



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Correlación del estado superficial y estructural de las estructuras de pavimento.

Joan Nicolás Hernández Morales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2020

Correlación del estado superficial y estructural de las estructuras de pavimento.

Joan Nicolás Hernández Morales

Trabajo final de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director (a):

Ph.D. Carol Andrea Murillo Feo

Línea de Investigación:

Materiales y pavimentos

Grupo de Investigación:

Geotechnical Engineering knowledge and Innovation (GENKI)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2020

A mis padres y mi hermano, quienes son todo en mi vida

A mis abuelitos Diva Barrios y Epifanio Morales

Agradecimientos

A Dios quien guía mi vida, a mis padres Edelma Morales y Floresmiro Hernández, y a mi hermano Paul Hernández por su amor y apoyo incondicional.

A la Profesora Carol Andrea Murillo Feo por su orientación y colaboración durante mi formación académica, profesional y como directora en este trabajo final de maestría.

Al Profesor Julio Estaban Colmenares Montañez por su colaboración y constante apoyo durante mi etapa de formación en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia.

A Daniela Jerez y Marcela Orjuela por su amistad, ayuda y motivación constante. A todos mis amigos y compañeros del Laboratorio de Geotecnia e integrantes del grupo de investigación GENKI, quienes me ayudaron y apoyaron constantemente.

Resumen

La evaluación estructural y superficial en las estructuras de pavimento, es fundamental para establecer los criterios de gestión y administración vial a cargo de las entidades gubernamentales. En este trabajo de investigación se evalúa la correlación existente entre la evaluación del estado superficial con el Perfilómetro Laser PL y la evaluación del estado estructural mediante el deflectómetro de impacto FWD; haciendo énfasis no solo en el Índice de Regularidad Internacional IRI sino además en el análisis de señales mediante transformaciones matemáticas como la Transformada Rápida de Fourier FFT, análisis de Densidad Espectral de Potencia PSD y Transformadas Discretas Wavelet DWT, análisis de parámetros de cuenco de deflexión y metodologías de retrocálculo AASHTO y YONAPAVE. Para esto, se realiza un estudio de las características y condiciones de servicio de segmentos viales con tres (3) niveles de deterioro, teniendo en cuenta variables como la velocidad de ejecución de ensayos con el PL. Asimismo, se hace una evaluación de serviciabilidad mediante el índice de condición PCI complementado con ensayos de macrotextura superficial, y la medición del espesor de las capas de las estructuras de pavimento con el Georradar GPR. Finalmente, se obtienen buenos resultados del análisis espectral con mayor precisión en la identificación de irregularidades mediante las Transformadas Wavelet. Además, se establecen los rangos o umbrales de medición para cada uno de los parámetros tenidos en cuenta junto con el Índice de Condición ICN, encontrando una correlación en la evaluación estructural y superficial de las estructuras de pavimento.

Palabras clave: Perfilómetro láser, FWD, IRI, Retrocálculo, Análisis espectral.

Abstract

The structural and superficial evaluation of pavement structures is essential to establish the criteria for Pavement Management System by government entities. In this research the correlation between the evaluation of the surface state with Profilometer Laser PL and the evaluation of the structural state through FWD impact deflectometer is evaluated; emphasizing not only in the International Regularity Index IRI but also in the analysis of signals through mathematical transformations such as Fast Fourier Transformation FFT, Power Spectral Density Analysis PSD and Discrete Wave Transformations DWT, analysis of deflection bowl parameters and retro calculation methodologies AASHTO and YONAPAVE. For this purpose, a study of the characteristics and service conditions of the road sections with three (3) levels of deterioration is carried out, considering variables such as the speed of execution with PL test, among others. Similarly, serviceability assessment is performed using Pavement Condition Index PCI complementary with Surface Macrottexture tests, and the measurement of the thickness of the layers of the pavement structures with Georradar GPR. Finally, good results of the spectral analysis are obtained with greater precision in the identification of irregularities by means of Wavelet Transforms. Also, the ranges or thresholds for each of the parameters considered together with the ICN condition index are established finding a correlation in the structural and superficial evaluation of pavement structures.

Keywords: Laser Profilometer, FWD, IRI, Retrocalculation, Spectral Analysis.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XVI
1. Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes y Justificación.....	4
1.1.1 Evaluación superficial.....	4
1.1.2 Evaluación estructural.....	8
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1 Objetivo general.....	10
1.2.2 Objetivos específicos.....	10
2. Capítulo II: Marco teórico.....	11
2.1 Evaluación superficial de los pavimentos.....	11
2.1.1 Metodologías de evaluación superficial.....	11
2.1.2 Fallas superficiales.....	13
2.1.3 Rugosidad.....	15
2.1.4 Regularidad.....	18
2.2 Análisis espectral de señales de onda.....	27
2.2.1 Transformada de Fourier.....	27
2.2.2 Transformada Discreta de Fourier.....	29
2.2.3 Densidad Espectral de Potencia PSD.....	30
2.2.4 Clasificación de perfiles de vía ISO 8608.....	32
2.2.5 Análisis por ventanas o Wavelets.....	36
2.3 Evaluación estructural de los pavimentos.....	39
2.3.1 Evaluación de tipo estacionario.....	39
2.3.2 Evaluación de tipo dinámico transitorio.....	40
2.3.3 Cuencos de deflexión.....	42
2.3.4 Métodos de retrocálculo.....	48
2.3.5 Prospección geofísica mediante Georradar GPR.....	53
3. Capítulo III: Metodología.....	54
3.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica.....	54
3.2 Etapa 2: Campaña experimental.....	55
3.2.1 Auscultación visual.....	58
3.2.2 Macrotextura superficial.....	58
3.2.3 Regularidad.....	59

3.2.4	Identificación de espesores.....	62
3.2.5	Deflectometría de impacto	63
4.	Capítulo IV: Resultados	66
4.1.1	Daños superficiales	66
4.1.2	Macrotextura superficial.....	70
4.1.3	Regularidad	72
4.1.4	Espesores de la estructura	79
4.1.5	Deflexiones.....	82
5.	Capítulo V: Análisis de resultados, Etapa 3.....	87
5.1	Evaluación superficial.....	88
5.1.1	Transformada Rápida de Fourier FFT.....	88
5.1.2	Densidad Espectral de Potencia PSD.....	95
5.1.3	Análisis Wavelet	102
5.2	Evaluación estructural	105
5.3	Análisis comparativo	108
5.3.1	Correlación DWT y CF.....	108
5.3.2	Índice de condición ICN.....	112
6.	Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	115
6.1	Conclusiones.....	115
6.2	Recomendaciones.....	119
7.	Referencias bibliográfica.....	120
8.	Anexos.....	126
8.1	Anexo A: Auscultación visual.....	126
8.1.1	Tramo TRA	127
8.1.2	Tramo TRM	128
8.1.3	Tramo TRB	129
8.2	Anexo B: Resumen datos obtenidos con el PL.....	131
8.2.1	Aceleraciones tramo TRA	132
8.2.2	Aceleraciones tramo TRM.....	133
8.2.3	Aceleraciones tramo TRB	134
8.2.4	Perfiles tramo TRA	135
8.2.5	Perfiles tramo TRM.....	136
8.2.6	Perfiles tramo TRB	137
8.3	Anexo C: Retrocálculo, valores de M_R y SN	138
8.3.1	Retrocálculo AASHTO tramo TRA	139
8.3.2	Retrocálculo YONAPAVE tramo TRA	141
8.3.3	Retrocálculo AASHTO tramo TRM.....	144
8.3.4	Retrocálculo YONAPAVE tramo TRM.....	146
8.3.5	Retrocálculo AASHTO tramo TRB	149
8.3.6	Retrocálculo YONAPAVE tramo TRB	151

Lista de figuras

Figura 2-1: Equipo Péndulo Británico, para mediciones de microtextura.	16
Figura 2-2: Medición de macrotextura mediante círculo de arena.....	17
Figura 2-3: Modelo matemático Quarter-Car QCS.....	20
Figura 2-4: Esquema general del índice IRI.....	22
Figura 2-5: Escalas para el índice IRI. (Michael W. Sayers et al., 1986).....	24
Figura 2-6: Perfilometro Rear CHLOE, (W. Carey, H. Huckins, 1962).	26
Figura 2-7: Esquema generalizado de FFT. División de secuencia de muestreo en sub secuencias, (Liu, 2009).	30
Figura 2-8: Aproximaciones de la función de Densidad Espectral de Potencia PSD, (Andren, 2015).	32
Figura 2-9: Categorización de las vías clases A-H. λ longitud de onda (m), n frecuencia espacial (ciclos/m), Ω frecuencia angular espacial, $Gd(n)$ y $Gd(\Omega)$ desplazamiento de Poder de Densidad Espectral (m^3), modificada de (ISO, 2016).	33
Figura 2-10: Clasificación de las vías según la normativa estándar ISO 8608, (ISO, 2016).....	34
Figura 2-11: Función DB3 Wavelet de Daubechies, (Wei et al., 2005).	38
Figura 2-12: A) Sistema de masas y amortiguadores, B) Forma típica de un pulso de carga FWD. (Meier, 1995)	41
Figura 2-13: Configuración estándar FWD marca Jills con nueve (9) geófonos. Modificada de (Stokoe et al., 1991).	41
Figura 2-14: Cuencos de deflexión bajo diferentes formas de carga. Modificada de (Horak & Emery, 2006).....	42
Figura 2-15: Parámetros de cuenco de deflexión y su asociación con la estructura de pavimento. (Horak & Emery, 2006).....	45
Figura 2-16: Esquema general, métodos de retrocálculo.....	48
Figura 2-17: Modelo de Hogg parámetros y definiciones. (Hoffman, 2003).	51
Figura 2-18: Variación de D_r/D_0 vs l_0 en el modelo Hogg para $h/l_0=20$. (Hoffman, 2003).52	
Figura 2-19: Típico sistema de reflexiones de una estructura de pavimento medido con un georradar. (Lahouar & Al-qadi, 2007).	53
Figura 3-1: Desarrollo metodológico de la investigación.....	54
Figura 3-2: Campaña experimental.	56
Figura 3-3: Ubicación de los tramos de estudio seleccionados. Modificado de: http://idu.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html	57
Figura 3-4: Medición de macrotextura superficial.	58
Figura 3-5: Perfilómetro láser. A) Sistema de ventosa. B) Laptop. C) Adquisición de datos. D) laser y acelerómetro. E) GPS. F) Cámara de video.....	60

Figura 3-6: Perfilómetro laser PL Unibox - Logiroad IRI, Universidad Nacional de Colombia.....	61
Figura 3-7: Identificación en tiempo de real de irregularidades sobre la superficie.....	61
Figura 3-8: Equipo Georradar (sistema GPR) marca GSSI (E.E.U.U.) y sus partes.....	62
Figura 3-9: Deflectometria con equipo FWD marca Jils, tramo TRM.....	64
Figura 3-10: Configuración esquemática de la aplicación de carga y ubicación de los geófonos.....	65
Figura 4-1: Registro fotográfico tramo TRA.....	67
Figura 4-2: Registro fotográfico tramo TRM.....	68
Figura 4-3: Registro fotográfico tramo TRB.....	68
Figura 4-4: Porcentaje de daños A) TRA, B) TRM y C) TRB.....	69
Figura 4-5: Curvas de aceleración promedio a tres velocidades diferentes, A) TRA, B) TRM y C) TRB.....	72
Figura 4-6: Curvas de perfil promedio a tres velocidades diferentes, A) TRA, B) TRM y C) TRB.....	74
Figura 4-7: Valores de IRI promedio a tres velocidades diferentes, tramo TRA.....	76
Figura 4-8: Valores de IRI promedio a tres velocidades diferentes, tramo TRM.....	77
Figura 4-9: Valores de IRI promedio a tres velocidades diferentes, tramo TRB.....	77
Figura 4-10: Espesores de capas de estructura de pavimento mediante GPR, tramo TRA.....	79
Figura 4-11: Espesores de capas de estructura de pavimento mediante GPR, tramo TRM.....	80
Figura 4-12: Espesores de capas de estructura de pavimento mediante GPR, tramo TRB.....	81
Figura 4-13: Valores de deflexiones corregidas de los 8 geófonos en el tramo TRA.....	83
Figura 4-14: Valores de deflexiones corregidas de los 8 geófonos en el tramo TRM.....	84
Figura 4-15: Valores de deflexiones corregidas de los 8 geófonos en el tramo TRB.....	85
Figura 5-1: Transformada Rápida de Fourier, aplicada a señales de aceleración en el tramo TRA a 45 km/h.....	89
Figura 5-2: Transformada Rápida de Fourier, aceleración en el tramo TRM a 45 km/h..	90
Figura 5-3: Transformada Rápida de Fourier, aceleración en el tramo TRM a 45 km/h..	90
Figura 5-4: Valores promedio de FFT en tramos TRA, TRM, TRB. 3 velocidades diferentes.....	91
Figura 5-5: Análisis de repetitividad en señales del tramo TRA a 45 km/h.....	92
Figura 5-6: Densidad espectral de onda obtenido con el PL a una velocidad de 45 km/h, tramo TRA.....	96
Figura 5-7: Densidad espectral de onda obtenido con el PL a una velocidad de 45 km/h, tramo TRM.....	97
Figura 5-8: Densidad espectral de onda obtenido con el PL a una velocidad de 45 km/h, tramo TRB.....	98
Figura 5-9: Densidad espectral de onda, clasificación ISO 8608 a una velocidad de 45 km/h, tramo TRA.....	99

Figura 5-10: Densidad espectral de onda, clasificación ISO 8608 a una velocidad de 45 km/h, tramo TRM.....	100
Figura 5-11: Densidad espectral de onda, clasificación ISO 8608 a una velocidad de 45 km/h, tramo TRB.	101
Figura 5-12: Descomposición wavelet (DB3) en el tramo TRA.	103
Figura 5-13: Lugares con mayores daños sobre el tramo TRA.	103
Figura 5-14: Descomposición wavelet (DB3) en el tramo TRM.....	104
Figura 5-15: Lugares con mayores daños sobre el tramo TRM.	104
Figura 5-16: Descomposición wavelet (DB3) en el tramo TRB.	105
Figura 5-17: Módulo de subrasante M_R para cada uno de los tramos evaluados.....	106
Figura 5-18: Numero estructural SN para cada uno de los tramos evaluados.	106
Figura 5-19: Parámetros del cuenco de deflexión CF, SCI, BCI, y BDI.....	107
Figura 5-20: Descomposición DWT junto al con eficiente CF en el tramo TRA a 45 km/h.	109
Figura 5-21: Descomposición DWT junto al con eficiente CF en el tramo TRM a 45 km/h.	110
Figura 5-22: Descomposición DWT junto al con eficiente CF en el tramo TRB a 45 km/h.	111

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Clasificación de condición de superficie de la estructura de pavimento, (American Society for Testing and Materials ASTM D 6433, 2007).	12
Tabla 2-2: Tipos de fallas o daños superficiales en un pavimento asfáltico, (American Society for Testing and Materials ASTM D 6433, 2007).	15
Tabla 2-3: Equipos para la medición de rugosidad.	18
Tabla 2-4: Notación de las variables del modelo Quarter-Car.....	20
Tabla 2-5: Clasificación de equipos de medida de perfil longitudinal, según el intervalo longitudinal y resolución vertical. (American Society for Testing and Materials ASTM D950, 2004).	22
Tabla 2-6: Valores de PSD calculados para las clases de vía de A hasta H.	35
Tabla 2-7: Valores de PSD suavizado en octavos de bandas frecuenciales, calculados para las clases de vía de A hasta H.	35
Tabla 2-8: Parámetros de cuenco de deflexión. (Gomez & Murillo, 2015).....	43
Tabla 2-9: Parámetros de cuenco de deflexión. (Horak & Emery, 2006).....	44
Tabla 2-10: Rangos de clasificación para los parámetros del cuenco de deflexión en diferentes pavimentos. (Horak, 2008).	46
Tabla 2-11: Curva de coeficientes de ajuste para el cálculo de I_0 . (Hoffman, 2003).....	52
Tabla 2-12: Curva de coeficientes de ajuste para el cálculo de E_{sg} ó (MR) . (Hoffman, 2003).	52
Tabla 3-1: Características de los tramos evaluados	57
Tabla 3-2: Ensayos de macrotextura superficial.	59
Tabla 3-3: Clasificación 1, 2 y 3 de equipos de medida de perfil longitudinal, según el intervalo longitudinal y resolución vertical. (American Society for Testing and Materials ASTM D950, 2004).	60
Tabla 3-4: Numero de ensayos realizados en cada tramo con el PL.	62
Tabla 3-5: Deflectometría mediante FWD.....	65
Tabla 4-1: Valor de PCI de los segmentos evaluados.	66
Tabla 4-2: Resultados de profundidad media de macrotextura.....	70
Tabla 4-3: Valores de IRI promedio en los tres segmentos evaluados.	75
Tabla 4-4: Variación de valores de IRI promedio.	75
Tabla 4-5: Espesores de las capas de las estructuras de pavimento mediante GPR.....	82
Tabla 4-6: Variación de deflexiones para cada geófono, tramo TRA.	84
Tabla 4-7: Variación de deflexiones para cada geófono, tramo TRM.....	85

Tabla 4-8: Variación de deflexiones para cada geófono, tramo TRB.....	86
Tabla 5-1: Frecuencias predominantes en cada tramo.	91
Tabla 5-2: Análisis de sensibilidad de valores pico en el tramo TRA.....	93
Tabla 5-3: Análisis de sensibilidad de valores pico en el tramo TRM.	93
Tabla 5-4: Análisis de sensibilidad de valores pico en el tramo TRB.....	94
Tabla 5-5: Longitudes de onda, notas espectros de onda.	95
Tabla 5-6: Notas de onda para cada segmento evaluado.	99
Tabla 5-7: Resumen de parámetros y Rangos de evaluación.	112
Tabla 5-8: Escala de clasificación índice ICN	113
Tabla 5-9: Clasificación tramos de estudio.....	114
Tabla 6-1: Evaluación superficial y estructural.	115
Tabla 6-2: Valores de retrocálculo AASHTO y YONAPAVE.....	118

1. Capítulo I: Introducción

Colombia actualmente presenta un crecimiento importante en la infraestructura vial, en donde se proyecta la implementación de las concesiones de cuarta generación 4G que incluye la construcción y operación en concesión de más de 8.000 km de vías, con 1.370 km de doble-calzadas y 159 túneles, en más de 40 nuevas concesiones. A través de las 4G se mejora la competitividad económica del país, disminuyendo costos de operación y tiempos de movilización, en especial del transporte de carga. Su aporte social será invaluable, pues generará 200.000 empleos, de los cuales se espera tengan un impacto favorable en el desarrollo progresivo del país (Abelló, 2015).

Las actividades de inversión requieren la evaluación de la condición de las estructuras viales existentes, que permitan desarrollar correctos programas de gestión vial, optimizando tiempo y disminución de costos. Existen diversos métodos para la evaluación del estado de las estructuras de pavimentos, en la parte de evaluación superficial, uno de los parámetros más empelados es el Índice de Regularidad Internacional mejor conocido por IRI con el cual es posible medir la regularidad de los segmentos viales, el cual fue aceptado como estándar de medida de regularidad superficial de las vías por el Banco Mundial en 1986, (Michael W Sayers, Thomas D. Gillespie, 1986). El IRI define unos rangos para la aceptación de estructuras de pavimento construidas, siendo este un parámetro de control de calidad superficial. En vías ya en servicio, este Índice es una herramienta que monitorea el comportamiento de la vía en el tiempo, y con esto la posibilidad de fijar umbrales de alerta, que sirven para una correcta toma de decisiones en la realización de estudios o labores de mantenimiento (Arriaga Patiño, Anguas, & Rico Rodriguez, 1998).

Sin embargo, este índice es un valor en una escala numérica que no describe de manera detallada las características y condiciones reales de la superficie de las estructuras de

pavimento, y por lo tanto no es aprovechada toda la información en este tipo de evaluaciones. Por esta razón, en esta investigación se busca realizar un análisis más detallado de las señales y datos obtenidos mediante las metodologías empleadas para la medición de regularidad por medio del perfilómetro laser PL, utilizando transformaciones matemáticas como las Transformadas Rápidas de Fourier FFT, análisis de Densidad Espectral de Potencia PSD, Transformación Discreta Wavelet DWT, entre otras herramientas disponibles que permiten obtener información más completa y detallada del estado superficial de las vías.

Por otra parte, en la evaluación estructural, la deflectometría de impacto con el equipo Falling Weight Deflectometer FWD es considerada una de las metodologías de evaluación más aceptadas y con mejores resultados en el mundo, la cual fue introducida en los años 1980s teniendo un desarrollo tecnológico importante respecto a las mediciones de deflexiones obtenidas con la viga Benkelman de los años 1950s. Con el FWD es posible aplicar cargas de tipo dinámico transitorio de hasta 24 kips de fuerza en 30 milisegundos a las estructuras de pavimento. Estas cargas reflejan de manera correcta las solicitaciones impuestas por el tráfico de los vehículos que transitan sobre estas y con lo cual, se obtienen las propiedades mecánicas de cada una de las capas, mediante la medición de deflexiones y deformaciones circulares también llamadas cuencos de deflexión que se extienden hasta dos metros desde el punto de aplicación de la carga. La forma y tamaño de estos cuencos de deflexión, dependerá de varios factores como; el equipo de medición (tipo de sensores o geófonos), magnitud y tiempo de la carga impuesta, temperatura, espesor y tipo de materiales empleados en las capas, entre otras.

Teniendo en cuenta lo descrito en los párrafos anteriores, en este trabajo de investigación se pretende llevar a cabo una evaluación conjunta de las estructuras de pavimento, empleando la metodología de evaluación superficial con el equipo PL y la evaluación estructural con el equipo FWD, en vías con diferente nivel de deterioro, con características y condiciones reales a las existentes en las vías de nuestro país.

De esta manera, el trabajo final presentado en este documento está estructurado de la siguiente manera; en el Capítulo I se exponen los conceptos introductorios relacionados con el estado del arte, antecedentes, justificación del trabajo junto con los objetivos propuestos. En el Capítulo II se aborda todos los conceptos teóricos que constituyen el marco de referencia teórico-conceptual, necesarios para el desarrollo de todo el trabajo de

investigación. En el Capítulo III se explica la metodología llevada a cabo junto con la campaña experimental realizada. En los Capítulos IV y V se exponen los resultados y el análisis de resultados de los datos y cálculos obtenidos. Finalmente, en el Capítulo VI se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de todo el trabajo.

1.1 Antecedentes y Justificación

1.1.1 Evaluación superficial

La evaluación superficial y estructural de los pavimentos ha sido de gran importancia y ampliamente estudiado desde hace varios años, por diferentes investigadores. Dentro del tema funcional, es relevante mencionar la historia del desarrollo de los equipos empleados en la medición de la regularidad superficial como una tecnología que inicia en los años 1960's por Elson Spangler y William Kelly, desarrollando el perfilómetro inercial en el laboratorio de investigación de la General Motors, también llamados en la actualidad como perfilómetros de alta velocidad GMR Profilometers (M W Sayers & Karamihas, 1998). Estos perfilómetros evolucionaron desde su versión análoga, pasando por la versión mejorada y más eficiente digital la cual ha sido usada en distintos lugares en Estados Unidos, pero debido a factores como el alto costo de venta y la falta de información obtenida con este tipo de equipos; ha hecho que no sea el más usado en el mundo tal como lo expone (J.C. Wambold, L.E. Defrain, R.R. Hegmon, K. Mcghee, J. Reichert, 1981), sin embargo ellos afirman que el GMR junto con el analizador dinámico de perfil APL son los equipos con mayor precisión para las mediciones de regularidad del pavimento. Finalmente, y teniendo en cuenta los inconvenientes y desventajas con el uso del GMR y APL, principalmente por tener un mecanismo de contacto el cual limita a la velocidad de operaciones a 65 km/h, la Federal Highway Administration FHWA inicia en los años 1970's pruebas con equipos de no-contacto que emplean métodos acústicos y de infrarrojo los cuales llegan a ser de un menor costo de adquisición y con resultados más precisos en la medición del perfil de las vías. En la actualidad los perfilómetros utilizados mantienen los principios de medición de los equipos de tipo no-contacto con algunos cambios en la adquisición de los datos.

En el párrafo anterior se mencionó de manera general el tema sobre la procedencia de los equipos utilizados en la medición del perfil longitudinal de una vía, se resalta que importantes estudios e investigaciones se han realizado empleando equipos de alto rendimiento como el perfilómetro laser PL, en temas enfocados principalmente en obtener un parámetro o índice de estado superficial, siendo el índice de regularidad internacional IRI el más conocido y aceptado por las entidades encargadas de la gestión de los

pavimentos. De las investigaciones de valor de IRI se ha evidenciado que los aspectos que más intervienen en las discrepancias encontradas en los resultados obtenidos son; el uso de variedad de equipos en el mercado, errores no tenidos en cuenta en el momento de la toma de datos y las metodologías empleadas en los cálculos realizados para obtener el perfil, por este motivo (Caro & Peña, 2012) hacen una comparación entre los diferentes equipos y metodologías existentes, calibrando cada uno de estos con el método de topografía el cual es el método más exacto para el cálculo del IRI (Villa, 2007).

El PL es considerado como uno de los equipos con mayor rendimiento en la toma de datos, experimentalmente se ha encontrado que tiene una alta sensibilidad a la velocidad del vehículo con la que se opere, según estudios realizados en la ciudad de Bogotá como lo muestra (Moreno, 2016). Sin embargo, es evidente que la evaluación de índice de regularidad empleando el PL, ha mostrado importantes ventajas debido a su alta precisión, eficacia y rendimiento (Losa, Leandri, & Bacci, 2008).

Por otra parte y buscando un mejor aprovechamiento de la información recopilada con el PL, se han realizado estudios en donde se comparan diferentes equipos de medida y se hace un análisis denominado de respuesta con la relación amplitud-frecuencia (AFR) el cual presenta varias ventajas; provee información sobre la precisión de la medición, es una característica propia de un perfilómetro, teóricamente independiente del perfil y da una representación visual coherente al perfil de la vía con los resultados del perfilómetro. Además de esto (Lushnikov & Lushnikov, 2017), afirman que para la aplicación de este método junto con un análisis de densidad espectral a los perfiles obtenidos, es necesario que los segmentos de vía de estudio presenten longitudes superiores a los 500 metros para un resultado confiable, debido a que los espectros de onda se les realiza una interpretación teniendo en cuenta longitudes de onda que abarcan distancias de 500 metros o más.

El análisis de Densidad Espectral de Potencia PSD ha sido uno de los métodos usados en el procesamiento de las señales obtenidas con los perfilómetros de alto rendimiento. En un comienzo esta técnica era empleada para entender el comportamiento dinámico de los vehículos en las vías, sin embargo, muchos investigadores encontraron conveniente el uso de PSD para la clasificación del estado de las vías como lo muestran (Cote, Kozin, & Bogdanoff, 1996). Uno de los primeros usos del análisis espectral en ingeniería civil fue

presentado por (Houbolt, Walls, & Smiley, 1955), ya en este año había sido propuesta una expresión lineal para el análisis de PSD mostrada en la ecuación (1-1),

$$G_d(n) = Cn^{-2} \quad (1-1)$$

Donde G_d corresponde a la densidad espectral, C es un parámetro dependiente de la regularidad del perfil y n la frecuencia espacial o número de onda (Wavenumber) de la señal obtenida. (Andren, 2015) en su trabajo menciona los requerimientos básicos para el correcto uso de PSD en los perfiles; como primer requerimiento el perfil debe pertenecer a un proceso estacionario aleatorio es decir las propiedades de este no deben variar en el tiempo o a lo largo de toda su longitud, el segundo se recomienda excluir las señales debidas a grandes fallas o daños como potholes los cuales afectan en el proceso de filtrado de las señales. Este investigador hace una revisión en la literatura de todas las aproximaciones existentes para el cálculo de PSD en perfiles de vía, como resultado encuentra diez (10) expresiones matemáticas de las cuales emplea tres (3) en la aplicación de un análisis de PSD a una red de vías en el estado de Suecia. Las tres (3) aproximaciones con nombres; ISO 8608, BSI (1972) modificada y la TWO Split, se muestran en las ecuaciones (1-2), (1-3) y (1-4) respectivamente, encontrando que la aproximación con mejores resultados es la TWO Split presentando un error de mínimos cuadrados menor en comparación a las otras.

$$G_d(n) = Cn^{-w} \quad 0 \leq n \leq \infty \quad (1-2)$$

$$G_d(n) = Cn^{-w_1} \quad 0 \leq n \leq n_0 \quad (1-3)$$

$$G_d(n) = Cn^{-w_2} \quad 0 \leq n \leq n_1 \quad (1-4)$$

Desde hace más de cuarenta años se han empleado índices estadísticos como el IRI y el root-mean-square vertical acceleration RMSVA utilizados por la AASHTO en el año de 1962 para la clasificación del estado superficial de las vías. Estos índices han sido importantes en los temas dirigidos a la administración de las vías, sin embargo, se ha observado que gran parte de la información suministrada por los equipos de medición de la condición de estado de los pavimentos ha sido obviada y únicamente se extrae y calcula los índices estadísticos sin profundizar en los detalles importantes de cada perfil. (Wei, Fwa, & Zhe, 2005) en su investigación presentan un procedimiento mediante el uso del

análisis de la transformada de las Wavelets, con lo cual se puede extraer más información sobre las características de la regularidad de los perfiles de las vías, dentro de estas se tiene la identificación de daños o fallas con la facultad de ser analizado en los dominios de distancia y frecuencia. La transformada Wavelet es una herramienta desarrollada recientemente que representa una señal tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de frecuencia, las wavelets usan pequeñas funciones de ondas, a estas se les realiza una serie de cambios junto con la aplicación de filtros que permiten una mejor interpretación de las señales. Dentro de su estudio (Wei et al., 2005) utilizaron la base de datos de mediciones de perfiles de vía perteneciente a Long Term Pavement Performance LTTP estas mediciones fueron realizadas en intervalos de distancia cada 0.152 m obtenidos de perfilómetros estándar, a estos datos se les aplico un análisis de ondas discreto DWT obteniendo muy buenos resultados. Fue posible la correcta identificación de fallas dentro de las señales generadas para cada perfil, siendo este un tema de gran importancia que se ha venido estudiando sin tener resultados positivos, además se hizo una comparación con los índices estadísticos IRI y RMSVA, con un buen ajuste empleando el método de mínimos cuadrados. Finalmente, los autores concluyen que este tipo de análisis permite un mejor acercamiento en la interpretación del estado de las vías con lo cual se obtiene información adicional con datos que aportan en la administración de una red vial.

De manera complementaria y como se mencionó en párrafos anteriores, además del equipo PL se ha demostrado que el equipo APL tiene una alta precisión en la medición de los perfiles longitudinales, y por lo tanto su uso ha sido considerable. Un importante estudio que contemplo la implementación de un método de medición basado en la navegación inercial fue realizado por (Caicedo, Murillo, & Tristancho, 2017) quienes modificaron un analizador de perfil longitudinal APL agregando a este un dispositivo inercial (acelerómetro), obteniendo así muy buenos resultados relacionados con el análisis de datos del espectro de onda generado por la vibración de un perfil longitudinal de vía.

Teniendo en cuenta que la investigación planteada en este documento busca relacionar diferentes temas de evaluación de estado de los pavimentos, en donde el análisis en conjunto de diferentes parámetros como lo hacen en sus estudios (Chen, Roohi Sefidmazgi, & Bahia, 2015; Miller, Swiertz, Tashman, Tabatabaee, & Bahia, 2012; Praticò & Vaiana, 2015; Rajaei, Sefidmazgi, & Bahia, 2014), quienes buscan encontrar correlaciones entre la textura, fricción, y medidas de la profundidad media de un perfil vial, presenta mayores ventajas y resultados positivos que aportan al tema de gestión y

administración vial. Con base en esto, a continuación, se hace una introducción al tema de evaluación estructural de los pavimentos, con el cual se pretende buscar una relación con la evaluación superficial empleando el PL.

