidales*



**Nota.** Se presenta un esquema conceptual de la descomposición de un perfil longitudinal del pavimento en funciones sinusoidales, empleada como base para el análisis espectral de la rugosidad mediante la Transformada de Fourier. **Fuente:** Adaptado de Márquez, Díaz y González (2023), *Evaluación de perfiles de pavimentos basados en la densidad espectral de potencia como un complemento al Índice de Rugosidad Internacional (IRI)*, presentado en el 14.º Congreso Internacional ProVAL.

La densidad espectral es una función que describe la manera en que la varianza de un perfil se encuentra distribuida entre las distintas componentes sinusoidales que, al superponerse, permiten aproximar dicho perfil. En términos estadísticos, representa la relevancia de las diferentes longitudes de onda que conforman el perfil longitudinal, considerando su contribución en amplitud. La representación gráfica de estas amplitudes en función de sus respectivas longitudes de onda se conoce como periodograma o gráfico de densidad espectral de potencia (DEP), también denominado PSD por sus siglas en inglés (Power Spectral Density). De acuerdo con la norma ISO (2016), la función PSD puede calcularse a partir del perfil de elevaciones o del perfil de pendientes; en este último caso, las amplitudes obtenidas se distribuyen de manera más uniforme a lo largo del espectro de longitudes de onda, lo que facilita una mejor identificación y visualización de las distintas características asociadas a la irregularidad del pavimento (Sayers y Karamihas, 1998).

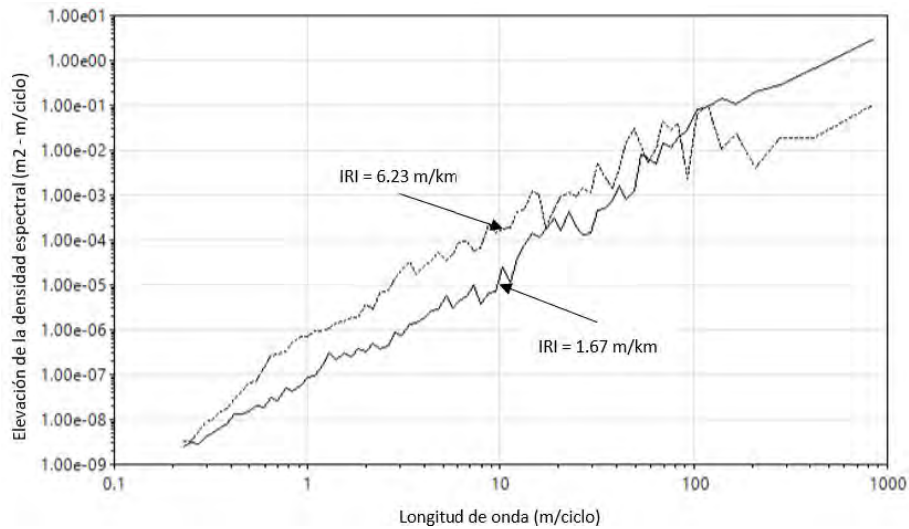
El cálculo de la DEP se realiza en tres etapas:

- **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.
- **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).
- **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 origina 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 1

*Esquematzación de la descomposición de un perfil longitudinal del pavimento en funciones sinusoidales*

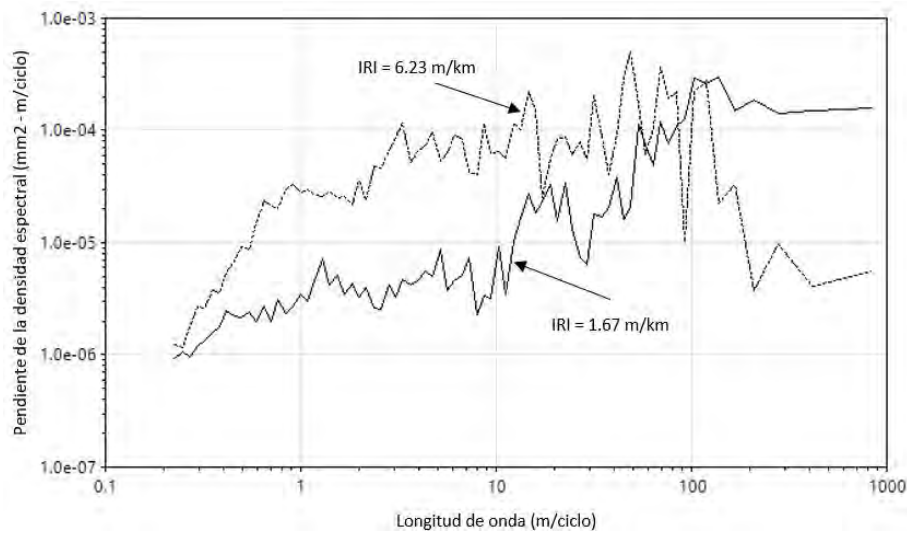


*Nota.* La figura ilustra la representación conceptual de un perfil longitudinal del pavimento descompuesto en un conjunto de funciones sinusoidales, base del análisis espectral aplicado al estudio de la rugosidad vial. *Fuente:* Adaptado de Márquez, Díaz y González (2023), *Evaluación de perfiles de pavimentos basados en la densidad espectral de potencia como un complemento al Índice de Rugosidad Internacional (IRI)*.

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

Figura 2

*Esquematzación de la pendiente de la densidad espectral asociada a un perfil longitudinal del pavimento*



*Nota.* La figura representa de manera conceptual la pendiente de la densidad espectral de potencia asociada al perfil longitudinal del pavimento, utilizada para caracterizar la distribución de energía de la señal en el dominio de la frecuencia y su relación con los distintos niveles de rugosidad superficial. *Fuente:* Adaptado de Márquez, Díaz y González (2023), *Evaluación de perfiles de pavimentos basados en la densidad espectral de potencia como un complemento al Índice de Rugosidad Internacional (IRI)*.

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 función de longitudes de onda representativas*

Longitud de onda (m)	Número de onda (m/ciclo)	Descripción
0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	Pavimentos rugosos con daños superficiales en la capa de rodadura.
1.0 – 2.0	0.5 – 1.0	Pavimentos rugosos con irregularidades superficiales de corta longitud de onda.
2.0 – 10.0	0.1 – 0.5	Superficies con presencia de deformaciones diferenciales de mediana escala.
10.0 – 35.0	0.01 – 0.1	Superficies con deformaciones diferenciales de mayor longitud de onda.
35.0 – 100.0	0.03 – 0.01	Longitudes de onda características de pavimentos recién construidos.

*Nota.* La tabla presenta la discretización de bandas de longitudes de onda y su correspondiente número de onda, empleadas para la caracterización del perfil longitudinal del pavimento y su interpretación en el análisis espectral de la rugosidad. *Fuente:* Elaboración propia.

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.

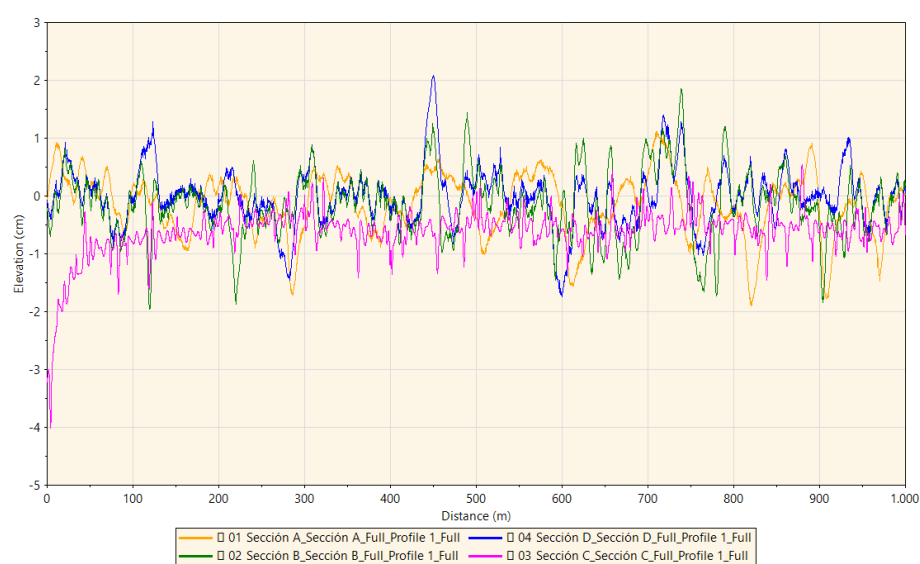
## 6.2 Caso de aplicación: análisis DEP para evaluar el comportamiento de pavimentos con diferentes niveles de rugosidad.

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.

Para todas las secciones, el perfil longitudinal fue evaluado con un perfilómetro láser 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  $\pm 6$  g. En la Fi-



**Figura 3**  
**Perfiles longitudinales del pavimento correspondientes a cuatro secciones del tramo evaluado**



**Nota.** La figura presenta los perfiles longitudinales de elevación del pavimento obtenidos para cuatro secciones del tramo analizado, expresados en función de la distancia. Las variaciones observadas reflejan irregularidades de distinta escala espacial, las cuales constituyen la base para el análisis del comportamiento funcional del pavimento y el posterior cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). *Fuente:* Elaboración propia.

gura 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 4  
 Densidad espectral del perfil longitudinal para las secciones evaluadas



(a) Densidad espectral del perfil de elevaciones



(b) Densidad espectral del perfil de pendiente

*Nota.* La figura presenta la densidad espectral de potencia obtenida a partir del análisis del perfil longitudinal del pavimento para cuatro secciones del tramo evaluado: (a) densidad espectral del perfil de elevaciones y (b) densidad espectral del perfil de pendiente. El análisis espectral permite caracterizar la distribución de energía de las irregularidades del pavimento en función de la longitud de onda, identificando distintos rangos asociados a variaciones de corto, medio y largo alcance, lo cual complementa la evaluación tradicional basada en el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). *Fuente:* Elaboración propia.

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 del IRI y parámetros espectrales por sección evaluada*

Sección	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	12.20	1.95E-02	2.37E-02	2.91E-02	2.86E-02	2.49E-02

*Nota.* La tabla presenta los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y los parámetros espectrales asociados a distintas bandas de longitud de onda para cada sección evaluada. Estos resultados permiten relacionar el nivel de rugosidad global con la contribución de irregularidades de diferente escala espacial, proporcionando un análisis complementario al enfoque tradicional basado únicamente en el IRI. *Fuente:* Elaboración propia.

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 N° 6.1: *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	Reparación 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	Reconformación del pavimento mediante reciclaje o reconstrucción total.

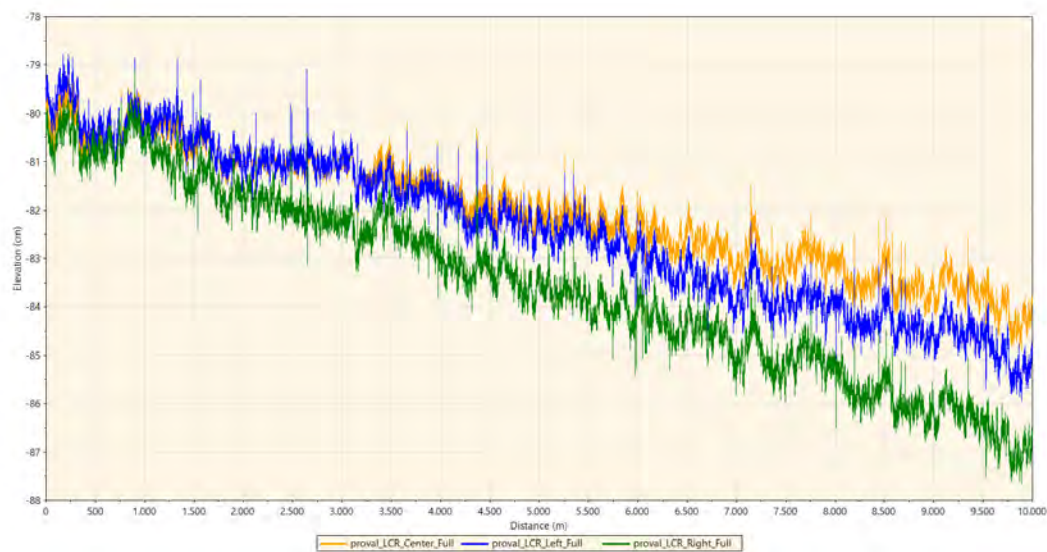
**Nota.** Las acciones de conservación recomendadas se establecen en función de la condición funcional del pavimento, evaluada mediante el análisis de la densidad espectral de potencia (DEP), como complemento al Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

### 6.3 Transformada Wavelet Continua para el Análisis Multicanal del IRI

La Transformada Wavelet Continua (CWT) constituye una herramienta idónea para el estudio de la rugosidad longitudinal, ya que permite representar la energía de una señal tanto en función de la distancia como de la escala. A diferencia de la Transformada de Fourier, que solo entrega información global en frecuencia, la CWT conserva la localización espacial de las irregularidades, lo cual resulta crucial en perfiles de carreteras donde los defectos se presentan de manera puntual o concentrada en ciertas zonas (Torrence & Compo, 1998; Addison, 2017). Esta propiedad justifica su aplicación en el presente estudio.

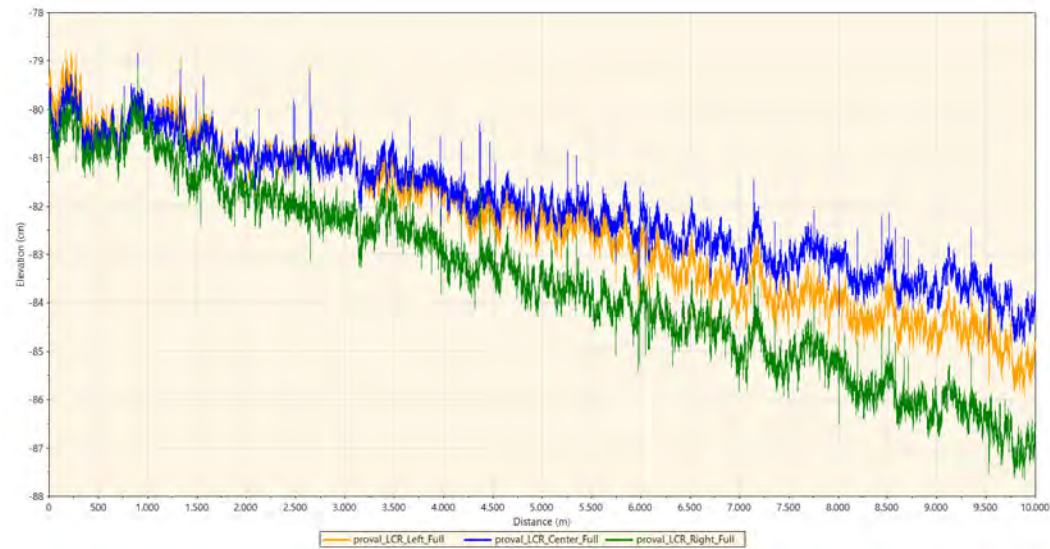
En este caso, el análisis se aplicó a perfiles longitudinales obtenidos a partir de cuatro tramos consecutivos medidos con perfilometría láser. Cada tramo contiene tres trayectorias correspondientes a los carriles izquierdo, central y derecho, que fueron tratados de manera independiente para preservar la totalidad de la información disponible. Esta estrategia permite caracterizar la rugosidad tanto en el dominio longitudinal como en el transversal, evitando la pérdida de detalles que podría ocurrir al sintetizar un único perfil ponderado.

**Figura 5**  
*Perfiles longitudinales del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 0–10)*



*Nota.* La figura presenta los perfiles longitudinales del pavimento correspondientes al tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 0–10), obtenidos a partir de mediciones realizadas con perfilómetro láser y procesadas mediante el software ProVAL 4.0. Las variaciones de elevación observadas reflejan irregularidades de distinta escala espacial, que constituyen la base para el análisis del comportamiento funcional del pavimento y la posterior determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).  
*Fuente:* Elaboración propia.

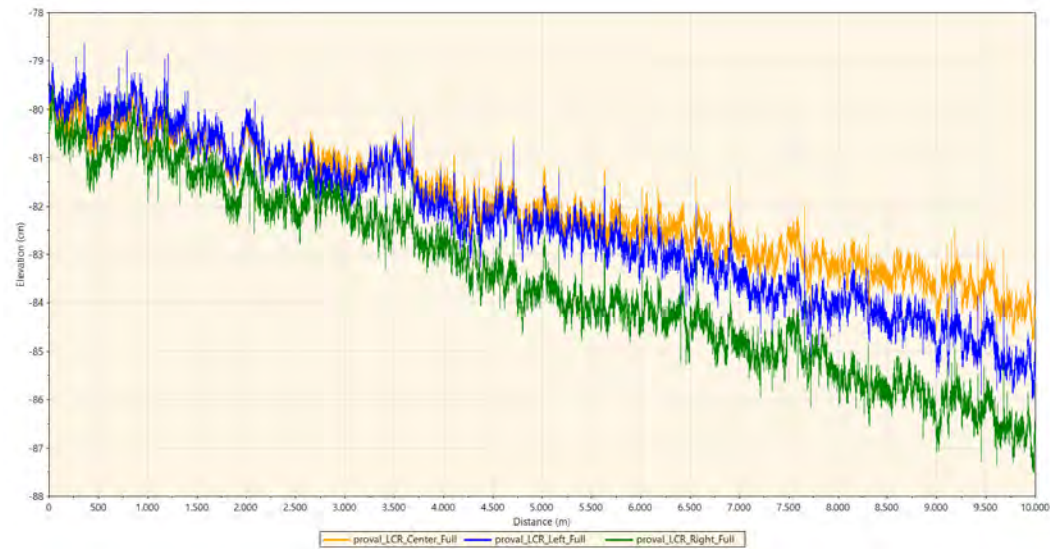
**Figura 6**  
*Perfiles longitudinales del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 10–20)*



*Nota.* La figura presenta los perfiles longitudinales del pavimento correspondientes al tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 10–20), obtenidos a partir de mediciones realizadas con perfilómetro láser y procesadas mediante el software ProVAL 4.0. Las variaciones de elevación observadas reflejan irregularidades de distinta escala espacial, que constituyen la base para el análisis del comportamiento funcional del pavimento y la posterior determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).  
*Fuente:* Elaboración propia.