1.1.2 Evaluación estructural

Para la evaluación estructural de los pavimentos se han empleado diferentes métodos en la que la mayoría de estos de tipo NDT (Ensayos No Destructivos) tienen como principio general el análisis inverso de las propiedades de la estructura de pavimento mediante la aplicación de una carga sobre la superficie. Estas metodologías se diferencian según la naturaleza de la carga aplicada sobre la estructura categorizándose en cargas de tipo estático, dinámico estacionario donde es aplicada una carga por equipos que presentan una mejora significativa de los dispositivos de tipo estacionario sin embargo no es posible replicar la carga impuesta por el movimiento de los vehículos sobre las vías, por lo tanto, han sido implementados nuevos equipos con la más alta tecnología utilizados en diferentes partes del mundo, como el Falling Weight Deflectometer FWD perteneciente a los dispositivos de tipo dinámico transitorio, capaz de replicar la carga impuesta por los vehículos.

Recientemente se han realizado investigaciones que buscan el empleo del FWD en la evaluación estructural de los pavimentos. (Park, Bobet, & Nantung, 2018) en su investigación muestran su esfuerzo en encontrar la relación existente entre las diferentes metodologías con los dispositivos FWD, Light Weight Deflectometer LWD y Dynamic Cone Penetrometer DCP empleados para el cálculo del valor de módulo resiliente M_R de la capa de suelo natural también denominada subrasante, con el ensayo de módulo resiliente en laboratorio. Estos investigadores encuentran la posibilidad de correlacionar los módulos obtenidos con el FWD sobre el pavimento y los obtenidos en laboratorio del ensayo de módulo resiliente, siempre y cuando los datos recolectados con el FWD sean confiables. Además, muestran la importancia de las características y propiedades de la estructura de pavimento en el momento de realizar los cálculos de módulos en donde la precisión del espesor de las capas es fundamental para un correcto análisis de los datos. También se concluye que los resultados obtenidos con el FWD sobre el suelo granular no son confiables, esto debido a una falta de confinamiento y un grado alto en el cambio de

contenido de agua en los materiales. Por otra parte, se concluye que no es posible obtener una buena correlación entre el LWD y DCP con el ensayo de módulo resiliente de laboratorio, debido a una alta dispersión en los datos, sin embargo, teniendo en cuenta que los resultados presentan una alta sensibilidad al grado de confinamiento, compactación y contenido de agua se recomienda el uso de estos dispositivos en el seguimiento o control de calidad en las etapas constructivas de las estructuras de pavimento. Finalmente, de este trabajo de investigación se puede observar como el FWD es un dispositivo con resultados muy confiables, que puede ser aplicado en las vías con gran facilidad reduciendo tiempos en la ejecución de los proyectos de construcción y costos asociados a los mismos.

La evaluación superficial y estructural de los pavimentos ha sido tratada por varios investigadores, uno de los trabajos realizados recientemente empleando como base en el estado funcional el índice IRI y como base en la capacidad de soporte el número estructural SN fue realizado por (Hasanuddin, Setyawan, & Yulianto, 2018). Estos investigadores hicieron mediciones sobre una vía en Simpang Tuan Providencia de Jambi en Indonesia mediante el método de National Association of Australian State Road Authorities NAASRA obteniendo los índices de regularidad correspondientes al estado funcional y mediante el cálculo de valores de número estructural AASHTO. De todo su trabajo de investigación fue posible concluir que para la toma de decisiones referente al tipo de intervención que requiera un segmento de vía, es necesario tener en cuenta en conjunto todos los métodos de evaluación empleados, dado que el análisis por separado de los componentes de una estructura de pavimentos arroja resultados que pueden ser erróneos al no ser tenidos en cuenta en un marco de evaluación general.

Las anteriores investigaciones son ejemplos claros de los estudios llevados a cabo con este tipo de metodologías, en donde se buscaba realizar un análisis más riguroso a las señales obtenidas con los equipos existentes para este tipo de evaluación de condición de estado de los pavimentos. Debido a que la respuesta obtenida por estas metodologías varía según las diferentes condiciones del medio en el que se evalúan, es importante realizar una implementación de estas en nuestro medio.

Con base a lo expuesto, y teniendo en cuenta que existen pocas investigaciones que relacionen los parámetros de estado superficial con los parámetros de nivel estructural, se pretende analizar el espectro de onda de la señal reportada con el PL, junto con valores y

parámetros del cuenco de deflexión obtenidos con el FWD, de esta manera hacer una correcta evaluación funcional y estructural en los pavimentos, buscando una relación entre los mismos, como lo muestran en su investigación (Praticò & Vaiana, 2015; Vargas & Obando, 2010), quienes definen unos rangos de clasificación para la red vial nacional de Costa Rica y las relaciones entre diferentes metodologías, aspecto que se hace necesario para Colombia lo cual sea un aporte en el tema de gestión y administración de toda la malla vial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar si hay una posible correlación entre la evaluación de estado superficial con el perfilómetro laser PL, parámetros de macrotextura con el círculo de arena y la evaluación de estado estructural por medio de deflectómetro de impacto FWD.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar las variables significativas en la evaluación de estado superficial y estructural de los pavimentos.

Evaluar las características y condiciones de servicio de los segmentos viales seleccionados con tres (3) niveles de deterioro.

Definir rangos de estado mediante los análisis correspondientes al tratamiento de ondas obtenidas con el PL, análisis de macrotextura superficial y análisis de parámetros de cuenco de deflexión obtenidos con el FWD.

2. Capítulo II: Marco teórico

Esta investigación tiene como propósito general realizar un aporte significativo en el tema de gestión y administración vial, desde las bases iniciales de este tipo de programas como lo es la evaluación del estado de los pavimentos.

De esta manera este capítulo pretende abordar los conceptos teóricos referentes al tema de evaluación superficial y estructural de los pavimentos como se muestra a continuación.

2.1 Evaluación superficial de los pavimentos

La evaluación superficial de los pavimentos se entiende como la verificación de condición visual, de confort, y funcional visto desde un nivel de seguridad dado al usuario de la capa externa de la estructura. En otras palabras este tipo de evaluación se puede ver como “todos aquellos factores que afectan negativamente a la serviciabilidad, seguridad y costos del usuario” (Thenoux & Gaete, 1995).

Dentro de la evaluación superficial se debe considerar los parámetros que se exponen a continuación como lo son las metodologías de evaluación, fallas superficiales, rugosidad y regularidad.

2.1.1 Metodologías de evaluación superficial

Existen diferentes metodologías empleadas para la evaluación superficial de los pavimentos mediante la inspección visual, a continuación, se mencionan las metodologías más utilizadas.

2.1.1.1 Metodología VIZIR¹. Es una metodología desarrollada en Francia, que hace una diferenciación clara entre fallas estructurales y funcionales, clasificando los deterioros de los pavimentos asfálticos en dos categorías A y B. La categoría A caracteriza una condición estructural ligadas a las capas de la estructura y al suelo o sub rasante. La categoría B corresponden a la condición funcional causadas

¹ Pinilla, Julián. Auscultación, calificación del estado superficial y evaluación económica de la carretera sector puente de la libertad, Colombia, 2007. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, p 14.

principalmente por deficiencias constructivas y condiciones locales particulares. Cada zona de análisis deberá tener una longitud de 100 metros, luego se calcula el índice global o índice de Deterioro Superficial, Si, este varía entre 1 y 7 donde 1 corresponde a un pavimento con un nivel de deterioro bajo y 7 un deterioro alto.

2.1.1.2 Metodología PAVER. (Cuerpo de Ingenieros Militares de Estados Unidos) o PCI (Pavement Condition Index)²: Consiste en proveer un índice PCI que representa el nivel de afectación de la estructura de pavimento, y es función de la clase de daño, su severidad y repetitividad en el segmento evaluado. La metodología emplea los valores deducidos correspondientes a valores de ponderación con el fin de indicar el grado de afectación que cada daño tiene sobre el pavimento, además la evaluación requiere de dividir el segmento o tramo en unidades de muestreo las cuales están definidas de acuerdo con un rango de área establecido de 230+-93 m². El valor de PCI es un índice numérico que varía entre 0 y 100 siendo 0 una calificación para una condición de deterioro alto y 100 un deterioro bajo. En la Tabla 2-1 se muestran los valores de PCI establecidos por la normatividad ASTM D6433-07 para la clasificación de condición de la superficie de la estructura de pavimento.

Tabla 2-1: Clasificación de condición de superficie de la estructura de pavimento, (American Society for Testing and Materials ASTM D 6433, 2007).

Clasificación condición	Valor PCI
Buena	85-100
Satisfactoria	70-85
Aceptable	55-70
Mala	40-55
Muy Mala	25-40
Severa	10-25
Falla	0-10

² Buitrago, Johanna. Análisis comparativo de metodologías de auscultación de pavimentos flexibles. Colombia, 2011. Proyecto de grado para optar título de Especialista en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, p 17.

2.1.1.3 Metodología MOP³. Con el propósito de estandarizar la evaluación del estado de los pavimentos el Ministerio de Obras Públicas MOP en la dirección de vialidad desarrollo un manual de inspección visual. Esta metodología tiene en cuenta la evaluación de un (1) kilómetro de vía con el registro de datos cada 250 metros, al igual que la metodología PAVER esta emplea las unidades de muestreo con áreas rectangulares con una dimensión de ancho igual al del carril y para pavimentos asfálticos de red vial no concesionada el largo será de 10 metros.

2.1.1.4 Metodología SHRP⁴. (Strategic Highway Research Program): en 1987 en los estados unidos fue desarrollado un programa de pavimentos denominado the Long-Term Pavement Performance LTPP Program, durante 20 años de vida del programa las agencias de vías de los Estados Unidos junto con 15 países más diseñaron un manual que permitía evaluar de una manera más consistente los daños presentes en una estructura de pavimento. Esta metodología se caracteriza por tener un buen nivel de detalle, manejando un muestreo de tipo estadístico el cual ubica de manera exacta los daños sobre el pavimento.

2.1.2 Fallas superficiales

Las fallas superficiales son aquellos daños que se presentan en la superficie del pavimento y son identificables a simple vista, además es posible su medición con equipos manuales de bajo costo. La identificación e intervención oportuna de estos daños sobre el pavimento previene una afectación mayor en toda la estructura del pavimento.

Tomando como referencia el documento con título “Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras” realizado por (Universidad Nacional de Colombia & INVIAS, 2006) afirma que: Existe la posibilidad de agrupar en cinco (5) categorías todos los daños presentes en una estructura de pavimento y son las siguientes:

2.1.2.1 Fisuras. Corresponden a discontinuidades en la carpeta asfáltica, por lo general estas son generadas por la existencia de sobreesfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura, superando de esta manera la resistencia de

³ Ministerio de Obras Públicas MOP, Instructivo de inspección visual de caminos pavimentados. Chile, 2016. Dirección de vialidad, Departamento de gestión vial.

⁴ FHWA. Distress identification manual for the long-term pavement performance program. United States, 2003. Publication No.FHWA-RD-03-031, US Department of Transportation.

los materiales. Algunas de estas son fisuras longitudinales y transversales, juntas de construcción, de borde, en bloque y piel de cocodrilo que generalmente son asociadas a una mala ejecución de las juntas de construcción, movimientos del terreno y la repetición de cargas de tránsito.

2.1.2.2 Deformaciones. Son daños o deterioro visibles en la capa de rodadura usualmente generados por una mala dosificación en la mezcla asfáltica, labores deficientes en la compactación o pérdida de resistencia de los materiales de la estructura por filtraciones de agua o inestabilidad de la banca. Las deformaciones pueden ser: ondulación, abultamiento, hundimiento y ahuellamiento.

2.1.2.3 Pérdida de las capas de la estructura. Estos daños corresponden a una desintegración en diferentes niveles de la carpeta asfáltica, son generados por procesos constructivos deficientes en donde no son colocados espesores ni drenajes adecuados, permitiendo la acumulación de agua sobre la superficie en zonas fisuradas que ante el tránsito produce reducción de esfuerzos efectivos. Estos daños son descascaramiento, bache y parche.

2.1.2.4 Daños superficiales. En esta categoría se encuentra el desgaste superficial, pérdida de agregado, pulimiento del agregado, exudación y surcos. Estos daños se generan por la acción del tránsito y por procesos constructivos deficientes principalmente por la utilización de materiales agregados inadecuados, mala dosificación de asfalto, una mala compactación, contaminación de la carpeta asfáltica o presencia de lluvia durante la aplicación del ligante asfáltico.

2.1.2.5 Otros Daños. Corresponden al deterioro de la estructura de pavimento ocasionado como consecuencia de los daños ya mencionados, estos son debidos principalmente por la presencia o infiltración de agua en la estructura. Dentro de este grupo se tiene el corrimiento vertical de la berma, separación de la berma, afloramiento de finos y afloramiento de agua.

En la Tabla 2-2 se muestra los tipos de fallas o daños superficiales en un pavimento flexible con capa de rodadura asfáltica.

Tabla 2-2: Tipos de fallas o daños superficiales en un pavimento asfáltico, (American Society for Testing and Materials ASTM D 6433, 2007).

N°	Tipo de Falla	Código	N°	Tipo de Falla	Código
1	Piel de cocodrilo	(PL)	11	Parqueo	(P)
2	Exudación	(E)	12	Pulimiento de agregados	(PA)
3	Fallas en bloque	(FB)	13	Baches	(B)
4	Abultamiento y Hundimientos	(AH)	14	Cruce de vía férrea	(CF _v)
5	Corrugación	(C)	15	Ahuellamiento	(H)
6	Depresión	(D)	16	Desplazamiento	(DZ)
7	Grieta en borde	(GB)	17	Grieta parabólica slipage	(GP)
8	Grieta de reflexión de junta	(GR)	18	Hinchamiento	(HI)
9	Desnivel carril berma	(DB)	19	Desprendimiento de agregados	(DA)
10	Grietas long. Y transv.	(G)			

2.1.3 Rugosidad

También es denominada como la resistencia al deslizamiento que involucra la fuerza de fricción entre las ruedas de un vehículo y la superficie del pavimento, por lo general está asociada con la macrotextura de la superficie con longitudes de onda entre 0.5 mm y 50 mm. La pérdida de fricción está directamente relacionada con la seguridad de los usuarios que transitan una vía por lo tanto es de vital importancia (Praticò & Vaiana, 2015; Thenoux & Gaete, 1995). La textura de la superficie tiene implicaciones con las emisiones de ruido, confort en la conducción, uso y cambio de neumáticos, costos de operación entre otros. Esta característica de resistencia además está relacionada con factores como la lluvia y velocidad de operación de los vehículos siendo estas las principales variables tenidas en cuenta en el hidropiloteo condición de pérdida de resistencia entre los neumáticos y la superficie de pavimento.

Teniendo en cuenta la descripción de rugosidad dada en el párrafo anterior, es importante hacer una diferenciación entre los conceptos que involucra, las fuerzas de resistencia al deslizamiento sobre la estructura de pavimento. Existen dos conceptos y son relacionados a continuación.

2.1.3.1 Microtextura

El primer concepto que se debe diferenciar es el de microtextura; que está asociada a la desviación de una superficie evaluada respecto a una superficie plana, correspondientes a dimensiones de longitudes de onda inferiores a 0.5 mm. El método más común para medir esta resistencia es por medio del péndulo británico (Norma INV E 792-13) mostrado en la Figura 2-1, que consiste en permitir el contacto entre la zapata de caucho del equipo con la superficie de ensayo en estado limpio y completamente húmedo en un movimiento pendular, con el cual se registra el valor C.R.D. que indica la microtextura.

Figura 2-1: Equipo Péndulo Británico⁵, para mediciones de microtextura.



2.1.3.2 Macrotextura

El segundo concepto relacionado con la resistencia al deslizamiento es la macrotextura; que de manera similar a la microtextura indica la desviación que presenta una superficie de estudio, con respecto a una superficie plana en dimensiones de longitud de onda entre 0.5 y 50 mm. En los ensayos más utilizados para la medición de este parámetro se encuentra el ensayo de círculo de arena (Norma INV E 791-13) mostrado en la Figura 2-2, que consiste en determinar la cantidad en volumen de una arena fina que es esparcida de manera adecuada sobre la superficie mediante un dispositivo circular. En principio el material por emplear en el ensayo puede ser cualquier granulado, uniforme y estable, con

⁵ Tomado de la página web el 30 de noviembre de 2019, empresa Pinzuar <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/pendulo-trrl-dispositivo-portatil-ensayo-resistencia-al-patinaje/>

tamaño de grano adecuado a la macrotextura del pavimento, es posible el empleo de arena sílicea de grano redondeado, lavada y secada en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C. Con el volumen de la arena utilizado se calcula la profundidad media de los vacíos de la superficie que han sido ocupados por la arena. La cantidad de arena y el tamaño de las partículas de esta (granulometría) por utilizar, se elige en relación con la textura del pavimento determinando un círculo de radio comprendido entre 5 y 18 centímetros y el tamaño máximo del grano no debe superar la profundidad media obtenida.

La profundidad media de macrotextura (H), se calcula con aproximación de 0.01 mm de acuerdo con la siguiente ecuación:

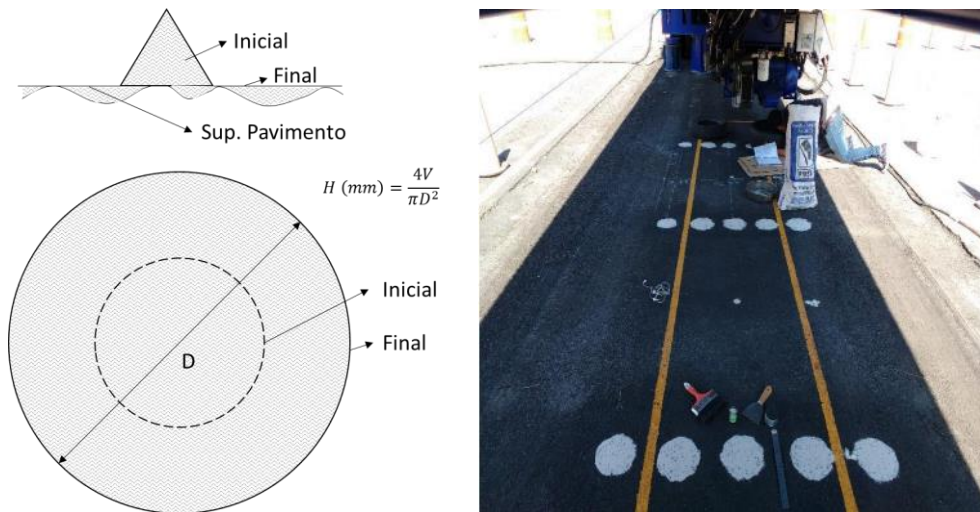
$$H = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2-1)$$

Dónde: H: Profundidad media de macrotextura, mm.

V: Volumen del material granular, mm³.

D: Diámetro promedio del círculo del material granular, mm.

Figura 2-2: Medición de macrotextura mediante círculo de arena.⁶



⁶ Modificado de la norma del Instituto Nacional de Vías INV E 791-07 y de la página web el 30 de noviembre de 2019, http://www.amaac.org.mx/archivos/18_ppt_evaluacion_de_una_micro_carpeta_en_frio_mediante_ensayos_acelerados_en_pavimentos_rihd.pdf

Además de estos métodos mencionados, existen diversos métodos y equipos empleados para la medición de la microtextura y macrotextura con el uso de equipo como el Mu-Meter, el método de mancha de grasa y el equipo de fricción dinámico DFT. En la Tabla 2-3 se muestran los diferentes equipos y métodos empleados para medir la rugosidad sobre la superficie de los segmentos viales.

De esta manera es posible obtener los parámetros correspondientes a la rugosidad de la superficie, con relación a los coeficientes de fricción que condicionan la resistencia al deslizamiento entre los neumáticos de los vehículos y las superficies de las vías.

Tabla 2-3: Equipos para la medición de rugosidad.

Equipo/Método	Descripción	Medición
Péndulo Británico	Contacto entre parte móvil del equipo (zapata) y superficie.	Microtextura longitud < 0.5 mm
Fricción dinámica DFT	Mide la velocidad de rotación, mediante tres deslizadores de goma en contacto con la superficie, ASTM E1911, (Miller et al., 2012).	Microtextura longitud < 0.5 mm
Círculo de arena	Volumen de arena sobre superficie, esparcida en forma circular.	Macrotextura 0.5 < longitud < 50 mm
Mu-Meter	Fricción entre neumáticos del equipo y superficie, velocidad de 75 km/h Normativa ASTM E 670-94.	Macrotextura 0.5 < longitud < 50 mm

2.1.4 Regularidad

La regularidad en la superficie de las estructuras de pavimento se considera uno de los factores más importantes en la evaluación funcional de las vías tal y como afirma (Caro & Peña, 2012):

La comodidad y seguridad que se les brindan a los usuarios en una vía dependen de una buena regularidad, siendo esta, además, responsable de los deterioros superficiales y estructurales de las estructuras de pavimento.

La medición de la regularidad en un perfil de vía no ha sido una labor sencilla, para ello se han empleado muchas técnicas desde hace más de cuarenta años, introduciendo índices de regularidad que pueden ser clasificados en dos grandes grupos como lo expone (Wei

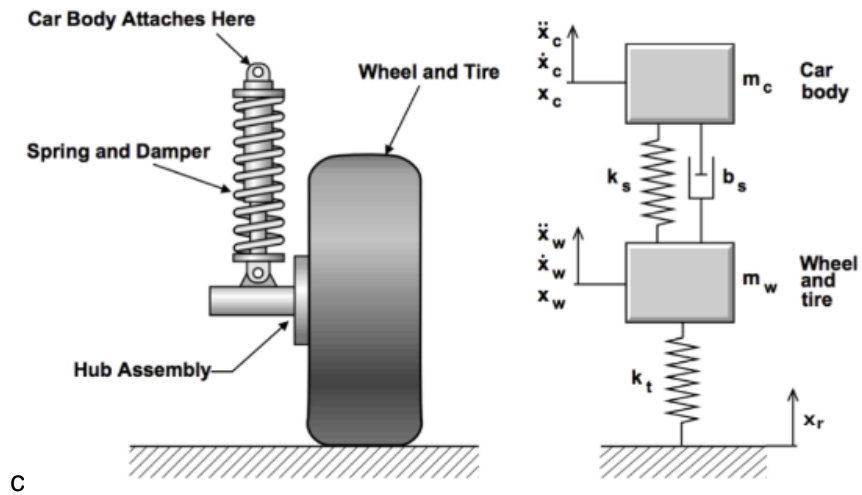
et al., 2005). El primer grupo se refiere a los índices nombrados de tipo de vehículo de respuesta en los cuales se tiene el Quarter-car Index QI, el International Roughness Index IRI y en el segundo grupo se tienen los índices de perfil de regularidad de superficie directos que incluyen el Slope Variance SV y el Root Mean Square Vertical Acceleration RMSVA. Todos estos índices son un resumen estadístico que provee un valor numérico de la condición de regularidad a lo largo de una sección de pavimento. A continuación, se hace una revisión teórica de los índices que han sido más empleados en la evaluación de regularidad de la superficie de las vías.

2.1.4.1 Grupo 1: métodos de respuesta

2.1.4.1.1 Índice QI. Es el nombre que es asignado a la escala de regularidad usada en Brasil durante y después del proyecto, Research on the Interrelationships Between Cost of Highway construction, Maintenance and Utilization PICR, (Michael W. Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1986). Este índice fue inicialmente desarrollado y usado a comienzos del año 1960 en el proyecto PICR basado en las salidas del perfilómetro inercial GMR-type también llamado Surface Dynamics Profilometer, el cual tenía incorporado un sistema de computación análoga llamado Quarter-Car Simulation QCS que pretendía simular los efectos dinámicos del rugosímetro BPR. Estos equipos operaban a una velocidad de 55 km/h dando como resultado un número por cada milla 1/10 de viaje como una medida de regularidad correspondiendo a una elevación positiva acumulada de 1/10 pulgadas del vehículo simulado, finalmente este número es multiplicado por 0.6214 para convertirlo en kilómetros siendo este el resultado de índice QI reportado.

El modelo matemático Quarter-Car Simulation, como se explicara más adelante, está relacionado con el índice IRI y contempla un modelo ilustrado en la Figura 2-3, con este modelo de simulación Quarter-Car QCS es posible obtener la medida de regularidad de un sistema "ideal" tipo-respuesta de medida de regularidad RTRRMS, (Michael W. Sayers et al., 1986).

Figura 2-3: Modelo matemático Quarter-Car QCS.⁷



En la Tabla 2-5 se describen cada una de las variables del modelo Quarter-Car.

Tabla 2-4: Notación de las variables del modelo Quarter-Car.

Nombre	Notación
Constante del resorte de la suspensión	k_s
Constante del resorte de la rueda	k_t
Masa suspendida	m_c
Masa no suspendida	m_w
Amortiguador	b_s :

Además:

$$k_1: k_t/m_c, k_2: k_s/m_c, u: m_w/m_c, C: b_s/m_c$$

El modelo matemático mostrado en la Figura 2-3 es definido matemáticamente por dos ecuaciones diferenciales de segundo orden:

$$\ddot{x}_c + C(\dot{x}_c - \dot{x}_w) + K_2(x_c - x_w) = 0 \quad (2-2)$$

$$\ddot{x}_c + u \ddot{x}_w + K_1 x_w = K_1 y \quad (2-3)$$

Donde:

⁷ Tomado de: Chegg study, sitio web; <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/shown-figure-simplified-dynamic-model-wheel-suspension-system-car-body-one-quarter-car-oft-q22051501>

$$k_1: 653 \text{ sec}^{-2}, k_2: 63.3 \text{ sec}^{-2}, u: 0.150, C: 6.00 \text{ sec}^{-1}$$

y: perfil de elevación de entrada

Teniendo en cuenta lo anterior, el valor de QC se puede calcular por la ecuación (2-4):

$$QC = \frac{1}{L} \int_0^{\frac{x}{v}} |\dot{x}_s - \dot{x}_w| dt \quad (2-4)$$

Donde:

QC es el Índice Quarter-Car; L es la longitud de la vía; X es la distancia en metros; V es la velocidad del auto modelado (80km/h); X/V el tiempo que tarda en recorrer la distancia X; dt el incremento de tiempo; \dot{x}_s es la velocidad vertical de la masa del vehículo; \dot{x}_w la velocidad vertical de la masa del eje. (Caro & Peña, 2012).

2.1.4.1.2 El índice IRI. El IRI es un producto de la unificación de la International Road Roughness Experiment (IRRE) propuesta para encontrar la mejor practica apropiada para los diferentes tipos de equipos usados para la medición de la regularidad (Michael W. Sayers et al., 1986), dirigida por equipos de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica, tenida en cuenta como una relación entre el movimiento relativo de la suspensión de un vehículo estándar con la distancia recorrida (Israel Pinto & Bertemes Filho, 2016).

El IRI representa el nivel de confort que percibe un usuario que viaja en un vehículo a una velocidad promedio de 80 km/h y ha sido simulado por medio de un modelo dinámico denominado “quarter-car” mencionado en párrafos anteriores, el cual tiene en cuenta la acumulación del movimiento vertical que experimenta la suspensión de una rueda, (Caicedo et al., 2017).

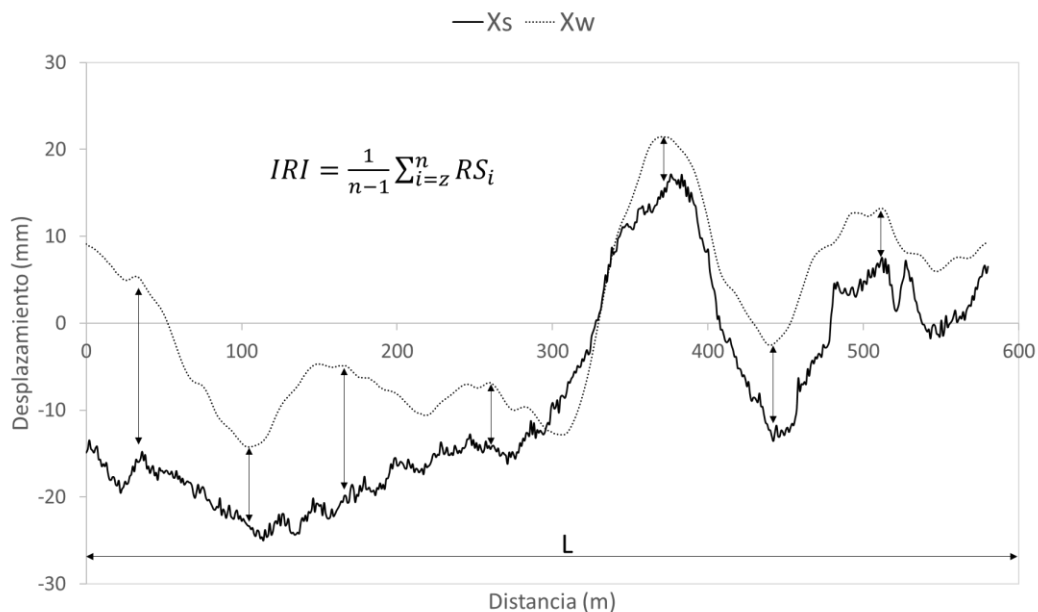
El IRI es calculado teniendo en cuenta el perfil longitudinal medido por instrumentos de clase 1 y de clase 2 como se muestra en la Tabla 2-5 según lo establecido por la normativa ASTM E 950-98, y empleando el modelo quarter-car, (Hu, 2006).

Tabla 2-5: Clasificación de equipos de medida de perfil longitudinal, según el intervalo longitudinal y resolución vertical. (American Society for Testing and Materials ASTM D950, 2004).

Clase	Intervalo longitudinal	Resolución vertical
Clase 1	≤ 25 mm	≤ 0.1 mm
Clase 2	> 25 mm hasta 150 mm	> 0.1 mm hasta 0.2 mm
Clase 3	> 150 mm hasta 300 mm	> 0.2 mm hasta 0.5 mm
Clase 4	> 300 mm	> 0.5 mm

De manera esquemática en la Figura 2-4 se muestra el concepto de este índice.

Figura 2-4: Esquema general del índice IRI.



Para el cálculo se emplea la solución matemática del modelo mostrado en la Figura 2-3, para esto se soluciona la ecuación para cada uno de los puntos de elevación de la vía de estudio, excepto para el primero punto en donde es utilizado el promedio de pendiente de los primeros once (11) metros, iniciando las variables de la siguiente manera:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_3 = (y_a - y_1)/11 \quad (2-5)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_4 = 0 \quad (2-6)$$

$$a = 11/(dx + 1) \quad (2-7)$$

Donde, Y_a es la a-th elevación y $dx=0.25$ metros es el intervalo de muestreo. De esta manera es posible solucionar las siguientes ecuaciones:

$$x_1 = s_{11}\dot{x}_1 + s_{12}\dot{x}_2 + s_{13}\dot{x}_3 + s_{14}\dot{x}_4 + p_1\dot{y} \quad (2-8)$$

$$x_2 = s_{21}\dot{x}_1 + s_{22}\dot{x}_2 + s_{23}\dot{x}_3 + s_{24}\dot{x}_4 + p_2\dot{y} \quad (2-9)$$

$$x_3 = s_{31}\dot{x}_1 + s_{32}\dot{x}_2 + s_{33}\dot{x}_3 + s_{34}\dot{x}_4 + p_3\dot{y} \quad (2-10)$$

$$x_4 = s_{41}\dot{x}_1 + s_{42}\dot{x}_2 + s_{43}\dot{x}_3 + s_{44}\dot{x}_4 + p_4\dot{y} \quad (2-11)$$

Donde,

$$\dot{y} = (y_i - y_{i-1})/dx = \text{pendiente} \quad (2-12)$$

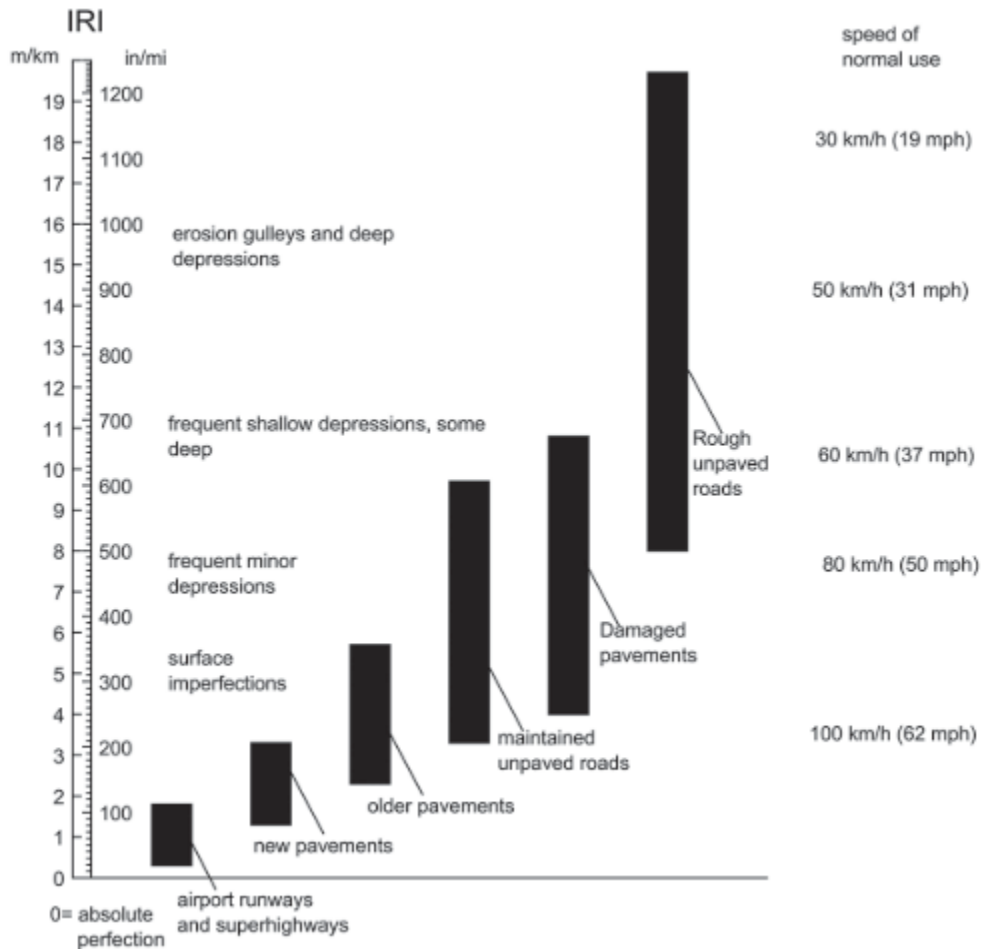
S_{ij} y P_j son coeficientes que son fijados para un intervalo de muestreo dx dado, y pueden obtenerse en el apéndice F en la tabla F-1 del documento presentado por (Michael W. Sayers et al., 1986).

Una vez es solucionada cada una de las ecuaciones para todos los puntos de muestreo, se procede a calcular la pendiente rectificada RS y el índice IRI de la siguiente manera:

$$RS_i = |x_3 - x_1| \quad (2-13)$$

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum_{i=z}^n RS_i \quad (2-14)$$

Teniendo en cuenta el tipo de vía evaluada y los valores de IRI obtenidos, en la Figura 2-5 se muestra la escala de valores esperados y la velocidad de uso.

Figura 2-5: Escalas para el índice IRI. (Michael W. Sayers et al., 1986).

Para tener un entendimiento claro sobre los conceptos involucrados en el cálculo del índice IRI, (Michael W. Sayers, 1986) en su investigación realizada muestra los siguientes puntos claves:

- El IRI tiene en cuenta un perfil longitudinal simple y el intervalo de muestreo no debe ser superior a 300 mm debido a la precisión del cálculo ni inferior a 10 mm tal como lo muestran en su investigación (Caicedo et al., 2017). Una resolución de 0.5 mm es adecuada para todas las condiciones, sin embargo, esta depende del nivel de regularidad de la vía de estudio.
- Se supone que el perfil tiene presenta una inclinación constante entre los puntos de elevación del muestreo.

- El perfil es suavizado con un movimiento promedio cuya base de longitud es 250 mm.
- Al perfil suavizado se le realiza un filtrado usando el model quarter-car, simulando una velocidad de 80 km/h.

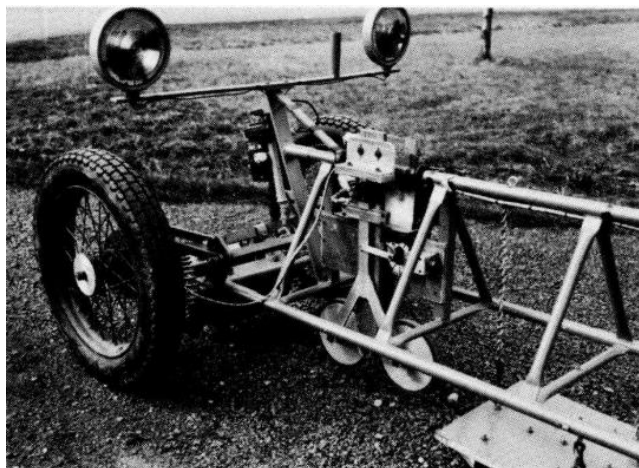
Existe un concepto muy importante referente al cálculo del IRI, con respecto al número de perfiles empleados para el cálculo de este. Como ya se mencionó el IRI emplea un único perfil simple, en el caso de disponer de sistemas que miden varios perfiles de manera simultánea serán calculados independientemente cada uno. Una alternativa de análisis cuando dos perfiles son medidos al mismo tiempo, estos son promediados punto a punto y posterior a esto es calculado el IRI, esta forma de análisis es conocida como (half-car simulation HRI) que es diferente del IRI, pero en algunos casos es empleado indistintamente de manera errónea. Las diferencias entre los índices IRI y HRI son discutidos en profundidad en el texto “Two Quarter-Car Models for Defining Road Roughness: IRI and HRI” por el investigador Michael W. Sayers en el año de 1989.

2.1.4.2 Grupo 1: métodos directos

2.1.4.2.1 Slope Variance SP. Como su nombre lo indica es un método que permite medir la variación de una señal o perfil obtenido por un método específico. Es una medida de regularidad de la vía como la varianza de una señal producida por los primeros perfilómetros de AASHTO y CHLOE mostrado en la Figura 2-6, (Michael W Sayers, Thomas D. Gillespie, 1986).

Como limitación de este tipo de mediciones, se tiene que el Slope Variance es más sensible a la elección del método de medición de perfil que a la rugosidad, y no describe una medida estándar de regularidad. Por otra parte, los valores de pendiente pueden ser calculados fácilmente mediante expresiones matemáticas a partir de las medidas de perfil. Sin embargo, los sistemas de instrumentación anteriores tenían peculiaridades y complejidades que no se han documentado bien, por lo que este tipo de datos presentan errores y no son equivalentes con las mediciones realizadas mediante métodos de respuesta.

Figura 2-6: Perfilometro Rear CHLOE, (W. Carey, H. Huckins, 1962).



2.1.4.2.2 Root Mean Square Vertical Acceleration RMSVA. Como su nombre lo indica hace referencia a la variación tenida en cuenta de la aceleración vertical como respuesta de la regularidad de la superficie de los segmentos viales. Esta medida fue propuesta por McKenzie y Srinarawat como una base para los trabajos de investigación en el proyecto denominado Mays Meter Calibration en Brasil BR-23, por el centro de investigación para el transporte de la Universidad en Austin Texas en febrero de 1978.

La aceleración vertical medida a lo largo de un tramo o segmento de vía es definida en cada posición mediante la ecuación (2-15).

$$VA_b = [Y(x + b) + Y(x - b) - 2 * Y(x)]/b^2 \quad (2-15)$$

Donde $Y(x)$ es la amplitud de la señal (elevación del perfil) en cada posición x , y b es el parámetro de longitud base. Como se muestra en la ecuación anterior, el parámetro RMSVA tienen unidades de aceleración vertical, pero esta no tiene relación alguna con la aceleración espacial de los perfiles. En lugar, esta es una medida de desviación con un factor de escala de $2/b^2$. El RMSVA como un valor estadístico fue usado para definir el índice de calibración estándar para la regularidad QI en el proyecto PICR y también usado en la calibración estándar de la universidad de Austin en Texas.

2.2 Análisis espectral de señales de onda

2.2.1 Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier tiene su comienzo desde el año 1807 cuando el matemático Francés Joseph Fourier presento por primera vez ante el instituto de Francia, la idea generalizada que cualquier función periódica puede ser representada como una serie de sinusoides armónicamente relacionadas, (Stéphane, 2009).

Entendiendo que el noventa por ciento de los fenómenos físicos están relacionados con vibraciones y ondas, la Transformada de Fourier juega un papel muy importante en el procesamiento de señales, imágenes y reconocimiento de voz. Ha sido utilizada en múltiples áreas del conocimiento, por ejemplo, es usada en muchas aplicaciones de la ciencia e ingeniería, en análisis de notas musicales, mecánica de fluidos, teoría electromagnética, rayos – X, mecánica cuántica entre otras, (James, 2011; Stéphane, 2009).

Los análisis de Fourier fueron originalmente interesados con representar y analizar fenómenos periódicos, empleando series de Fourier, luego fue extendiéndose a fenómenos no periódicos mediante la Transformada de Fourier. Una forma de pasar de las series de Fourier a la Transformación de Fourier es considerar los fenómenos no periódicos como un caso límite de los fenómenos periódicos debido a que el periodo tiende al infinito. Uno de los principios más importantes de este tema, que debe ser interpretado con cuidado indica que, un conjunto de frecuencias discretas en el caso periódico llega a ser un continuo de frecuencias en el caso no periódico, es allí donde nace el espectro y con esto lo más importante que menciona que cada señal tiene un espectro y es determinado por su mismo espectro, por lo tanto, es posible analizar las señales en el dominio del tiempo y en el dominio de frecuencias. (Osgood, 2019).

Un análisis de Fourier es la representación de funciones continuas por un potencial finito de series de funciones de seno y coseno.

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx) \quad (2-16)$$

Donde

$n=1,2,3 \dots, \infty$

$$a_0 = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx$$

Los números a_n y b_n son llamados coeficientes de Fourier de f . de esta manera la suma infinita $f(x)$ es llamada series de Fourier de f , que a su vez pueden ser generalizadas a números complejos y además generalizado para derivar la Transformada de Fourier.

La transformada de Fourier es entonces definida por la siguiente expresión:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i k x} dk \quad (2-17)$$

Y de la misma manera la Transformada Inversa de Fourier está definida por la siguiente expresión:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{2\pi i k x} dk \quad (2-18)$$

La ecuación define $F(k)$, como la Transformada de Fourier de $f(x)$. $f(x)$ es una función dependiente de la variable tiempo y $F(k)$ es una función dependiente de la variable frecuencia.

Se entiende la Transformada de Fourier como un mapeo en el dominio del tiempo dentro del dominio de frecuencia. De esta manera la Transformada es a menudo llamada dominio de la frecuencia. La Transformada Inversa de Fourier mapea el dominio de la frecuencia de nuevo dentro de su correspondiente dominio de tiempo. Las dos funciones son inversas una a una. Debido a que en diferentes áreas y aplicaciones en el que la idea del dominio de la frecuencia es importante, pero teniendo en cuenta la complejidad de la infinidad en el número de muestras la Transformada de Fourier directamente no es posible de aplicar, para esto existe una solución llamada Transformada Discreta de Fourier.

2.2.2 Transformada Discreta de Fourier

Esta transformación requiere de una función de entrada que sea discreta con valores diferentes de cero y duración finita. La función de entrada puede ser una secuencia finita de números reales o complejos, de esta manera la DFT es ideal para procesamiento de información guardada en computadores. Por lo tanto, la definición de la DFT es expresada de la siguiente manera:

Dada una secuencia de f_n por $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, es transformada dentro de la secuencia de X_k por la DFT de acuerdo con la siguiente expresión:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (2-19)$$

De esta manera la Transformada Discreta de Fourier Inversa se puede expresar de la siguiente manera:

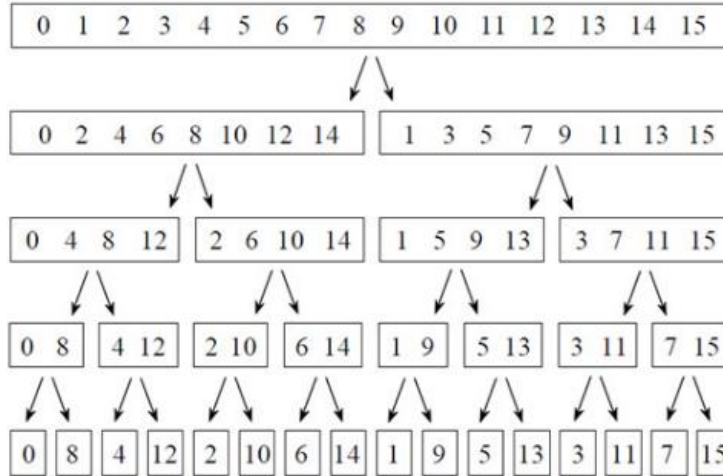
$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (2-20)$$

Donde,

$$w_n = e^{\frac{2\pi i}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) + i \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \quad (2-21)$$

Con el fin de tener procesos más eficientes a la hora de analizar una secuencia de datos, la DFT presenta una alta complejidad en el tiempo de cálculo cuando el número de muestreo es alto, para esto existe un algoritmo mejorado llamado Transformada Rápida de Fourier FFT que da resultados muy similares a la DFT. La FFT a diferencia de la DFT divide la secuencia de N muestras en dos sub secuencias. Esta división tiene en cuenta la división del número de muestreo en sub secuencias hasta obtener solo un elemento, como se muestra en la Figura 2-12.

Figura 2-7: Esquema generalizado de FFT. División de secuencia de muestreo en sub secuencias, (Liu, 2009).



De esta manera es posible escribir de la siguiente manera la función de DFT:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n w_N^{-kn} = \sum_{n=0}^{N/2-1} f_{2n} w_N^{-2kn} + \sum_{n=0}^{N/2-1} f_{2n+1} w_N^{-(2k+1)n} \quad (2-22)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} f_n^{even} w_{N/2}^{-kn} + \sum_{n=0}^{N/2-1} f_n^{odd} w_{N/2}^{-kn} \quad (2-23)$$

2.2.3 Densidad Espectral de Potencia PSD

Como definición general, la Densidad Espectral de Potencia de una señal es una función matemática, que explica la distribución de potencia de la señal sobre las diferentes frecuencias de las que está conformada. Físicamente, una función de Poder Espectral PSD es la varianza de la variable que ha sido medida (elevación, pendiente, etc.) distribuida sobre número de onda, (Michael W. Sayers et al., 1986).

Un análisis de PSD ha sido empleado en distintas aplicaciones de la ciencia e ingeniería, un ejemplo de esto es su uso en; vibraciones, imágenes, sonido, temas médicos relacionados con análisis cardiacos cerebrales entre otros y en ingeniería vial se ha

convertido en una herramienta muy útil, aportando en temas relacionados con el análisis de perfiles viales.

La principal motivación para el uso de la función de PSD en el cálculo de perfiles de vía fue su utilidad en el análisis del comportamiento dinámico de los vehículos y su interacción con la superficie de una estructura de pavimento, de esta manera, muchos investigadores notaron que la PSD podía ser utilizada en la clasificación del deterioro y de la regularidad de las vías. La función de PSD, es una representación estadística de la importancia de varios números de onda NE, esta puede ser entendida como una Transformada de Fourier escalada de tal forma que muestre la variación del perfil de la vía sobre un conjunto de ondas sinusoidales, (M W Sayers & Karamihas, 1998). La PSD, permite representar un pavimento como la suma de ondas con diferentes longitudes de onda y amplitudes, que son transformadas matemáticamente mediante la Transformada de Fourier, (Goenaga, Fuentes, & Mora, 2017).

La formulación matemática para representar la aproximación de la función de PSD se muestra en la ecuación (2-24), esta es una notación uniforme tomada de la normativa estándar (ISO, 2016).

$$G_d(n) = Cn^{-w} \quad (2-24)$$

Donde G_d corresponde al desplazamiento de PSD, C es un parámetro dependiente de la regularidad del perfil, n corresponde a la frecuencia espacial o número de onda (Wavenumber) de la señal obtenida y w es un parámetro adimensional, (Andren, 2015). Para la expresión matemática mostrada en la ecuación (2-24), ha existido una serie de alternativas o propuestas por diversos investigadores para el estudio en segmentos viales, tal como se muestra en la Figura 2-8, muchos de estos fijando el parámetro adimensional w evaluado en un rango de numero de onda n específico. Macaulay (1963), propuso la misma función de aproximación, pero añadió que w debería tener un valor de 2.5 para longitudes de onda entre 100 metros y 3 metros, y un valor de 1.5 para longitudes menores a estas.

Figura 2-8: Aproximaciones de la función de Densidad Espectral de Potencia PSD, (Andren, 2015).

<i>Name</i>	<i>PSD approximation</i>	<i>Wavenumber</i>
ISO (1995-09-01)	$G_d(n) = Cn^{-w}$	$0 \leq n \leq \infty$
BSI (1972)	$G_d(n) = \begin{cases} Cn^{-w_1} \\ Cn^{-w_2} \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_0$ $n_0 \leq n \leq \infty$
Two Split	$G_d(n) = \begin{cases} Cn^{-w_1} \\ Cn^{-w_2} \\ Cn^{-w_3} \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_1$ $n_1 \leq n \leq n_2$ $n_2 \leq n \leq \infty$
Sayers (1986)	$G_d(n) = C_1/n^4 + C_2/n^2 + C_3$	$0 \leq n \leq \infty$
Gillespie (1985)	$G_d(n) = C(1 + (0.066/n)^2)/n^2$	$0 \leq n \leq \infty$
Marcondes et al. (1991)	$G_d(n) = \begin{cases} C_1 \exp(-kn^p) \\ C_2(n - n_0)^q \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_0$ $n_0 \leq n \leq \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C}{\alpha^2 + n^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Macvean (1980)	$G_d(n) = \frac{C}{(\alpha^2 + n^2)^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C(n^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{(n^2 + \alpha^2 + \beta^2)^2 + 4n^2\alpha^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Xu et al. (1992)	$G_d(n) = A/2a \exp\left(-n^2 / \left((2a)^2\right)\right)$	$0 \leq n \leq \infty$
Kozin and Bogdanoff (1961)	$G_d(n) = A/a \exp(-n^2/a^2)$	$0 \leq n \leq \infty$

Note: $C, C_1, C_2, C_3, p, k, q, \alpha$ and β are real positive constants

2.2.4 Clasificación de perfiles de vía ISO 8608

La aproximación estándar ISO 8608, ha sido empleada en muchas investigaciones para el cálculo de perfiles de vía, como un indicador de regularidad más usado en el mundo, esta fue desarrollada para proveer un método estándar de comparación para la elevación del perfil longitudinal de una vía en términos de la función de PSD (Pawar, Tom, & Saraf, 2018). La PSD es descrita por dos parámetros, el índice de desnivel y ondulación, y puede

ser expresada en términos de la frecuencia espacial angular Ω como se muestra en la ecuación (2-25).

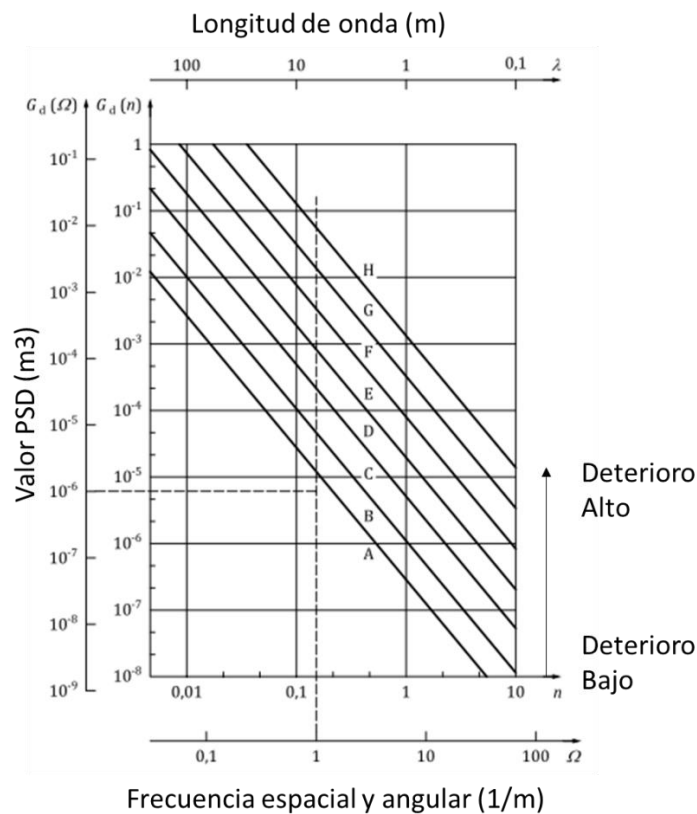
$$G_d(\Omega) = C\Omega^{-w} \tag{ 2-25}$$

Donde C corresponde a $G_0 = G_d(\Omega_0)$ en $m^2/(\text{rad}/m)$ describe los valores de PSD de la onda de referencia (Ω_0) = 1. También es posible expresar la función de PSD por medio de la frecuencia espacial n como se muestra en la ecuación (2-26), empleando un valor de frecuencia espacial de referencia $n_0 = 0.1 \text{ ciclos}/m$.

$$G_d(n) = G_d(n_0)(n/n_0)^{-w} \tag{ 2-26}$$

Para la clasificación de las vías, la ISO estándar uso un parámetro w igual a 2 y con base a esto fue propuesta una categorización de las vías de escala geométrica de la A-H tal como se muestra en la Figura 2-9.

Figura 2-9: Categorización de las vías clases A-H. λ longitud de onda (m), n frecuencia espacial (ciclos/m), Ω frecuencia angular espacial, $G_d(n)$ y $G_d(\Omega)$ desplazamiento de Poder de Densidad Espectral (m^3), modificada de (ISO, 2016).



La ISO 8680 propuso los valores de **C** empleados en la expresión (2-25), teniendo en cuenta diferentes clases de vía siendo **A** una clase de vía en estado muy bueno y **H** una vía en estado muy pobre o malo tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2-10: Clasificación de las vías según la normativa estándar ISO 8608, (ISO, 2016).

Road class	Degree of roughness			
	Lower limit	Geometric mean	Upper limit	Geometric mean
	Spatial frequency units, n			
		$G_d(n_0)^a$ 10^{-6} m^3		$G_v(n)$ 10^{-6} m
A	—	16	32	6,3
B	32	64	128	25,3
C	128	256	512	101,1
D	512	1 024	2 048	404,3
E	2 048	4 094	8 192	1 617
F	8 192	16 384	32 768	6 468
G	32 768	65 536	131 072	25 873
H	131 072	262 144	—	103 490
	Angular spatial frequency units, Ω			
		$G_d(\Omega_0)^b$ 10^{-6} m^3		$G_v(\Omega)$ 10^{-6} m
A	—	1	2	1
B	2	4	8	4
C	8	16	32	16
D	32	64	128	64
E	128	256	512	256
F	512	1 024	2 048	1 024
G	2 048	4 096	8 192	4 096
H	8 192	16 384	—	16 384
^a $n_0 = 0,1 \text{ cycles/m}$ ^b $\Omega_0 = 1 \text{ rad/m}$ NOTE 1 The road classification is based on $G_d(n_0)$, $G_d(\Omega_0)$, $G_v(n)$ and $G_v(\Omega)$ values. NOTE 2 The fit exponent $w = 2$ is assumed (see B.5 and C.4). NOTE 3 The mean values for road classes A and H are only for simulation purposes.				

2.2.4.1 Ejemplo de cálculo, clasificación ISO 8608

Para realizar el cálculo de cada una de las clases de vía estipuladas por la ISO 8608 mostradas en la Figura 2-9, se muestra a continuación un ejemplo general del procedimiento y operaciones necesarias.

1. Se toma como ejemplo el cálculo de la clase de vía con un nivel de deterioro bajo **A**. Para esto se emplea la ecuación (2-26), un rango de frecuencias espaciales **n**

de 1×10^{-2} hasta 10 (ciclos/m), la frecuencia espacial de referencia $n_0 = 0.1$ *ciclos/m* y el parámetro w igual a 2.

- El siguiente paso es buscar el valor de desplazamiento PSD $G_d(n_0)$ en la Figura 2-7, que para el caso de la clase **A** el valor medio es 16, y se procede al cálculo del PSD para el primer valor de frecuencia espacial como se muestra a continuación:

$$G_d(0.001) = 16 * 10^{-6} * \left(\frac{0.001}{0.01}\right)^{-2} \quad (2-27)$$

$$G_d(0.001) = 0.16 \text{ m}^3 \quad (2-28)$$

- Seguido de esto es calculado cada uno de los valores de PSD para cada frecuencia espacial establecida y cada clase de vía A-H, mostrados en la Tabla 2-6 y graficados en la **Figura 2-9**.

Tabla 2-6: Valores de PSD calculados para las clases de vía de A hasta H.

n (1/m)	PSD o Gd (m3)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1.E-03	1.6.E-01	6.4.E-01	2.6.E+00	1.0.E+01	4.1.E+01	1.6.E+02	6.6.E+02	2.6.E+03
1.E-01	1.6.E-05	6.4.E-05	2.6.E-04	1.0.E-03	4.1.E-03	1.6.E-02	6.6.E-02	2.6.E-01
1.E+00	1.6.E-07	6.4.E-07	2.6.E-06	1.0.E-05	4.1.E-05	1.6.E-04	6.6.E-04	2.6.E-03
1.E+01	1.6.E-09	6.4.E-09	2.6.E-08	1.0.E-07	4.1.E-07	1.6.E-06	6.6.E-06	2.6.E-05

Es importante mencionar que la clasificación ISO 8608 utiliza un suavizado para los perfiles de vía analizados, empleando una sectorización por medio de octavos de bandas frecuenciales, buscando una mejor apariencia visual de la función de PSD en la clasificación de vía. Para el cálculo de los valores de PSD suavizados por octavos de bandas se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, con la única diferencia, que se emplean los valores de desplazamiento PSD $G_d(n_0)$ de la tabla C-3 del anexo C del documento de la International Standard (ISO, 2016) y son mostrados en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Valores de PSD suavizado en octavos de bandas frecuenciales, calculados para las clases de vía de A hasta H.

n (1/m)	Gd (m3)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
7.8.E-03	1.3.E-03	5.2.E-03	2.1.E-02	8.4.E-02	3.4.E-01	1.3.E+00	5.4.E+00	2.1.E+01
1.6.E-02	3.3.E-04	1.3.E-03	5.2.E-03	2.1.E-02	8.4.E-02	3.4.E-01	1.3.E+00	5.4.E+00
3.1.E-02	8.2.E-05	3.3.E-04	1.3.E-03	5.2.E-03	2.1.E-02	8.4.E-02	3.4.E-01	1.3.E+00
6.3.E-02	2.0.E-05	8.2.E-05	3.3.E-04	1.3.E-03	5.2.E-03	2.1.E-02	8.4.E-02	3.4.E-01
1.3.E-01	5.2.E-06	2.1.E-05	8.2.E-05	3.3.E-04	1.3.E-03	5.2.E-03	2.1.E-02	8.4.E-02
2.5.E-01	1.3.E-06	5.1.E-06	2.0.E-05	8.2.E-05	3.3.E-04	1.3.E-03	5.2.E-03	2.1.E-02

n (1/m)	Gd (m3)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
5.0.E-01	3.2.E-07	1.3.E-06	5.1.E-06	2.0.E-05	8.2.E-05	3.3.E-04	1.3.E-03	5.2.E-03
1.0.E+00	8.0.E-08	3.2.E-07	1.3.E-06	5.1.E-06	2.0.E-05	8.2.E-05	3.3.E-04	1.3.E-03
2.0.E+00	2.0.E-08	8.0.E-08	3.2.E-07	1.3.E-06	5.1.E-06	2.0.E-05	8.2.E-05	3.3.E-04
4.0.E+00	5.0.E-09	2.0.E-08	8.0.E-08	3.2.E-07	1.3.E-06	5.1.E-06	2.0.E-05	8.2.E-05
8.0.E+00	1.3.E-09	5.0.E-09	2.0.E-08	8.0.E-08	3.2.E-07	1.3.E-06	5.1.E-06	2.0.E-05
1.0.E+01	8.0.E-10	3.2.E-09	1.3.E-08	5.1.E-08	2.0.E-07	8.2.E-07	3.3.E-06	1.3.E-05

2.2.5 Análisis por ventanas o Wavelets

La manera correcta de analizar una señal no estacionaria, es decir una señal que varía continuamente, que no posee un patrón que se repita y su registro no está limitado en el tiempo, es hacer un análisis espectral que dependa del tiempo. Gabor en el año de 1940, fue el primer investigador en traer a colación la Transformada de Fourier de tiempo corto mejor conocida como Transformada de Fourier de Ventana Deslizante. Esta Transformada permite ubicar de manera precisa las singularidades presentes en una señal, pero con la limitación de conocer únicamente el intervalo de tiempo en que ocurre, además cuando las singularidades aparezcan muy cerca no será posible la distinción de las mismas entre sí, (ApuntesDeSeñales, 2006).

2.2.5.1 Transformada de Wavelets

Una solución matemática a estos problemas es la Transformada Wavelet creada a en los años '80, la cual permite centrarse en fenómenos transitorios con una frecuencia alta que a diferencia de la Transformada por ventanas en el que es definido un tamaño para las ventanas todas las frecuencias son analizadas con las mismas resoluciones de tiempo y frecuencia, la Transformada Wavelet logra determinar un tamaño de ventana teniendo en cuenta una relación con las frecuencias analizadas.

La Transformada Wavelet de una función $f(t)$ se entiende como la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\psi_{s,\tau}(t)$ que forman una base y son llamadas "Wavelets", de esta manera la Transformada Wavelet vista como una transformación continua CWT se define como:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}(t) dt \quad (2-29)$$

En algunos casos aplicar los operadores continuos en el dominio completo puede presentar varios inconvenientes en el proceso de suavizado de la función, por lo tanto es más adecuado emplear un análisis Discreto de Transformada Wavelet DWT, en donde se selecciona únicamente un conjunto de bandas y posiciones frecuenciales (Wei et al., 2005). De esta manera es posible representar la función $f(t)$ como la suma de una serie de señales $d_m(t)$ denominadas sub bandas de la señal:

$$f(t) = \sum_{m=0}^n d_m(t) \quad (2-30)$$

Las sub bandas de señal permiten detallar la señal inicial en tiempos y posiciones específicos, en el caso de tener una señal que representa la medida de regularidad de un perfil de una vía en donde t representa la posición a lo largo del perfil, esta puede ser expresada matemáticamente como una combinación lineal de una función Wavelet de la siguiente manera:

$$f(t) = d_0(t) + d_1(t) + d_2(t) + \dots + d_n(t), \text{ para } 2^n \leq N \quad (2-31)$$

Donde las sub bandas de frecuencia seleccionada están definidas desde $i = 0, 1, 2, \dots, n$ donde 2^n debe ser menor al número total de los datos N .

Las wavelets, pueden ser pensadas como pulsos de onda que se trasladan en el dominio del tiempo y pueden cambiar de tamaño, son usadas como la construcción de bloques para la solución de problemas de resolución tiempo-frecuencia. Existen varias familias de Wavelets y para cada una de estas hay una Wavelet madre, (Alhasan, White, & De Brabanterb, 2016). Una Wavelet puede ser aplicada en diferentes posiciones de la señal hacer transformada, dilatándola o comprimiéndola buscando la forma adecuada a una escala y ubicación específica, (Wei et al., 2005). La dispersión de la Wavelet es controlada por un factor de escala a en el que valores grandes corresponden a dilatación y valores pequeños corresponden a compresión de la señal. La función Wavelet madre se define como:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2-32)$$

Donde, τ es el factor de traslación y t es la posición en el perfil. El factor de escala s es inversamente relacionado con la frecuencia f de la Wavelet adoptada como:

$$f = \frac{f_c}{s} \quad (2-33)$$

Donde, f_c es constante para una Wavelet dada, que es igual a la desviación estándar del espectro de energía sobre un eje vertical.

Dentro de las diversas familias Wavelet se tiene la Wavelets de Shannon, Meyer, Battle-Lemarie, Haar, Daubechies, entre otras. Las Wavelets de Daubechies basadas en el trabajo realizado de Ingrid Daubechies de Bélgica en el año de 1990, como Wavelets ortogonales que definen una transformación discreta, son de las Wavelets más empleadas en el análisis de señales junto con las Wavelet de Haar, siendo estas transformaciones que permiten extenderse a múltiples niveles.