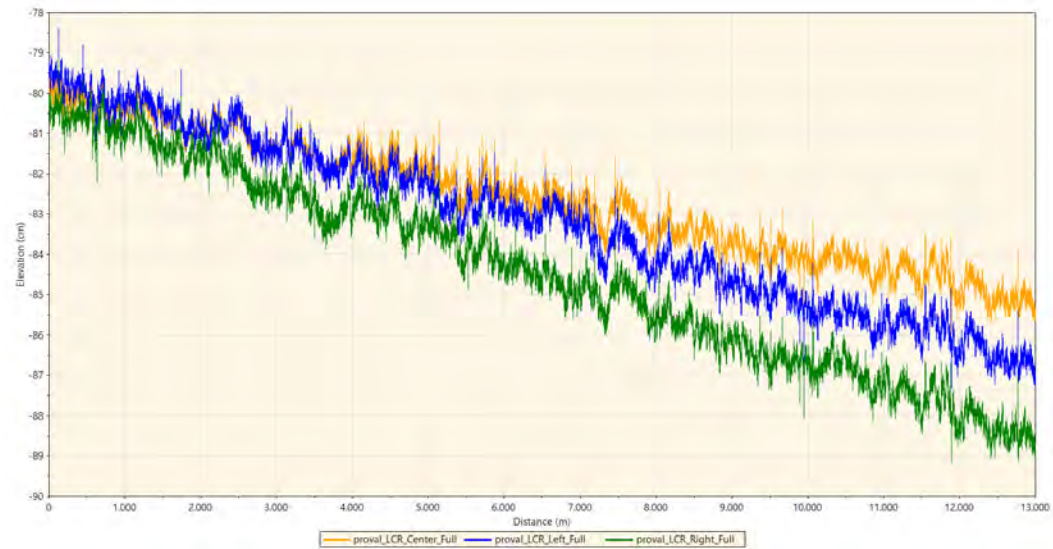


**Figura 7**  
**Perfiles longitudinales del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 20–30)**



*Nota.* La figura presenta los perfiles longitudinales del pavimento correspondientes al tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 20–30), obtenidos a partir de mediciones realizadas con perfilómetro láser y procesadas mediante el software ProVAL 4.0. Las variaciones de elevación observadas reflejan irregularidades de distinta escala espacial, que constituyen la base para el análisis del comportamiento funcional del pavimento y la posterior determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).  
*Fuente:* Elaboración propia.

**Figura 8**  
**Perfiles longitudinales del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 30–43)**



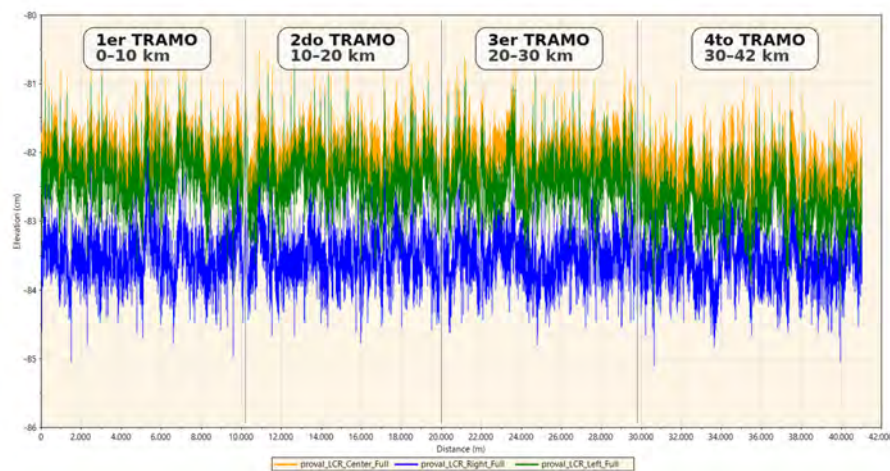
*Nota.* La figura presenta los perfiles longitudinales del pavimento correspondientes al tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 30–43), obtenidos a partir de mediciones realizadas con perfilómetro láser y procesadas mediante el software ProVAL 4.0. Las variaciones de elevación observadas reflejan irregularidades de distinta escala espacial, que constituyen la base para el análisis del comportamiento funcional del pavimento y la posterior determinación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).  
*Fuente:* Elaboración propia.

## 6.4 Preparación de los Datos

Los cuatro tramos fueron concatenados en un perfil único y continuo mediante el ajuste acumulativo de las distancias, asegurando la correcta secuencia espacial a lo largo de los 43 km medidos. Este procedimiento permite la detección de irregularidades de gran longitud de onda que podrían truncarse en un análisis por tramos individuales (Sayers & Karamihas, 1998). Adicionalmente, se preservó la información de frontera entre tramos para facilitar comparaciones posteriores por secciones.

En lugar de sintetizar un perfil ponderado, se decidió mantener los tres carriles de manera independiente. Esto permite identificar asimetrías transversales, evaluar diferencias en el desgaste por carril y correlacionar la rugosidad con patrones de tránsito o fallas estructurales localizadas. Gillespie (1992) indica que, aunque el carril central suele ser el más representativo del confort percibido, el análisis integral de todos los carriles proporciona una visión más completa del comportamiento del pavimento.

FIGURA N° 6.2: *Perfiles longitudinales de los carriles izquierdo, central y derecho del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 0–43)*



**Nota.** Se muestran los perfiles longitudinales correspondientes a los carriles izquierdo, central y derecho del tramo Santa Rosa–Ayaviri (km 0–43), obtenidos a partir de datos procesados en el software ProVAL 4.0. Los perfiles representan la variación de elevación del pavimento en función de la distancia y constituyen la base para el análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y los estudios espectrales posteriores. **Fuente:** Elaboración propia.

## 6.5 Procedimiento Computacional

El análisis espectral mediante la CWT se implementó respetando la resolución de muestreo original de 0.025 m entre puntos, de acuerdo con la norma ASTM E1926-

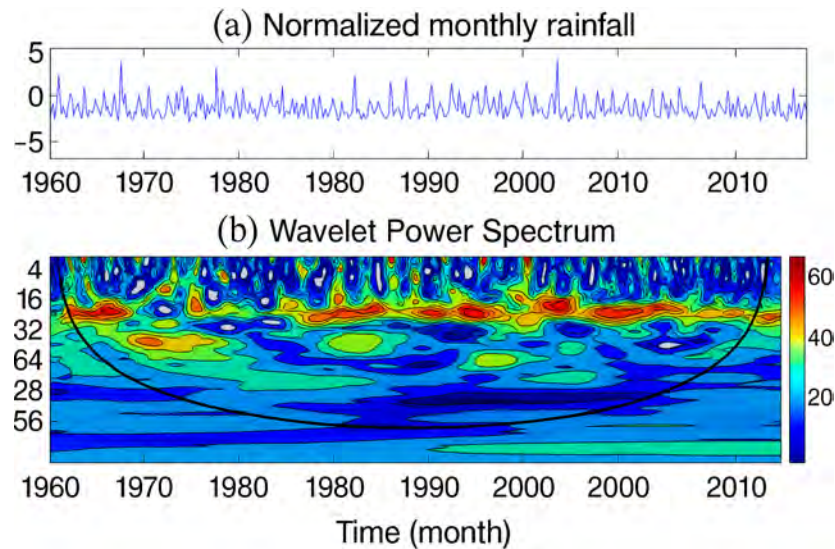
08. Para cada carril se calculó la CWT de manera independiente utilizando la wavelet compleja de Morlet, seleccionada por su balance entre resolución en escala y en distancia (Addison, 2017).

La Transformada Wavelet Continua se define en la ecuación (1):

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6.1)$$

donde  $a$  es el parámetro de escala,  $b$  representa la posición en la distancia y  $\psi^*(t)$  corresponde al conjugado complejo de la wavelet.

FIGURA N° 6.3: *Transformada wavelet continua (CWT) de la serie mensual de precipitaciones*



**Nota.** Se presenta la Transformada Wavelet Continua (CWT) aplicada a una serie mensual de precipitaciones, donde se identifican variaciones temporales y patrones multiescala de la señal. La representación tiempo–frecuencia permite analizar fenómenos no estacionarios, destacando regiones de alta energía asociadas a diferentes escalas temporales. **Fuente:** Adaptado de Rashid, M. M., Beecham, S., y Chowdhury, R. K. (2015), *Statistical downscaling of rainfall: a non-stationary and multi-resolution approach, Theoretical and Applied Climatology*. © Springer-Verlag Wien 2015.

El Espectro de Potencia Wavelet (WPS) se definió como:

$$WPS(a, b) = |W(a, b)|^2 \quad (6.2)$$

El WPS de cada carril se calculó de manera separada, lo que permite construir mapas escala–distancia específicos por trayectoria. Este enfoque facilita la identificación de defectos localizados en carriles particulares y el análisis comparativo

transversal.

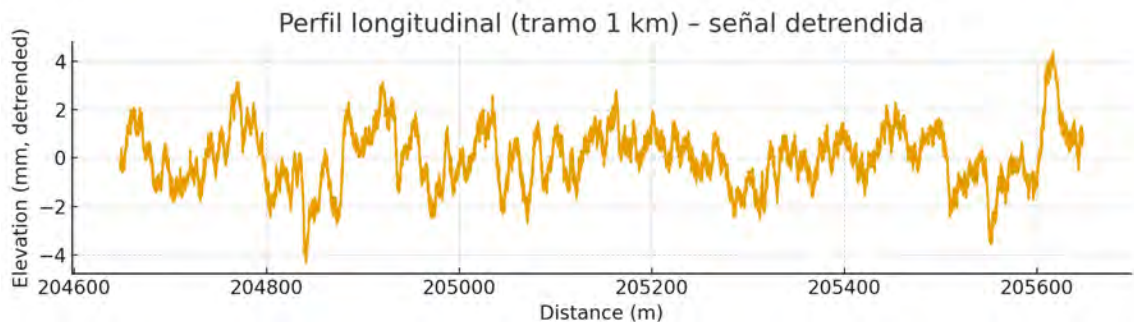
A continuación, se obtuvo el espectro marginal mediante la ecuación (3):

$$\overline{P}(a) = \frac{1}{T} \int_0^T |W(a,b)|^2 db \quad (6.3)$$

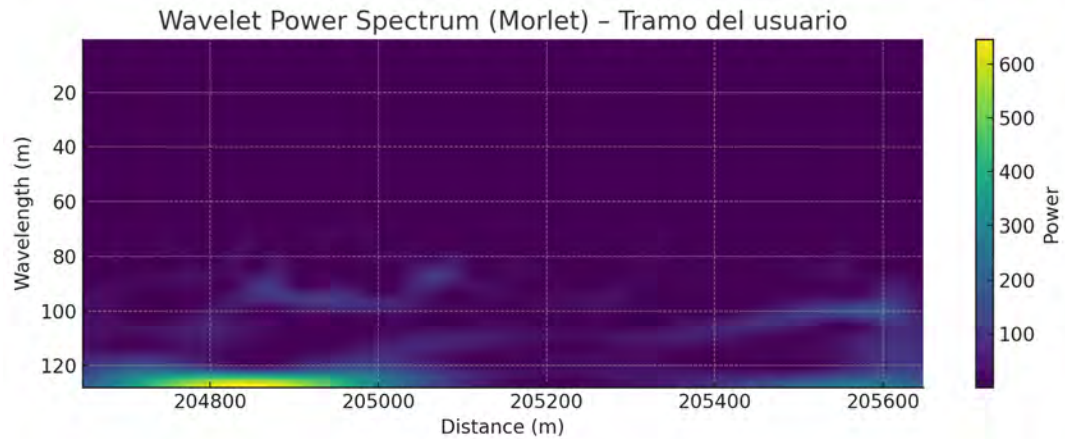
El espectro marginal de cada carril permitió cuantificar la contribución total de las distintas escalas de rugosidad y establecer comparaciones globales entre carriles y tramos.

## 6.6 Análisis de Resultados

FIGURA N° 6.4: *Gráfica de amplitud integrada correspondiente al análisis espectral del tramo*

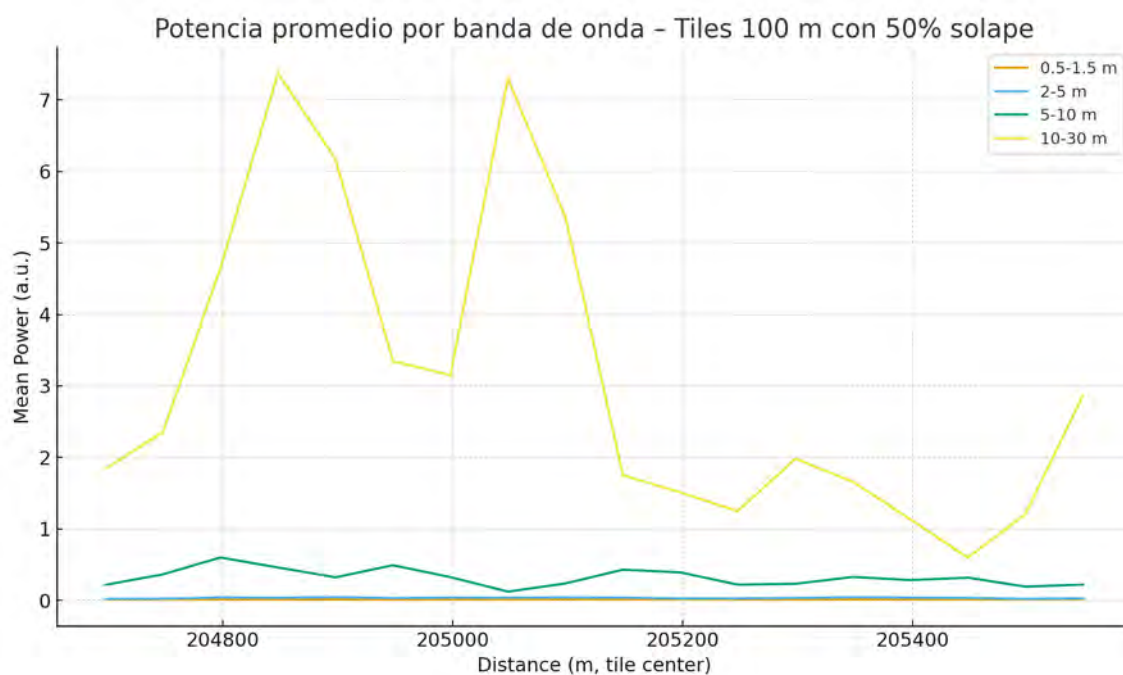


**Nota.** Se muestra la gráfica de amplitud integrada obtenida a partir del análisis espectral del perfil longitudinal del tramo evaluado. Esta representación permite identificar la contribución acumulada de las componentes frecuenciales de la señal, facilitando la interpretación de las irregularidades dominantes del pavimento y su relación con el comportamiento de la rugosidad. **Fuente:** Elaboración propia.

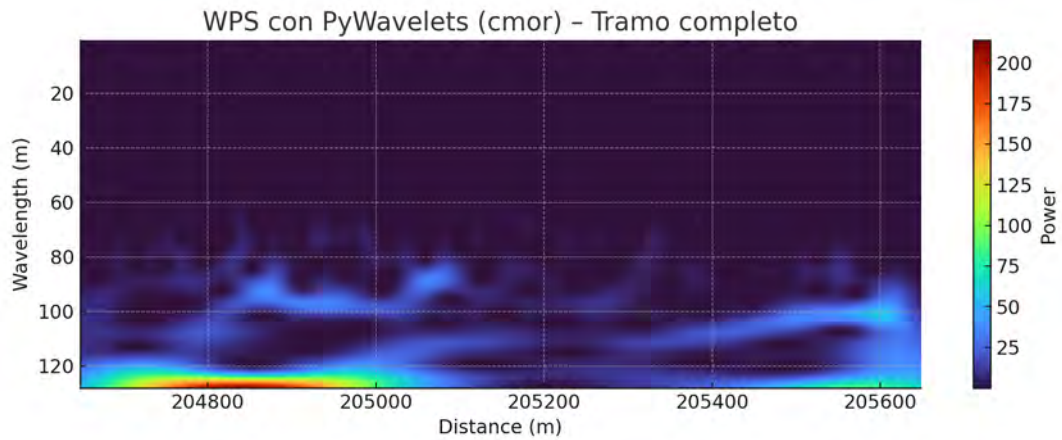
FIGURA N° 6.5: *Amplitud integrada obtenida del perfil longitudinal*

**Nota.** Se presenta la amplitud integrada obtenida a partir del perfil longitudinal del pavimento, evidenciando variaciones relevantes en las componentes oscilatorias de la señal. Este resultado permite identificar rangos de frecuencia asociados a irregularidades dominantes y contribuye a la interpretación del comportamiento espectral del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el tramo analizado. **Fuente:** Elaboración propia.