Las funciones Wavelet de escala formuladas por Daubechies, son construidas con base a condiciones de regularidad y ortonormalidad mediante las siguientes expresiones:

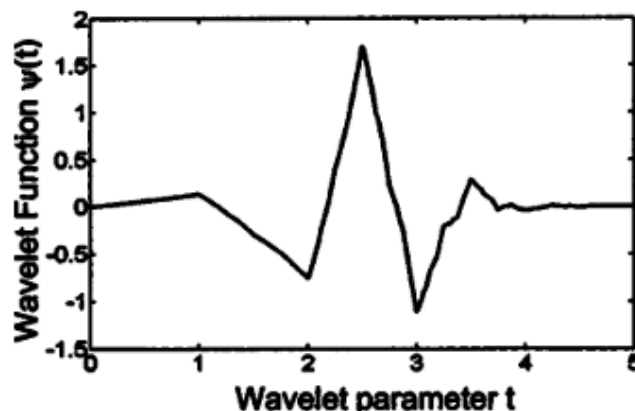
$$P(\omega) = \left(\frac{1 + e^{-j\omega}}{2} \right)^M F(e^{-j\omega}), \text{condición de regularidad} \quad (2-34)$$

$$|P(\omega)|^2 + |P(\omega + \pi)|^2 = 1, \text{condición de ortonormalidad} \quad (2-35)$$

Las variables y conceptos matemáticos pueden revisarse en la literatura de (Poularikas, 2010), con un entendimiento más claro y detallado.

En la Figura 2-11, se muestra la función DB3 de la Wavelet de Daubechies.

Figura 2-11: Función DB3 Wavelet de Daubechies, (Wei et al., 2005).



2.3 Evaluación estructural de los pavimentos

Con la evaluación estructural de los pavimentos se busca determinar la capacidad de soporte de todo el sistema que lo compone (capas de materiales de la estructura junto con la capa inferior natural o sub rasante. Como lo menciona (Meier, 1995), la capacidad estructural de las vías se determina en gran medida por las relaciones de carga – deflexión de las capas de materiales que conforman toda la estructura de pavimento. Estas propiedades pueden ser medidas en el laboratorio mediante muestras tomadas del sitio de ensayos destructivos, sin embargo, como su nombre lo indica es necesario afectar la estructura para tomar las muestras, además mediante este tipo de procedimientos no es posible realizar seguimientos a longitudes considerables de forma continua ni tener en cuenta errores como: la heterogeneidad de toda el área, muestras no inalteradas, errores propios de los ensayos de laboratorio.

Como una alternativa de evaluación, existen los ensayos no destructivos NDT que proveen grandes beneficios frente a los ensayos de laboratorio mediante muestras de material, (Stokoe, Hudson, & Miner, 1991). Como ejemplo de esto, con ensayos in situ NDT es posible obtener aproximaciones propias de esfuerzos, deformación, temperatura y contenido de agua, además este tipo de pruebas permite de una manera muy rápida con una alta confiabilidad y bajo costo obtener resultados para la toma de decisiones frente al tipo de intervención requerido al pavimento.

Tomando como referencia a (Hoffman & Aguila, 1985) puede mencionarse lo siguiente: la evaluación estructural, empleando métodos no destructivos, utiliza la respuesta del sistema para establecer sus características estructurales, siendo este un proceso de diseño inverso.

2.3.1 Evaluación de tipo estacionario

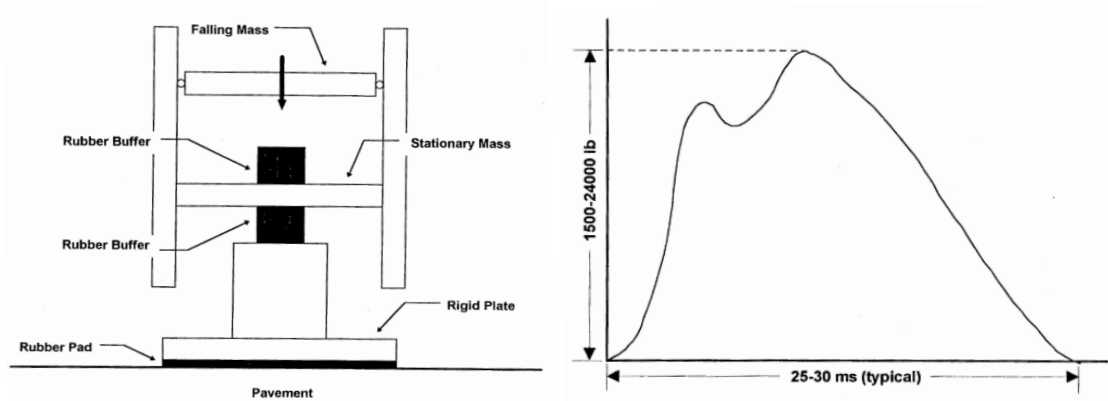
Existen diferentes tipos de metodologías empleadas para la evaluación estructural mediante ensayos de tipo NDT, la mayoría de estos se basan en el mismo principio de evaluación tal y como lo expone (Meier, 1995); la superficie de deflexión observada bajo una carga dada, está relacionada de manera inversa con la capacidad de soporte de las estructuras de pavimento como se muestra en la Figura 2-14, por lo tanto los diferentes

equipos empleados en la evaluación estructural varían según la naturaleza de la carga que estos aplican, categorizándose como cargas de tipo estático, dinámicos de estado estacionario y dinámico transitorio. El deflectógrafo de La Croix junto con la viga Benkelman se encuentran dentro de los dispositivos de tipo estacionario, cuyo método se basa en la aplicación de una carga estática que es generada por un camión o vehículo con un peso considerable lo cual dificulta el uso de este método generando una serie de errores e incertidumbres a la hora de realizar las mediciones, por lo tanto la Association of State Highway and Transportation Officials) no permite el uso de estos dispositivos aproximadamente desde el año 2009. El Dynaflect, el Road Rater y el WES 16-Kip Vibrator, son dispositivos considerados dentro del grupo de los dinámicos estacionarios, siendo estos equipos capaces de aplicar una carga en un rango de 1000 lb a cargas pico de 30000 lb generando una carga harmónica con frecuencias entre 5 Hz y 70 Hz.

2.3.2 Evaluación de tipo dinámico transitorio

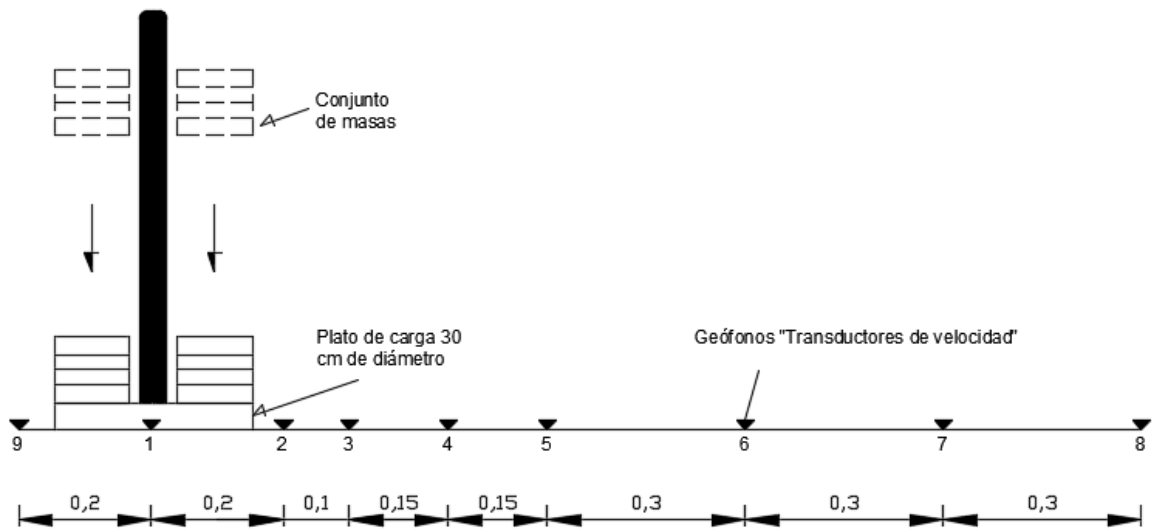
El deflectómetro de impacto o Falling Weight Deflectometer FWD es un equipo que permite la evaluación estructural de los pavimentos mediante la aplicación de una carga dinámica transitoria de hasta 24 kips en una duración de 30 ms (Meier, 1995), el FWD se compone de una serie de masas (de peso entre 110 y 660 lb) de hasta cuatro rangos de altura de caída superior a las 16 pulgadas. Las masas caen sobre un conjunto de amortiguadores de caucho que condicionan la carga para producir la forma de pulso deseado como se muestra en la Figura 2-12. La carga es transmitida del sistema de masas al pavimento a través de un plato de carga metálico con almohadilla de caucho de 11.8 in de diámetro asegurando una correcta distribución uniforme de la carga sobre toda el área, el tamaño y forma de este plato es aproximado al área cargada por la rueda trasera de un vehículo.

Figura 2-12: A) Sistema de masas y amortiguadores, B) Forma típica de un pulso de carga FWD. (Meier, 1995)



En la Figura 2-13, se observa la configuración general de un deflectómetro de impacto FWD, el cual consta de un sistema de elevación de masas correspondientes a la aplicación de carga sobre la estructura, seguido de siete o más sensores transductores de velocidad también llamados geófonos, en donde el número de estos sensores dependerá del tamaño del equipo que se tenga.

Figura 2-13: Configuración estándar FWD marca Jills con nueve (9) geófonos. Modificada de (Stokoe et al., 1991).



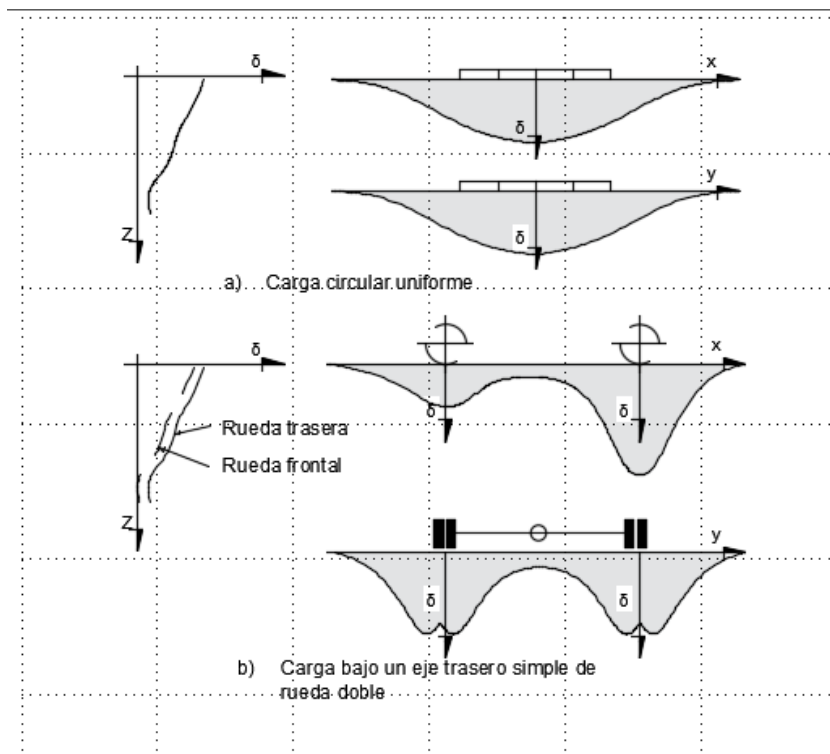
De los ensayos realizados con el FWD es posible obtener un cuenco de deflexiones del cual se derivan los llamados parámetros del cuenco de deflexiones que son asociados a cada una de las capas que conforman una estructura de pavimento (Horak & Emery, 2006),

además este equipo aplica una carga similar a las cargas dinámicas inducidas por el tráfico para diferentes niveles de frecuencia y velocidad (Gomez & Murillo, 2015).

2.3.3 Cuencos de deflexión

Cuando un pavimento se deflecta debido a una carga impuesta, el área de influencia puede extenderse hasta dos metros desde el punto de aplicación de la carga, y sucede en todas las direcciones. Se genera una deformación circular también llamada cuenco de deflexión, en donde la forma y tamaño dependerá de diferentes factores como el dispositivo de medición, resistencia de la estructura del pavimento, magnitud y tiempo de la carga aplicada, entre otras. En la Figura 2-14 se muestran varios cuencos de deflexión para diferentes tipos de cargas impuestas sobre el pavimento, se puede apreciar como las cargas impuestas por las llantas traseras de los vehículos por lo general presentan mayor impacto sobre la estructura y por lo tanto cuencos de deflexión más grandes.

Figura 2-14: Cuencos de deflexión bajo diferentes formas de carga. Modificada de (Horak & Emery, 2006).



Estos cuencos de deflexión han sido medidos por medio de métodos de análisis desarrollados desde los años 1950s, principalmente fue empleada la viga Benkelman para obtener la deflexión máxima bajo la carga del eje trasero de un camión. A mediados de los años 1980s el FWD es introducido en el mercado como un dispositivo eficaz, capaz de medir de manera electrónica las deflexiones. Con la medición de todo el cuenco de deflexión es posible derivar y deducir las propiedades y parámetros del cuenco de deflexión. En la Tabla 2-8 presenta un resumen general de los parámetros de cuenco de deflexión más relevantes hallados por los diferentes investigadores desde los años 1950s. Los investigadores (Horak & Emery, 2006), luego de realizar sus estudios y trabajos en South África desarrollaron tres nuevos parámetros del cuenco de deflexión medidos con el FWD, estos nuevos parámetros son; Base Layer Index BLI, Middle Layer Index MLI y Lower Layer Index LLI.

Tabla 2-8: Parámetros de cuenco de deflexión. (Gomez & Murillo, 2015).

Parámetro de deflexión	Formula	Equipo de medición	Referencia
Deflexiones (dr)	Deflexión medida a una distancia de la carga	FWD	Hoffman 1981
Área	$AREA = 6(d_0 + 2d_{12} + 2d_{24} + d_{36})/d_0$	FWD	
Áreas adicionales	$AREA_2 = 6(d_{12} + 2d_{18} + d_{24})/d_0$ $AREA_3 = 6(d_{24} + 2d_{36} + d_{48})/d_0$	FWD	
Índices de área (AI)	$AI_1 = d_0 + d_{12}/d_0$ $AI_2 = d_{12} + d_{24}/2d_0$ $AI_3 = d_{24} + d_{36}/2d_0$ $AI_4 = d_{36} + d_{48}/d_0$	FWD	
Área bajo el perfil del pavimento (AUPP)	$AUPP = (5 \cdot d_0 - 2d_{12} - 2d_{24} - d_{36})/2$	FWD	Hill and Thomson
Índice de curvatura de la superficie (SCI) ó (BLI)	$SCI = d_0 - d_{12}$	Road Rater, Dynaflect, FWD	Shrivner 1968
Índice de curvatura en la base (BCI) ó (MLI)	$BCI = d_{24} - d_{36}$ ó $BCI = d_{36} - d_{48}$	Dynaflect, FWD	Kilareski 1982
Índice de daño en la base (BDI) ó (LLI)	$BDI = d_{12} - d_{24}$	RR, FWD	Kilareski 1982
Índice de flexión (BI)	$BI = d_0/a$	Viga Benkelman	Hveem 1954
Índice de extensibilidad de la carga (LSI)	$LSI = (d_{48}/d_{24})F$	FWD	Wimsatt 1995
Deflexión máxima (d0)	d_0	Viga Benkelman, Dynaflect	Shrivner 1968
Radio de curvatura (R)	$R = r^2 / (2d_0(d_0/dr - 1))$	Viga Benkelman	Dehlen 1962
Radio influencia (RI)	$RI = x/d_0$	Viga Benkelman	Ford 1962
Factores de forma (F)	$F_1 = (d_0 - d_{24})/d_{12}$ $F_2 = (d_{12} - d_{36})/d_{24}$ $F_3 = (d_{24} - d_{48})/d_{36}$	FWD	Hoffman 1981

Parámetro de deflexión	Formula	Equipo de medición	Referencia
Pendiente de deflexión (SD)	$SD = \tan^{-1}[(d_0 - dr)/r]$	Viga Benkelman	Kung 1981
Extensibilidad (S)	$S = 25(d_0 + d_{12} + d_{24} + d_{36})/d_0$	Road Rater, Dynaflect, FWD	Vaswani 1971

En la Tabla 2-9 los parámetros de cuenco de deflexión son resumidos junto con su expresión matemática y asociación con la estructura de pavimento. En la Figura 2-15 se muestra un cuenco de deflexión típico bajo una carga dinámica generada por un FWD, además se indican los parámetros de cuenco y su asociación con el perfil de una estructura de pavimento típica de South África (Horak & Emery, 2006).

Tabla 2-9: Parámetros de cuenco de deflexión. (Horak & Emery, 2006)

Parameter	Formula	Structural indicator
1 .Maximum deflection	D_0 as measured	Gives an indication of all structural layers with about 70% contribution by the subgrade
2a Australian Curvature Function	$CF = D_0 - D_{200}$	Gives an indication of the structural condition of the surfacing and base
2b. South African Radius of Curvature (RoC)	$RoC = \frac{(L)^2}{2D_0(1 - D_{200}/D_0)}$ Where L=127mm in the original Dehlen curvature meter and 200mm for the FWD	Gives an indication of the structural condition of the surfacing and base condition
3.Base Layer Index (BLI)	$BLI = D_0 - D_{300}$	Gives an indication of primarily the base layer structural condition
4.Middle Layer Index (MLI)	$MLI = D_{300} - D_{600}$	Gives an indication of the subbase and probably selected layer structural condition
5. Lower Layer Index (LLI)	$LLI = D_{600} - D_{900}$	Gives an indication of the lower structural layers like the selected and the subgrade layers

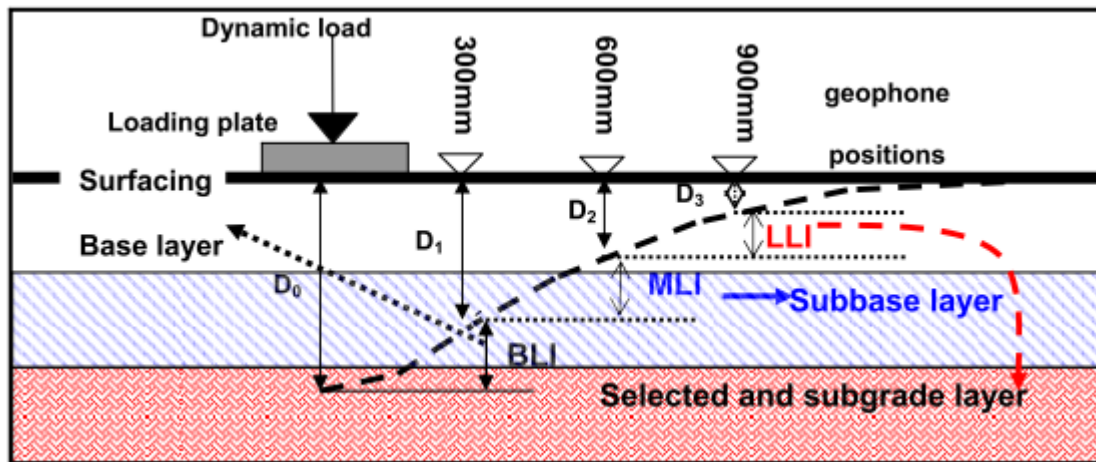
De la Figura 2-15 es posible distinguir tres zonas importantes en el cuenco de deflexión, teniendo en cuenta lo establecido por (Horak, 2008), la zona 1 es la más próxima al punto de aplicación de carga a 300 mm presentando una curvatura positiva, y se asocia con las

capas superficiales del pavimento. Esta zona se identifica como Base Layer Index BLI, previamente referido como Surface Curvature Index SCI.

La zona 2 normalmente fijada entre las distancias de 300 mm a 600 mm desde el punto de carga, presenta la variación de una curvatura positiva a una curvatura negativa también llamada zona de inflexión, la cual es relacionada con las capas que conforman el cuerpo de la estructura. Esta zona se puede identificar como Middle Layer Index MLI y previamente definida como Base Curvature Index BCI.

Por último, la zona 3 siendo la más alejada del punto de carga en donde la curva de deflexión se invierte y se extiende hacia la superficie normal de la vía, esta zona se encuentra entre los 600 mm y 2000 mm y corresponde al comportamiento de la subrasante. Esta zona se identifica como Lower Layer Index LLI o previamente como Base Damage Index BDI.

Figura 2-15: Parámetros de cuenco de deflexión y su asociación con la estructura de pavimento. (Horak & Emery, 2006)



Luego de realizar los análisis correspondientes a los parámetros de cuenco de deflexión en diferentes estructuras de pavimento, fue establecida una clasificación de evaluación comparativa para los parámetros del cuenco. En la Tabla 2-10 se muestra esta clasificación para estructuras de pavimento con tres capas de base con distinto material, consiste en un sistema escalonado de tres niveles de condición, empleando además colores para su distinción en donde el color verde es para una condición buena, el color naranja para una condición de daño y el color rojo para una condición de daño severo.

Tabla 2-10: Rangos de clasificación para los parámetros del cuenco de deflexión en diferentes pavimentos. (Horak, 2008).

	Structural condition rating	Deflection bowl parameters				
		D_0 (μm)	RoC (m)	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Granular base	Sound	<500	>100	<200	<100	<50
	Warning	500-750	50-100	200-400	100-200	50-100
	Severe	>750	<50	>400	>200	>100
Cementitious base	Sound	<200	>150	<100	<50	<40
	Warning	200-400	80-150	100-300	50-100	40-80
	Severe	>400	<80	>300	>100	>80
Bituminous base	Sound	<400	>250	<200	<100	<50
	Warning	400-600	100-250	200-400	100-150	50-80
	Severe	>600	<100	>400	>150	>80
Note: These criteria can be adjusted to improve sensitivity of benchmarking.						

Los valores de deflexión adquiridos en campo mediante el FWD deben ser corregidos por carga y temperatura, siguiendo la metodología expuesta por (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

2.3.2.1 Corrección de deflexiones por carga

La corrección por carga es debida a la variación respecto a un valor de carga normalizado generado por el equipo en el momento de realizar el ensayo, para esta corrección se utiliza una expresión lineal mostrada en la (2-36).

$$FCC = Q_{norm}/Q_i \quad (2-36)$$

Donde:

FCC : Factor de corrección por carga.

Q_{norm} : Carga normalizada, 9000 lb

Q_i : Carga aplicada en el ensayo i , lb

2.3.2.2 Corrección de deflexiones por temperatura

De manera similar los valores de deflexión deben ser corregidos por temperatura, teniendo en cuenta las propiedades visco elásticas y la dependencia con la temperatura en el cambio de rigidez del material asfáltico empleado en las capas superficiales del pavimento.

Para la corrección por temperatura se utiliza una temperatura normalizada de 20°C (68°F) y las ecuaciones empíricas mostradas en la ecuación (2-37) que dependen del espesor de la carpeta asfáltica.

$$\begin{aligned} FCT_{2"} &= -0.0039 * T + 1.266 \\ FCT_{4"} &= -0.0068 * T + 1.468 \\ FCT_{8"} &= -0.0093 * T + 1.626 \\ FCT_{12"} &= -0.0112 * T + 1.748 \end{aligned} \quad (2-37)$$

Donde:

FCT : Factor de corrección por temperatura.

T : Es la temperatura de realización del ensayo (°F).

Se deberá realizar una interpolación en el caso que el espesor de la carpeta asfáltica sea diferente a los utilizados en las expresiones matemáticas de la ecuación (2-37).

Una vez obtenidos los factores de corrección por carga y temperatura se calculan las deflexiones corregidas, multiplicando por los factores de corrección mediante la expresión (2-38).

$$d_{corr.} = d_{medida} * FCC * FCT \quad (2-38)$$

Donde:

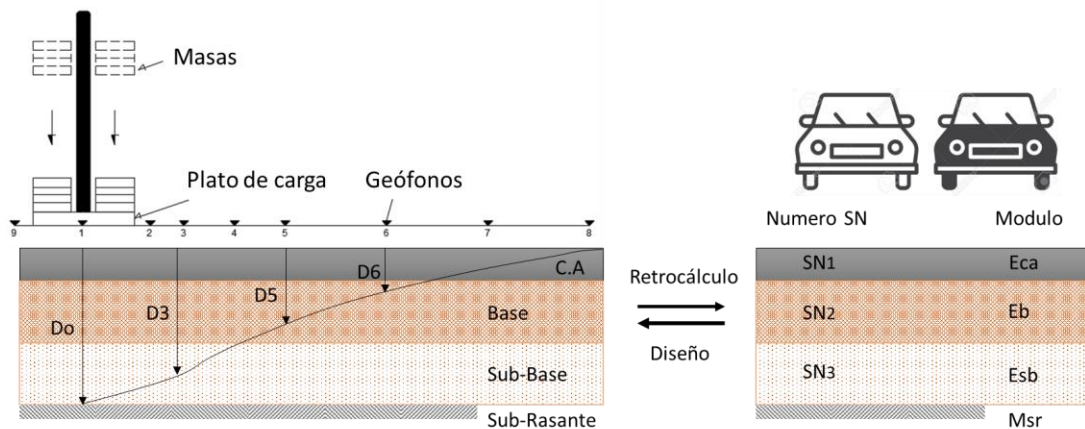
$d_{corr.}$: Deflexion corregida por carga y temperatura, (in).

d_{medida} : Deflexion medida con el equipom FWD, (in).

2.3.4 Métodos de retrocálculo

La evaluación de las propiedades mecánicas de las capas que conforman las estructuras de pavimento junto con la estimación de las solicitaciones del tráfico son factores relevantes para el diseño y el análisis de estado de los pavimentos. Mediante la determinación del valor de módulo resiliente en laboratorio es posible caracterizar las capas de materiales, sin embargo, este tipo de ensayos presentan limitaciones e inconvenientes relacionados con representatividad de las muestras y altos costos, con lo que hace de este método inviable. Por lo tanto, se han desarrollado otras metodologías llamadas de retrocálculo que permiten la obtención de parámetros mecánicos de las diferentes capas del pavimento utilizando los valores de deflexión mediante el FWD.

Figura 2-16: Esquema general, métodos de retrocálculo



2.3.4.1 Metodología de retrocálculo (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Esta metodología permite la determinación del módulo resiliente de la subrasante y el número estructural efectivo de toda la estructura, basada en el modelo monocapa de la teoría de Boussinesq empleando la siguiente expresión:

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r} \quad (2-39)$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente de subrasante de retrocálculo, psi

P : Carga aplicada, lb

d_r : Deflexion a una distancia r del centro de carga, in

r : Distancia del centro de carga, in

La guía de diseño AASHTO recomienda una distancia mínima en donde el bulbo de esfuerzos se haya disipado en gran medida, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$r = 0.7 a_e \quad (2-40)$$

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D^3 \frac{E_p}{M_R} \right)^2 \right]} \quad (2-41)$$

Donde:

a_e : Radio de bulbo de esfuerzo en la interfaz pavimento – subrasante, in

a : Radio de plato de carga, in

D : Espesor total del pavimento sobre la subrasante, in

E_p : Modulo efectivo de todas las capas del pavimento sobre la subrasante, psi

Para el cálculo del módulo efectivo E_p se emplea la deflexión máxima medida debajo del plato de carga, mediante la siguiente expresión:

$$d_0 = 1.5 p a \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{\left[1 + \left(\frac{D^3}{a} \frac{E_p}{M_R} \right)^2 \right]}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (2-42)$$

Donde:

d_0 : Deflexión en el centro del plato de carga, a una temperatura de 68°F, in

p : Presion sobre el plato de carga, psi

Con el valor de modulo efectivo de la estructura (E_p) obtenido de la ecuación(2-42), es posible calcular el valor de número estructural efectivo (SN_{eff}) empleando la siguiente expresión:

$$SN_{eff} = 0.0045 D^3 \sqrt[3]{E_p} \quad (2-43)$$

2.3.4.2 Metodología de retrocálculo YONAPAVE

Un método simplificado para el cálculo del módulo elástico de subrasante, que para efectos prácticos en esta investigación es denominado módulo resiliente de la subrasante por su similitud en sus fundamentos teóricos, fue propuesto por (Hoffman, 2003). Esta metodología se fundamenta en los parámetros y definición de modelo de Hogg compuesto por una losa delgada sobre una subrasante que cumple la teoría de elasticidad como se muestra en la Figura 2-17.

Fueron modelados varios cuencos de deflexión mediante el modelo de Hogg con un radio de plato de carga circular de 6 pulgadas de diámetro teniendo en cuenta la geometría del FWD. En la Figura 2-18 se muestra la variación de la deflexión normalizada D_r/D_0 con la longitud característica l_0 , asumiendo una capa de roca muy profunda. Se realizó una comparación de los cuencos de deflexión del modelo de Hogg junto con mediciones in situ y modelaciones empleando el software MODULUS, obteniendo de esta manera ecuaciones de ajuste para el cálculo del módulo, que depende de propiedades geométricas del cuenco como el área y la deflexión máxima. De esta manera la metodología se puede expresar mediante dos ecuaciones que son dependientes de unos parámetros de ajuste y características del cuenco de deflexión.

$$l_0 = A * e^{B*Area} \quad (2-44)$$

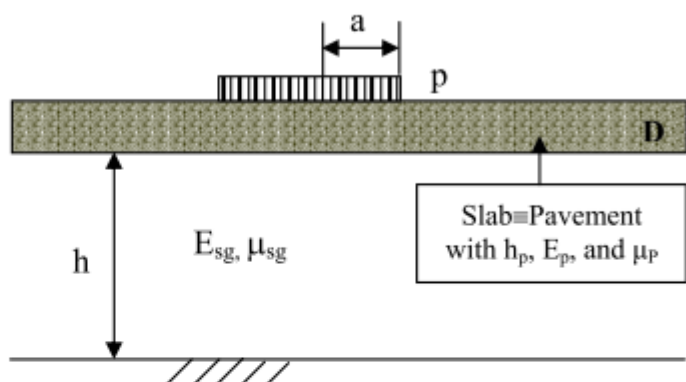
Donde:

l_0 : Longitud característica, cm

Area: Área de cuenco de deflexión, in

A y B: Coeficientes de ajuste, descritos en la Tabla 2-11

Figura 2-17: Modelo de Hogg parámetros y definiciones. (Hoffman, 2003).

<p>Model Geometry</p>	
<p>Basic Model Parameters</p>	<p>Slab (pavement) Rigidity, $D = \frac{E_p h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)}$...[2]</p> <p>Characteristic Length, $l_0 = \sqrt[3]{\frac{D}{E_{sg}} * \frac{(1 + \mu_{sg})(3 - 4\mu_{sg})}{2(1 - \mu_{sg})}}$...[3]</p> <p>Subgrade Modulus and Poisson's Ratio, E_{sg}, μ_{sg}</p>

De manera similar es posible fijar la curva exponencial para la determinación de E_{sg} también denominado M_R en esta investigación, usando la siguiente expresión:

$$E_{sg} \text{ ó } (M_R) = m * \frac{p}{D_0} * l_0^n \tag{2-45}$$

E_{sg} ó (M_R) : Modulo de elasticidad resiliente de subrasante, MPa

p : Presion sobre el plato de carga del FWD, kPa

D_0 : Deflexion maxima, μm

m, n : Coeficientes de ajuste mostrados en la Tabla 2-12

Figura 2-18: Variación de D_r/D_0 vs l_0 en el modelo Hogg para $h/l_0=20$. (Hoffman, 2003).

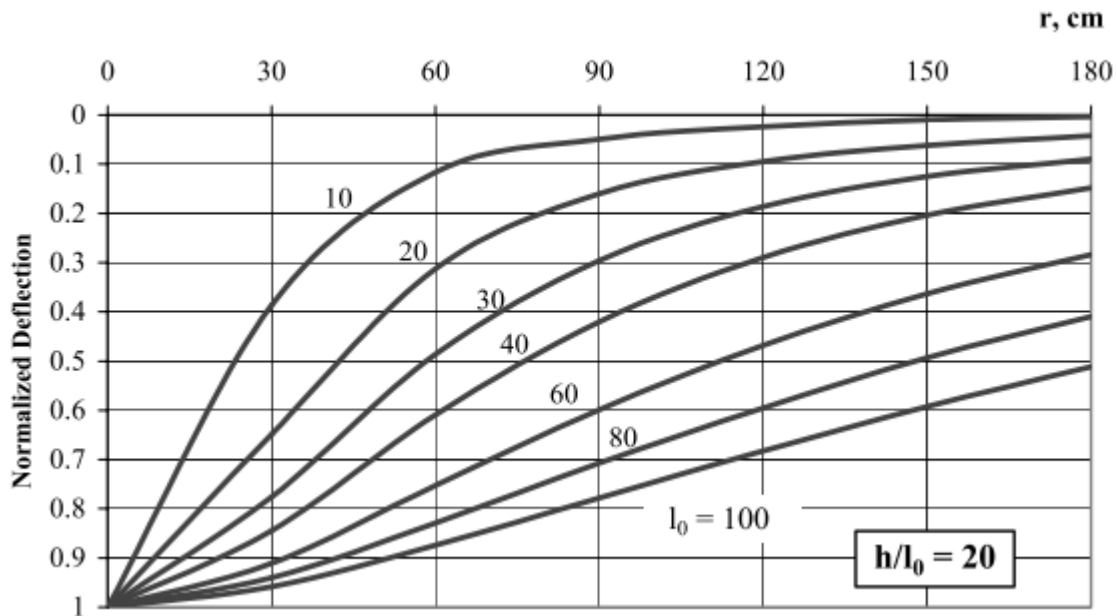


Tabla 2-11: Curva de coeficientes de ajuste para el cálculo de l_0 . (Hoffman, 2003).

Range of Area Values, inch	h/l_0	A	B
Área ≥ 23.0	5	3.275	0.1039
$21.0 \leq \text{Área} < 23.0$	10	3.691	0.0948
$19.0 \leq \text{Área} < 21.0$	20	2.800	0.1044
Área < 19.0	40	2.371	0.1096

Tabla 2-12: Curva de coeficientes de ajuste para el cálculo de E_{sg} ó (M_R). (Hoffman, 2003).

h/l_0	m	N
5	926.9	-0.8595
10	1152.1	-0.8782
20	1277.6	-0.8867
40	1344.2	-0.8945

Con los valores de la longitud característica l_0 y módulo de subrasante E_{sg} ó (M_R). Es posible calcular el número estructural del pavimento, mediante la siguiente expresión matemática:

$$SN_{eff} = 0.01821l_0 \sqrt[3]{E_{sg}} \quad (2-46)$$

2.3.5 Prospección geofísica mediante Georradar GPR

El radar de subsuelo o georradar GPR es un equipo no destructivo, basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio continuo, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. Las mediciones con el GPR se basan en la evaluación de parámetros electromagnéticos, que indirectamente permiten conocer información importante sobre la condición de las estructuras de pavimento (Benedetto & Tosti, 2013).

El georradar, envía un pulso de onda electromagnética a través de una antena hacia la superficie del pavimento, de forma posterior registra los pulsos reflejados desde las interfaces internas, donde hay un contraste entre las propiedades dieléctricas, como se presenta en la Figura 2-19. La amplitud de la señal recibida depende de las características electromagnéticas de los materiales en el medio de estudio (Benedetto, Tosti, Schettini, & Twizere, 2011). La diferencia de tiempo medido entre los pulsos reflejados (por ejemplo, t_1 y t_2) pueden utilizarse en conjunción con las propiedades dieléctricas de la capa analizada para determinar su espesor. El espesor de la i -ésima capa se calcula de acuerdo con la ecuación (2-47).

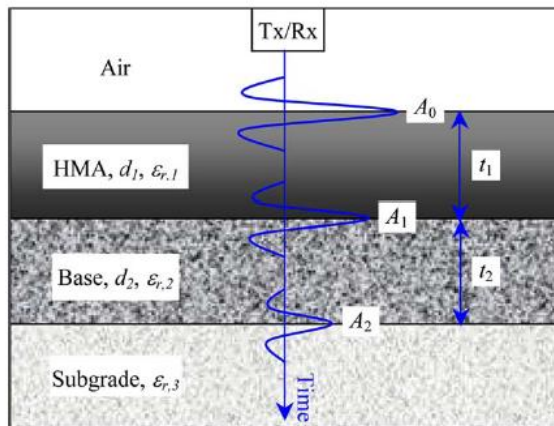
$$d_i = \frac{ct_i}{2\sqrt{\epsilon_{ri}}} \tag{ 2-47}$$

Donde; d_i : es el espesor de la i -ésima capa,

t_i : el tiempo de viaje de la onda electromagnética bidireccional en cada capa,

c : es la velocidad de la luz en el vacío ($c \approx 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$) y ϵ_{ri} es la constante dieléctrica.

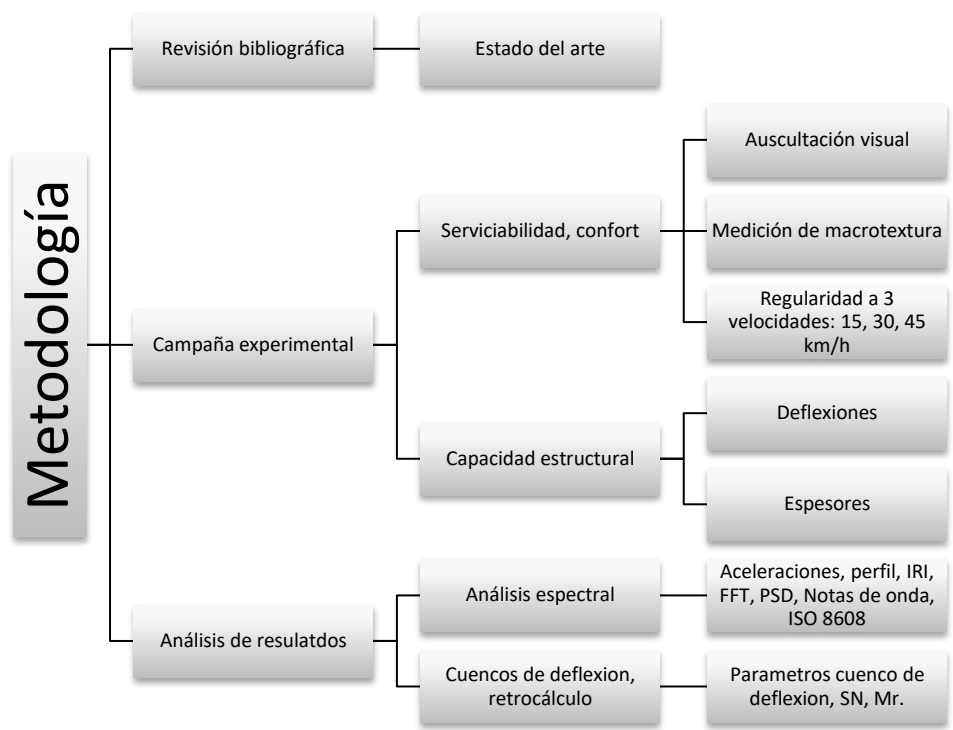
Figura 2-19: Típico sistema de reflexiones de una estructura de pavimento medido con un georradar. (Lahouar & Al-qadi, 2007).



3. Capítulo III: Metodología

Se llevó a cabo un proceso metodológico mostrado en la Figura 3-1, que consistió en tres etapas.

Figura 3-1: Desarrollo metodológico de la investigación



3.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica

La primera etapa estuvo enfocada en una revisión bibliográfica sobre los conceptos y aspectos teóricos presentes en la evaluación superficial y estructural de los pavimentos. Se identificaron las variables más significativas que deben ser contempladas en un análisis de estructuras de pavimentos, siendo el estado de daños superficiales, la regularidad, y la respuesta mecánica tres variables de gran importancia. La información necesaria para un

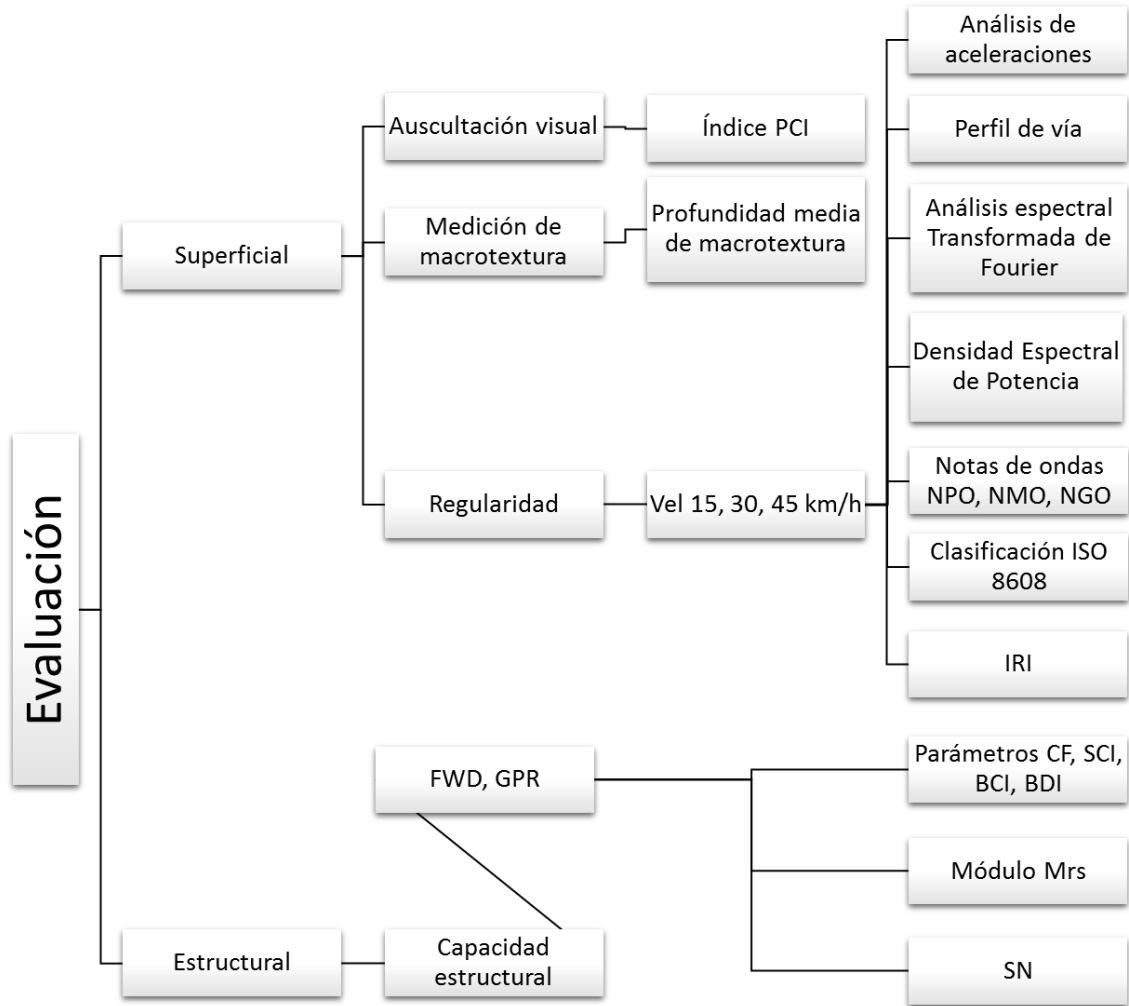
análisis de estas variables, que ya fueron descritas en el marco teórico, requiere de una campaña experimental con la toma de datos en campo, esta actividad fue contemplada en la segunda etapa de esta investigación.

3.2 Etapa 2: Campaña experimental

En la segunda etapa se llevó a cabo la campaña experimental, que consistió en la realización de los ensayos dirigidos en la evaluación superficial y estructural, permitiendo alcanzar los objetivos propuestos. Como actividades realizadas para la evaluación superficial se llevó a cabo una inspección visual, medición de macrotextura con el círculo de arena y mediciones con el perfilómetro laser PL. La evaluación estructural consistió en ensayos de deflectometría de impacto con el FWD junto con el análisis de espesores de las capas de la estructura mediante prospección geofísica con el uso del georradar GPR.

En la siguiente figura se explica de manera esquemática la campaña experimental, junto con los análisis esperados, llevada a cabo en esta investigación.

Figura 3-2: Campaña experimental.



Para esta investigación fueron seleccionados tres (3) tramos viales dentro del campus de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, con un nivel de deterioro alto TRA, un nivel de deterioro regular TRM y un nivel de deterioro bajo TRB, teniendo en cuenta el porcentaje de daños que presentaba cada uno. La longitud de estos segmentos es de 140, 245 y 240 metros respectivamente tal como se muestra en la Figura 3-3.

Es importante mencionar que la longitud de estos tramos es corta para el tipo de estudio que se pretende adelantar en esta investigación, teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por investigadores que han realizado sus trabajos relacionados con la evaluación

de estructuras de pavimentos como lo muestra (Lushnikov & Lushnikov, 2017). Sin embargo, haciendo un análisis de las longitudes de la mayoría de las vías en la ciudad de Bogotá como principal sitio objetivo de esta investigación, se encuentra que estas tienen longitudes cortas en promedio de 100 metros y menos. Lo cual hace de este trabajo fundamental para el entendimiento claro sobre este tipo de estructuras de pavimentos, optimizando las diferentes metodologías existentes para su evaluación.

Figura 3-3: Ubicación de los tramos de estudio seleccionados. Modificado de: <http://idu.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html>



En la Tabla 3-1 se muestra las características de cada uno de los tramos.

Tabla 3-1: Características de los tramos evaluados

Tramo	Ubicación	Nivel de deterioro	Id.	Longitud (m)
1	Zona la Capilla-Costado Sur UN	Alto	TRA	240
2	Canchas-Costado norte UN	Regular	TRM	245
3	Acceso parqueadero ed. Enfermería-Costado Oriental UN	bajo	TRB	140

La campaña experimental para cada uno de los segmentos seleccionados se describe a continuación.

3.2.1 Auscultación visual

Se realizó el levantamiento de los daños presentes en cada segmento, estableciendo de esta manera el porcentaje de afectación y el índice de condición del pavimento PCI mediante las metodologías de PCI con base en la normativa ASTM D 6433. En cada segmento de vía se realizó una división de secciones y unidades de muestreo como lo indica la norma, se hizo el levantamiento para cada tipo de daño empleando un instrumento de medida de longitud y un registro fotográfico complementario.

3.2.2 Macrotextura superficial

La medición de macrotextura superficial se llevó a cabo en cada uno de los segmentos de vía de estudio, siguiendo la metodología de ensayo mostrada en la norma INV E 791. Se empleó como material granular una arena fina lavada y secada al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, cumpliendo con las granulometrías expuestas en la norma. Además, se utilizó un dispositivo circular con las dimensiones adecuadas para la actividad de enrasado sobre la superficie del pavimento, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3-4: Medición de macrotextura superficial.



El número de mediciones se hizo cumpliendo con los requerimientos exigidos por la normativa de ensayo, de esta manera se llevaron a cabo ensayos en dos (2) sectores de cada uno de los tramos de estudio, y para cada sector se realizaron cuatro (4) ensayos buscando una representatividad alta entre estos. En la siguiente tabla se indica el número de ensayos de macrotextura superficial realizados y su ubicación en cada tramo.

Tabla 3-2: Ensayos de macrotextura superficial.

Tramo	Sector	Abscisa (m)
TRA	1	79, 80, 81, 82
	2	158, 159, 160, 161
TRM	1	80, 81, 82, 83
	2	160, 161, 162, 163
TRB	1	45, 46, 47, 48
	2	95, 96, 97, 98

3.2.3 Regularidad

Para la evaluación de regularidad superficial de las estructuras de pavimento se empleó el perfilómetro laser PL a tres velocidades diferentes de 15, 30 y 45 km/h, en cada uno de los tramos de estudio. A continuación, se explica de manera detallada el equipo utilizado y las actividades de medición en campo.

3.2.2.1 Perfilómetro laser PL

El perfilómetro laser PL es un equipo construido para efectuar pruebas no destructivas ni invasivas en el pavimento, hace parte de los equipos técnicamente más avanzados y mejor desempeño que existen para medir la regularidad de una estructura de pavimento simulando las aceleraciones que experimenta un usuario en un vehículo a una velocidad de 80km/h.

Para el presente estudio se usó un perfilómetro laser L2R IRI, marca Unibox-Logiroad con un intervalo de medida menor a cincuenta (50) milímetros y una resolución vertical menor a una décima (0.1) de milímetro dentro de las clases 1 y 2 requeridas para la medición de regularidad superficial (Hu, 2006), según los requerimientos de la normativa ASTM E 950 mostrados en la Tabla 3-3. Este equipo fue diseñado y construido por la firma francesa para la toma de información a una velocidad superior a 30 km/h, dando como resultado un buen desempeño y calidad en los datos.

Tabla 3-3: Clasificación 1, 2 y 3 de equipos de medida de perfil longitudinal, según el intervalo longitudinal y resolución vertical. (American Society for Testing and Materials ASTM D950, 2004).

Precisión	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Intervalo longitudinal	≤ 25 mm	> 25 mm hasta 150 mm	> 150 mm hasta 300 mm
Resolución vertical	≤ 0.1 mm	> 0.1 mm hasta 0.2 mm	> 0.2 mm hasta 0.5 mm

Este perfilómetro láser mostrado en la Figura 3-5, está constituido por un sistema laser, acelerómetro que pueden ser acoplados a cualquier vehículo por medio de un sistema de ventosa de manera fácil. Un computador o laptop junto al dispositivo de adquisición de datos, además cuenta con un sistema de georreferenciación GPS marca Navilock 61840 con precisión de 2.5 metros y una cámara de video Logitech.

Figura 3-5: Perfilómetro láser. A) Sistema de ventosa. B) Laptop. C) Adquisición de datos. D) laser y acelerómetro. E) GPS. F) Cámara de video.



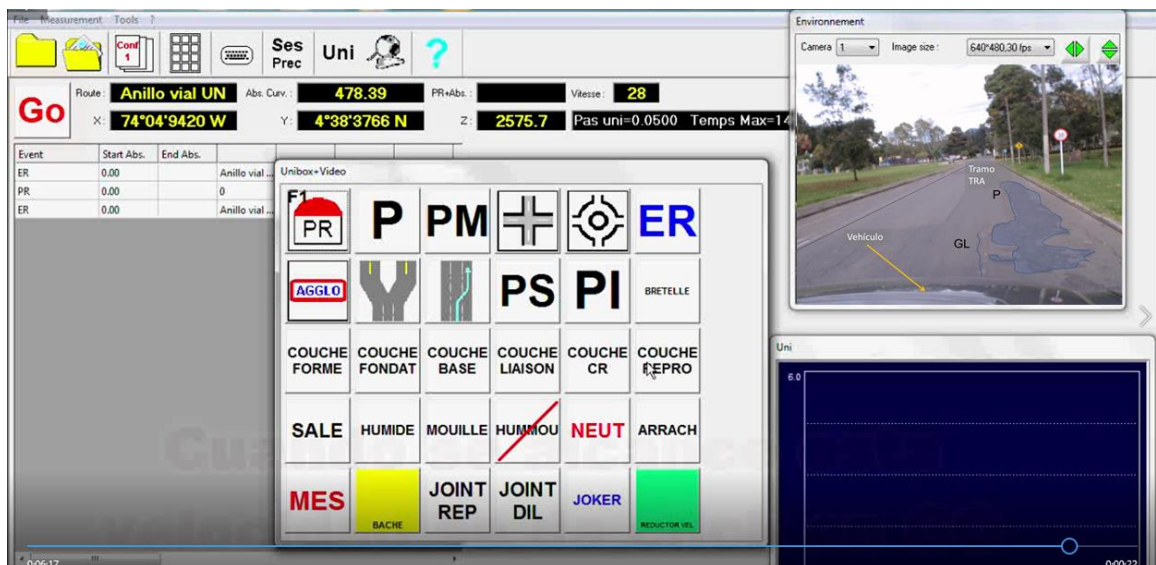
En la figura siguiente se presenta el montaje del equipo PL sobre un vehículo, empleado en la ejecución del ensayo en el tramo TRA destacando sus principales componentes.

Figura 3-6: Perfilómetro laser PL Unibox - Logiroad IRI, Universidad Nacional de Colombia.



Del equipo PL con el que cuenta la Universidad Nacional de Colombia, se destaca la facilidad de identificar las irregularidades y daños presentes en los tramos de estudio. Como se muestra en la Figura 3-7, en tiempo real es capturada la imagen correspondiente al recorrido realizado por medio de la cámara de video, incorporada en la parte posterior del vehículo. En estas imágenes y mediante el programa para la toma de datos del equipo se referencian los tipos de daños existentes sobre la superficie de la vía, tenidos en cuenta en el post proceso y cálculo de los datos obtenidos.

Figura 3-7: Identificación en tiempo de real de irregularidades sobre la superficie.



3.2.2.2 Mediciones en campo con PL

El trabajo de campo desarrollado durante las pruebas con el PL, de acuerdo con la normativa ASTM E 950 y ASTM E 1926 del año 2004 y 2015 respectivamente, considero la verificación del correcto funcionamiento del equipo antes de realizar la toma de datos. Se realizó la medición ubicando el dispositivo laser y acelerómetro a una altura de (35) centímetros de la superficie del pavimento, en la huella derecha de cada tramo, efectuando diez (10) recorridos a tres (3) velocidades diferentes 15, 30 y 45 km/h para un total de noventa (90) recorridos como se muestra en la Tabla 3-2, buscando obtener una alta representatividad de las mediciones. La toma de información se realizó en un día despejado sin lluvia.

Tabla 3-4: Numero de ensayos realizados en cada tramo con el PL.

Tramo	Numero de ensayos			
	15 km/h	30 km/h	45 km/h	Total
TRA	10	10	10	30
TRM	10	10	10	30
TRB	10	10	10	30
			Total	90

3.2.4 Identificación de espesores

Para la verificación de los espesores de las capas de cada estructura de pavimento, se utilizó el equipo georradar GPR con variación en la frecuencia de muestreo, permitiendo una mayor precisión en la identificación de las capas.

3.2.3.1 Georradar GPR

La evaluación se realizó utilizando el equipo georradar (sistema GPR) marca GSSI (EE.UU.), con un sistema de inspección y análisis tipo UtilityScan con antenas de 400 MHz y 1.5 GHz y un sistema de doble canal de adquisición de datos (SIR 20), mostrado en la Figura 3-8. Las antenas cuentan con una profundidad de análisis de 2.50 m y 0.70 m respectivamente, adecuadas para el nivel de detalle requerido para este caso.

Figura 3-8: Equipo Georradar (sistema GPR) marca GSSI (E.E.U.U.) y sus partes.



3.2.3.2 Mediciones en campo con GPR

El cálculo de espesores de la estructura se llevó a cabo teniendo en cuenta el método de prospección geofísica con el equipo georradar GPR siguiendo la normativa ASTM D 4748.

Se realizó un recorrido con cada antena totalmente acopladas a la superficie del pavimento a una velocidad promedio de cinco (5) km/h a lo largo de la huella derecha de cada tramo. Para la calibración del equipo, en el momento de realizar los ensayos se verificó los espesores de las capas de la estructura de pavimento utilizando lugares específicos de cada estructura como cajas de inspección, cambios de nivel, capas de materiales descubiertas, junto con valores reportados en los diseños de pavimento realizados para los tramos recién intervenidos por la Universidad que permitieron la comparación de los espesores registrados por el GPR y su correcta interpretación. Los ensayos fueron realizados en un día soleado sin presencia de lluvia.

Las distancias recorridas fueron medidas por medio del odómetro o medidor de distancia con el que cuenta el equipo y además fueron medidas con un odómetro manual, con el fin de verificar la longitud real de cada tramo.

3.2.5 Deflectometría de impacto

La evaluación estructural de cada uno de los tramos de estudio se realizó mediante la deflectometría de impacto con el equipo Falling Weight Deflectometer FWD. Previo a las mediciones en campo, se determinó el espaciamiento adecuado entre los puntos de deflectometría buscando un análisis detallado y representativo de todo el segmento. A

continuación, se describe el equipo utilizado y las actividades de medición de deflexiones en las estructuras de pavimento seleccionadas.

3.2.2.1 Falling Weight Deflectometer FWD

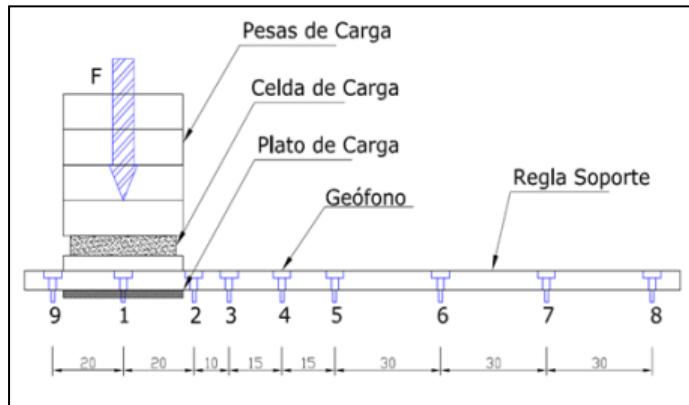
La medición de deflexiones se realizó mediante ensayos no destructivos empleando el equipo Falling Weight Deflectometer FWD, el cual impone una carga dinámica transitoria sobre la superficie del pavimento, para el este estudio se utilizó el equipo FWD marca Jils de la Universidad Nacional de Colombia mostrado en la Figura 3-6 el cual cuenta con nueve (9) sensores (geófonos) espaciados como se muestra en la Figura 3-10 y un sistema de aplicación de carga en un rango de 6000 hasta 30000 lb de fuerza, para este estudio se utilizó una carga de 9000 lb de fuerza.

Figura 3-9: Deflectometria con equipo FWD marca Jils, tramo TRM.



El FWD consta de un sistema (motor de combustión a gasolina) capaz de generar una potencia de (18 HP), además, sensores de carga y de velocidad en campo, un sistema de medición de temperatura ambiente y de la capa de rodadura de la estructura de pavimento junto con un sistema de control computacional. El equipo además cuenta con los certificados de calibración exigidos por las entidades reglamentarias establecidos en las normativas ASTM D 4694 e INV 798-13.

Figura 3-10: Configuración esquemática de la aplicación de carga y ubicación de los geófonos⁸.



3.2.4.2 Mediciones en campo con FWD

La toma de información se realizó en toda la longitud de cada uno de los segmentos de vía seleccionados, teniendo en cuenta lo estipulado en la normativa ASTM D 4694 y INV 798-13, haciendo una medición de puntos de deflectometría en zigzag espaciados cada cinco (5) metros para un total de 128 puntos en todos los segmentos evaluados, como se muestra en la Tabla 3-5. La carga aplicada fue de 9000 libras con una repetición de tres (3) caídas por punto obteniendo una serie de datos suficientes para el análisis de la estructura, además fueron tomados datos de temperatura en la mitad de la capa superficial asfáltica de forma manual mediante un termómetro láser y un termómetro de contacto. La deflectometría se llevó a cabo en un día despejado sin presencia de lluvia.

Tabla 3-5: Deflectometría mediante FWD.

Tramo	Carga (lb)	Longitud (m)	Nº Puntos
TRA	9000	240	49
TRM		245	50
TRB		140	29
Total		625	128

⁸ Guía para el procesamiento de los datos obtenidos con el deflectómetro de impacto – FWD (Falling Weight Deflectometer), Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá, 2015.

4. Capítulo IV: Resultados

4.1.1 Daños superficiales

En la Tabla 4-1 se muestran los segmentos de vía de estudio, su longitud, los tipos de daños encontrados en cada una de las unidades de muestreo y el valor de PCI calculado. El cálculo de los valores de PCI fueron realizados mediante el uso del software Unal-PCIA desarrollado por el ingeniero Luis Ricardo Vásquez de la Universidad del Cauca. Los cálculos y análisis completos se muestran en el ANEXO A.

Tabla 4-1: Valor de PCI de los segmentos evaluados.

Tramo	Id	Longitud (m)	Unidad de muestreo	PCI Unidad de muestreo	Tipos de daños ⁹	PCI	Clasificación
Zona la Capilla	TRA	240	1	25	3, 10	24.7	Muy mala
			2	39	3		
			3	17	1, 13		
			4	33	11		
			5	19	11		
			6	29	4		
			7	17	3,11		
			8	21	13		
			9	22	3, 10		
Canchas	TRM	245	1	42	10	43.5	Mala
			2	41	10		
			3	36	13		
			4	58	3		
			5	58	3		
			6	26	11, 13		
Parqueadero - Enfermería	TRB	140	1	100	-	100	Buena
			2	100	-		
			3	100	-		
			4	100	-		

⁹ Tipos de daños mostrados en la Tabla 2-2 en el capítulo 2.1.2.

Como resumen general los daños encontrados en los tres tramos son: Grietas Transversales GT, Grietas Longitudinales GL, Fallas en Bloque FB, Baches B, Parches P, Abultamiento y Hundimiento AH y Piel de Cocodrilo PL.

4.1.1.1 El tramo TRA, presenta daños de tipo falla en bloque con un porcentaje de 57%, parcheo con un porcentaje de 22%, grietas transversales con un 16%, baches con un 2%, abultamiento y hundimiento con un 2% y daños de tipo piel de cocodrilo con un 1% de afectación. El registro fotográfico de este tramo se muestra en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Registro fotográfico tramo TRA.



4.1.1.2 El tramo TRM, presenta fallas en bloque en un porcentaje de 34%, seguido de grietas transversales con un 23%, grietas longitudinales con un 22% y finalmente parcheo y baches con un porcentaje de 16% y 4% respectivamente. El registro fotográfico de este tramo se muestra en la Figura 4-2.

Figura 4-2: Registro fotográfico tramo TRM.



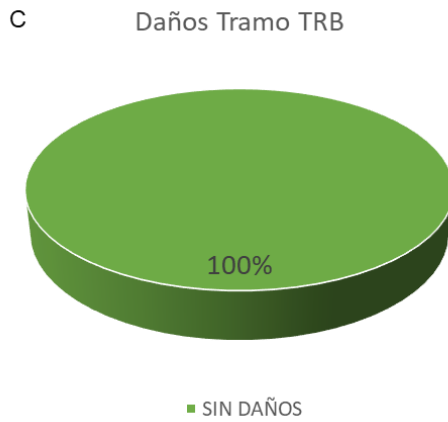
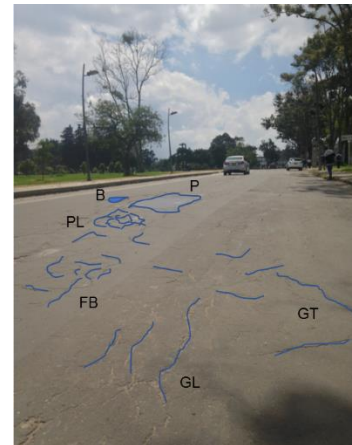
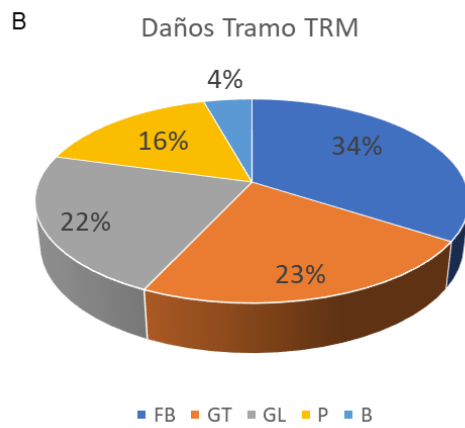
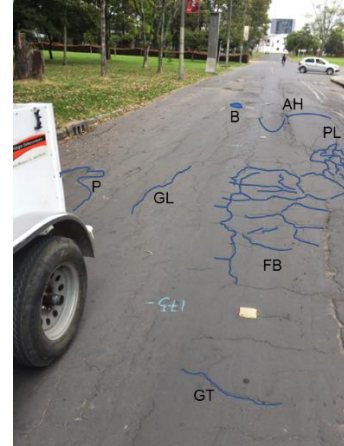
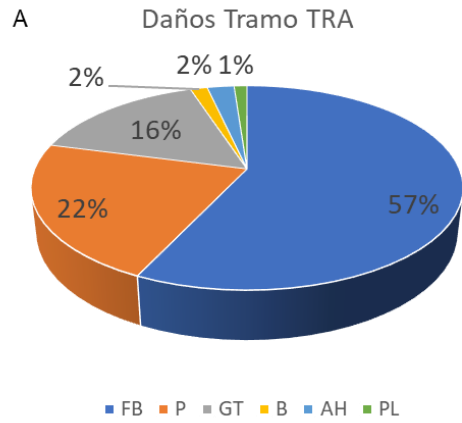
4.1.1.3 El tramo TRB, que corresponde al segmento de vía de estudio con un nivel de deterioro bajo no presenta daños superficiales perceptibles a simple vista. El registro fotográfico de este tramo se muestra en la Figura 5-9.