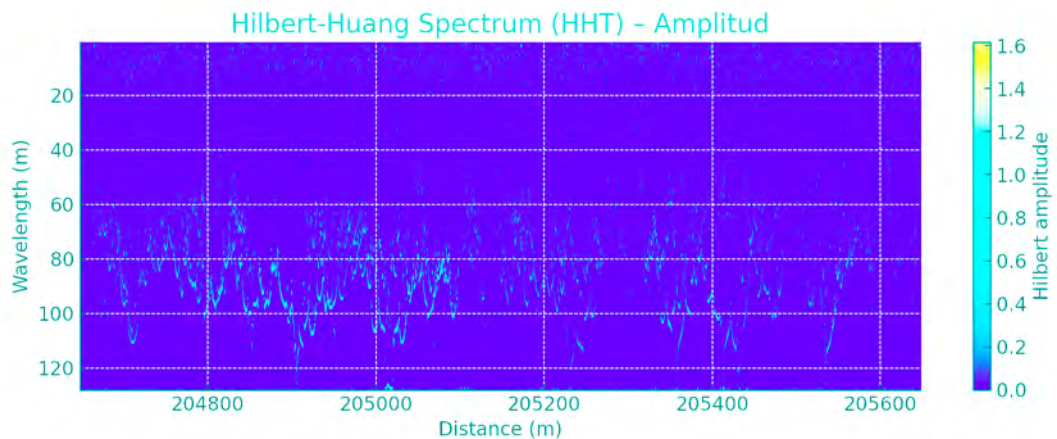


FIGURA N° 6.6: *Potencia por bandas (WPS) representada en mosaicos*

**Nota.** Se presenta la distribución de la potencia por bandas (Wavelet Power Spectrum, WPS) representada en forma de mosaicos, lo que permite identificar las escalas con mayor concentración de energía a lo largo del perfil longitudinal analizado. Este tipo de representación facilita la detección de patrones multiescala y la localización de irregularidades dominantes del pavimento asociadas a diferentes longitudes de onda. **Fuente:** Elaboración propia.

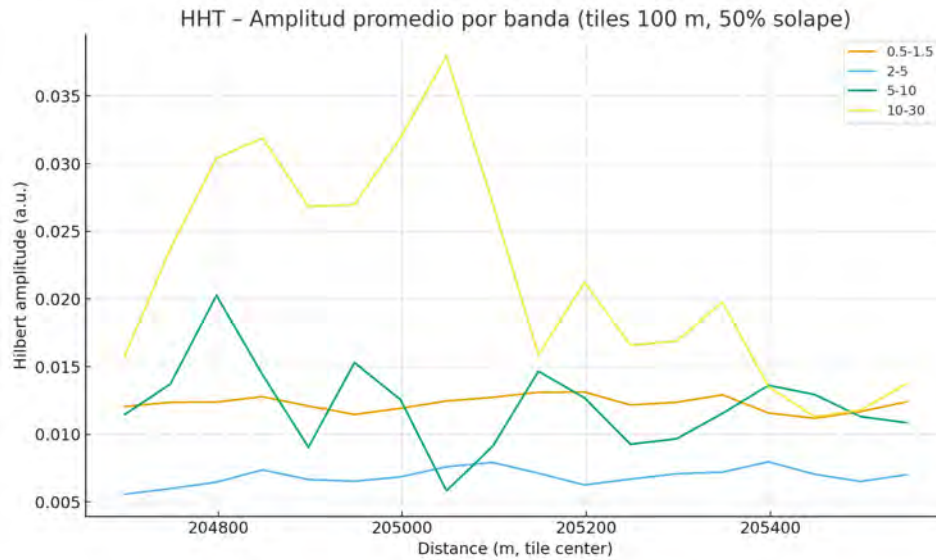
FIGURA N° 6.7: *Espectrograma Wavelet continuo (WPS) del tramo completo*

**Nota.** Se presenta el espectrograma Wavelet continuo (Wavelet Power Spectrum, WPS) correspondiente al tramo completo analizado, en el que se observa la distribución de energía de la señal del perfil longitudinal en función de la distancia y de las escalas. Esta representación permite identificar zonas con mayor concentración energética y evaluar el comportamiento multiescala de la rugosidad del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.8: *Espectro Hilbert–Huang inicial del tramo analizado*

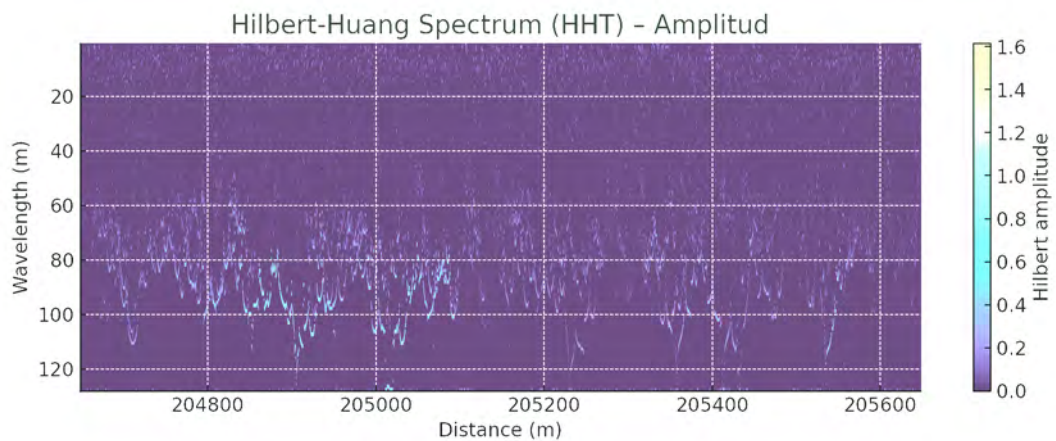
**Nota.** Se presenta el espectro Hilbert–Huang correspondiente al tramo analizado, obtenido a partir de la descomposición empírica de modos (EMD) y la transformada de Hilbert. Esta representación permite examinar la distribución de energía en función de la frecuencia instantánea y la distancia, siendo especialmente útil para el análisis de señales no lineales y no estacionarias asociadas a la rugosidad del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.



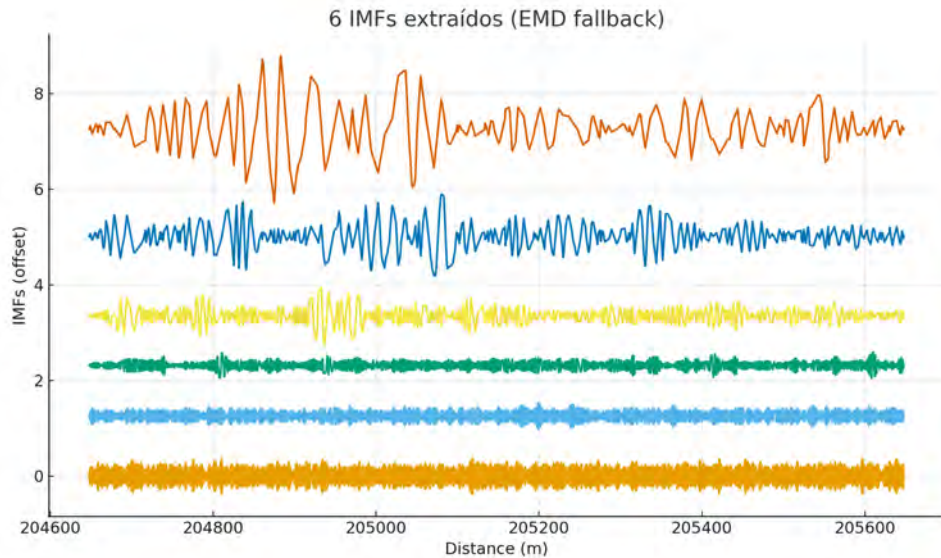
FIGURA N° 6.9: *Potencia por bandas del análisis Hilbert–Huang (HHT)*

**Nota.** Se presenta la distribución de la potencia por bandas obtenida a partir del análisis Hilbert–Huang (HHT), lo que permite identificar los rangos de frecuencia instantánea con mayor concentración de energía asociados a las irregularidades del perfil longitudinal del pavimento. Esta representación es especialmente útil para el estudio de señales no lineales y no estacionarias.

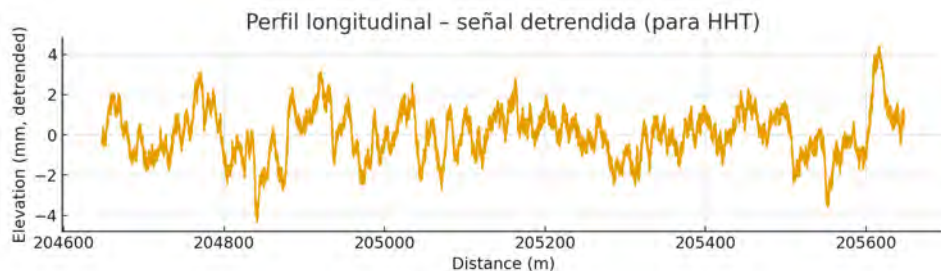
**Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.10: *Espectro Hilbert–Huang final del tramo procesado*

**Nota.** Se presenta el espectro Hilbert–Huang final correspondiente al tramo procesado, obtenido tras la selección y depuración de los modos intrínsecos (IMF) mediante la descomposición empírica de modos y la aplicación de la transformada de Hilbert. Esta representación permite una interpretación más precisa de la distribución de energía en función de la frecuencia instantánea y la distancia, mejorando el análisis de la rugosidad del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.11: *Funciones de modo intrínseco (IMFs) obtenidas mediante EMD*

**Nota.** Se presentan las funciones de modo intrínseco (Intrinsic Mode Functions, IMFs) obtenidas mediante la descomposición empírica de modos (EMD) aplicada al perfil longitudinal del pavimento. Cada IMF representa componentes oscilatorias de distinta escala, cuya combinación permite analizar el comportamiento no lineal y no estacionario de la señal de rugosidad. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.12: *Perfil longitudinal utilizado como entrada del análisis HHT*

**Nota.** Se presenta el perfil longitudinal del pavimento utilizado como señal de entrada para el análisis Hilbert-Huang (HHT). Este perfil corresponde a los datos de elevación en función de la distancia obtenidos en campo y constituye la base para la descomposición empírica de modos (EMD) y la posterior obtención del espectro de Hilbert. **Fuente:** Elaboración propia.

## 6.7 Análisis de Resultados

El análisis mediante la CWT evidenció la presencia de eventos de alta frecuencia, asociados a rugosidad superficial y baches, y de baja frecuencia, vinculados a asentamientos o deficiencias geométricas. Se observaron diferencias significativas

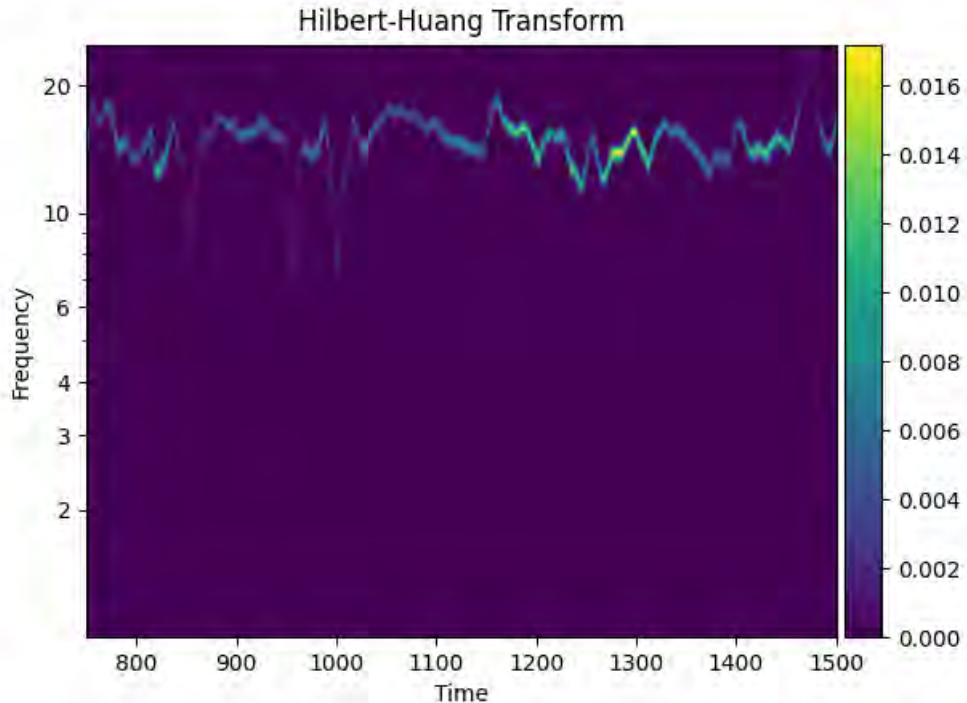
entre carriles, especialmente en zonas donde el tránsito pesado induce deformaciones asimétricas. El tratamiento independiente de los tres carriles permitió una evaluación más rica que un análisis sintetizado, aportando información transversal clave para la gestión de mantenimiento.

## 6.8 Análisis multiescala mediante la Transformada de Hilbert–Huang

### 6.8.1 Fundamento conceptual

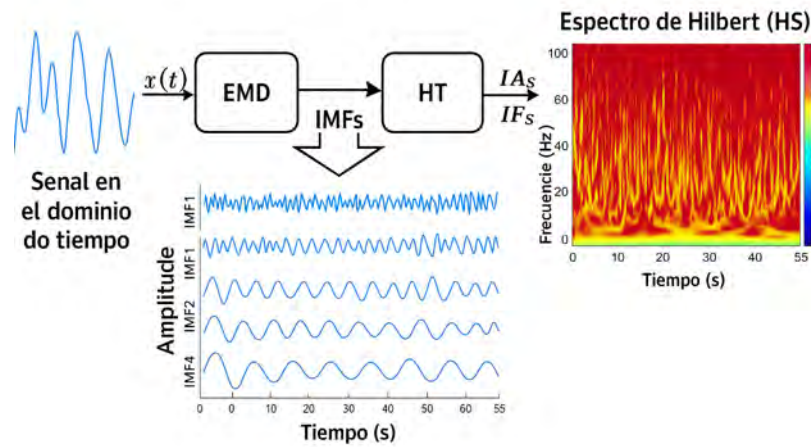
La Transformada de Hilbert–Huang (HHT, por sus siglas en inglés) es un método de análisis no estacionario y no lineal, especialmente adaptado para señales cuyos componentes espectrales varían con la posición o el tiempo. Se compone de dos etapas principales: (i) la descomposición en modos intrínsecos (*Intrinsic Mode Functions*, IMF) mediante *Empirical Mode Decomposition* (EMD) o sus variantes mejoradas como EEMD o CEEMDAN, y (ii) la aplicación de la Transformada de Hilbert a cada IMF para obtener magnitudes instantáneas.

FIGURA N° 6.13: *Espectro tiempo–frecuencia del perfil longitudinal mediante la Transformada de Hilbert–Huang (HHT)*



**Nota.** Se presenta el espectro tiempo–frecuencia del perfil longitudinal del pavimento obtenido mediante la Transformada de Hilbert–Huang (HHT), el cual permite identificar las frecuencias dominantes y la distribución de energía asociada a irregularidades no estacionarias a lo largo del tramo analizado. Esta representación resulta especialmente adecuada para el estudio de señales no lineales y no estacionarias vinculadas al comportamiento funcional del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

A diferencia de la Transformada de Fourier, que utiliza una base de senos y cosenos global, o de la Transformada Wavelet, que proyecta sobre funciones base escaladas y trasladadas, la HHT extrae su propia base directamente de los datos, lo que permite adaptarse mejor a patrones irregulares y fenómenos transitorios presentes en el perfil longitudinal de un pavimento.

FIGURA N° 6.14: *Fundamento conceptual del método HHT*

**Nota.** Se presenta el esquema conceptual del método Hilbert–Huang (HHT), que describe el proceso de descomposición empírica de modos (EMD) aplicado a la señal del perfil longitudinal del pavimento para obtener las funciones de modo intrínseco (IMFs) y la posterior aplicación de la transformada de Hilbert, a partir de la cual se genera el espectro de Hilbert. Este enfoque permite identificar variaciones locales de irregularidad y analizar señales no lineales y no estacionarias asociadas a la rugosidad del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

### 6.8.2 Hilbert Spectrum vs. Hilbert Marginal Spectrum

El análisis Hilbert–Huang produce dos salidas complementarias:

1. **Hilbert Spectrum**  $H(f, x)$ : Representa la energía instantánea distribuida a lo largo de la distancia  $x$  y de la frecuencia  $f$ . Es análogo al *Wavelet Power Spectrum* (WPS) en el análisis Wavelet, ya que permite identificar en qué ubicación espacial ocurren determinadas irregularidades y a qué escala (o longitud de onda) pertenecen.
2. **Hilbert Marginal Spectrum**  $H_m(f)$ : Se obtiene integrando  $H(f, x)$  a lo largo de todo el tramo. Es equivalente al *Power Spectral Density* (PSD) de Fourier o al espectro marginal de Wavelet, ya que resume la contribución total de cada banda de frecuencia sin información espacial.

En este trabajo se utilizan **ambos**, ya que:

- El **Hilbert Spectrum** ofrece la localización espacial de defectos y la evolución de sus frecuencias.

- El **Marginal Spectrum** permite comparaciones numéricas entre tramos, útil para indicadores globales de confort y mantenimiento.

### 6.8.3 Preparación de datos: unificación de tramos

Se dispone de cuatro tramos medidos con perfilometría láser en formato RSP. Cada archivo contiene registros con elevaciones para los carriles izquierdo, central y derecho. Los tramos se unificaron concatenando las series y ajustando las distancias de forma acumulativa para generar un único perfil continuo. Esta estrategia permite:

- Analizar escalas largas que trascienden la longitud de un tramo individual.
- Evitar discontinuidades espectrales derivadas de cortes artificiales.
- Facilitar la detección de patrones globales de deformación.

### 6.8.4 Ponderación transversal de carriles

El confort percibido por el conductor depende principalmente de la trayectoria de las ruedas, que suele coincidir con el carril central en mediciones controladas. Sin embargo, los carriles laterales influyen cuando el vehículo realiza maniobras o cuando el desgaste es asimétrico. Por ello, se construyó un perfil ponderado:

$$P_{\text{pond}}(x) = 0.3L(x) + 0.5C(x) + 0.2R(x),$$

donde  $L$ ,  $C$  y  $R$  son los perfiles izquierdo, central y derecho, respectivamente. Esta ponderación se inspira en criterios de relevancia funcional y confort (AASHTO, 2018).

### 6.8.5 Descomposición adaptativa (EMD/CEEMDAN)

Cada señal ( $L$ ,  $C$ ,  $R$  y  $P_{\text{pond}}$ ) se sometió a *Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise* (CEEMDAN), variante que mitiga el *mode mixing* y mejora la estabilidad de los modos. El algoritmo produce  $K$  IMFs y un residuo  $r(x)$ :

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \text{IMF}_k(x) + r(x),$$

donde cada IMF es casi monocomponente y presenta una banda de frecuencia bien definida.

### 6.8.6 Cálculo de magnitudes instantáneas

Sobre cada IMF se aplica la Transformada de Hilbert para obtener:

$$A_k(x) = |z_k(x)|, \quad \phi_k(x) = \arg\{z_k(x)\}, \quad f_k(x) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_k(x)}{dx},$$

donde  $A_k$  es la amplitud instantánea,  $\phi_k$  la fase y  $f_k$  la frecuencia instantánea en ciclos por metro. Las derivadas se estiman mediante diferencias centradas para maximizar la precisión.

### 6.8.7 Generación del Hilbert Spectrum

El Hilbert Spectrum se calcula como:

$$H(f, x) = \sum_{k=1}^K A_k^2(x) \delta(f - f_k(x)),$$

y se representa en un mapa de color (frecuencia vs distancia), donde la intensidad indica energía. Este gráfico permite:

- Localizar defectos de corta longitud de onda (baches, rugosidad superficial) como bandas energéticas a alta frecuencia.
- Identificar deformaciones onduladas de escala media (ahuellamientos, modulación estructural).
- Detectar asentamientos o deformaciones extensas como energía concentrada en bajas frecuencias.

### 6.8.8 Generación del Hilbert Marginal Spectrum

Integrando  $H(f, x)$  en toda la distancia:

$$H_m(f) = \int H(f, x) dx,$$

se obtiene un espectro unidimensional que resume la energía por frecuencia. Este resultado es particularmente útil para:

- Comparar de manera global la severidad de la rugosidad entre distintos tramos.
- Cuantificar la contribución relativa de cada banda de longitud de onda al IRI global.



### 6.8.9 Interpretación conjunta

El uso combinado de  $H(f, x)$  y  $H_m(f)$  ofrece una visión más completa:

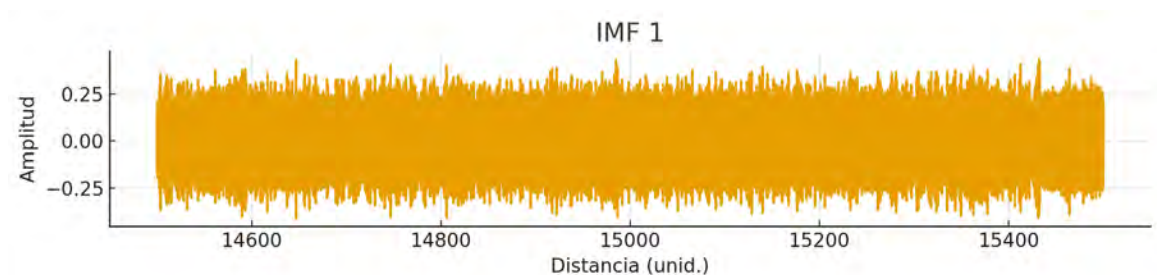
1. El Hilbert Spectrum revela la *localización* y la *evolución* de defectos.
2. El Marginal Spectrum sintetiza el comportamiento en un único indicador global.

Este enfoque paralelo a Fourier y Wavelet asegura que los tres métodos sean comparables y complementarios.

### 6.8.10 Ventajas y limitaciones

La HHT ofrece mayor adaptabilidad que Fourier y Wavelet para señales con fuerte no estacionariedad, pero presenta sensibilidad al ruido y a artefactos de borde. La elección de CEEMDAN y un control riguroso de parámetros ayuda a mitigar estos problemas.

FIGURA N° 6.15: *Primer modo intrínseco obtenido mediante EMD*

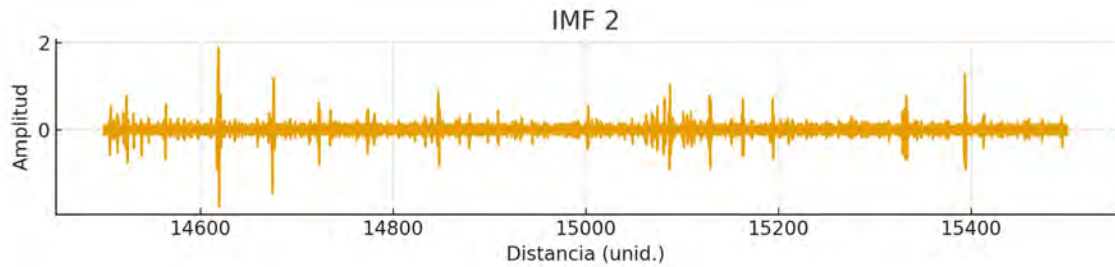


**Nota.** Se presenta el primer modo intrínseco (IMF 1) obtenido mediante la descomposición empírica de modos (EMD), el cual representa las irregularidades de mayor frecuencia del perfil longitudinal del pavimento. Este modo se asocia principalmente con texturas finas, vibraciones y ondulaciones de corta longitud de onda, siendo altamente sensible a defectos superficiales del pavimento.

**Fuente:** Elaboración propia.

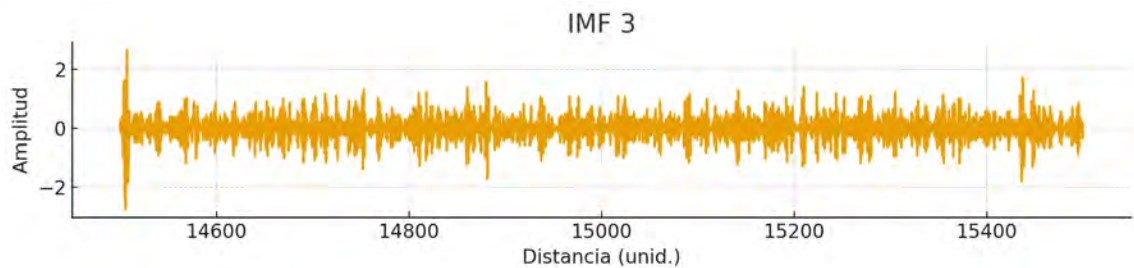


FIGURA N° 6.16: Segundo modo intrínseco obtenido mediante EMD

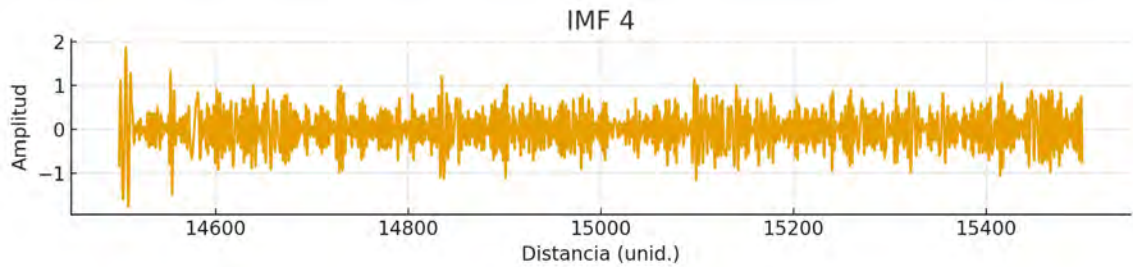


**Nota.** Se presenta el segundo modo intrínseco (IMF 2) obtenido mediante la descomposición empírica de modos (EMD), caracterizado por ondas de corta longitud de onda con mayor amplitud relativa respecto al IMF 1. Este modo aporta información relevante para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), ya que describe micro-ondulaciones del pavimento que influyen directamente en el confort de rodadura y en el movimiento vertical del vehículo. **Fuente:** Elaboración propia.

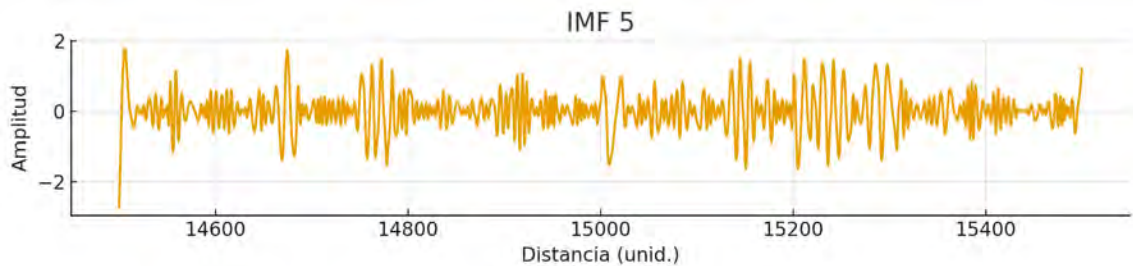
FIGURA N° 6.17: Tercer modo intrínseco obtenido mediante EMD



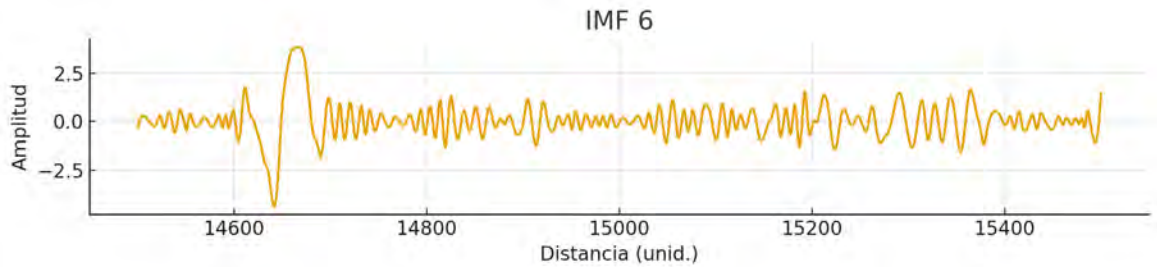
**Nota.** Se presenta el tercer modo intrínseco (IMF 3) obtenido mediante la descomposición empírica de modos (EMD), el cual captura componentes de longitud de onda media, del orden de varios metros. Estas componentes suelen estar asociadas con compactación irregular, pequeñas deformaciones estructurales o patrones repetitivos del proceso constructivo, influyendo de manera significativa en el comportamiento funcional del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.18: *Cuarto modo intrínseco obtenido mediante EMD*

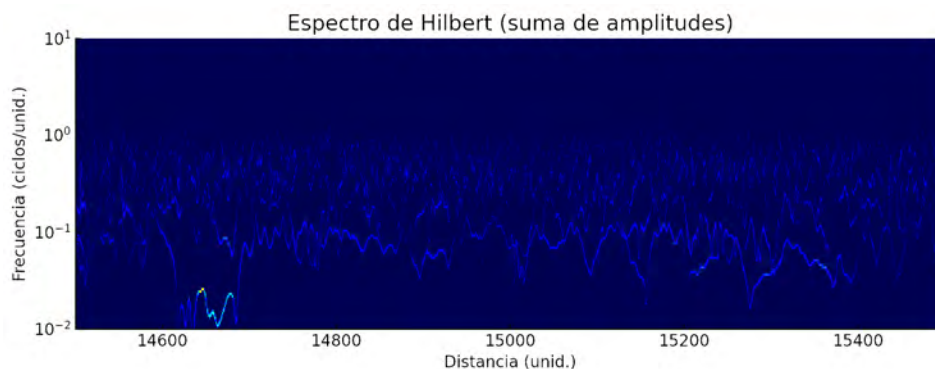
**Nota.** Se presenta el cuarto modo intrínseco (IMF 4) obtenido mediante la descomposición empírica de modos (EMD), el cual refleja irregularidades de largo alcance, menos frecuentes y de mayor amplitud. Este modo representa deformaciones amplias del perfil longitudinal, que pueden estar asociadas a asentamientos, desniveles estructurales o fallas acumuladas del pavimento, influyendo en el comportamiento global de la rugosidad. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.19: *Quinto modo intrínseco obtenido mediante EMD*

**Nota.** Se presenta el quinto modo intrínseco (IMF 5) obtenido mediante la descomposición empírica de modos (EMD), el cual muestra variaciones lentas y globales del perfil longitudinal. Este modo se asocia a la forma general del tramo y a deformaciones de gran magnitud, caracterizadas por longitudes de onda muy largas, que reflejan el comportamiento estructural global del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.20: *Sexto modo intrínseco obtenido mediante EMD*

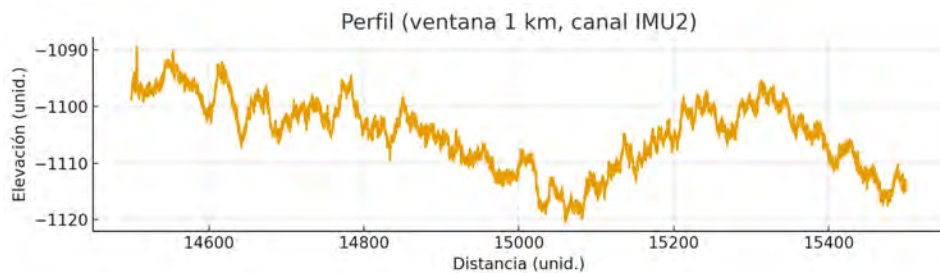
**Nota.** Se presenta el sexto modo intrínseco (IMF 6) obtenido mediante la descomposición empírica de modos (EMD), el cual representa las deformaciones más extensas del pavimento. Este modo se asocia principalmente con el comportamiento de la base o subrasante, reflejando inclinaciones, bombeos o hundimientos de gran escala y larga longitud de onda, que condicionan la geometría global del tramo vial. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.21: *Distribución conjunta de amplitud en función de la distancia y la frecuencia*

**Nota.** Se presenta la distribución conjunta de la amplitud en función de la distancia y la frecuencia obtenida a partir del análisis Hilbert–Huang (HHT). Esta representación permite identificar las zonas del tramo donde se concentran las irregularidades más significativas y determinar las bandas de frecuencia que dominan localmente, aportando información clave para la interpretación espacial y espectral de la rugosidad del pavimento. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.22: *Amplitud integrada en función de la frecuencia*

**Nota.** Se presenta la amplitud integrada para cada frecuencia obtenida a partir del análisis del perfil longitudinal del tramo evaluado. La gráfica permite identificar las ondas dominantes del pavimento mediante picos espectrales representativos de longitudes de onda específicas, asociadas a texturas superficiales, ondulación de longitud media y deformaciones de gran escala. **Fuente:** Elaboración propia.

FIGURA N° 6.23: *Perfil de la ventana de 1 km utilizado para el análisis Hilbert–Huang*

**Nota.** Se presenta el perfil longitudinal correspondiente a una ventana de análisis de 1 km de longitud, seleccionado como señal de entrada para la aplicación del método Hilbert–Huang (HHT). Esta segmentación permite analizar de manera detallada las variaciones locales de rugosidad del pavimento, facilitando la identificación de irregularidades no lineales y no estacionarias a escala intermedia. **Fuente:** Elaboración propia.

## 6.9 Evaluación estructural del pavimento

En esta sección se presenta la metodología empleada para obtener el perfil estructural longitudinal del corredor Santa Rosa–Ayaviri, como complemento al análisis funcional y espectral de la rugosidad. El procedimiento se basa en: (i) la reconstrucción de la sección típica del pavimento, (ii) la estimación del tráfico acumulado en términos de ejes equivalentes (ESAL), (iii) el cálculo del número estructural del pavimento existente y (iv) la definición de un índice de capacidad estructural por subtramo.

### 6.9.1 Reconstrucción de la sección estructural

A partir de la información del expediente técnico y de los ensayos de campo y laboratorio, se identificaron las capas que conforman el pavimento del corredor. Para fines ilustrativos, en la Tabla 6.2 se presenta una sección típica representativa, con espesores y parámetros estructurales *inventados para este modelo*.

TABLA N° 6.2: *Sección típica de pavimento para el modelo estructural (valores de ejemplo)*

Capa	Espesor $h_i$ (cm)	Coefficiente estructural $a_i$	Coef.de dren. $m_i$
Carpeta asfáltica	7	0.44	1.00
Base granular	20	0.14	1.05
Subbase granular	25	0.11	1.00
Subrasante (CBR = 5 %)	—	—	—

**Nota.** La tabla presenta una sección típica de pavimento flexible utilizada como referencia para el modelo estructural, incluyendo espesores de capa, coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje. Los valores mostrados son referenciales y se emplean con fines ilustrativos para el análisis del comportamiento estructural del pavimento.