Figura 4-3: Registro fotográfico tramo TRB.



En la figura siguiente se muestra el porcentaje de daños encontrados en cada uno de los tramos de estudio.

Figura 4-4: Porcentaje de daños A) TRA, B) TRM y C) TRB.



De la inspección visual es posible caracterizar cada segmento de vía de estudio, en la figura anterior se muestra el porcentaje de daños encontrados siendo la falla en bloque el tipo de daño con mayor porcentaje en los segmentos TRA y TRM, seguido por las grietas longitudinales, transversales junto con los parcheos presentes en el tramo TRA con mayor proporción y por último las fallas de tipo bacheo y piel de cocodrilo con menor porcentaje. Para el tramo con alto nivel de deterioro TRA se encontró un daño de tipo abultamiento y hundimiento con un dos 2% por ciento de afectación un valor bajo debido a una corta longitud ubicado al final del segmento pero que es notable en la vía. Se aprecia que en los tramos TRA y TRM existe un alto deterioro por fallas en bloque con un carácter muy similar a la falla de tipo piel de cocodrilo pero que únicamente existe en el tramo TRA con un porcentaje de 1%.

4.1.2 Macrotextura superficial

Luego de realizar los ensayos de macrotextura superficial en cada uno de los dos sectores escogidos para cada tramo de estudio, se obtuvo los valores de diámetro del círculo de arena conformado sobre la superficie de la estructura de pavimento. Para todos los ensayos se utilizó una arena con gradación 50-100 y un volumen de 1000 mm³ según la norma INV E 791. Seguido de esto se calculó la profundidad media de macrotextura (**H**) para cada sector, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-2: Resultados de profundidad media de macrotextura.

Tramo	Abscisa (m)	Diámetro (mm)				Profundidad (mm)				Profundidad Media (H) (mm)	Profundidad Media (H) del sector (mm)	Macro textura ¹⁰
		1	2	3	4	1	2	3	4			
TRA	79	171	175	179	180	0.435	0.416	0.397	0.393	0.41	0.460	Media o Fina
	80	152	154	155	161	0.551	0.537	0.530	0.491	0.53		
	81	160	159	158	159	0.497	0.504	0.510	0.504	0.50		
	82	180	179	178	178	0.393	0.397	0.402	0.402	0.40		

¹⁰ Escala de medición subjetiva, tomada de: Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos, Ingeniero Fabricio Leiva, investigación LANAMME LM-PI-PV-IN-27B-05, julio 2005.

Tramo	Abscisa (m)	Diámetro (mm)				Profundidad (mm)				Profundidad Media (H) (mm)	Profundidad Media (H) del sector (mm)	Macro textura ¹⁰
		1	2	3	4	1	2	3	4			
	158	153	155	158	153	0.544	0.530	0.510	0.544	0.53	0.553	Media o Fina
	159	156	155	158	160	0.523	0.530	0.510	0.497	0.52		
	160	149	148	153	145	0.574	0.581	0.544	0.606	0.58		
	161	149	145	146	148	0.574	0.606	0.597	0.581	0.59		
TRM	80	180	180	179	181	0.393	0.393	0.397	0.389	0.39	0.395	Lisa o Fina
	81	181	179	178	170	0.389	0.397	0.402	0.441	0.41		
	82	181	182	181	179	0.389	0.384	0.389	0.397	0.39		
	83	180	181	182	180	0.393	0.389	0.384	0.393	0.39		
	160	159	155	159	158	0.504	0.530	0.504	0.510	0.51	0.499	Media o Fina
	161	161	158	159	165	0.491	0.510	0.504	0.468	0.49		
	162	165	164	165	166	0.468	0.473	0.468	0.462	0.47		
	163	160	151	155	159	0.497	0.558	0.530	0.504	0.52		
TRB	45	135	136	139	140	0.699	0.688	0.659	0.650	0.67	0.649	Media o Fina
	46	136	137	138	139	0.688	0.678	0.669	0.659	0.67		
	47	145	146	143	148	0.606	0.597	0.623	0.581	0.60		
	48	139	141	142	140	0.659	0.640	0.631	0.650	0.65		
	95	143	145	147	145	0.623	0.606	0.589	0.606	0.61	0.598	Media o Fina
	96	146	145	144	147	0.597	0.606	0.614	0.589	0.60		
	97	149	145	148	147	0.574	0.606	0.581	0.589	0.59		
	98	148	145	146	145	0.581	0.606	0.597	0.606	0.60		

De los resultados de macrotextura mostrados en la tabla anterior se puede observar que el tramo con mayor profundidad media de macrotextura es el tramo con menor nivel de deterioro TRB seguido por el tramo TRA y por último con menor profundidad media de macrotextura el tramo TRM. Este resultado se asocia con el tiempo en servicio de cada una de estas estructuras de pavimento en donde el tramo TRB fue construido recientemente y el desgaste de los granos que conforman el concreto asfáltico de la capa de rodadura ha sido menor respecto a los demás tramos de estudio. Con este resultado, además, se puede estimar que las solicitaciones de tránsito del tramo TRM ha sido mayor que el tramo TRA teniendo en cuenta que la profundidad media de macrotextura superficial del tramo TRM es menor mostrando un mayor desgaste y abrasión por parte de los vehículos que transitan sobre esta estructura de pavimento.

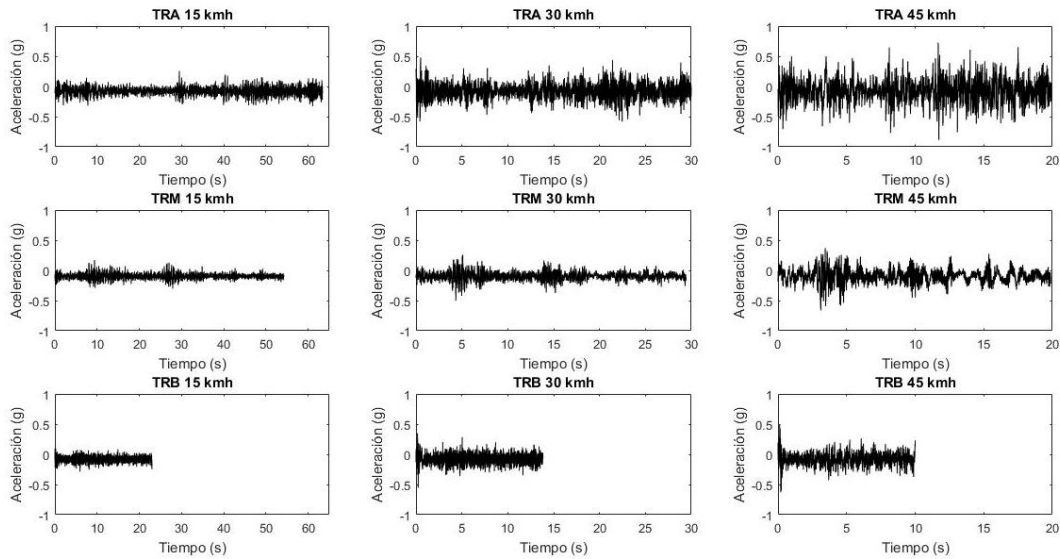
4.1.3 Regularidad

Luego de la toma de información con el equipo PL y de manera previa a obtener el resultado de los datos, se realiza un correspondiente procesamiento de la información, verificando todas las características de cada tramo como anomalías presentes que influyen en los resultados. Del ensayo con el PL, se obtuvo información referente a los valores de aceleración vertical que es generada por las distorsiones presentes en la superficie del pavimento y contribuye en gran medida al nivel de confort inducido a los ocupantes del vehículo. La aceleración vertical es medida por medio de un transductor de aceleración (acelerómetro) como parte del PL. También son registrados los valores de distancia vertical correspondiente a la distancia desde el dispositivo laser del equipo PL con el cual es medida esta distancia hasta la superficie del pavimento. Se presentan los perfiles de la superficie de cada tramo evaluado, que son obtenidos con la información de aceleración y distancia vertical ya mencionada. Finalmente, se muestran los valores de IRI para cada segmento de vía estudiado, que son comparados según la escala de medida explicada en la Figura 2-5. El resumen de todos los datos obtenidos se muestra en el ANEXO B.

4.1.2.1 Curvas de Aceleración vertical

En la Figura 4-5 se muestra el cálculo de las curvas de aceleración promedio de los diez (10) ensayos realizados, en cada uno de los tramos de estudio a tres velocidades diferentes.

Figura 4-5: Curvas de aceleración promedio a tres velocidades diferentes, A) TRA, B) TRM y C) TRB.

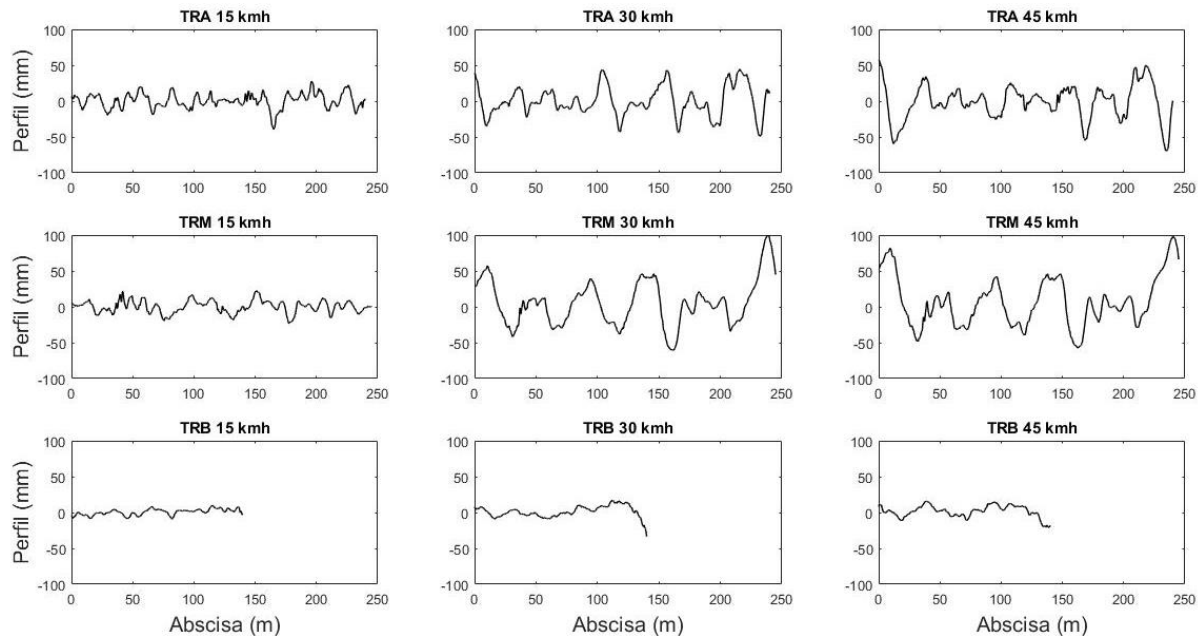


Se observa que existen valores de aceleración pico más altos en el tramo con mayor nivel de deterioro TRA respecto a los demás tramos, estos valores pico se presentan en general a lo largo de todo el tramo, pero para el tramo con nivel de deterioro medio TRM estos picos se presentan concentrados en algunos sectores del tramo. No obstante, la distribución de estos valores pico permiten la identificación de los sitios con mayor concentración de daños o deterioro dentro de la señal de aceleración obtenida, tema que será tratado más adelante con mejores resultados en el análisis de las señales mediante transformada de ventanas o Wavelet. Además, se observa que las amplitudes con valores más altas se obtienen en las curvas con mayor velocidad, en este caso a 45 km/h, lo cual puede indicar mayores concentraciones en las vibraciones del vehículo a altas velocidades, lo que facilita la identificación de las irregularidades presentes en el tramo de estudio.

4.1.2.2 Curvas de perfiles de vía

Los perfiles promedio de vía de cada uno de los tramos de estudio se presentan en la Figura 4-6. Cada uno indica la elevación promedio en milímetros, obtenida teniendo en cuenta la información de aceleración y distancia vertical ya mencionados.

Figura 4-6: Curvas de perfil promedio a tres velocidades diferentes, A) TRA, B) TRM y C) TRB.



De la figura anterior se puede observar la incidencia de la velocidad en los perfiles obtenidos, en donde existen mayores elevaciones a una velocidad de 45 km/h, con similitud en la velocidad de 30 km/h, pero que es claramente diferenciado para cada uno de los niveles de deterioro estudiados, lo cual indica que el equipo PL representa de manera adecuada el estado real de los tramos. Este es un resultado similar al análisis realizado con las curvas de aceleración mostradas en el apartado anterior. De esta manera, a velocidades inferiores a 30 km/h el equipo PL no registra de manera adecuada los datos tanto del sensor de distancia vertical (laser), como del sensor de aceleración vertical (acelerómetro).

4.1.2.3 Curvas de índice IRI

En la Tabla 4-3 se muestra los resultados de IRI obtenidos en cada tramo evaluado, se calculó el valor promedio de IRI de los diez (10) recorridos hechos en cada segmento para las velocidades de estudio de 15, 30 y 45 km/h.

Tabla 4-3: Valores de IRI promedio en los tres segmentos evaluados.

Tramo	TRA			TRM			TRB		
Vel km/h	15	30	45	15	30	45	15	30	45
Ensayo	IRI promedio (mm/m)								
1	11.3	9.8	9.8	8.7	9.2	9.1	3.9	3.9	3.9
2	10.1	9.9	9.7	8.4	8.9	8.8	3.9	3.6	3.9
3	10.4	10.5	9.7	8.9	9.0	8.9	4.1	3.9	4.2
4	10.1	10.5	9.7	8.9	8.8	8.9	4.2	4.0	4.3
5	10.6	10.2	9.9	8.6	8.8	9.1	4.5	4.0	4.9
6	10.0	10.4	9.8	9.3	9.1	9.2	4.3	4.9	5.4
7	10.6	10.3	9.6	9.1	9.1	8.7	4.4	3.7	3.9
8	10.3	10.6	9.4	9.5	9.4	8.9	3.9	4.2	3.9
9	10.1	10.1	9.6	9.2	8.6	8.7	4.2	4.4	3.5
10	10.4	10.5	9.6	9.3	8.8	9.0	3.8	4.4	3.9
Valor promedio (10 ensayos)	10.4	10.3	9.7	9.0	9.0	8.9	4.1	4.1	4.2
Desviación σ	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6
Coef. Var. C.V.	3.8	2.5	1.6	3.8	2.4	2.0	5.7	9.4	13.1

Para un análisis más completo de los valores de IRI mostrados en la tabla anterior de los diez (10) ensayos realizados en cada tramo, se muestra la variabilidad de los datos expresado mediante el coeficiente de variación C.V. siendo este una medida estadística que muestra la dispersión relativa de un conjunto de datos. Su cálculo se obtiene al dividir la desviación típica entre el valor absoluto de la media del conjunto y es expresado en porcentaje. Existe una alta variabilidad de los datos analizados, cuando el C.V. presenta un valor superior a veinticinco por ciento (25%). De esta manera se observa que todos los resultados presentan una baja variabilidad con valores de C.V. inferiores al 15 %. Por otra parte, los valores con mayor variabilidad se presentan en los ensayos realizados en el tramo TRB respecto a los demás tramos y a diferencia de este, los tramos TRA y TRM presentan valores de C.V. más altos a velocidades de 15 km/h. Con el fin de analizar la variabilidad de los datos de IRI promedio de los diez (10) ensayos respecto a cada velocidad, en la Tabla 4-4 se muestra el C.V. para cada tramo.

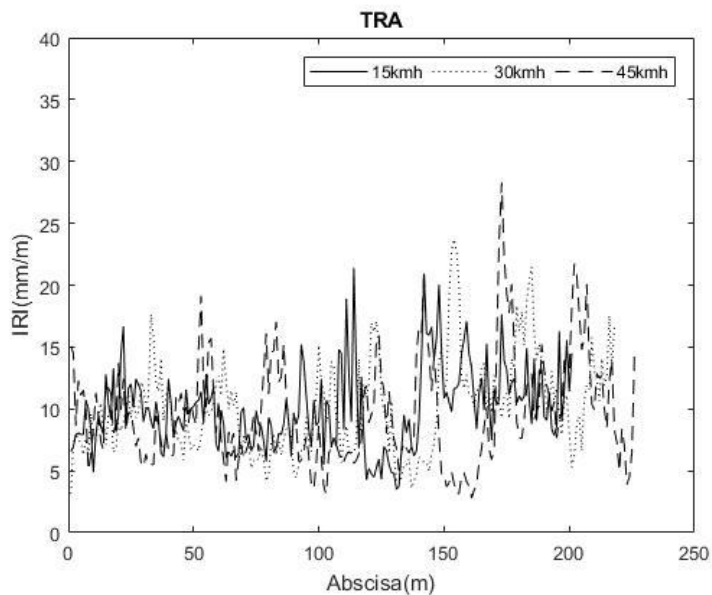
Tabla 4-4: Variación de valores de IRI promedio.

Tramo	TRA	TRM	TRB
Vel km/h	IRI promedio (mm/m), (10 ensayos)		
15	10.4	9.0	4.1
30	10.3	9.0	4.1
45	9.7	8.9	4.2
Media X	10.1	9.0	4.1
Desviación σ	0.38	0.04	0.05
Coef. Var. C.V.	3.8	0.4	1.1

De la tabla anterior es posible observar que los coeficientes de variación de cada tramo son inferiores a 4 %, siendo este un valor bajo. Sin embargo, se encuentra que existe una mayor variabilidad respecto a las tres velocidades en el tramo TRA con un C.V. igual a 3.787 %, seguido por el tramo TRB con un C.V. igual a 1.102 % y finalmente la menor variabilidad encontrada en el tramo TRM con un C.V. igual a 0.386 %.

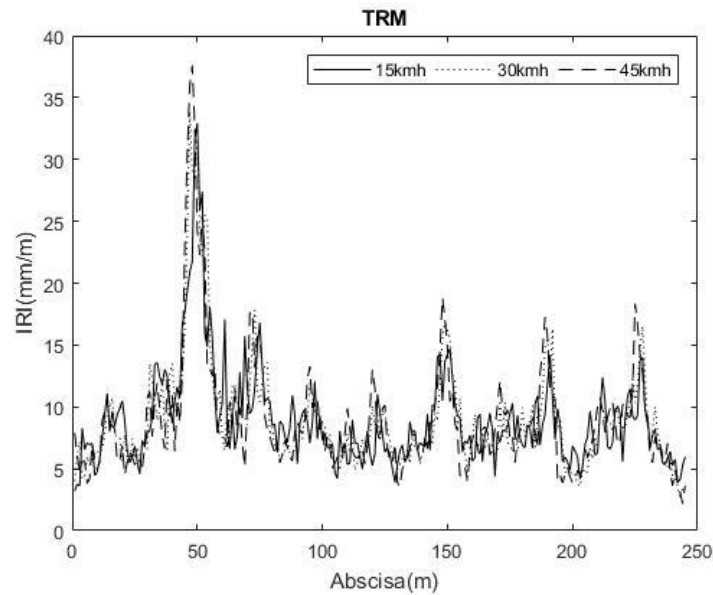
Complementando el análisis realizado en las tablas anteriores, en las siguientes figuras se muestran de manera gráfica los valores de IRI para cada uno de los tramos de estudio, a tres velocidades diferentes.

Figura 4-7: Valores de IRI promedio a tres velocidades diferentes, tramo TRA.



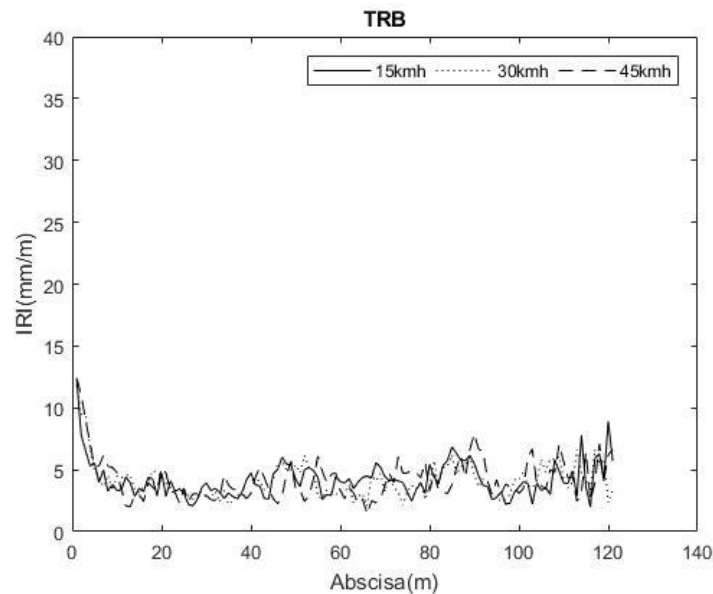
De la gráfica anterior se observa que este tramo de estudio presenta un valor de IRI promedio igual a 10.39, 10.27 y 9.68 mm/m a las velocidades de 15, 30, y 45 km/h respectivamente. Además, existe una variabilidad alta de los datos respecto a cada velocidad tal como se explicó en la Tabla 4-4 con un C.V. de 3.8 a lo largo de todo el tramo.

Figura 4-8: Valores de IRI promedio a tres velocidades diferentes, tramo TRM.



De manera similar, en la gráfica anterior y de la Tabla 4-4 se observa que este tramo de estudio presenta un valor de IRI promedio igual a 9.00, 8.98 y 8.93 mm/m a las velocidades de 15, 30, y 45 km/h respectivamente. Además, presenta el valor de C.V. más bajo de los tres tramos respecto a las velocidades de estudio.

Figura 4-9: Valores de IRI promedio a tres velocidades diferentes, tramo TRB.



Finalmente, para el tramo TRB los valores de IRI promedio son iguales a 4.12, 4.10 y 4.19 mm/m a las velocidades de 15, 30, y 45 km/h respectivamente.

Del análisis realizado para los tres tramos se observa que los valores de IRI más altos corresponden al tramo TRA seguidos por el tramo TRM y finalmente por el tramo TRB. Además, se tiene que los valores más altos están asociados a las velocidades de 15 km/h.

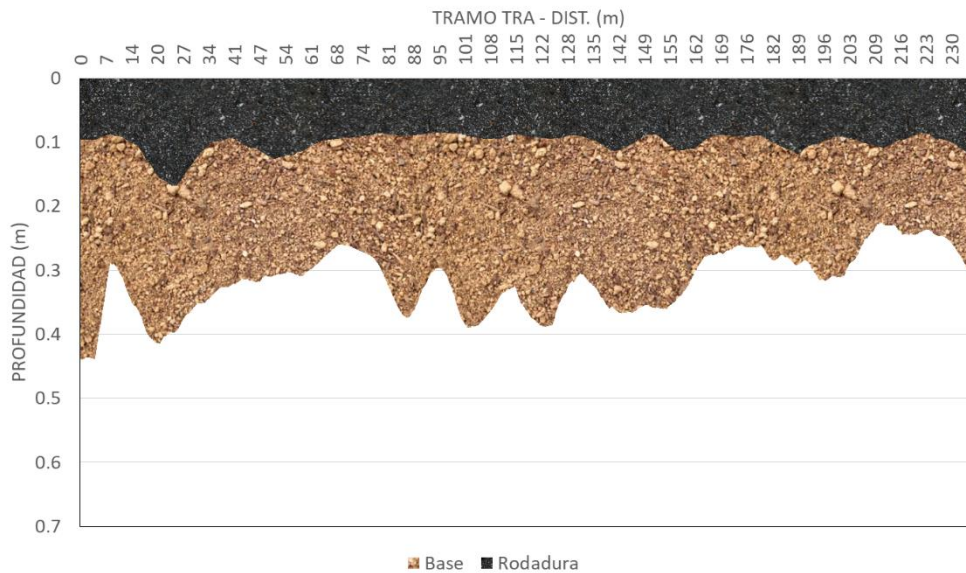
Tomando como base la escala de clasificación realizada por (Michael W. Sayers et al., 1986) , mostrada en la Figura 2-5 los tramos TRA y TRM corresponden a vías con estructuras de pavimento antiguos con varios daños superficiales y algunas depresiones poco profundas, además su velocidad de operación es cerca a los 60 km/h. Por otra parte el tramo TRB es clasificado como una vía con una estructura de pavimento nueva, sin daños presentes y con una velocidad de operación de 100 km/h.

4.1.4 Espesores de la estructura

Una vez realizada la toma de información en cada uno de los segmentos viales mediante el GPR, se realizó un procesamiento de esta, determinando los espesores de cada una de las capas que conforman las estructuras de pavimento estudiadas, como se muestra en las siguientes figuras.

4.1.3.1 Tramo TRA

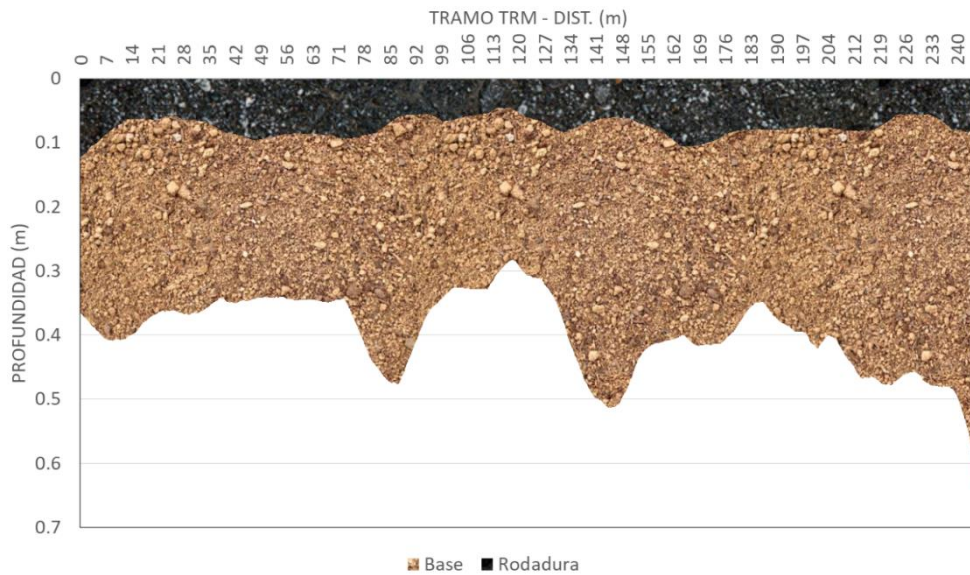
Figura 4-10: Espesores de capas de estructura de pavimento mediante GPR, tramo TRA.



El análisis de los resultados obtenidos mediante el GPR muestra que para el tramo TRA la estructura de pavimento se conforma por dos capas, la capa de base y la capa de rodadura en concreto asfáltico. Se observa un espesor homogéneo para la capa de rodadura con excepción de la abscisa de 20 metros en donde el espesor de la capa aumenta más de 5 centímetros con respecto al valor promedio. Por otra parte, la capa de base sí presenta variaciones importantes en más de 15 centímetros a lo largo de todo el tramo, presentando espesores más bajos en las abscisas superiores a los 203 metros, resultado que implica un comportamiento general inadecuado y posibles daños en toda la estructura de pavimento.

4.1.3.2 Tramo TRM

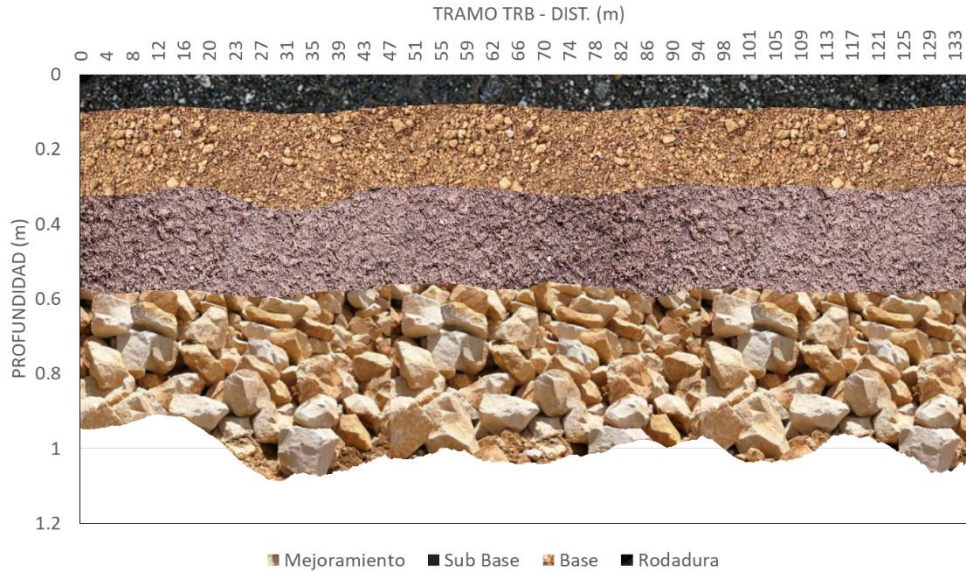
Figura 4-11: Espesores de capas de estructura de pavimento mediante GPR, tramo TRM.



En el tramo TRM, la estructura de pavimento es similar a la del tramo TRA conformada por dos capas, la capa de base y la capa de rodadura en concreto asfáltico. Se identifica una heterogeneidad alta en los espesores de las capas, con una variación de hasta 5 centímetros de la capa de rodadura y una variación de hasta 20 centímetros respecto al valor promedio. Los mayores cambios en los espesores de la capa de base se presentan en las abscisas de 78, 134 y 240 metros.

4.1.3.3 Tramo TRB

Figura 4-12: Espesores de capas de estructura de pavimento mediante GPR, tramo TRB.



El tramo TRB cuenta con cuatro capas; una capa de mejoramiento, seguida por una de sub-base, una de base y una capa de rodadura en concreto asfáltico. Para este tramo se observa una baja variabilidad en los espesores de las capas teniendo en cuenta que es una estructura de pavimento reciente.

Teniendo en cuenta que el equipo GPR reporta un valor de espesor en distancia cada centímetro, en la Tabla 4-5 se calculan los espesores promedio en toda la longitud de cada capa de pavimento, junto con los valores del espesor total de cada estructura, en donde el tramo TRB presenta un espesor total de un (1) metro contando la capa de mejoramiento a diferencia del tramo TRM con un espesor total de 0.39 metros y el tramo TRA con un espesor total de 0.32 metros.

Tabla 4-5: Espesores de las capas de las estructuras de pavimento mediante GPR.

Tramo		TRA	TRM	TRB
Rodadura (m)	Promedio (m)	0.10	0.08	0.09
	Desv. σ	0.02	0.02	0.01
Base (m)	Promedio (m)	0.22	0.32	0.22
	Desv. σ	0.05	0.06	0.02
Sub Base(m)	Promedio (m)	-	-	0.27
	Desv. σ	-	-	0.01
Mejoramiento (m)	Promedio (m)	-	-	0.43
	Desv. σ	-	-	0.04
Espesor Total (m)		0.32	0.39	1.01

La interpretación y validación de los espesores se hizo con base en información secundaria correspondiente a los diseños de pavimentos realizados para los tramos que han sido intervenidos recientemente como el tramo TRB.