Para cada subtramo de 200 m se verificó, en el expediente técnico, la presencia de sobrecarpetas, parches o variaciones de espesor, ajustando los valores de  $h_i$  según corresponda. De este modo se obtiene un *perfil estructural preliminar* en términos de espesores por progresiva.

### 6.9.2 Estimación del tráfico en ESAL

El tráfico se expresó en términos de ejes equivalentes simples de 80 kN (ESAL). A partir del IMDA, la composición vehicular y el periodo de diseño, se utilizó la expresión clásica:

$$N = IMDA \cdot 365 \cdot F_g \cdot F_d \cdot F_{carga}, \quad (6.4)$$

donde  $IMDA$  es el índice medio diario anual de vehículos pesados,  $F_g$  el factor de crecimiento anual acumulado,  $F_d$  el factor direccional y  $F_{carga}$  el factor de equivalencia de carga. Para este modelo se adoptaron los valores ejemplificados en la Tabla 6.3.

TABLA N° 6.3: *Parámetros de tráfico para el cálculo de ESAL (valores de ejemplo)*

Parámetro	Símbolo	Valor asumido
IMDA de vehículos pesados (veh/día)	$IMDA$	420
Período de análisis (años)	$n$	10
Factor de crecimiento anual	$i$	0.04
Factor direccional	$F_d$	0.50
Factor de distribución por carril	$F_c$	0.60
Factor de equivalencia de carga promedio	$F_{\text{carga}}$	1.70

**Nota.** La tabla presenta los parámetros de tráfico empleados para el cálculo del número de ejes equivalentes de 18 kips (ESAL), utilizados como valores referenciales en el análisis estructural del pavimento. Los valores mostrados son de carácter ilustrativo y pueden ajustarse según las condiciones reales de tránsito del tramo evaluado.

El factor de crecimiento acumulado  $F_g$  se calculó mediante:

$$F_g = \frac{(1+i)^n - 1}{i}, \quad (6.5)$$

obteniéndose para el ejemplo  $F_g \approx 12.0$ . De este modo, el número de ESAL acumulados por carril se estimó como:

$$N \approx 420 \cdot 365 \cdot 12.0 \cdot 0.5 \cdot 0.6 \cdot 1.7 \approx 1,13 \times 10^7 \text{ ESAL}.$$

### 6.9.3 Cálculo del número estructural existente

El número estructural (SN) del pavimento existente se calculó siguiendo la formulación AASHTO:

$$SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3, \quad (6.6)$$

donde  $h_i$  se expresan en pulgadas. Para la sección típica de la Tabla ??, los espesores en pulgadas son  $h_1 = 2.76$ ,  $h_2 = 7.87$  y  $h_3 = 9.84$ . Sustituyendo:

$$SN = 0.44(2.76) + 0.14(7.87)(1.05) + 0.11(9.84)(1.00) \approx 1.21 + 1.16 + 1.08 \approx 3.45.$$

Este procedimiento se aplica a cada subtramo, ajustando los valores según la estructura real medida. Con ello se genera un perfil longitudinal del número estructural.

#### 6.9.4 Índice de capacidad estructural

El índice estructural se definió como:

$$I_{\text{estr}} = \frac{N_{\text{soportado}}}{N_{\text{actual}}}, \quad (6.7)$$

donde  $N_{\text{actual}}$  es el tráfico acumulado en ESAL calculado previamente y  $N_{\text{soportado}}$  es la capacidad estructural estimada para la sección. Su interpretación es:

- $I_{\text{estr}} > 1$ : la estructura tiene capacidad suficiente.
- $I_{\text{estr}} = 1$ : la estructura se encuentra en su límite operativo.
- $I_{\text{estr}} < 1$ : estructura insuficiente o agotada.

Para el ejemplo mostrado:

$$I_{\text{estr}} \approx \frac{1.5 \times 10^7}{1.13 \times 10^7} \approx 1.33.$$

#### 6.9.5 Integración con el análisis de rugosidad

Para cada subtramo del corredor se integraron:

- IRI funcional,
- indicadores espectrales (Fourier),
- escalogramas y energía por escala (Wavelet),
- modos intrínsecos IMF (HHT),
- número estructural y índice estructural.

Esto permitió diferenciar entre:

- **Rugosidad de origen estructural:** alta energía en baja frecuencia +  $I_{\text{estr}} < 1$ .
- **Rugosidad de origen superficial:** energía dominante en altas frecuencias + estructura adecuada.

## CONCLUSIONES

1. **Uso del IRI como indicador inicial de evaluación:** Se confirma que el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) constituye un indicador adecuado para la evaluación funcional inicial del pavimento. No obstante, en tramos donde el IRI supera valores del orden de **2.5 a 3.0 m/km** y se observa una alta variabilidad espacial, su interpretación debe ser complementada con técnicas de análisis multirresolutivo, a fin de evitar diagnósticos globales que oculten irregularidades locales de importancia técnica.
2. **Aplicación de la Transformada Wavelet Continua en gestión vial:** Para estudios orientados a la gestión y conservación vial, la aplicación de la Transformada Wavelet Continua (CWT) con resoluciones espaciales del orden de **10 a 20 m** demostró una mayor capacidad para identificar zonas críticas del pavimento, en comparación con los métodos tradicionales basados en valores promedio del IRI, permitiendo una localización más precisa de los sectores con deterioro funcional significativo.
3. **Importancia de la segmentación del perfil longitudinal:** El análisis evidenció que la segmentación del perfil longitudinal en longitudes no mayores a **100 a 200 m** resulta más representativa del comportamiento real del pavimento. Segmentaciones de mayor longitud tienden a suavizar irregularidades locales, las cuales pueden representar incrementos puntuales del IRI superiores al **30 %**, afectando la correcta priorización de intervenciones.
4. **Integración del expediente técnico en la interpretación del IRI:** Se determinó que la información proveniente del expediente técnico constituye una herramienta fundamental de interpretación en aquellos tramos donde se registran incrementos abruptos del IRI mayores a **0.8 m/km** en distancias cortas. Dichos incrementos sugieren la posible presencia de deterioros estructurales o problemas geotécnicos subyacentes que no pueden ser explicados únicamente desde una evaluación funcional.
5. **Reproducibilidad de la metodología propuesta:** La metodología basada en el análisis multiescala del perfil longitudinal mostró un alto potencial de replicabilidad en otros corredores viales. Su aplicación permitiría validar si los rangos de energía y las escalas características identificadas se mantienen en pavimentos con diferentes condiciones de tránsito, estructura y entorno geográfico, fortaleciendo su aplicabilidad en la gestión vial a nivel regional y nacional.
6. **Requerimientos computacionales del análisis multirresolutivo:** El desa-



rollo eficiente de los análisis espectrales y multirresolutivos requiere la disponibilidad de **hardware y procesadores modernos**, debido al alto volumen de datos y a la complejidad computacional involucrada. Contar con estos recursos permite reducir significativamente los tiempos de procesamiento y los costos asociados al análisis, favoreciendo su implementación práctica en estudios de evaluación de pavimentos.

7. **Tendencia suavizada mediante promedio móvil:** El promedio móvil evidenció un incremento sostenido del IRI entre los kilómetros **41 y 58**, con un aumento del **35 %** respecto al tramo inicial, lo cual revela una tendencia de deterioro progresivo del pavimento.
8. **Recomendaciones de mantenimiento:** Basado en los umbrales definidos, se recomienda intervenir un **28 % del tramo total** por presentar condiciones inferiores a regular”. Además, un **12.5 %** del tramo necesita intervención urgente por deterioro severo.
9. 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.
10. 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.
11. El análisis DEP puede ser relativamente fácil de implementar en la práctica, ya que, si bien tiene 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.

12. 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, sino también las razones que sustentan los valores obtenidos.

## RECOMENDACIONES

**1. Implementar mantenimiento rutinario preventivo en zonas con rugosidad moderada.**

Se recomienda priorizar el mantenimiento superficial (como sellado de fisuras o bacheo localizado) en los tramos que presentan un valor de IRI entre **3.0 m/km y 5.0 m/km**. Según el análisis espectral y empírico, estos tramos abarcan aproximadamente el **46.7%** del tramo total, mostrando condiciones regulares que aún pueden mantenerse sin requerir intervenciones mayores.

**2. Realizar rehabilitación vial en zonas con rugosidad severa.**

En los tramos que superan el valor de IRI de **5.0 m/km**, correspondientes al **18.3%** del total analizado, se evidencia deterioro estructural y pérdida de confort de conducción. Se sugiere evaluar el refuerzo del pavimento o la rehabilitación integral en estas zonas, de acuerdo con las prioridades del plan vial.

**3. Implementar un sistema de monitoreo continuo del IRI.**

Considerando la variabilidad espacial observada, se recomienda la instalación de un programa de monitoreo continuo del IRI a través de sensores inerciales o perfilómetros. Esto permitiría detectar el deterioro de manera oportuna y mejorar la planificación del mantenimiento.

**4. Utilizar transformadas avanzadas como herramientas complementarias de diagnóstico.**

La Transformada Wavelet y la Hilbert-Huang demostraron ser útiles para segmentar patrones ocultos de deterioro a diferentes escalas. Se recomienda incluir estas herramientas en los sistemas de gestión vial como apoyo al diagnóstico convencional.

**5. Desarrollar un índice compuesto multiescala.**

A partir del análisis conjunto de los modos intrínsecos (IMFs) y componentes espectrales, se sugiere crear un índice multiescala que combine características de frecuencia y magnitud del IRI. Este índice permitiría una clasificación más robusta del estado del pavimento.

**6. Capacitar al personal técnico en procesamiento de señales aplicado a infraestructura vial.**

Dado que el uso de técnicas como Fourier, Wavelet y EMD aún no es común en la ingeniería vial peruana, se recomienda promover la capacitación en estas herramientas, así como el desarrollo de software propio para su implementación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM. (2001). *Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces (ASTM E1170-97)*. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- De Solminihaç, H., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). *Gestión de infraestructura vial* (3ra edición). Santiago de Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Díaz-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. Reino Unido.
- Gillespie, T., Sayers, M., & Segel, L. (1980). *Calibration of response-type road roughness measuring systems*. Reporte NCHRP N° 228. Washington D.C.: National Research Council.
- Hesami, R., & McManus, K. (2009). *Signal processing approach to road roughness analysis and measurement*. Proceedings of the IEEE Region 10 Annual International Conference. Singapur.
- Highway Research Board. (1962). *The AASHO Road Test*. Illinois: National Academy of Sciences.
- Irvine, T. (2000). *An introduction to spectral functions*. Vibroacoustics Technical Series. Estados Unidos.
- ISO. (2016). *Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting measured data (ISO 8608:2016)*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- Mann, A., MacManus, K., & Holden, J. (1997). *Power spectral density analysis of road profiles for road defect assessment*. Road & Transport Research, Vol. 5(3), 36–47.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2020). *Manual de Carreteras, Volumen N° 3: Instrucciones y criterios de diseño*. Santiago de Chile.
- Múcka, P. (2017). *International Roughness Index specifications around the world*. Road Materials and Pavement Design, Vol. 18(4), 929–965.
- Múcka, 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.

## ANEXOS

### ANEXO A: CÓDIGOS EN PYTHON

A continuación, se presentan los códigos desarrollados en Python para el procesamiento del perfil longitudinal del pavimento. En este sentido, el ?? muestra el algoritmo principal empleado para el análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de los datos del perfilómetro láser, integrando las transformadas de Fourier, Wavelet y Hilbert–Huang, así como los procedimientos de preprocesamiento del archivo tipo RSP.

El ?? presenta las funciones auxiliares utilizadas por dichos algoritmos, incluyendo los módulos para filtrado, eliminación de tendencias, segmentación por distancias y cálculo de las señales modales. Estos componentes permiten articular de manera sistemática el análisis multiespectral de rugosidad necesario para el tramo Santa Rosa–Ayaviri.

#### Procesamiento del Perfil Longitudinal del Pavimento

```
1      # PROCESAMIENTO DEL PERFIL LONGITUDINAL DEL PAVIMENTO
2      # Datos aplicados al tramo Santa Rosa – Ayaviri (Sicuani –
      Juliaca)
3      import funciones_IRI as fun
4      import numpy as np
5      import pywt
6      from scipy.signal import hilbert
7      from scipy import fftpack
8
9      # LECTURA Y PREPROCESAMIENTO DEL ARCHIVO RSP
10
11      # Lectura del perfil (registro 5405)
12      perfil = fun.leer_rsp("./RSP/SantaRosa_Ayaviri_5405.rsp")
13
14      # Espaciamiento del perfil longitudinal
15      delta_x = 0.025          # [m] según la configuración del
      perfilómetro láser
16      N = len(perfil)          # Número total de puntos (~43 km)
17      distancia = np.arange(0, N*delta_x, delta_x)
18
19      # Eliminación de tendencia y filtrado inicial
20      perfil_detrend = fun.detrend(perfil)
21      perfil_filtrado = fun.filtrar_bajo_ruido(perfil_detrend)
22
23      # TRANSFORMADA DE FOURIER
24
25      fft_signal = fftpack.fft(perfil_filtrado)
```

```

24     frecuencias = fftpack.fftfreq(N, delta_x)
25
26     # TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA
27
28     wavelet = 'morl'
29     coef, escalas = fun.wavelet_cwt(perfil_filtrado, wavelet)
30
31     # DESCOMPOSICIÓN HILBERTHUANG (EMD + HHT)
32
33     imfs = fun.emd_descomposicion(perfil_filtrado)
34     inst_frec, inst_amp = fun.hilbert_huang(imfs, delta_x)
35
36     # CÁLCULO DEL IRI POR TRAMOS
37
38     # Segmentación cada 100 m
39     segmentos = fun.segmentar(distancia, perfil_filtrado, L=100)
40     iri_por_segmento = []
41
42     for seg in segmentos:
43         iri = fun.calcular_IRI(seg, delta_x)
44         iri_por_segmento.append(iri)
45
46     # RESULTADOS DEL ALGORITMO
47     print("Número de IMFs obtenidos:", len(imfs))
48     print("IRI promedio del tramo (m/km):", np.mean(iri_por_segmento))
49 )

```

Código A.1: Algoritmo para el análisis del perfil longitudinal mediante Fourier, Wavelet y Hilbert-Huang

## Funciones

```

1 import numpy as np
2 from scipy import linalg as LA
3 import copy
4
5 # FUNCIÓN EIGEN
6 def eigen(Tsf=1,n=5):
7     Z=np.identity(n); ke=(4*n/Tsf)**2; k=np.zeros(n)
8     for i in range(n):
9         if i==0:
10             k[i]=2*ke
11         else:
12             k[i]=ke
13     K=tridiag(k,n); M=np.identity(n)
14     vp,φp=LA.eigh(K,M); φp=φp.T; FP=[]; MP=[]
15     for i in range(n):
16         FP.append(sum(φp[i].T@M))

```

```
17     for i in range(n):  
18         MP.append((sum( $\varphi p[i]$ ).TQM)**2)  
19     T=2*np.pi/(vp)**0.5; MMP=MP/sum(MP)  
20     return T, $\varphi p$ ,FP,MMP
```

Código A.2: Funciones-KS



ANEXO A: CÓDIGOS EN PYTHON

034

<b>CLIENTE</b> 	<b>CONSULTOR</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSION A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS - CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5): Dv. INTEROCÉANICA SUR RA 30C AL Dv. AZÚGARO RUTA 348"</b>
<b>DOCUMENTO</b>	<b>DISEÑO DE PAVIMENTOS</b>	<b>FECHA: 2021 INFORME FINAL N° 04 - INGENIERIA</b>

2014	11.9		12.2	11.3	9.7	8.9	8.7	10.0	12.1	13.4	14.8	13.4	11.49
2015	12.1	12.2	12.5	11.4	9.9	8.6	7.9	10.4	13.0	13.5	14.6	12.9	11.58
2016	14.2	13.3	13.5	11.8	9.6	8.0	8.3	10.1	12.4	12.8	13.8	13.7	11.79
2017	12.8	12.4	12.1	11.6	10.1	8.9	9.4	10.5	12.5	12.7	13.5	12.9	11.62
2018	11.9	12.2	12.3	11.5	9.4	8.0	8.1	9.5	12.4	12.6	13.8	13.2	11.24
2019	12.9	12.4	12.4	12.0	9.8	8.6	8.5	10.0	12.7	14.0	13.5		11.53
<b>TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)</b>													<b>11.40</b>

Fuente: SENAMHI

Tabla 13 Temperatura media anual - Santa Rosa

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2010	9.6	10.6	10.7	9.5	7.2	6.1	4.7	6.6	9.3	10.6	11.5	10.0	8.87
2011	10.0	8.8	8.8	9.1	6.4	4.0	4.6	7.2	8.4	10.3	11.4	10.3	8.28
2012	9.5	8.9	9.5	8.3	5.9	4.6	4.2	6.3	9.2	11.0	12.0	9.7	8.26
2013	9.2	9.3	9.3	8.1	6.7	4.9	5.1	6.2	8.1	10.5	11.6	10.0	8.25
2014	9.5	9.7	9.2	8.5	6.6	5.8	5.1	6.1	8.9	10.1	11.1	11.0	8.47
<b>TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)</b>													<b>8.41</b>

Fuente: SENAMHI

Tabla 14 Temperatura media anual - Ayaviri

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2010	10.5	11.3	11.0	10.7	9.3	8.4	6.9	8.9	11.4	11.9	13.2	11.4	10.41
2011	11.4	10.0	10.0	9.8	8.6	7.3	7.2	8.8	9.9	11.5	12.2	10.7	9.78
2012	10.0	9.6	10.3	9.5	7.7	6.6	6.7	7.4	9.8	11.3	11.8	10.2	9.24
2013	9.8	9.3	10.5	9.6	9.3	7.4	7.7	8.3	9.7	11.5	12.7	10.6	9.70
2014	10.1	10.2	10.7	10.2	9.6	8.7	7.9	8.7	10.3	10.7	11.2	10.7	9.92
2015	9.9	10.5	10.7	9.8	9.2	8.0	7.0	8.7	10.5	10.8	12.5	11.1	9.89
2016	11.8	11.8	11.8	9.8	8.4	7.1	7.3	8.9	10.4	11.1		12.1	10.05
2017		11.0	9.9	9.7	8.8	7.3	7.0	8.6	10.3	11.2	12.2	11.3	9.75
2018	10.1	10.3	10.2	9.1	8.3	7.3	7.0	7.8	10.0	10.2	12.2	12.0	9.54
2019	11.7	10.5	10.5	10.1	8.6	6.9	6.7	8.0	10.8	11.0			9.48
<b>TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)</b>													<b>9.78</b>

Fuente: SENAMHI

Tabla 15 Temperatura media anual - Pucara

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2010	11.0	11.2	11.1	10.3	8.3	7.8	6.9	7.7	9.6	10.9	11.0	11.0	9.73
2011	10.6		9.4	9.1	8.0	6.9	6.6	7.8	9.0	9.6	10.7		8.77
2012			9.4	9.2	7.2	6.4	6.1	6.8	9.0	10.5	11.3		8.43
2013	10.5	10.7	11.3	9.9	9.0	7.3	8.0	8.4	9.5	11.0	12.2	11.2	9.92

KARL WILFREDO RIOS ASMAT  
Jefe de Estudio  
Reg. CIP N° 53750

MIGUEL VERA PACO  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 71725

Luis Miguel Medina Quiroz  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 32709

CONSORCIO VIAL URCOS  
Isaías Raúl Valverde Ibarguen  
REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.1: Temperatura y CBR - Página 1.

035

<b>CLIENTE:</b> 	<b>CONSULTOR:</b> 	<b>TÍTULO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS – CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5: D.V. INTEROCÉANICA SUR RA 30C AL D.V. AZÚGARO RUTA 34B*)
<b>DOCUMENTO</b>	<b>DISEÑO DE PAVIMENTOS</b>	<b>FECHA:</b> 2021 <b>INFORME FINAL N° 04-INGENIERIA</b>

2014	11.0	10.8	10.8	10.5	8.8	8.2	7.6	8.3	10.2	10.7	11.6	11.5	10.00
2015	10.6	10.9	10.7	10.0	8.9	7.8	6.8	7.7	9.7	10.5	11.7	11.3	9.72
2016	11.4	12.0	11.4	10.8	8.4	7.5	7.3	8.4	9.4	10.7	10.9	11.6	9.98
2017	11.2	11.3	10.9	10.4	9.3	7.9	7.6	8.2	10.0	9.5	10.8	10.2	9.78
2018				8.3	7.3	6.9	7.1	7.7	8.7	9.8	10.5	10.5	8.53
2019	10.2	10.5	10.3	10.0	8.5	7.1	7.1	7.3	9.0	9.4			8.94
<b>TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)</b>													<b>9.38</b>

Fuente: SENAMHI

Tabla 16 Temperatura media anual – Juliaca

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2010	11.0	10.2	10.3	9.5	8.3	5.6	6.6	7.1	10.3	11.6	12.5	11.9	9.58
2011	11.7	11.5	11.4	11.0	8.8	8.1	6.8	8.0	10.5	11.4	12.8	11.1	10.26
2012	11.7	10.0	10.1	10.1	8.5	7.0	6.7	8.5	9.6	11.2	12.8	11.8	9.83
2013	10.7	9.5	9.9	9.8	7.6	6.4	6.4	7.3	9.8	12.0	13.0	11.2	9.47
2014	10.5	10.6	11.0	9.2	8.3	6.4	6.7	7.6	9.4	11.1	12.8	11.1	9.56
2015	10.7	10.8	10.7	10.1	8.3	8.0	6.7	7.7	9.4	11.0	12.5	12.7	9.88
2016	10.0	10.8	10.5	9.7	8.6	7.4	6.3	7.9	10.3	11.1	13.0	12.4	9.83
2017	12.3	11.5	11.9	10.1	8.4	6.8	7.2	8.2	10.3	11.2	12.5	12.5	10.24
2018	10.8	10.5	10.2	9.3	7.7	7.1	7.2	8.0	9.8	11.4	12.8	12.1	9.74
2019	11.6		11.2	10.2	8.7	6.8	6.5	7.6	10.6	10.9			9.34
<b>TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)</b>													<b>9.77</b>

Fuente: SENAMHI

De acuerdo a las temperaturas medias anuales registradas, presenta una temperatura media anual de 13.49 °C (Cayay), 11.40 (Sicuan), 8.41 (Santa Rosa), 9.78 (Ayaviri), 9.38 (Pucara) y 9.77 °C (Juliaca), dada las condiciones climáticas del Proyecto y de acuerdo a las Especificaciones Técnicas Generales 2013 del MTC, se recomienda la utilización de cemento asfáltico convencional PEN 120-150 para altura mayores a los 3,000 msnm (ver siguiente tabla).

Tabla 17 Selección del tipo de cemento asfáltico

<b>TEMPERATURA MEDIA ANUAL</b>			
<b>24°C</b>	<b>24°C – 15°C</b>	<b>15°C – 5°C</b>	<b>Menos de 5°C</b>
40 – 50 ó 60 – 70 ó modificado	60 – 70	85 – 100 120 – 150	Asfalto Modificado

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales 2013.

### 1.3.10. CALCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTO

  
 KARL WILFREDO RIOS ASMAT  
 Jefe de Estudio  
 Reg. CIP N° 53750

  
 MIGUEL VERA PACO  
 INGENIERO CIVIL  
 Reg. CIP N° 71725

  
 Luis Miguel Medina Quiroz  
 INGENIERO CIVIL  
 Reg. CIP N° 32709

  
 CONSORCIO VIAL URCOS  
 Isaias Raúl Valverde Ibarguen  
 REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.2: Temperatura y CBR - Página 2.

036

<b>CLIENTE:</b>  <b>PERU</b>	<b>CONSULTOR:</b> 	<b>"ESTUDIO DE PREINVERSION A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS - CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5): DV. INTEROCEÁNICA SUR RA 30C AL DV. AZÚGARO RUTA 348"</b>
<b>DOCUMENTO</b>	<b>DISEÑO DE PAVIMENTOS</b>	<b>FECHA: 2021 . INFORME FINAL N° 04 - INGENIERIA</b>

A continuación, se describe el diseño de pavimento para la carretera Urcos - Calapuja, la sectorización realizada por los valores de CBR, se ha subdividido ya que se ha considerado tráficos distintos en su longitud, por lo que la sectorización final para el cálculo de los espesores sería:

Tabla 18 Valores de CBR y Mr de la sectorización final de la vía

SECTOR	SUB SECTOR	DEL KM	AL KM	CBR %	MR (psi)
1		1019+600.00	1020+287.31	41.07	27,532.50
2		1020+287.31	1020+868.75	45.41	29,338.96
3		1020+868.75	1025+393.34	37.70	25,916.11
4		1025+393.34	1027+856.89	25.70	19,812.11
5		1027+856.89	1034+852.76	37.53	25,911.50
6		1034+852.76	1036+862.30	41.01	27,498.75
7	7.1	1036+862.30	1040+680.00	40.33	26,930.34
	7.2	1040+680.00	1048+815.36	38.51	23,335.76
8	8.1	1048+815.36	1052+340.00	34.41	24,193.83
	8.2	1052+340.00	1053+803.67	33.64	23,542.60
9		1053+803.67	1055+269.35	42.04	27,925.91
10		1055+269.35	1056+771.21	45.29	29,281.45
11		1056+771.21	1057+754.26	11.20	11,991.15
12	12.1	1057+754.26	1060+600.00	36.73	26,443.21
	12.2	1060+600.00	1062+655.36	45.53	29,691.68
13		1062+655.36	1062+818.68	48.12	30,485.23
14		1062+818.68	1063+746.72	34.01	24,316.03
15		1063+746.72	1066+757.60	42.72	26,206.65
16	16.1	1066+757.60	1068+440.00	42.99	26,335.16
	16.2	1068+440.00	1078+580.00	41.34	24,686.57
	16.3	1078+580.00	1079+691.48	30.20	22,054.55
17		1079+691.48	1082+665.91	35.00	24,306.39
18	18.1	1082+665.91	1083+420.00	45.60	29,428.09
	18.2	1083+420.00	1085+666.68	19.49	16,291.24
19		1085+666.68	1091+622.18	35.30	24,581.90
20		1091+622.18	1092+684.47	20.95	17,603.13
21		1092+684.47	1093+665.54	31.48	23,174.84
22		1093+665.54	1100+633.66	43.70	26,588.22
23		1100+633.66	1101+820.00	30.98	21,717.05
24		1101+820.00	1103+280.42	13.16	23,819.67
25		1103+280.42	1103+918.72	35.03	13,210.85
26	26.1	1103+918.72	1105+630.00	21.50	19,076.12
	26.2	1105+630.00	1106+680.00	40.00	TUNEL
	26.3	1106+680.00	1110+660.00	21.50	19,076.12
	26.4	1110+660.00	1111+410.00	40.00	TUNEL
	26.5	1111+410.00	1113+800.00	20.42	19,076.12
27		1113+800.00	1114+221.38	29.76	21,745.76
28	28.1	1114+221.38	1114+240.00	44.18	28,825.37
	28.2	1114+240.00	1120+426.92	28.78	21,470.39

KARL WILFREDO RIOS ASMAT  
Jefe de Estudio  
Reg. CIP N° 53750

MIGUEL VERA PACO  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 71725

Luis Miguel Medina Quiroz  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 32709


CONSORCIO VIAL URCOS  
Isaias Raúl Valverde Ibarquien  
REPRESENTANTE LEGAL


FIGURA B.3: Temperatura y CBR - Página 3.


037

		<b>ESTUDIO DE PREINVERSION A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS - CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 6): Dv. INTEROCEÁNICA SUR RA 30C AL Dv. AZANGARO RUTA 348"</b>
DOCUMENTO	DISEÑO DE PAVIMENTOS	FECHA: 2021 INFORME FINAL N° 04 - INGENIERIA

SECTOR	SUB SECTOR	DEL KM	AL KM	CBR %	MR (psi)
29		1120+426.92	1123+231.97	26.77	20,710.40
30		1123+231.97	1124+214.66	44.64	29,035.11
31		1124+214.66	1126+456.58	24.78	19,553.98
32		1126+456.58	1129+280.44	37.31	25,880.25
33		1129+280.44	1133+436.52	43.16	28,276.62
34		1133+436.52	1142+319.61	34.32	24,288.28
35		1142+319.61	1146+258.58	38.53	26,316.93
36		1146+258.58	1147+199.70	46.88	29,962.53
37		1147+199.70	1149+038.68	39.51	28,822.78
38		1149+038.68	1152+765.64	35.11	24,611.70
39		1152+765.64	1160+829.37	33.42	23,932.23
40		1160+829.37	1172+814.96	42.14	27,891.07
41		1172+814.96	1176+801.81	34.21	24,256.81
42	42.1	1176+801.81	1179+950.00	31.21	22,061.95
	42.2	1179+950.00	1180+788.76	28.93	22,011.40
43		1180+788.76	1182+841.26	40.41	27,251.39
44		1182+841.26	1184+834.75	30.50	22,758.88
45		1184+834.75	1188+862.27	41.35	27,443.70
46		1188+862.27	1191+369.50	27.93	21,169.08
47		1191+369.50	1193+789.49	33.34	23,236.59
48		1193+789.49	1196+843.77	22.40	17,582.30
49		1196+843.77	1207+619.40	23.73	18,629.07
50		1207+619.40	1208+613.10	19.07	16,180.37
51		1208+613.10	1209+824.21	69.38	38,461.02
52		1209+824.21	1214+797.00	38.41	28,246.63
53	53.1	1214+797.00	1221+500.00	30.23	22,460.24
	53.2	1221+500.00	1222+396.16	23.94	19,289.18
54		1222+396.16	1223+810.75	31.54	23,229.28
55		1223+810.75	1228+309.26	31.39	22,889.12
56		1228+309.26	1230+776.61	18.67	15,586.33
57		1230+776.61	1242+397.37	27.18	20,773.42
58		1242+397.37	1246+265.50	16.42	14,970.20
59		1246+265.50	1249+830.37	16.18	14,427.02
60		1249+830.37	1257+474.27	26.10	19,426.71
61		1257+474.27	1262+005.06	19.99	17,143.38
62		1262+005.06	1263+860.29	11.55	12,113.16
63		1263+860.29	1267+121.37	11.43	12,073.31
64		1267+121.37	1270+036.93	13.02	13,101.09
65		1270+036.93	1272+846.67	14.77	14,284.72
66		1272+846.67	1273+893.44	16.22	15,197.57
67		1273+893.44	1278+297.17	24.80	19,725.10
68		1278+297.17	1281+334.43	23.94	18,756.73
69	69.1	1281+334.43	1285+400.00	35.92	24,027.15
	69.2	1285+400.00	1288+755.06	25.17	22,182.78

  
**KARL WILFREDO RIOS ASMAT**  
 Jefe de Estudio  
 Reg. CIP N° 53750

  
**MIGUEL VERA PACO**  
 INGENIERO CIVIL  
 Reg. CIP N° 71725

  
**Luis Miguel Medina Quiroz**  
 INGENIERO CIVIL  
 Reg. CIP N° 32708


  
**Isaias Raúl Valverde Ibarguen**  
 REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.4: Temperatura y CBR - Página 4.



038

<b>CLIENTE</b>  <b>PERU</b> Ministerio de Transportes y Comunicaciones		<b>CONSULTOR</b> 	<b>"ESTUDIO DE PREINVERSION A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS - CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5): Dv. INTEROCEÁNICA SUR RA 30C AL Dv. AZÚNGARO RUTA 348"</b>
<b>DOCUMENTO</b>	<b>DISEÑO DE PAVIMENTOS</b>	<b>FECHA:</b>	<b>INFORME FINAL N° 04 - INGENIERIA</b>

A continuación, se describe el diseño de pavimento para los distintos periodos de diseño de la carretera Urcos - Calapuja:

#### A. DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO FLEXIBLE - AASHTO 93

##### a. Diseño de Pavimentos para 20 años (Ejecución en 2 Etapas)

La estructura de pavimento flexible proyectado se detalla en la siguiente tabla para el único sector, para lo cual se ha considerado los parámetros previamente asignados:

Tabla 19 Pavimento asfáltico período 10 años

SECTOR	SUB SECTOR	CARPETA ASFÁLTICA (cm)	BASE GRANULAR (cm)	SUB BASE GRANULAR (cm)
1		10.00	15.00	15.00
2		10.00	15.00	15.00
3		10.00	15.00	15.00
4		10.00	17.50	17.50
5		10.00	15.00	15.00
6		10.00	15.00	15.00
7	7.1	10.00	15.00	15.00
	7.2	10.00	15.00	15.00
8	8.1	10.00	15.00	15.00
	8.2	10.00	15.00	15.00
9		10.00	15.00	15.00
10		10.00	15.00	15.00
11		10.00	22.50	25.00
12	12.1	10.00	15.00	15.00
	12.2	10.00	15.00	15.00
13		10.00	15.00	15.00
14		10.00	15.00	15.00
15		10.00	15.00	15.00
16	16.1	10.00	15.00	15.00
	16.2	10.00	15.00	15.00
	16.3	10.00	17.50	17.50
17		10.00	17.50	17.50
18	18.1	10.00	17.50	17.50
	18.2	10.00	20.00	20.00
19		10.00	15.00	15.00
20		10.00	17.50	20.00
21		10.00	15.00	17.50



KARL WILFREDO RIOS ASMAT  
Jefe de Estudio  
Reg. CIP N° 53750

MIGUEL VERA PACO  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 71725

Luis Miguel Medina Quiroz  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 32709

CONSORCIO VIAL URCOS  
Isaías Raúl Valverde Ibarguen  
REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.5: Temperatura y CBR - Página 5.