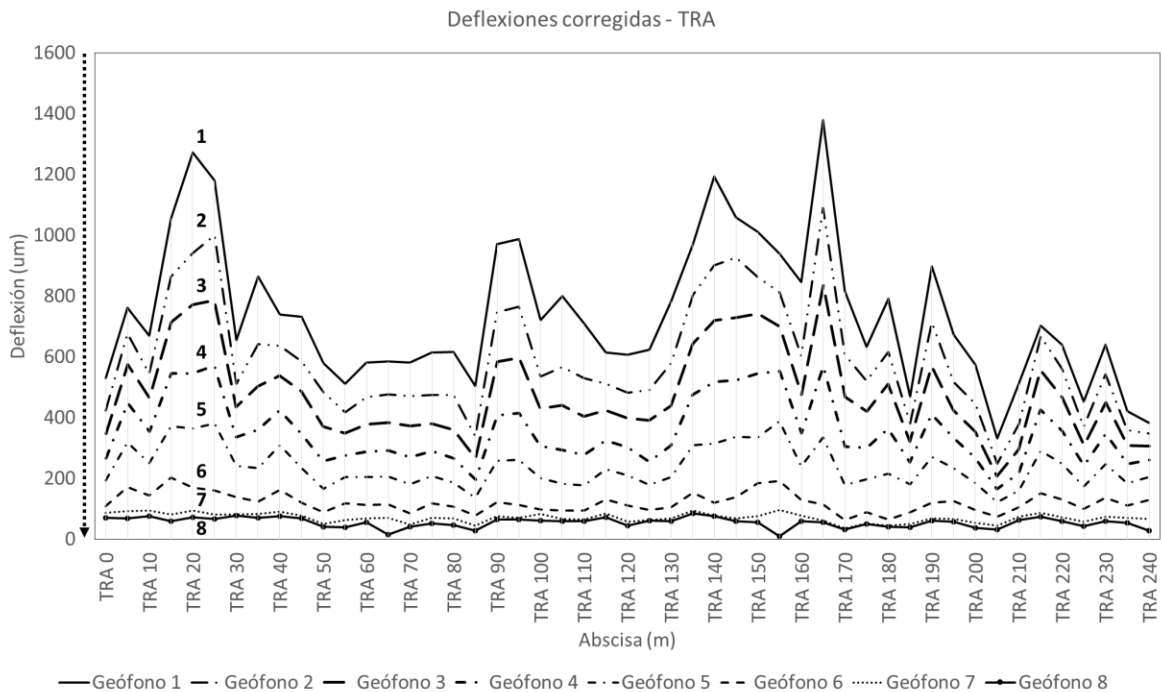
Se presenta además la desviación estándar de cada valor de espesor, y se observa que los mayores valores de desviación son en el tramo TRM seguido por el tramo TRA, resultado que se asocia con el periodo de uso de estos y el deterioro de los materiales lo cual implica una dificultad mayor en la interpretación de los datos a diferencia del tramo TRB que es una estructura de pavimento nueva y los cambios de material se pueden identificar más fácil.

4.1.5 Deflexiones

Se determinó los cuencos de deflexión realizando las correcciones establecidas por la normativa ASTM D 4694 y INV 798-13 de carga y temperatura, para cada uno de los sensores (geófonos) empleados, en donde los valores de deflexión del geófono número 8 más alejado del plato de carga, se encuentra en la parte inferior y las deflexiones del geófono número 1 más cercano al plato de carga se encuentra en la parte superior de la Figura 4-13, correspondiente a los valores de deflexión promedio de los tres (3) golpes aplicados por punto, para el tramo TRA.

4.1.4.1 Tramo TRA

Figura 4-13: Valores de deflexiones corregidas de los 8 geófonos en el tramo TRA.



En el tramo TRA con un nivel de deterioro alto, se observa que los valores de deflexión para los geófonos más alejados del punto de aplicación de la carga con excepción del geófono número 8, presentan menos fluctuaciones o variaciones comparados con los geófonos que se encuentran a una distancia más cercana al punto de carga. Estas variaciones se presentan en la Tabla 4-6 en términos del valor de C.V. explicado en párrafos anteriores.

Se observa que los geófonos 1, 2, 3, y 4 presentan un C.V. superior al 30 %, siendo esta una variación alta, que puede ser explicada por la mayor perturbación generada en áreas cercanas del plato de carga sobre la estructura de pavimento. Respecto al valor de C.V. superior a 30 % del geófono número 8, se asocia a las vibraciones ocasionadas por un mal acople de la regleta de soporte de los geófonos sobre la superficie. En las abscisas 20, 90, 140, 165, 190, 220, y 230 metros desde el inicio del tramo se evidencian los mayores picos de deflexión, correspondiendo a lugares con mayores afectaciones sobre la estructura de pavimento.

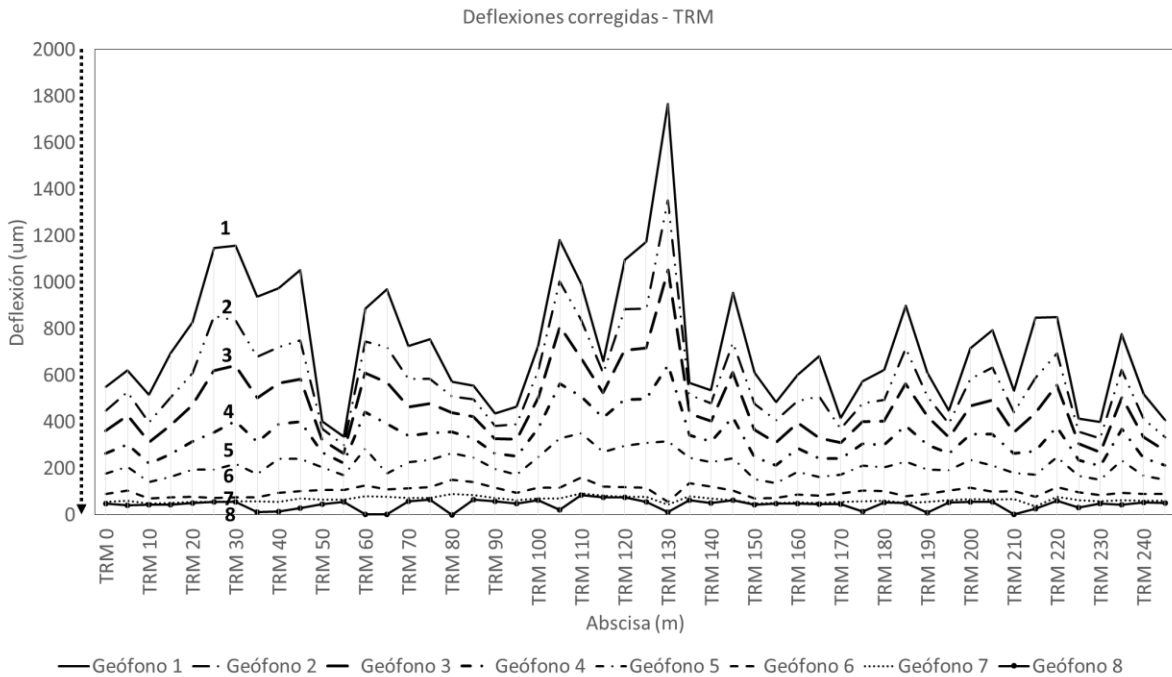
Tabla 4-6: Variación de deflexiones para cada geófono, tramo TRA.

Geófonos	1	2	3	4	5	6	7	8
Media \bar{x} (μm)	737.98	589.56	477.02	351.63	237.14	120.22	70.07	54.83
Desviación σ (μm)	234.95	189.82	151.54	107.50	66.73	31.48	14.92	16.47
Coef. Var. C.V.	31.84	32.20	31.77	30.57	28.14	26.19	21.29	30.03

4.1.4.2 Tramo TRM

En la Figura 4-14 se muestran los valores de deflexión del tramo TRM.

Figura 4-14: Valores de deflexiones corregidas de los 8 geófonos en el tramo TRM.



En el tramo con deterioro medio TRM los geófonos con mayores fluctuaciones a lo largo de todo el segmento son los que están más cercanos del punto de aplicación de la carga siendo estos los geófonos con número 1, 2 y 3, tal como se presenta en la Tabla 4-7 con respecto al valor de C.V.

A lo largo de todo el segmento se presentan picos de deflexión, en donde el pico máximo se presenta en la abscisa 130 metros desde el inicio de la vía.

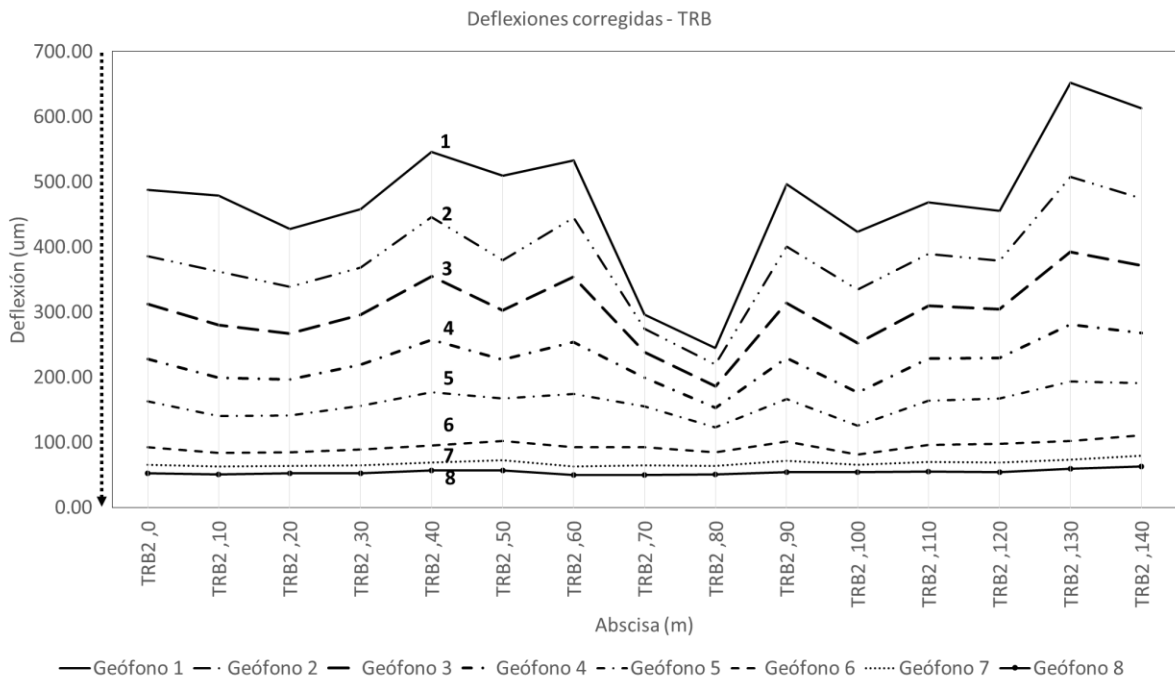
Tabla 4-7: Variación de deflexiones para cada geófono, tramo TRM.

Geófonos	1	2	3	4	5	6	7	8
Media x (µm)	728.96	583.45	467.63	333.95	214.67	101.26	64.26	44.20
Desviación σ (µm)	278.35	201.92	154.91	94.81	50.68	21.78	12.05	20.57
Coef. Var. C.V.	38.19	34.61	33.13	28.39	23.61	21.51	18.75	46.55

4.1.4.2 Tramo TRB

En la Figura 4-15 muestran los valores de deflexión del tramo TRB.

Figura 4-15: Valores de deflexiones corregidas de los 8 geófonos en el tramo TRB.



De los valores de deflexión obtenidos para el tramo TRB con un nivel de deterioro bajo, se observa que también se presenta el mismo comportamiento que los dos tramos anteriores referente a las menores variaciones en los geófonos más alejados de la carga como se muestra en la Tabla 4-8. Además, se presenta un punto crítico en las deflexiones en la mitad del segmento, un comportamiento que se asocia a la posible existencia de una tubería u obra de drenaje dentro de la estructura de pavimento. Visualmente sobre la superficie en el punto donde se presenta la disminución en las deflexiones, no es posible determinar los factores o causa de este comportamiento.

Tabla 4-8: Variación de deflexiones para cada geófono, tramo TRB.

Geófonos	1	2	3	4	5	6	7	8
Media \bar{x} (μm)	472.65	380.23	302.30	222.91	160.17	93.67	67.90	54.05
Desviación σ (μm)	103.95	73.43	53.90	34.41	20.78	8.27	4.76	3.71
Coef. Var. C.V.	21.99	19.31	17.83	15.44	12.97	8.83	7.02	6.86

Se observa que en general los valores de deflexión reportados por el equipo FWD representan de manera adecuada la respuesta de cada estructura de pavimento tomando como referencia valores de deflexiones encontrado en la literatura para este tipo de vías. Los valores de deflexión de los tramos TRA y TRM son muy similares, sin embargo, los valores son más altos para el tramo TRA, lo cual es un resultado que se puede asociar con el nivel de deterioro. Por otra parte, las deflexiones en el tramo TRB son más bajas, pero es posible evidenciar que las deflexiones correspondientes a los geófonos número 7 y 8 son valores muy altos en comparación con los demás tramos, siendo este un tramo recién construido que debería tener una mejor respuesta ante las cargas impuestas.

5. Capítulo V: Análisis de resultados, Etapa 3

En la tercera etapa luego de la campaña experimental y teniendo en cuenta la gran utilidad de un análisis espectral de señales tal como lo indican, (Andren, 2015; Lushnikov & Lushnikov, 2017; Wei et al., 2005) se realizó un análisis de la condición superficial con base en los espectros de señal FFT y PSD junto con un análisis de ventanas Wavelets, empleando las herramientas o Signal Processing Toolbox del sistema de cómputo numérico MATLAB.

Por otra parte, para la condición estructural fueron utilizadas dos metodologías de retrocálculo AASHTO y YONAPAVE por ser dos de las metodologías más conocidas y usadas actualmente en la evaluación de pavimentos.

La metodología AASHTO se ha considerado como pionera y con resultados confiables siendo un método empírico que tiene en cuenta las características de la estructura de pavimento en conjunto para su cálculo. La metodología YONAPAVE se fundamenta como un método directo de análisis empírico mecanicista que no requiere de los espesores de la estructura para su cálculo, siendo esta una característica que simplifica sus análisis y la hace conveniente para esta investigación.

Con los análisis realizados se buscó la correlación entre las dos condiciones de evaluación de las estructuras de pavimento propuestas, además se hizo una caracterización de los segmentos viales tipificando las respuestas obtenidas por cada una de las metodologías de estudio evaluadas.

5.1 Evaluación superficial

Como parte de los resultados de la campaña experimental, se obtuvo la respuesta del movimiento del vehículo por medio de las aceleraciones registradas por el acelerómetro y la distancia vertical por el láser del equipo PL. Con estos datos fue posible calcular los perfiles de vía de cada segmento de estudio para los diez (10) recorridos.

En el procedimiento de análisis de los datos de aceleración, fue utilizada y aplicada la Transformada Rápida de Fourier FFT cambiando del dominio del tiempo al dominio de frecuencia, lo cual permite tener un análisis más eficiente en la caracterización de las señales. Además, con el fin de evaluar la repetitividad de los recorridos realizados en cada tramo, se hizo un análisis de sensibilidad de frecuencia y amplitud de los valores con picos más altos en cada señal, para esto en la Figura 5-5 mostrada más adelante se presenta un ejemplo del análisis llevado a cabo.

Seguido de esto fueron utilizados los perfiles de vía previamente calculados y mostrados en el capítulo anterior, para el análisis de PSD y análisis mediante la Transformación de Wavelet.

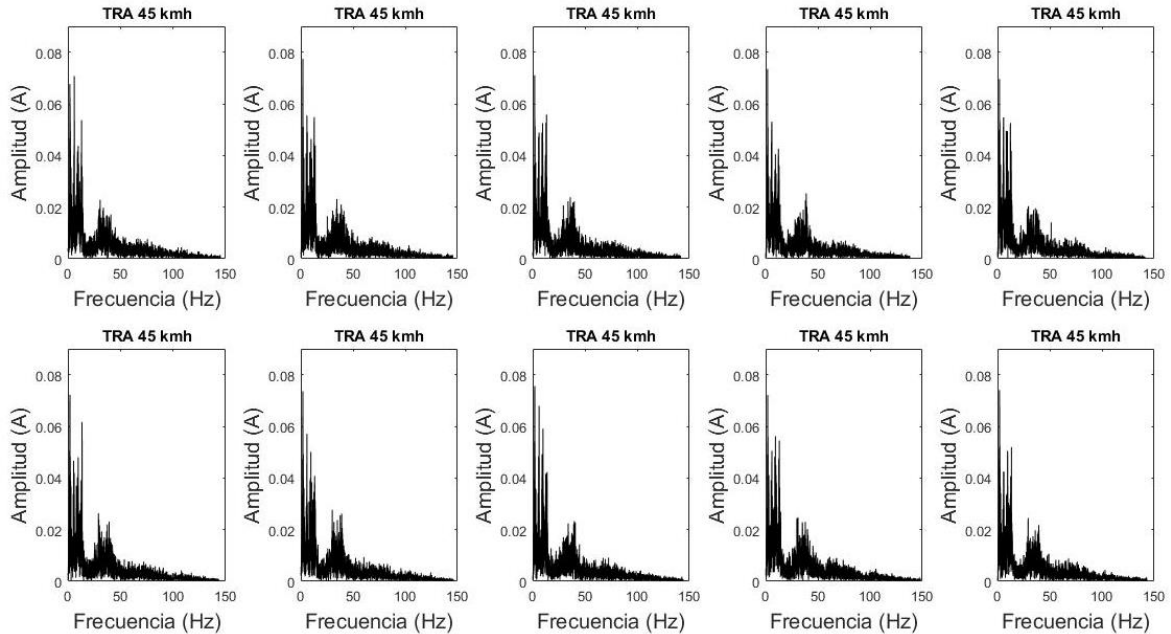
Es importante mencionar que el análisis de regularidad realizado en este capítulo en su mayoría se hizo con base en los datos obtenidos a una velocidad de 45 km/h. Como se mostró en capítulos anteriores existe una alteración en la toma de datos por parte del equipo PL, con respecto a los valores de aceleración vertical y distancia vertical a velocidades inferiores a 30 km/h. Esta limitación implica errores en el perfil calculado con datos obtenidos a velocidades de 15 y 30 km/h, por esta razón, únicamente se hace el análisis de PSD y Transformadas Wavelet con datos correspondientes a la velocidad de estudio más alta.

5.1.1 Transformada Rápida de Fourier FFT

Como se mencionó en párrafos anteriores fueron calculados los diez (10) espectros de onda obtenidos en cada tramo de estudio a una velocidad de 45 km/h, mostrados en las siguientes figuras. Estos espectros fueron calculados mediante la FFT teniendo en cuenta el tiempo de ejecución de cada ensayo o recorrido, buscando un análisis correcto en términos de los valores frecuenciales.

5.1.1.1 Tramo TRA

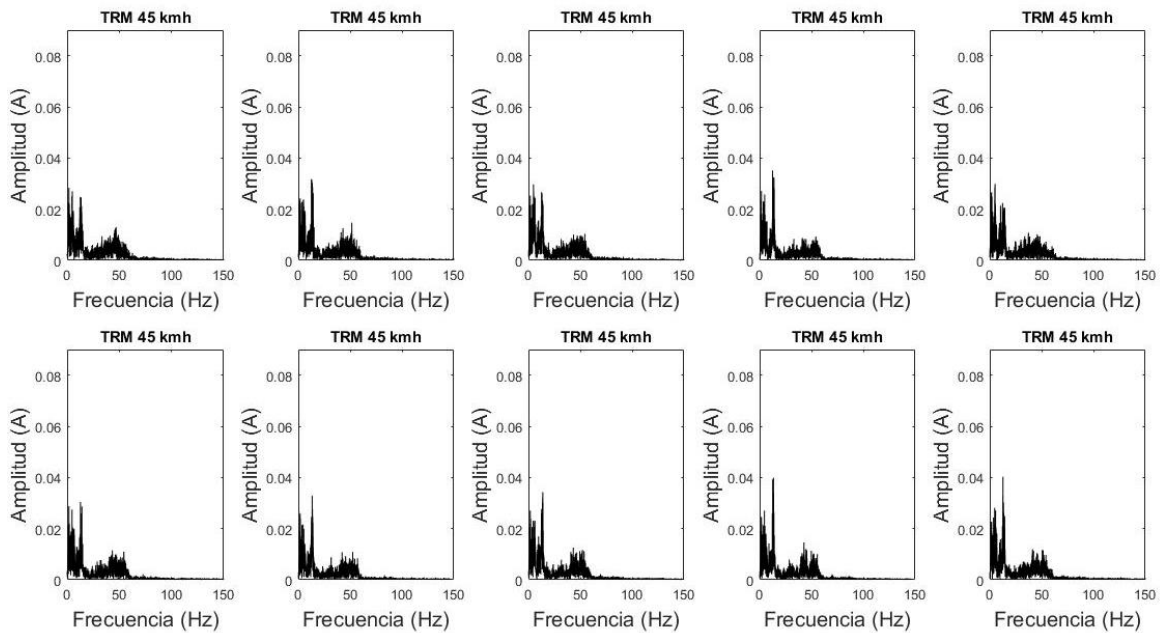
Figura 5-1: Transformada Rápida de Fourier, aplicada a señales de aceleración en el tramo TRA a 45 km/h.



En los espectros de onda de la se puede observar una buena repetitividad entre todos los recorridos y los sectores en donde se presenta predominancia en los valores de frecuencia. De la figura anterior se perciben dos rangos de frecuencias predominantes de la señal en un rango de 2 a 12 Hz y otro en un rango de 33 a 40 Hz.

5.1.1.2 Tramo TRM

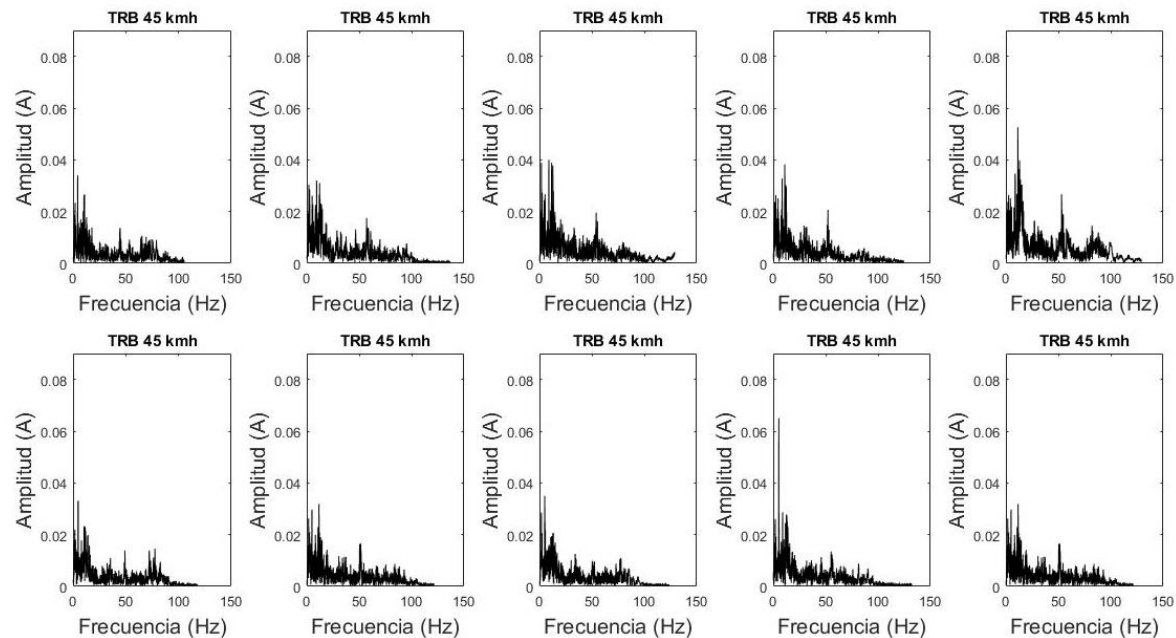
Figura 5-2: Transformada Rápida de Fourier, aceleración en el tramo TRM a 45 km/h.



En el caso del tramo TRM se presenta predominancia en un rango de 2 a 15 Hz y otra en un rango de 40 a 50 Hz. Es posible notar que este tramo presenta menores amplitudes en cada uno de los espectros respecto al tramo TRA.

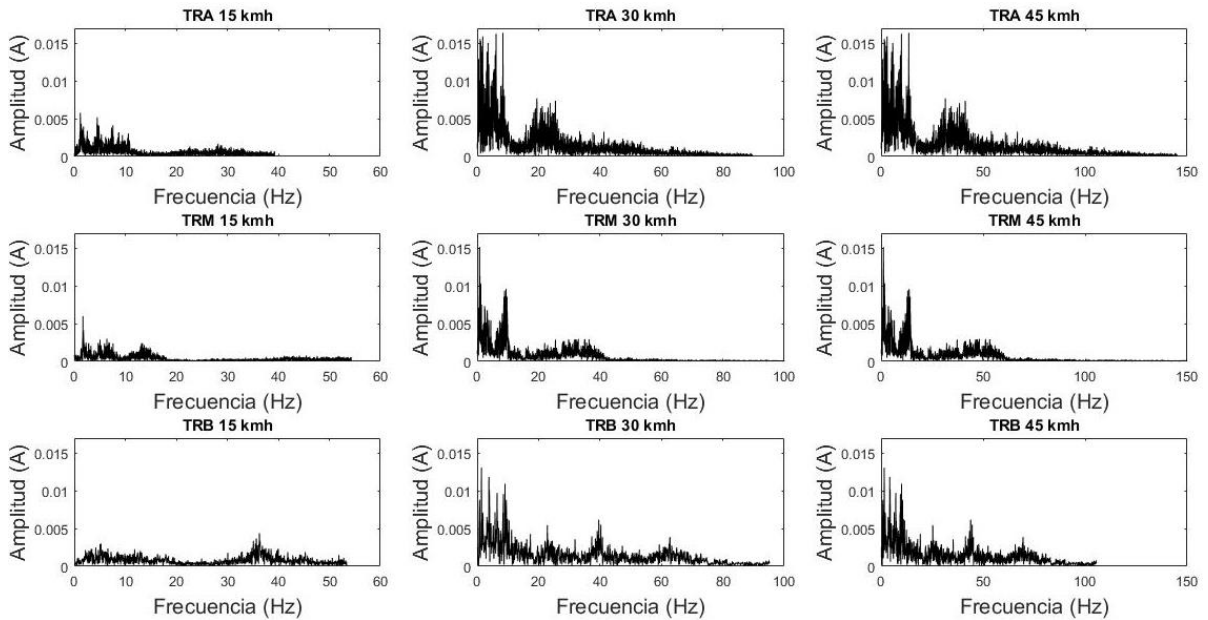
5.1.1.3 Tramo TRB

Figura 5-3: Transformada Rápida de Fourier, aceleración en el tramo TRM a 45 km/h.



Existe una diferencia en el tramo TRB en donde la predominancia de la señal es clara en tres rangos; el primero se encuentra de 2 a 14 Hz, el segundo de 30 a 40 Hz y por último en un rango de 60 a 70 Hz. Con el objetivo de realizar un análisis de los datos obtenidos en condiciones de servicio diferentes en los tramos TRA, TRM y TRB, en la Figura 5-4 fueron graficados los valores promedio del espectro de Fourier de los diez (10) ensayos para cada velocidad 15, 30 y 45 km/h.

Figura 5-4: Valores promedio de FFT en tramos TRA, TRM, TRB. 3 velocidades diferentes.



Los diferentes rangos de predominancia para cada uno de los tramos, se observan de manera más clara en la figura anterior, en donde una de las principales diferencias en estos radica en el tramo TRB que presenta tres rangos resaltando que el rango de 60 a 70 Hz no es posible identificarlo en la velocidad de 15 km/h resultado que se asocia con la longitud corta del tramo y la influencia en la velocidad, que como ya se ha venido mencionado, a velocidades inferiores a 30 km/h el equipo PL reporta adecuadamente los datos.

Tabla 5-1: Frecuencias predominantes en cada tramo.

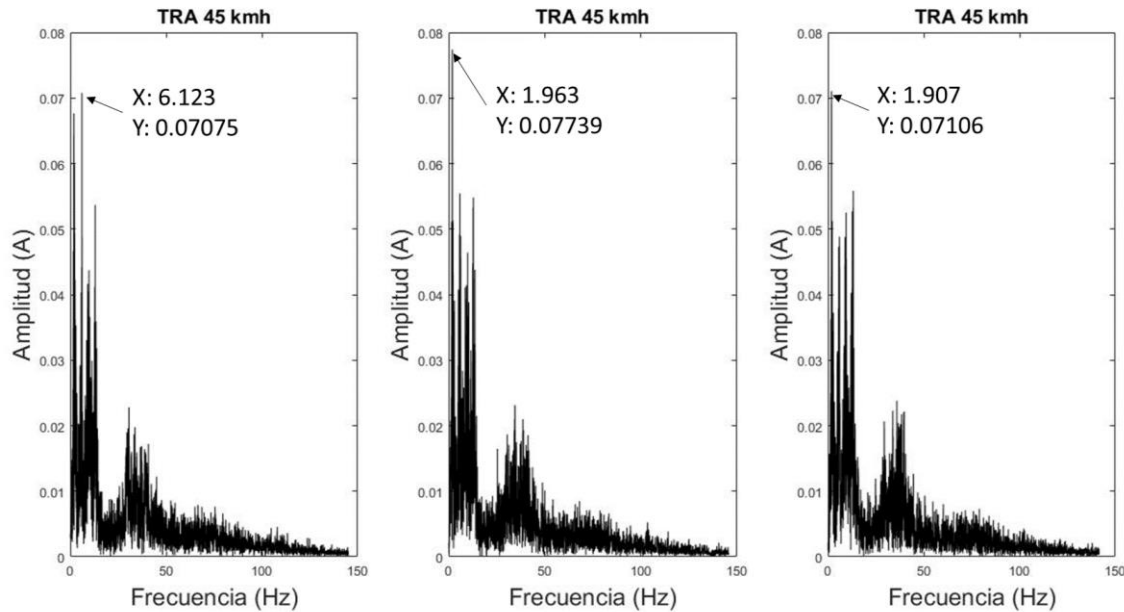
Tramo	Rangos frecuencias predominantes (Hz)		
TRA	2-12	33-40	-
TRM	2-15	40-50	-
TRB	2-14	30-40	60-70

Además, se encuentra que para el tramo TRB existe una concentración de los valores pico en frecuencias más altas en comparación con los demás tramos. Este resultado indica una

proporcionalidad directa del valor de frecuencia respecto al nivel de deterioro de cada tramo además de la influencia de la longitud de cada uno, teniendo en cuenta que existe una proporcionalidad inversa entre frecuencia y longitud de onda, para el tramo TRB con una distancia de 140 metros las longitudes de onda superiores a cincuenta (50) metros no alcanzan a ser registradas de una manera correcta por el PL.

De manera complementaria al análisis frecuencial anteriormente realizado, como ejemplo en la Figura 5-5 se muestra los valores pico de los tres espectros de onda de las señales obtenidas en el tramo TRA a una velocidad de 45 km/h. Se seleccionó los picos con mayores amplitudes en un rango entre 1 y 15 Hz de frecuencia, teniendo en cuenta que en este rango se presenta la mayor influencia de las cargas dinámicas impuestas por el vehículo a la estructura de pavimento, como lo muestran en su investigación (Hassan & Kerry, 2001), siendo este un factor importante en la evaluación de la regularidad del perfil de una vía.

Figura 5-5: Análisis de repetitividad en señales del tramo TRA a 45 km/h.



En la figura anterior es posible observar que existe una similitud en los valores de frecuencia, con el fin de realizar un análisis más completo y tener certeza de las conclusiones realizadas, en la Tabla 5-2, Tabla 5-3 y Tabla 5-4 se muestra la variación de los valores en los diez (10) recorridos a las diferentes velocidades, expresado por medio

del coeficiente de variación C.V., el cual se obtiene al dividir la desviación típica entre el valor absoluto de la media del conjunto y es expresado en porcentaje.

Tabla 5-2: Análisis de sensibilidad de valores pico en el tramo TRA.

N° de recorrido	TRA_15kmh		TRA_30kmh		TRA_45kmh	
	F (Hz)	Amplitud	F (Hz)	Amplitud	F (Hz)	Amplitud
1	2.455	0.009	2.177	0.028	2.177	0.062
2	2.821	0.010	1.608	0.025	1.926	0.074
3	2.255	0.009	2.263	0.029	1.871	0.069
4	2.053	0.011	2.313	0.028	2.071	0.061
5	2.135	0.012	2.398	0.033	1.867	0.070
6	2.386	0.012	1.971	0.029	1.895	0.066
7	2.436	0.012	2.311	0.029	1.938	0.077
8	2.399	0.012	2.311	0.029	1.905	0.073
9	2.141	0.012	2.340	0.030	1.963	0.072
10	2.019	0.012	2.296	0.028	1.891	0.077
Media X	2.310	0.011	2.199	0.029	1.950	0.070
Desviación σ	0.241	0.001	0.239	0.002	0.099	0.006
Coef. Var. C.V.	10.452	10.744	10.856	6.644	5.091	8.281

En el tramo TRA los coeficientes C.V. son inferiores de 11 % tanto en el análisis de la frecuencia como en la amplitud en los puntos seleccionados, indicando una variabilidad baja entre los ensayos realizados. En este segmento de estudio el pico de frecuencia analizado se mantuvo en un rango de 1.6 a 2.8 Hz y en un rango desde 0.009 a 0.07 de amplitud en todos los ensayos y se aprecia que la menor variación de los resultados se obtuvo con la mayor velocidad de 45 km/h.