039

<b>CLIENTE:</b> 	<b>CONSULTOR:</b> 	<b>TÍTULO:</b> "ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS - CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5): Dv. INTEROCÉANICA SUR RA 30C AL Dv. AZÁNGARO RUTA 34B"
<b>DOCUMENTO:</b> DISEÑO DE PAVIMENTOS	<b>FECHA:</b> 2021	<b>INFORME FINAL N° 04 - INGENIERIA</b>

SECTOR	SUB SECTOR	CARPETA ASFÁLTICA (cm)	BASE GRANULAR (cm)	SUB BASE GRANULAR (cm)
22		10.00	15.00	17.50
23		10.00	15.00	17.50
24		9.00	17.50	17.50
25		9.00	17.50	17.50
26	26.1	9.00	17.50	17.50
	26.2	TUNEL	TUNEL	TUNEL
	26.3	9.00	17.50	17.50
	26.4	TUNEL	TUNEL	TUNEL
	26.5	9.00	17.50	17.50
27		10.00	15.00	15.00
28	28.1	10.00	15.00	15.00
	28.2	9.00	15.00	17.50
29		9.00	15.00	17.50
30		9.00	15.00	17.50
31		9.00	15.00	17.50
32		9.00	15.00	15.00
33		9.00	15.00	15.00
34		9.00	15.00	15.00
35		9.00	15.00	15.00
36		9.00	15.00	15.00
37		9.00	15.00	15.00
38		9.00	15.00	15.00
39		9.00	15.00	15.00
40		9.00	15.00	15.00
41		9.00	15.00	15.00
42	42.1	9.00	15.00	15.00
	42.2	9.00	15.00	15.00
43		9.00	15.00	15.00
44		9.00	15.00	15.00
45		9.00	15.00	15.00
46		9.00	15.00	15.00
47		9.00	15.00	15.00
48		9.00	17.50	17.50
49		9.00	17.50	17.50
50		9.00	17.50	17.50
51		9.00	15.00	15.00
52		9.00	15.00	15.00
53	53.1	9.00	15.00	15.00

KARL WILFREDO RIOS ASMAT  
Jefe de Estudio  
Reg. CIP N° 53750

MIGUEL VERA PACO  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 71725

Luis Miguel Medina Quiroz  
INGENIERO CIVIL  
Reg. CIP N° 32709

CONSORCIO VIAL URCOS  
Isaías Raúl Valverde Ibarquén  
REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.6: Temperatura y CBR - Página 6.

040

<b>CLIENTE:</b>  <b>PERU</b>		<b>CONSULTOR:</b> 	<b>TÍTULO:</b> ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS – CALAPIJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5): Dv. INTEROCEÁNICA SUR RA 30C AL Dv. AZÚGARO RUTA 34B
<b>DOCUMENTO:</b> DISEÑO DE PAVIMENTOS		<b>FECHA:</b> 2021	<b>INFORME FINAL N° 04 - INGENIERIA</b>

SECTOR	SUB SECTOR	CARPETA ASFÁLTICA (cm)	BASE GRANULAR (cm)	SUB BASE GRANULAR (cm)
	53.2	9.00	15.00	17.50
54		9.00	15.00	17.50
55		9.00	15.00	17.50
56		9.00	17.50	20.00
57		9.00	15.00	15.00
58		9.00	17.50	20.00
59		9.00	20.00	20.00
60		9.00	15.00	17.50
61		9.00	17.50	17.50
62		9.00	20.00	22.50
63		9.00	20.00	22.50
64		9.00	20.00	20.00
65		9.00	20.00	20.00
66		9.00	20.00	20.00
67		9.00	15.00	17.50
68		9.00	15.00	17.50
69	69.1	9.00	15.00	15.00
	69.2	9.00	15.00	15.00



#### b. Cálculo de Refuerzo de Pavimento a los 10 años

La ejecución en dos etapas, contempla la ejecución inmediata de un refuerzo consistente en una carpeta asfáltica sobre la calzada ya existente. La implementación correcta de esta etapa, está condicionada a una evaluación integral de pavimento a fin de verificar el nivel de degradación de la superficie existente.

Por ello, al cabo de los 10 primeros años se debe realizar una evaluación del pavimento como es realizar medidas de la rugosidad, daños (agrietamientos, parchados, ahuecamiento) y deflectometría para saber el estado real de pavimento y tomar las correctas acciones como son dar mantenimiento o rehabilitar el pavimento.

Para hallar el refuerzo del pavimento a los 10 años en el presente estudio se ha empleado el método de la vida remanente del pavimento existente descrito en el manual de diseño AASHTO.

En primer lugar, se ha calculado la vida remanente del pavimento existente luego de haberse producido una serviciabilidad final de 1.5, mediante la siguiente fórmula:





 <b>KARL WILFREDO RIOS ASMAT</b> Jefe de Estudio Reg. CIP N° 53750	 <b>MIGUEL VERA PACO</b> INGENIERO CIVIL Reg. CIP N° 71725	 <b>Luis Miguel Medina Quiroz</b> INGENIERO CIVIL Reg. CIP N° 32709	 <b>CONSORCIO VIAL URCOS</b> <b>Isaias Radí Valverde Ibarquén</b> REPRESENTANTE LEGAL
--	--	--	---


FIGURA B.7: Temperatura y CBR - Página 7.








159

 CONSORCIO VIAL URCOS



PROYECTO ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: "MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5): DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B"

TRAMO PROYECTO Km 1019+600 - Km 1288+755.06

ELEMENTO : Estudio de Suses

MATERIAL : Evaluación Terreno Natural de Subrasante

### SECTORIZACION DEL TRAMO MEDIANTE MR DE SUBRASANTE: METODO DE LAS DIFERENCIAS ACUMULADAS

RECOMENDACION GUIA ASSHTO 1993

1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Progresiva	MR <sub>prom</sub> (%)	# Intervalo	Dist. Entre Intervalos	Dist. Acumulada entre intervalos	Intervalo promedio	Área del Intervalo	Área acumulada	Σz	Sub Tramos - MR prom. (%)	Tramos - MR prom. (%)
1104+929.84	26.883.91	166	1009.09	146312.05	25263.9	27767314.3	3504078266.3	236840.8		
1105+028.73	32.648.46	167	875.36	147187.41	32546.5	28489880.2	3532568156.5	235723.5		
1106+904.08	26.891.73	168	1012.77	148200.18	26691.7	27092579.4	3539600735.9	240071.1		27,881.07
1107+918.86	26.879.87	169	951.62	149151.8	28579.9	27197171.4	3546797907.3	245553.0		
1108+888.48	26.778.04	170	1146.9	150298.7	25778.0	28564832.3	3616362739.6	248828.4		
1170+016.38	33.490.83	171	872.45	151171.15	33490.5	29218813.8	3645581533.4	25905.9		
1170+887.83	26.198.38	172	908.26	152079.41	25136.4	22830344.7	3668411896.1	261991.6		
1171+798.09	26.617.70	173	1018.87	153098.28	28617.7	27119960.1	3695531878.2	266288.9		
1172+814.96	27.881.33	174	989.57	153699.85	27861.9	16608282.3	3712137180.5	268555.0		
1173+410.83	26.208.80	175	557.17	154261.02	26206.5	14863542.1	3727000702.7	271714.6		
1173+977.70	26.838.87	176	923.54	155184.56	26838.7	24786389.2	3751787291.9	275814.8		
1174+901.34	19.788.28	177	910.14	156094.7	15733.3	1433924.0	3766126815.9	289788.2		24,288.81
1175+811.28	27.895.78	178	990.43	157085.13	27935.9	27668445.6	3793795261.5	275252.0		
1176+901.81	24.847.77	179	1088.1	158153.23	24547.8	26219476.4	3820014737.9	277847.2		
1177+998.01	27.492.48	180	965.95	159119.18	27462.5	26527363.3	3846542101.2	282438.2		
1178+935.98	14.897.74	181	973.7	160092.89	14597.7	14213815.2	3860759016.4	274842.2	22,661.85	22,498.31
1179+808.98	28.828.65	182	977.2	161070.08	25925.7	25334549.8	3886080466.2	278288.5		
1180+738.78	22.811.40	183	954.73	162024.83	22011.4	21015384.1	3907105850.3	277918.5	22,011.48	
1181+741.81	27.698.13	184	1099.75	163124.58	27089.1	29796282.2	3936842132.5	283021.5		
1182+841.28	27.463.86	185	1052.44	164177.02	27463.7	28809845.6	3965748978.0	288351.8		27,351.39
1183+993.70	21.898.69	186	941.05	165118.07	21929.6	20695836.8	3986382814.8	287910.1		
1184+834.75	23.888.17	187	1021.61	166138.68	23588.2	24097906.5	4010480721.4	289125.0		22,758.88
1185+988.38	30.814.71	188	999	167138.68	30614.7	80584093.4	4041064814.8	297332.5		
1186+888.38	24.890.42	189	1066.77	168205.45	24580.4	26221633.9	4067285468.0	299659.6		
1187+822.13	33.078.88	190	940.14	169145.59	39076.6	31096519.1	409889081.1	309996.1		27,449.70
1188+882.27	21.801.11	191	986.94	170131.93	21803.1	21209885.0	4119983462.1	308814.5		
1189+848.81	15.871.80	192	986.86	171118.79	15871.7	15663136.1	4135235601.2	302373.0		
1190+835.47	23.297.46	193	534.08	171652.82	23297.5	12441548.7	4147787144.9	302852.8		21,569.06
1191+889.80	34.338.09	194	578.95	172231.77	24338.1	14090537.6	4161787882.5	303978.5		
1191+848.48	30.888.98	195	944.77	173176.54	30858.9	29154041.4	4190941723.9	311987.6		
1192+883.22	12.870.06	196	896.27	174072.81	12870.1	11535047.8	4202476771.7	308427.2		28,236.99
1193+788.48	25.881.37	197	1036.08	175108.89	25981.4	26818778.2	4229385549.9	307198.8		
1194+826.87	11.021.88	198	1010.56	176119.45	11021.7	11198071.5	4240533621.3	295841.4		
1195+836.13	25.902.81	199	993.58	177113.03	25302.5	25140071.7	4265679689.0	298526.3		
1196+826.71	10.889.01	200	944.04	178057.07	10889.0	10100285.4	4275779888.4	287481.1		17,582.30
1197+773.75	30.081.17	201	1070.02	179127.09	30081.2	32187454.1	4307961442.6	295701.2		
1198+843.77	19.897.12	202	1027.2	180154.29	10807.1	11101071.7	4318062514.3	283794.1		
1199+870.87	20.485.80	203	951.15	181105.44	20488.5	19456349.9	4338518764.1	281948.6		
1200+822.12	10.448.17	204	476.68	181582.12	10445.2	4979003.4	4349487767.5	276247.5		
1201+288.80	20.711.30	205	541.77	182123.89	20711.4	11220811.8	4354718579.3	275333.2		
1201+840.87	20.078.74	206	988.95	183112.24	20076.7	19842847.8	4374561427.1	279088.0		
1202+338.82	12.821.92	207	506.64	183618.88	12021.9	6009797.4	4380652224.5	267780.6		
1203+821.82	30.710.77	208	486.06	184104.94	22821.0	11082387.2	4391744811.7	267985.8		
1204+808.98	8.652.16	209	987.31	185092.25	30710.8	30821045.6	4422065637.3	276192.1		18,829.07
1205+841.24	20.482.21	210	1094.31	186126.56	9652.1	9883299.0	4437048916.3	263007.9		
1206+832.57	23.884.30	211	989.27	187115.83	20492.2	2072325.7	4452321242.0	261121.6		
1207+818.40	13.888.66	212	986.89	188102.72	23664.4	23354115.5	4475875357.5	262170.4		
1208+813.10	16.180.37	213	993.7	189096.42	11868.6	13781208.4	4489456565.9	253893.8		
1209+824.21	38.481.02	214	1011.11	190107.53	16180.6	18360138.2	4505816704.1	247606.1		16,180.37
1210+780.12	22.229.47	215	1052.36	191063.44	18461.0	36765272.1	4542581976.2	262960.0		38,461.02
1211+832.48	20.599.80	216	1026.9	192115.8	22229.3	23393403.2	4565975379.4	262781.6		
1212+859.38	23.881.83	217	985.26	193142.7	30559.6	11381652.0	4597357031.4	271161.8		
1213+844.64	30.853.56	218	952.86	194127.96	23851.9	2350035.6	4620857387.1	272593.3		26,246.65
1214+787.00	25.898.80	219	1003.93	195083.85	23938.6	24021104.5	46370073710.8	281999.8		

CONSORCIO VIAL URCOS

CARL WILFREDO RIOS ASMAT

Jefe de Estudio

Reg. CIP N° 53790

MIGUEL PENA PACO

INGENIERO CIVIL

Reg. CIP N° 71725

Luis Miguel Medina Quiroz

INGENIERO CIVIL

Reg. CIP N° 32709

Isaías Radí Valverde Ibarguen

REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.9: Ensayos de Laboratorio PLATAFORMA





0303

CIENTE:	CONSULTOR:	ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:	
		"MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPIJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCÉANICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B	
DOCUMENTO	ESTUDIO DE TRÁFICO	FECHA:	INFORME FINAL

**Tabla 339 Niveles de Servicio - Salida - EP Dv. Yauri**  
**SALIDA ACTUAL (Tramo: SANTA ROSA - DV YAURI)**

Año	Volumen diario (MDA)	Volumen horario en HP	Volumen Horario Equivalente, (Vp)	Velocidad Media de Viaje (VFL)	Densidad Vial	Nivel de Servicio
	Veh.x día	Veh.x Hora	Veh./Hr./Carril	Km. / Hr.	Veh./Km./Carril	
2018	1,146	74	88	62.9	1.4	A
2019	1,160	74	89	62.9	1.4	A
2020	1,172	75	90	62.9	1.4	A
2021	1,187	76	92	62.9	1.5	A
2022	1,202	77	93	62.9	1.5	A
2023	1,218	78	94	62.9	1.5	A
2024	1,232	79	95	62.9	1.5	A
2025	1,245	80	97	62.9	1.5	A
2026	1,264	81	98	62.9	1.6	A
2027	1,340	86	104	62.9	1.7	A
2028	1,357	87	106	62.9	1.7	A
2029	1,371	88	107	62.9	1.7	A
2030	1,392	89	108	62.9	1.7	A
2031	1,409	90	110	62.9	1.7	A
2032	1,425	91	111	62.9	1.8	A
2033	1,442	92	113	62.9	1.8	A
2034	1,460	94	114	62.9	1.8	A
2035	1,479	95	116	62.9	1.8	A
2036	1,501	96	118	62.9	1.9	A
2037	1,521	98	119	62.9	1.9	A
2038	1,539	99	121	62.9	1.9	A
2039	1,560	100	123	62.9	2.0	A
2040	1,579	101	124	62.9	2.0	A
2041	1,599	103	126	62.9	2.0	A
2042	1,619	104	128	62.9	2.0	A
2043	1,643	105	130	62.9	2.1	A
2044	1,663	107	131	62.9	2.1	A
2045	1,685	108	133	62.9	2.1	A
2046	1,705	109	135	62.9	2.1	A

#### 18.5.10. Estación E10: SANTA ROSA TRAMO: SANTA ROSA - AYAVIRI

El nivel de servicio encontrado para el año 2018 en el tramo E10 es "A", para ambos sentidos, esta condición se mantiene hasta el año 2046 y con la propuesta de mejoras viales en este tramo, el nivel de servicio permanece en "A", la cual representa la circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma Individual, están virtualmente

ING. KARL VALVERDE RAMOS ARQUE  
Jefe de Estudio  
Reg. CIP N° 63799

R. CHERO C.  
DES  
RVN

ING. RAÚL VALVERDE BANGUEN  
Especialista de Tráfico  
Reg. C.I.P N° 89588

CONSORCIO VIAL URCOS  
Ing. Raúl Valverde Banguen  
REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.12: niveles de servicio 1.



0304

<b>CLIENTE</b> 	<b>CONSULTOR</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> <b>"MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B"</b>
<b>DOCUMENTO :</b>	<b>ESTUDIO DE TRÁFICO</b>	<b>FECHA:</b> 2021 <b>INFORME FINAL</b>

exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen una altísima libertad para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito. El Nivel general de comodidad y conveniencia proporcionado por la circulación es excelente.

**Tabla 340 Datos de la vía – E10 Santa Rosa**



		ACTUAL	PROPUESTO
<b>Geometría vial</b>			
Topografía	Llana		
Ancho calzada	(m)	3.10	3.80
Ancho despeje lateral	(m)	2.00	2.00
Ancho carril	(m)	3.10	3.80
Número de carriles	(N°)	1.00	1.00
Existencia de mediana	(S/N)	N	N
Puntos de acceso a la vía	(N°)	0	0
<b>Parámetros de ajuste a la Velocidad</b>			
Velocidad Directriz	(Km/Hr.)		
Velocidad Operacional	(Km/Hr.)	70.0	70.0
FC por el tipo de mediana	(N°)	0.0	0.0
FC por la anchura del carril	(N°)	8.1	0.0
FA por despeje lateral	(N°)	0.0	0.0
FC por N° puntos de acceso	(N°)	0.0	0.0
<b>Parámetros de tráfico</b>			
Hora Punta	%	6.9%	
Factor de Máxima Demanda	%	0.77	
Dirección con mas flujo	%	51.6%	
Flujo % de Camiones	%		
Flujo % de Omnibus	%		
Factor del Conductor	Fp	1.00	
<b>Parámetros de Vehículo Pesado</b>			
Factor de ajuste por VP	Fhv		
Et (camiones y buses)	Et	1.5	
Et (recreacionales)	Et	1.5	
Factor pendiente (Fg)		1.0	

Fuente HCM



FIGURA B.13: niveles de servicio 2.

0305


<b>CLIENTE</b> 	<b>CONSULTOR</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> <b>"MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B"</b>
DOCUMENTO	ESTUDIO DE TRÁFICO	FECHA: 2021 INFORME FINAL

**Tabla 341 Niveles de Servicio – Entrada – E10 Santa Rosa**

ENTRADA ACTUAL (Tramo: STA ROSA - AYAVIRI)						
Año	Volumen diario (MDA)	Volumen horario en HP	Volumen Horario Equivalente, (Vp)	Velocidad Media de Viaje (VFL)	Densidad Vial	Nivel de Servicio
	Veh.x día	Veh.x Hora	Veh./Hr./Carril	Km. / Hr.	Veh./Km./Carril	
2018	759	52	79	61.9	1.3	A
2019	767	53	79	61.9	1.3	A
2020	779	54	81	61.9	1.3	A
2021	787	54	82	61.9	1.3	A
2022	798	55	83	61.9	1.3	A
2023	810	56	84	61.9	1.4	A
2024	821	57	85	61.9	1.4	A
2025	833	58	87	61.9	1.4	A
2026	840	58	88	61.9	1.4	A
2027	868	62	94	61.9	1.5	A
2028	908	63	95	61.9	1.5	A
2029	918	63	96	61.9	1.6	A
2030	931	64	98	61.9	1.6	A
2031	943	65	99	61.9	1.6	A
2032	956	66	100	61.9	1.6	A
2033	969	67	102	61.9	1.6	A
2034	989	68	104	61.9	1.7	A
2035	1,001	69	106	61.9	1.7	A
2036	1,016	70	107	61.9	1.7	A
2037	1,026	71	108	61.9	1.7	A
2038	1,043	72	110	61.9	1.8	A
2039	1,058	73	112	61.9	1.8	A
2040	1,071	74	114	61.9	1.8	A
2041	1,086	75	115	61.9	1.9	A
2042	1,102	76	117	61.9	1.9	A
2043	1,117	77	119	61.9	1.9	A
2044	1,135	78	121	61.9	2.0	A
2045	1,149	79	123	61.9	2.0	A
2046	1,165	81	124	61.9	2.0	A

  
**ING. NARCISO PINEDA**  
 Jefe de Estudio  
 Reg. CIP N° 53790



  
**ING. RAÚL VALVERDE**  
 Especialista de Tráfico  
 Ingeniero de Transportes  
 Reg. C.I.P. N° 89598



  
**CONSORCIO VIAL URCOS**  
 Ing. Raúl Valverde Ibarquén  
 REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.14: niveles de servicio 3.

0306



CLIENTE: 	CONSULTOR: 	ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO: "MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B
DOCUMENTO	ESTUDIO DE TRÁFICO	FECHA: 2021 INFORME FINAL

Tabla 342 Niveles de Servicio - Salida - E10 Santa Rosa

SALIDA ACTUAL (Tramo: AYAVIRI - SANTA ROSA)						
Año	Volumen diario (IMDA)	Volumen horario en HP	Volumen Horario Equivalente, (Vp)	Velocidad Media de Viaje (VFL)	Densidad Vial	Nivel de Servicio
	Veh.x día	Veh.x Hora	Veh./Hr./Carri	Km. / Hr.	Veh./Km./Carri	
2018	715	49	73	61.9	1.2	A
2019	723	50	74	61.9	1.2	A
2020	732	51	75	61.9	1.2	A
2021	742	51	76	61.9	1.2	A
2022	753	52	78	61.9	1.3	A
2023	762	53	79	61.9	1.3	A
2024	773	53	80	61.9	1.3	A
2025	783	54	81	61.9	1.3	A
2026	792	55	82	61.9	1.3	A
2027	843	58	87	61.9	1.4	A
2028	856	59	89	61.9	1.4	A
2029	864	60	90	61.9	1.5	A
2030	878	61	91	61.9	1.5	A
2031	889	61	92	61.9	1.5	A
2032	898	62	94	61.9	1.5	A
2033	912	63	95	61.9	1.5	A
2034	928	64	97	61.9	1.6	A
2035	939	65	98	61.9	1.6	A
2036	954	66	100	61.9	1.6	A
2037	965	67	101	61.9	1.6	A
2038	979	68	103	61.9	1.7	A
2039	990	68	104	61.9	1.7	A
2040	1,003	69	105	61.9	1.7	A
2041	1,019	70	107	61.9	1.7	A
2042	1,033	71	109	61.9	1.8	A
2043	1,047	72	110	61.9	1.8	A
2044	1,062	73	112	61.9	1.8	A
2045	1,076	74	114	61.9	1.8	A
2046	1,084	76	116	61.9	1.9	A

#### 18.5.11. Estación E11: AYAVIRI TRAMO: AYAVIRI -PUCARA

El nivel de servicio encontrado para el año 2018 en el tramo E11 es "A", para ambos sentidos, esta condición se mantiene hasta el año 2046 y con la propuesta de mejoras viales en este tramo, el nivel de servicio permanece en "A", la cual representa la






FIGURA B.15: niveles de servicio 4.

0062

<b>CLIENTE:</b> 	<b>CONSULTOR:</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> <b>"MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B"</b>
<b>DOCUMENTO:</b> ESTUDIO DE TRÁFICO		<b>FECHA:</b> 2021
		<b>INFORME FINAL</b>

**Tabla 39 Estación E10 – Santa Rosa. Volumen Vehicular por día, dirección y tipo de vehículo, en valores absolutos y relativos – Índice Medio Diario Anual, por dirección y tipo de vehículo en valores absolutos y relativos (Estación E10 – Santa Rosa)**

TRAMO DE LA CARRETERA		SANTA ROSA - AYAVIRI														ESTACION	
SENTIDO		SANTA ROSA - AYAVIRI														SANTA ROSA	
UBICACIÓN		SEN 970-700														E10	
FECHA	SENTIDO	AUTO	WAGON	PICK UP	PANEL	RURAL	MICRO	BUS	SE	SE	CAMION	SE	SE	SE	SE	SE	TOTAL
Jun 26- Noviembre	SANTA ROSA - AYAVIRI	106	25	08	25	210	9	43	81	42	18	3	0	7	0	29	808
	AYAVIRI - SANTA ROSA	102	25	01	37	207	8	38	58	47	15	5	0	18	0	1	806
	Ambos	208	50	09	62	417	17	81	139	89	33	8	0	25	0	3	1614
Mar 27- Noviembre	SANTA ROSA - AYAVIRI	135	25	07	23	213	12	31	64	63	28	3	1	0	0	47	748
	AYAVIRI - SANTA ROSA	116	19	05	38	181	10	22	47	73	32	5	0	5	0	40	683
	Ambos	251	44	12	61	394	22	53	111	136	60	8	1	11	0	87	1431
Jun 15- Junio	SANTA ROSA - AYAVIRI	123	38	105	30	178	5	15	33	79	35	2	0	10	1	59	715
	AYAVIRI - SANTA ROSA	103	55	133	15	187	1	18	39	53	34	0	0	4	0	32	888
	Ambos	226	91	238	45	365	6	33	72	132	69	2	0	14	1	91	1603
Jun 28- Noviembre	SANTA ROSA - AYAVIRI	108	29	04	38	213	9	18	52	72	30	2	2	2	4	88	729
	AYAVIRI - SANTA ROSA	89	25	03	35	195	14	19	58	68	18	0	0	4	1	37	652
	Ambos	197	54	07	71	408	23	37	110	140	48	2	2	6	5	125	1381
Jul 30- Noviembre	SANTA ROSA - AYAVIRI	160	37	106	34	280	8	13	78	90	39	6	3	1	0	63	867
	AYAVIRI - SANTA ROSA	145	33	106	29	289	4	19	67	88	34	4	4	2	0	65	868
	Ambos	305	70	212	63	569	12	32	145	178	73	9	7	3	0	128	1735
Ago 1- Diciembre	SANTA ROSA - AYAVIRI	158	38	03	58	284	20	21	47	77	27	8	0	7	1	48	888
	AYAVIRI - SANTA ROSA	182	34	04	43	284	18	17	38	61	24	4	2	5	0	80	884
	Ambos	337	70	07	99	568	38	38	85	138	51	10	2	12	1	128	1772
Dic 2- Diciembre	SANTA ROSA - AYAVIRI	182	32	102	60	285	24	18	81	78	32	6	0	8	1	88	928
	AYAVIRI - SANTA ROSA	178	29	08	32	279	18	22	37	68	25	7	2	1	0	65	848
	Ambos	330	61	188	92	564	42	40	118	146	57	12	2	9	1	153	1776
PD Nov- Dic (Ayaviri)		0.963	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963	0.919	0.919	0.919	0.919	0.919	0.919	0.919	0.919	0.919	100%

FECHA	SENTIDO	AUTO	WAGON	PICK UP	PANEL	RURAL	MICRO	BUS	SE	SE	CAMION	SE	SE	SE	SE	SE	TOTAL
MCA	SANTA ROSA - AYAVIRI	129	31	04	36	230	12	21	63	65	27	3	1	5	1	45	759
	AYAVIRI - SANTA ROSA	126	30	04	31	224	10	20	45	60	24	3	1	5	0	42	715
	Ambos	255	61	08	67	454	22	41	98	126	51	6	2	10	1	87	1474

Fuente: Estudio de Tráfico 2018

ING. KARL VALDEBARRA ROSA  
Jefe de Estudio  
Reg. C.P. N° 88598



VALDEBARRA ROSA RAUL  
Especialista de Tráfico  
Ingeniero de Transportes  
Reg. C.I.P. N° 88598

CONSORCIO VIAL URCOS

Raúl Valdebarra Ibarra  
Representante Legal



FIGURA B.16: Volumen vehicular por día 1.



0063

<b>CLIENTE</b> 	<b>CONSULTOR</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> <b>"MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPIJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B"</b>
<b>DOCUMENTO . ESTUDIO DE TRÁFICO</b>		<b>FECHA:</b> 2021 <b>INFORME FINAL</b>

**Tabla 40 Estación E11 – Ayaviri. Volumen Vehicular por día, dirección y tipo de vehículo, en valores absolutos y relativos – Índice Medio Diario Anual, por dirección y tipo de vehículo en valores absolutos y relativos (Estación E11 – Ayaviri)**

TRAMO DE LA CARRETERA		AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA														ESTACION	
SENTIDO		AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA														CODIGO	
UBICACIÓN		RUE 1230+000														E-11	
FECHA	SENTIDO	STATION	CARRETERAS	RURAL	MIXTO	SE	SE	SE	CAMION	SE	SE	SE	SE	SE	SE	TOTAL	%
Jun 20-Notiembre	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	140	88	137	58	282	0	35	72	86	16	3	0	1	0	949	51%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	133	43	116	57	352	2	20	66	81	16	2	3	2	31	827	46%
	Ambos	281	80	253	115	644	2	55	138	177	32	5	3	2	72	1876	100%
mar 27-Notiembre	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	117	13	105	45	191	3	31	60	67	7	0	0	2	0	737	50%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	126	13	103	47	283	2	34	60	62	30	2	1	2	0	736	50%
	Ambos	242	26	208	92	384	5	65	120	129	27	2	1	4	0	1473	100%
Jun 13-Julio	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	136	24	180	4	220	6	11	40	101	15	5	2	2	0	341	51%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	127	18	188	3	240	4	14	41	89	16	7	1	2	5	321	49%
	Ambos	263	42	377	7	460	10	25	80	190	34	13	3	4	13	662	100%
Jun 20-Notiembre	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	140	33	130	28	238	3	22	52	104	16	0	1	0	2	349	52%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	113	31	122	22	258	1	36	57	83	4	2	2	1	2	705	48%
	Ambos	251	64	252	51	496	4	58	109	187	20	3	1	4	133	1034	100%
vie 30-Notiembre	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	121	45	180	38	280	2	29	61	123	19	3	4	1	0	800	53%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	131	46	188	27	281	2	12	36	88	8	1	2	0	0	768	47%
	Ambos	252	91	215	67	561	4	40	149	212	25	4	6	1	0	1568	100%
sab 1-Diciembre	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	210	80	128	32	317	4	34	71	127	8	0	1	1	0	1087	49%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	214	82	133	41	348	5	38	68	142	12	1	1	2	0	1162	51%
	Ambos	424	162	261	73	665	9	72	139	269	19	1	2	3	0	2249	100%
dom 2-Diciembre	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	176	88	100	32	277	2	32	65	101	8	1	0	1	0	916	50%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	165	88	105	26	285	1	22	71	104	10	2	2	1	1	932	50%
	Ambos	341	176	205	58	562	3	54	136	205	18	3	2	2	1	1848	100%
FC Nov - Día (Ayaviri)		0.903	0.903	0.903	0.903	0.903	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	

INDIC	SENTIDO	STATION	CARRETERAS	RURAL	MIXTO	SE	SE	SE	CAMION	SE	SE	SE	SE	SE	SE	TOTAL	%
INDIC	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEANICA	140	45	124	31	248	3	30	54	67	12	2	1	1	55	854	51%
	CARRETERA INTEROCEANICA - AYAVIRI	137	42	120	31	285	2	22	53	61	11	2	2	1	44	828	49%
	Ambos	286	87	244	62	533	5	52	107	128	23	4	3	2	2	100	1682

Fuente: Estudio de Tráfico 2018

  
**ING. KARL WILFREDO RIOS AGUILAR**  
 Jefe de Estudio  
 Reg. CP N° 53750



  
**VALVERDE IBARGUEN ISAIAS RAUL**  
 Especialista de Tráfico  
 Ingeniero de Transportes  
 Reg. C.I.P. N° 66068

**CONSORCIO VIAL URCOS**  
  
**Isaias Raul Valverde Ibarguen**  
 REPRESENTANTE LEGAL



FIGURA B.17: Volumen vehicular por día 2.

0048

<b>CLIENTE</b> 	<b>CONSULTOR</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> <b>"MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 8) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÚNGARO RUTA 34B"</b>
DOCUMENTO	ESTUDIO DE TRÁFICO	FECHA: 2021 INFORME FINAL

## 6.9. IMDA E10 - SANTA ROSA KM 1179+950

La Tabla 25 muestra el Índice Medio Diario (IMDA) para una semana bajo condiciones normales de operación y la distribución del flujo vehicular de la estación E10.

**Tabla 25 IMDA - E10 Santa Rosa**  
E-10 - SANTA ROSA

Vehículo	SANTA ROSA - AYAVIRI	AYAVIRI - SANTA ROSA	IMDA	Distribución por Tipo de Vehículo	Distribución por Capacidad de Vehículo
Automóvil	129	128	255	17.3%	71.0%
Station Wagon	31	30	61	4.1%	
Pick Up	94	94	188	12.8%	
Panel	38	31	67	4.6%	
C. Rural	230	224	454	30.8%	
Microbús	12	10	22	1.5%	
Bus 2E	21	20	41	2.8%	29.0%
Bus 3E	53	45	98	6.6%	
Camión 2E	66	60	126	8.5%	
Camión 3E	27	24	51	3.5%	
Camión 4E	3	3	6	0.4%	
Semitrailer 2S1/2S2	1	1	2	0.1%	
Semitrailer 2S3	5	5	10	0.7%	
Semitrailer 3S1/3S2	1	0	1	0.1%	
Semitrailer >=3S3	48	42	90	6.1%	
Trayler 2T2	1	0	1	0.1%	
Trayler 2T3	0	0	0	0.0%	
Trayler 3T2	1	0	1	0.1%	
Trayler 3T3	0	0	0	0.0%	
<b>TOTAL</b>	<b>759</b>	<b>715</b>	<b>1474</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Fuente: Estudio de Tráfico 2018



FIGURA B.18: IMDA 1.

0049

<b>CLIENTE</b> 		<b>CONSULTOR</b> 	<b>ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL DEL PROYECTO:</b> <b>*MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA URCOS-CALAPUJA (CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA, TRAMO 5) DV. INTEROCEÁNICA SUR RUTA 30C AL DV. AZÁNGARO RUTA 34B</b>	
<b>DOCUMENTO</b>		<b>ESTUDIO DE TRÁFICO</b>	<b>FECHA:</b> 2021	<b>INFORME FINAL</b>

## 6.10. IMDA E11 - AYAVIRI KM 1221+500

La Tabla 26 muestra el Índice Medio Diario (IMDA) para una semana bajo condiciones normales de operación y la distribución del flujo vehicular de la estación E11.

**Tabla 26 IMDA - E11 Ayaviri**  
E-11 - AYAVIRI

Vehículo	AYAVIRI - CARRETERA INTEROCEÁNICA	CARRETERA INTEROCEÁNICA - AYAVIRI	IMDA	Distribución por Tipo de Vehículo	Distribución por Capacidad de Vehículo
Automóvil	149	137	286	17.0%	71.3%
Station Wagon	45	42	87	5.2%	
Pick Up	124	120	244	14.5%	
Panel	31	31	62	3.7%	
C. Rural	248	288	516	30.7%	
Microbús	3	2	5	0.3%	28.7%
Bus 2E	28	22	50	3.0%	
Bus 3E	56	53	109	6.6%	
Camión 2E	97	91	188	11.2%	
Camión 3E	12	11	23	1.4%	
Camión 4E	2	2	4	0.2%	
Semitrailer 2S1/2S2	1	2	3	0.2%	
Semitrailer 2S3	1	1	2	0.1%	
Semitrailer 3S1/3S2	1	1	2	0.1%	
Semitrailer >=3S3	55	44	99	5.9%	
Trayler 2T2	0	0	0	0.0%	
Trayler 2T3	0	1	1	0.1%	
Trayler 3T2	0	0	0	0.0%	
Trayler 3T3	1	0	1	0.1%	
<b>TOTAL</b>	<b>854</b>	<b>623</b>	<b>1532</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Fuente: Estudio de Tráfico 2018

  
Jairo de Eche  
Reg. CIP N° 88738



  
VALVERDE BARGUEN SALES RAUL  
Especialista de Tráfico  
Ingeniero de Transportes  
Reg. C.I.P. N° 88589



**CONSORCIO VIAL URCOS**  
  
Raúl Valverde Bargas  
REPRESENTANTE LEGAL

FIGURA B.19: IMDA 2.