Tabla 5-3: Análisis de sensibilidad de valores pico en el tramo TRM.

N° de recorrido	TRM_15kmh		TRM_30kmh		TRM_45kmh	
	F (Hz)	A	F (Hz)	A	F (Hz)	A
1	1.874	0.011	2.483	0.018	1.789	0.027
2	1.823	0.009	2.414	0.018	2.071	0.031
3	1.815	0.013	2.453	0.015	2.055	0.026
4	1.838	0.013	2.468	0.020	1.748	0.025
5	1.753	0.009	2.351	0.021	2.124	0.029
6	1.819	0.009	2.359	0.017	2.052	0.025
7	1.926	0.016	2.500	0.018	1.990	0.025
8	1.795	0.015	2.354	0.017	2.145	0.023
9	1.811	0.015	2.410	0.017	1.994	0.027
10	1.608	0.015	2.567	0.018	2.084	0.026
Media X	1.806	0.013	2.436	0.018	2.005	0.026
Desviación σ	0.083	0.003	0.071	0.002	0.134	0.002
Coef. Var. C.V.	4.623	22.740	2.929	10.074	6.693	8.484

Por otra parte, en la Tabla 5-3 se muestra los resultados del tramo TRM en donde el C.V. es inferior a 10% en los valores de frecuencia, presentándose la mayor variabilidad a una velocidad de 45 km/h. En el caso de los valores de amplitud el C.V. es superior a 20 % a una velocidad de 15 km/h, igual a 10% a una velocidad de 30 km/h e inferior a 10 % a la velocidad de 45 km/h. Contrario a los resultados obtenido en el tramo TRA la mayor variabilidad en la frecuencia se presenta en la mayor velocidad. Para este tramo el pico de estudio se encuentra en un rango de 1.6 a 2.5 Hz para la frecuencia y en un rango de 0.009 a 0.031 para la amplitud.

Tabla 5-4: Análisis de sensibilidad de valores pico en el tramo TRB.

N° de recorrido	TRM_15kmh		TRM_30kmh		TRM_45kmh	
	F (Hz)	A	F (Hz)	A	F (Hz)	A
1	2.525	0.009	3.172	0.013	1.963	0.023
2	2.469	0.008	3.451	0.013	2.013	0.039
3	1.913	0.010	1.880	0.013	2.600	0.027
4	1.901	0.008	2.332	0.013	2.505	0.026
5	2.211	0.010	2.281	0.012	2.604	0.026
6	2.192	0.010	3.905	0.018	1.737	0.022
7	2.711	0.009	3.338	0.016	1.785	0.026
8	2.256	0.011	2.307	0.013	1.818	0.029
9	2.347	0.010	2.311	0.014	1.947	0.026
10	2.721	0.010	3.286	0.011	3.706	0.017
Media X	2.325	0.009	2.826	0.014	2.268	0.026
Desviación σ	0.289	0.001	0.677	0.002	0.608	0.006
Coef. Var. C.V.	12.435	10.218	23.936	16.473	26.806	21.617

En el tramo TRB, se obtuvo un C.V. en un rango de valores de 10 a 26 % en todos los casos de estudio, tanto en el análisis de frecuencia como de amplitud. Se observa que existe una variabilidad más alta en los recorridos realizados a una velocidad de 45 km/h resultado similar para el tramo TRM. Los picos analizados para este tramo se encuentran en un rango de 1.7 a 3.9 Hz y de 0.008 a 0.039 en la amplitud.

Los resultados muestran que existe una buena repetitividad entre los ensayos realizados con un C.V. inferior a 25 % en todos los casos excepto en el tramo TRB a una velocidad de 45 km/h en donde el C.V. arrojó un valor de 26%, además, los valores de frecuencia se mantienen en un rango similar en todos los tramos de estudio. Los valores de amplitud

más altos se obtuvieron en el tramo TRA a una velocidad de 45 km/h, resultado que se asocia a un alto nivel de deterioro del tramo.

Los recorridos fueron realizados con el objetivo de mantener las mismas condiciones entre estos, sin embargo, es importante aclarar que las variables correspondientes a la conducción del vehículo incluida la velocidad de este son difíciles de controlar en el momento de la ejecución de cada ensayo, siendo esto un factor importante que puede estar involucrado en la variación de los ensayos.

5.1.2 Densidad Espectral de Potencia PSD

Mediante el empleo de los perfiles de vía de cada segmento, fueron calculados los espectros de onda, junto con los valores de notas de onda (NPO, NMO y NGO) los cuales corresponden a las diferentes vibraciones a longitudes de onda mostradas en la Tabla 5-5 iguales a 2.5, 10 y 50 metros respectivamente y pueden ser entendidas como una clasificación de la condición de la superficie de la vía. Estas notas se dan en una escala de 0 a 12, siendo 12 una nota para una condición buena, es decir de bajas vibraciones y 0 para una condición mala es decir altas vibraciones.

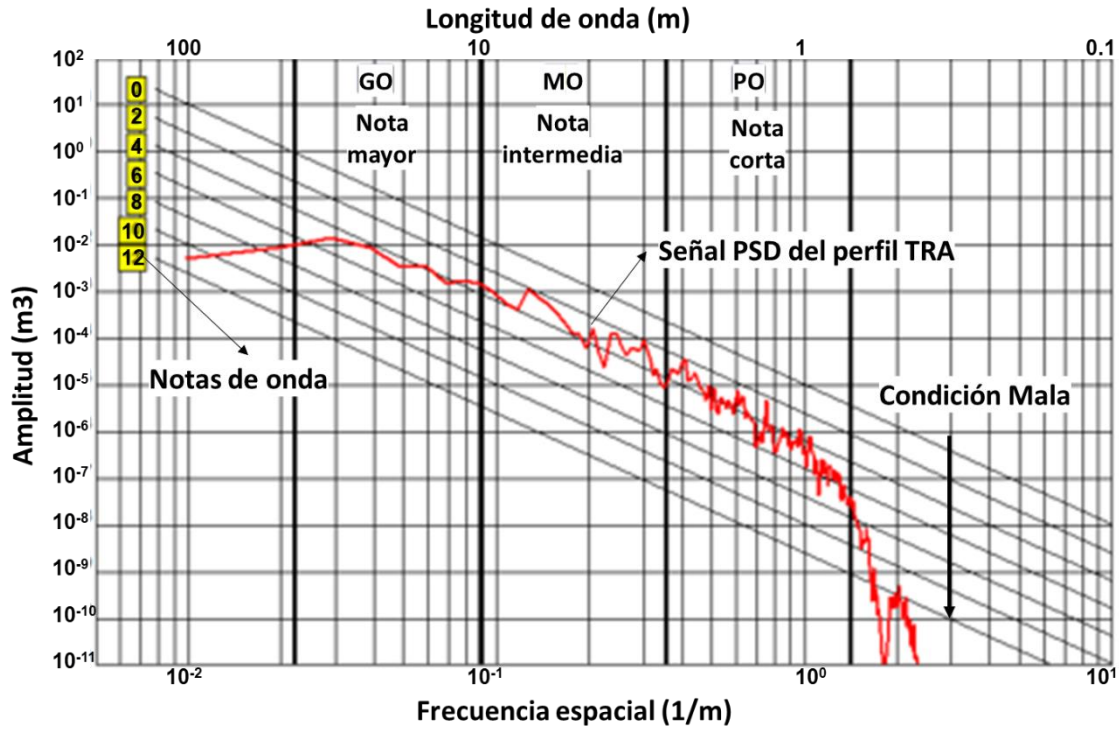
Tabla 5-5: Longitudes de onda, notas espectros de onda.

Nota de onda	NPO	NMO	NGO
Longitud de onda (m)	2.5	10	50

5.1.2.1 Tramo TRA

En la Figura 5-6 se muestra los resultados directos dados por el PL de densidad espectral para el perfil del tramo TRA, en donde es explicado cada uno de los componentes de la figura. La señal amplitud / frecuencia espacial es la correspondiente a una velocidad de 45 km/h.

Figura 5-6: Densidad espectral de onda obtenida con el PL a una velocidad de 45 km/h, tramo TRA.



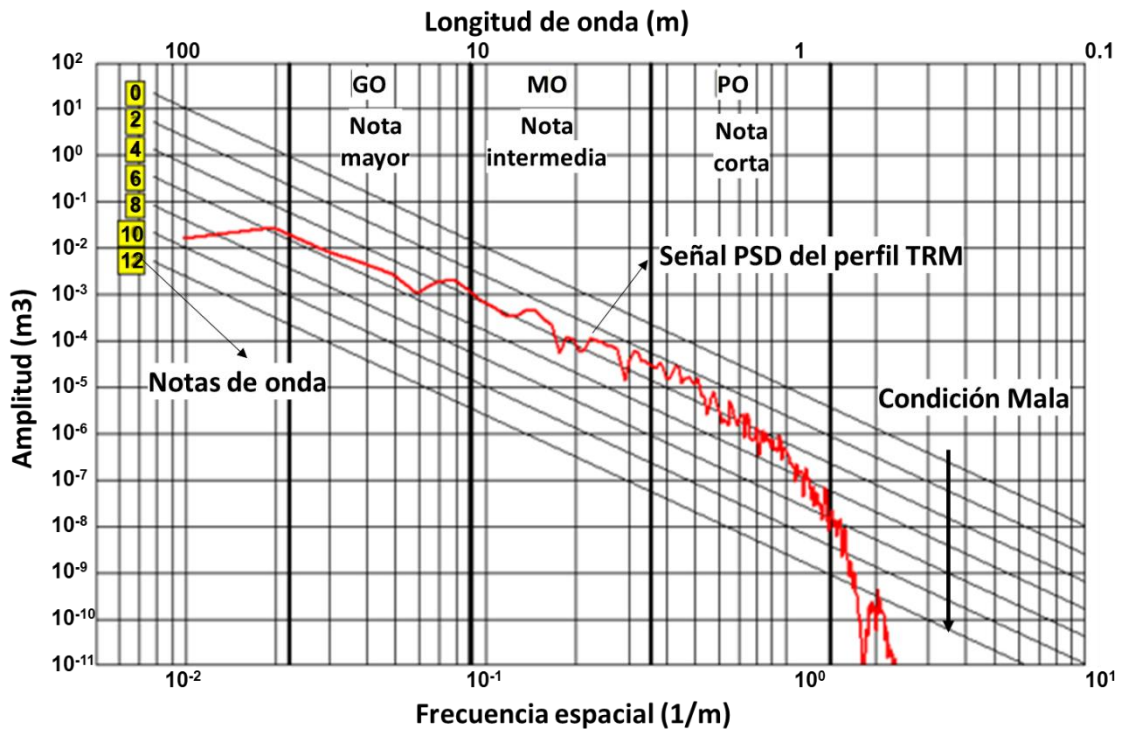
Se observa que para el tramo TRA las amplitudes con longitudes de onda intermedia están en un rango de valores de 10^{-5} a 10^{-3} m^3 y se encuentran en valores de 4 para notas de onda bajas, como se explica más adelante en la Tabla 5-4.

Se presentan picos importantes y mayor variación en la señal en longitudes de onda corta, sin embargo, se perciben también picos y variaciones importantes en longitudes intermedias lo cual indica un deterioro alto a esta escala sobre el segmento de la vía.

5.1.2.2 Tramo TRM

El cálculo de PSD del equipo PL para el tramo TRM se muestra en la Figura 5-7.

Figura 5-7: Densidad espectral de onda obtenida con el PL a una velocidad de 45 km/h, tramo TRM.

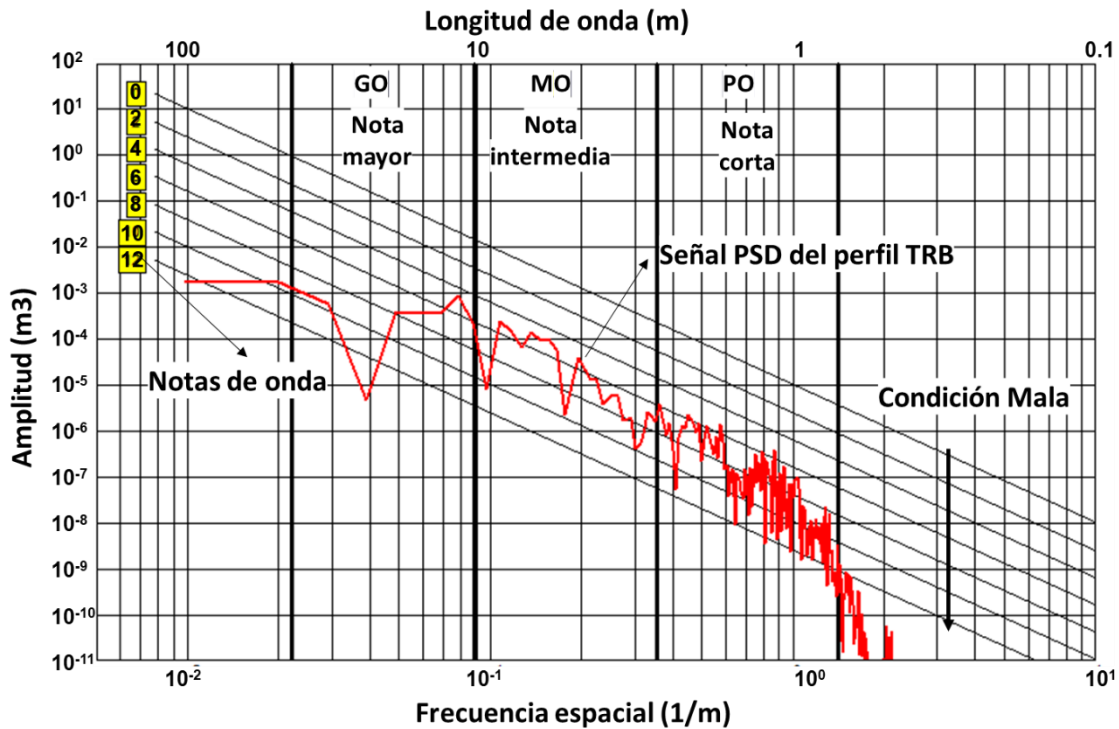


De manera similar al análisis realizado en el tramo TRA, para el tramo TRM las amplitudes de onda intermedia están en un rango de valores de 10^{-5} a 10^{-3} m^3 , y son asociados a notas de onda con valores de 4 valores bajos, presentando una condición superficial mala. Para este caso la señal correspondiente a longitudes de onda intermedia tiene menor variación y picos en comparación con el tramo TRA.

5.1.2.3 Tramo TRB

En la Figura 5-8 se presenta los resultados de PSD para el tramo con un nivel de deterioro bajo TRB.

Figura 5-8: Densidad espectral de onda obtenida con el PL a una velocidad de 45 km/h, tramo TRB.



De la figura anterior se observa que para el tramo TRB se obtienen amplitudes en la señal más bajas en relación con los demás tramos, estas presentan valores de 10^{-6} a 10^{-4} m^3 . Se tienen para las longitudes de onda intermedia, además, mayores variaciones y picos en todas las longitudes de onda, lo cual tiene una posible explicación con relación a longitud del tramo evaluado siendo este menor a 150 metros.

5.1.2.4 Notas de onda NPO, NMO, NGO

Los valores de notas de onda promedio obtenidos para los diez (10) recorridos realizados en cada tramo evaluado se muestran en la Tabla 5-4., los valores de notas más altos se presentan en el tramo TRB y las notas con valores más bajos en el tramo TRA, asumiendo una relación directa con el nivel de deterioro. Además, se observa que para velocidades menores a 30 km/h las notas son más altas que las demás velocidades lo cual indicaría que a estas velocidades existe una influencia menor respecto a los valores de aceleración inducidos por las irregularidades presentes en cada tramo.

Tabla 5-6: Notas de onda para cada segmento evaluado.

Tramo	NPO ($\lambda=2.5$ m)			NMO ($\lambda=10$ m)			NGO ($\lambda=50$ m)		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45
TRA	2.36	2.39	2.32	0.00	0.00	0.00	3.50	1.15	1.40
TRM	2.40	2.01	2.20	0.57	0.50	0.50	4.29	2.39	2.53
TRB	4.84	5.30	5.09	2.67	3.25	2.50	4.27	3.55	3.50

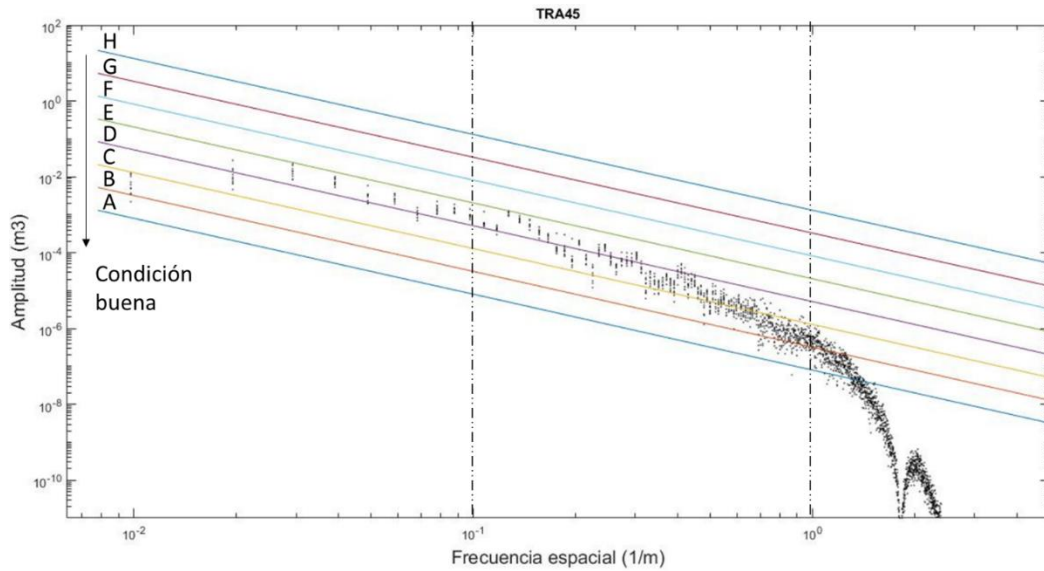
De manera complementaria al análisis realizado a los valores de notas obtenidos para cada uno de los tramos de estudio, se observa que las notas intermedias NMO son un indicador adecuado de la condición de cada estructura de pavimento. Esto teniendo en cuenta que la potencia de la señal muestra mayores cambios en longitudes de ondas intermedias. Además, se ve de manera clara que para el tramo TRB existen valores atípicos a velocidades de 15 km/h en todas las notas de onda a diferencia de los demás tramos, a lo que es atribuido nuevamente a la longitud corta de ese tramo.

5.1.2.5 Clasificación ISO 8608

Con el fin de clasificar los resultados de densidad espectral de onda según la clasificación de vías ISO 8608 mostrada en capítulos anteriores, en la Figura 5-9, Figura 5-10 y Figura 5-11 se muestra la densidad espectral obtenida de los diez (10) ensayos o recorridos realizados a una velocidad de 45 km/h en cada uno de los tramos evaluados.

5.1.2.5.1 Tramo TRA

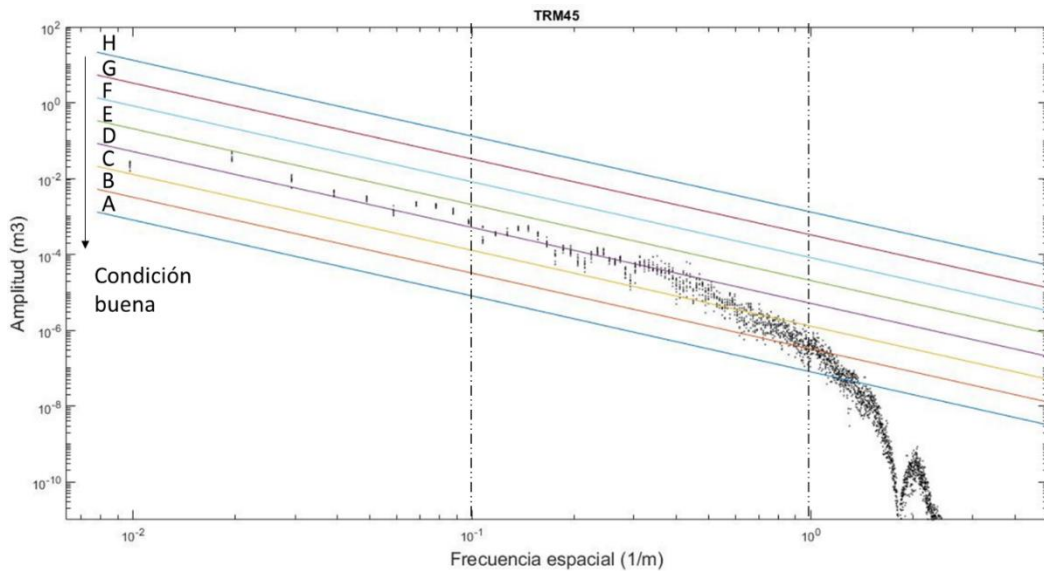
Figura 5-9: Densidad espectral de onda, clasificación ISO 8608 a una velocidad de 45 km/h, tramo TRA.



Se observa que de acuerdo con la clasificación ISO 8608 en un rango de frecuencia espacial intermedia el tramo TRA pertenece a un tipo de vía pobre o mala D, y se observa mayor concentración de los datos en frecuencias espaciales superiores a 1 (1/m).

5.1.2.5.2 Tramo TRM

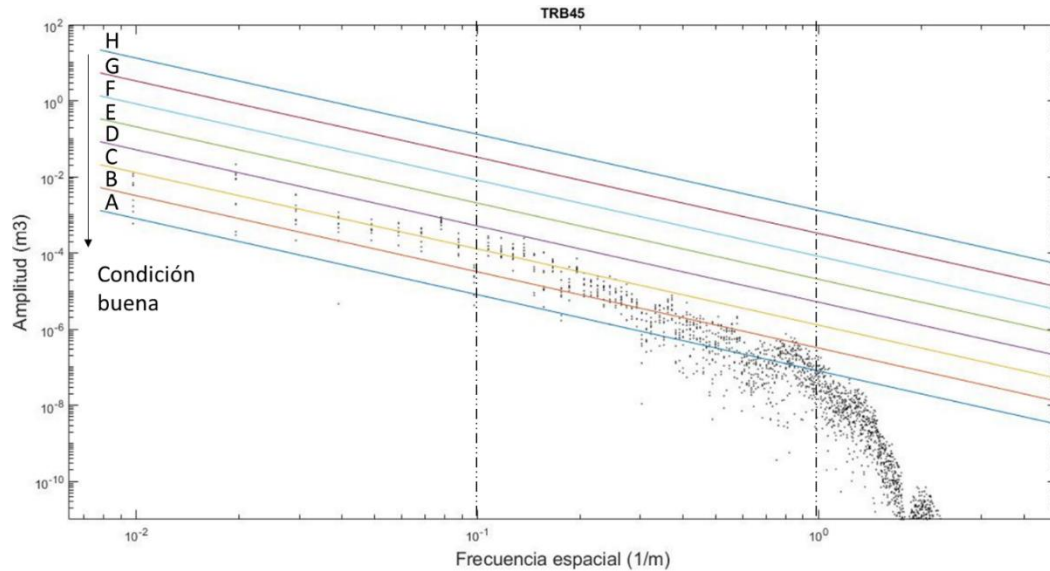
Figura 5-10: Densidad espectral de onda, clasificación ISO 8608 a una velocidad de 45 km/h, tramo TRM.



El tramo TRM pertenece a un tipo de vía regular entre C a D, y la mayor concentración de los datos se presenta en frecuencias espaciales superiores a 10^{-1} (1/m).

5.1.2.5.3 Tramo TRB

Figura 5-11: Densidad espectral de onda, clasificación ISO 8608 a una velocidad de 45 km/h, tramo TRB.



Finalmente, el tramo TRB pertenece a un tipo de vía bueno entre A a B.

Para un rango de frecuencia espacial alto, se aprecia la disminución de la potencia en todos los tramos.

Comparando la Figura 5-6, Figura 5-7 y Figura 5-8 es notable la diferencia que existe en la clasificación de cada tramo, esta diferencia se asocia a que la clasificación usada directamente por el PL es diferente a la clasificación ISO 8608, y que puede ser cualquier otra clasificación de un gran número existente de estas. Por esta razón, es de gran importancia realizar el cálculo de la clasificación de cada perfil empleando la metodología ISO 8608, con la cual se tenga certeza y un entendimiento claro de los resultados obtenidos en la evaluación superficial de cada segmento de vía evaluado.

Mediante el cálculo de los valores de Densidad Espectral de Potencia PSD, es posible determinar las frecuencias a las cuales el perfil del tramo de estudio presenta mayor concentración de potencia. En la Figura 5-9, Figura 5-10 y Figura 5-11 se observa que existe una mayor densidad en todos los tramos a frecuencias espaciales mayores a uno

(1), siendo estas las frecuencias espaciales predominantes impuestas por las cargas dinámicas del vehículo hacia la estructura de pavimento como lo muestra (Hassan & Kerry, 2001). Por otra parte, en este mismo rango de frecuencias, en el tramo TRB se presenta mayor dispersión de los resultados entre los diez (10) ensayos realizados, que se asocia directamente con la longitud corta de este tramo siendo este un factor que no permite en la ejecución de cada ensayo alcanzar y mantener la velocidad promedio requerida para una correcta toma de datos con el equipo.

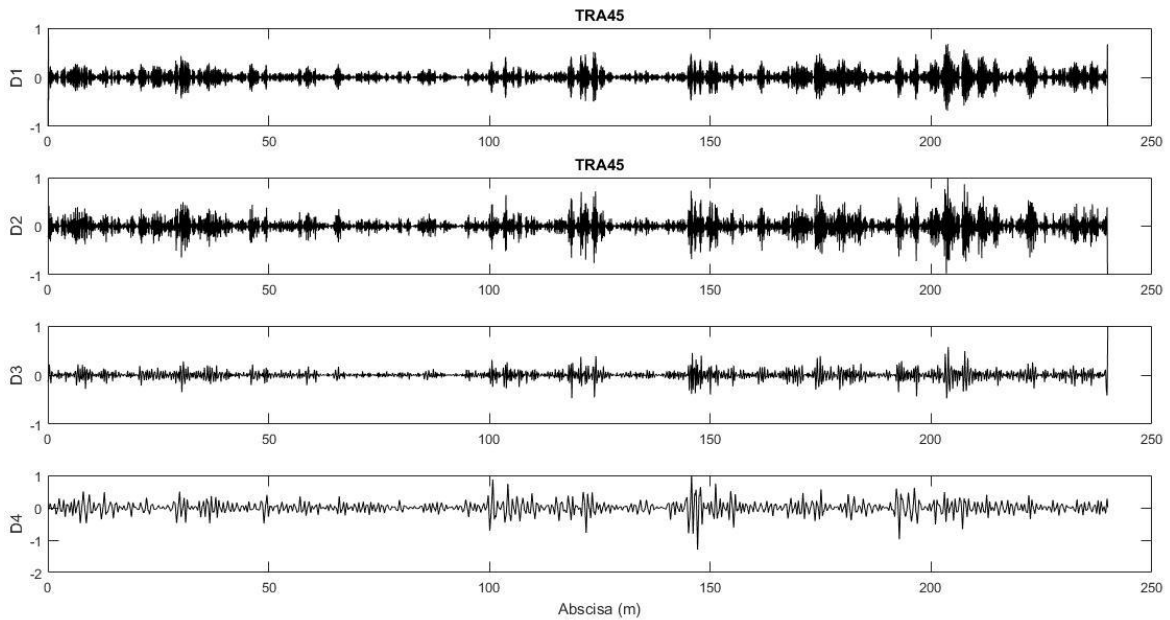
5.1.3 Análisis Wavelet

Como parte del análisis realizado a las señales obtenidas con el PL, se utilizó el método de descomposición mediante transformación discreta Wavelet DWT. Para esto se empleó el programa computacional Matlab, el cual consta de herramientas prácticas para la aplicación de este tipo de transformaciones a señales, con una amplia lista de funciones y de familias tipo Wavelet. Teniendo en cuenta que una de las familias más empleadas para la descomposición de perfiles de vía ha sido la desarrollada por Daubechies (Daubechies 1988;1990) en este trabajo se hace uso de la misma con la función de nivel (DB3) con una frecuencia correspondiente de 0.80 ciclos/m, dado que en anteriores investigaciones ha presentado buenos resultados tal como lo muestra (Wei et al., 2005).

Con este análisis se buscó obtener la descomposición de los perfiles de vía hasta un nivel en que fuera posible identificar de manera clara las irregularidades presentes en cada uno, abarcando todo el espectro de frecuencias detectado en cada ensayo realizado. Para esto se hizo la descomposición en cuatro (4) sub bandas en cada uno de los tramos a una velocidad de 45 km/h. Como se había mencionado en párrafos anteriores se realizó los cálculos únicamente empleando la velocidad de 45 km/h, teniendo en cuenta que para velocidades inferiores se detectó errores en la medición de los datos por parte del equipo PL, con lo cual no se tendría certeza de los resultados obtenidos. La descomposición mediante la Transformación Wavelet en cada segmento de estudio se muestra en las siguientes figuras.

5.1.3.1 Tramo TRA

Figura 5-12: Descomposición wavelet (DB3) en el tramo TRA.



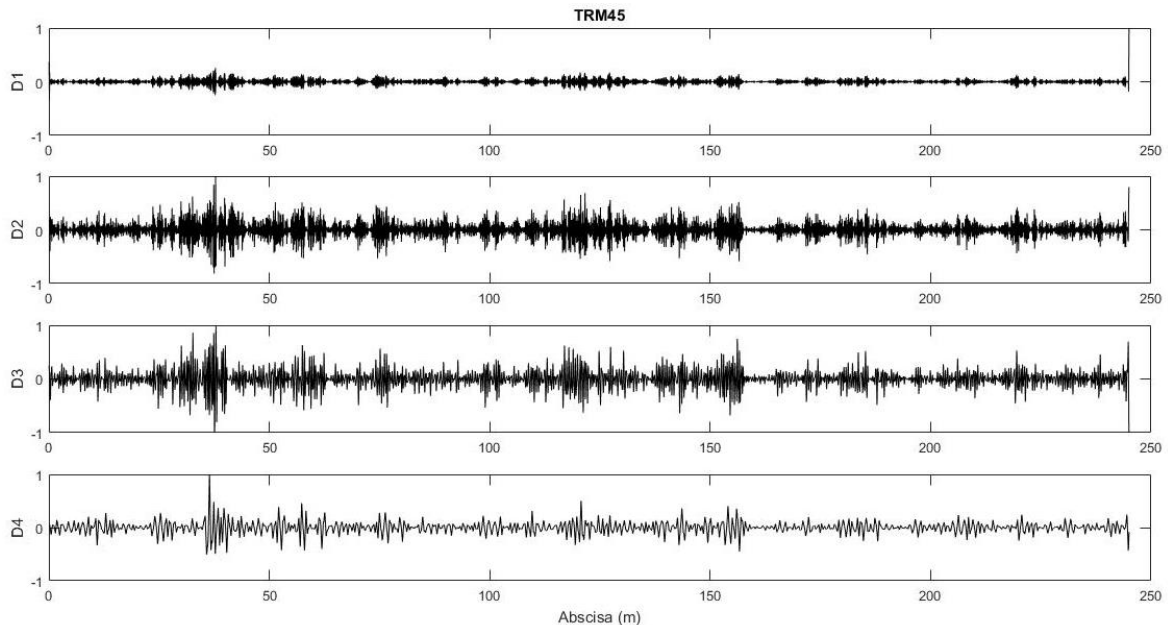
Luego de realizar la descomposición de la señal correspondiente al tramo TRA, se observa que es posible identificar los sectores en donde se presentan las mayores intensidades a lo largo de todo el segmento. Por lo general todo el tramo de estudio muestra picos referentes a las perturbaciones existentes sobre la superficie del pavimento, sin embargo, en las distancias de 8, 29, 100, 121, 145, 155, 175, 192, 207 metros desde el inicio de la vía se tienen los puntos máximos, asociados a los lugares con mayor afectación y presencia de daños graves sobre la superficie, tal como se muestra en el registro fotográfico de la siguiente figura.

Figura 5-13: Lugares con mayores daños sobre el tramo TRA.



5.1.3.2 Tramo TRM

Figura 5-14: Descomposición wavelet (DB3) en el tramo TRM.



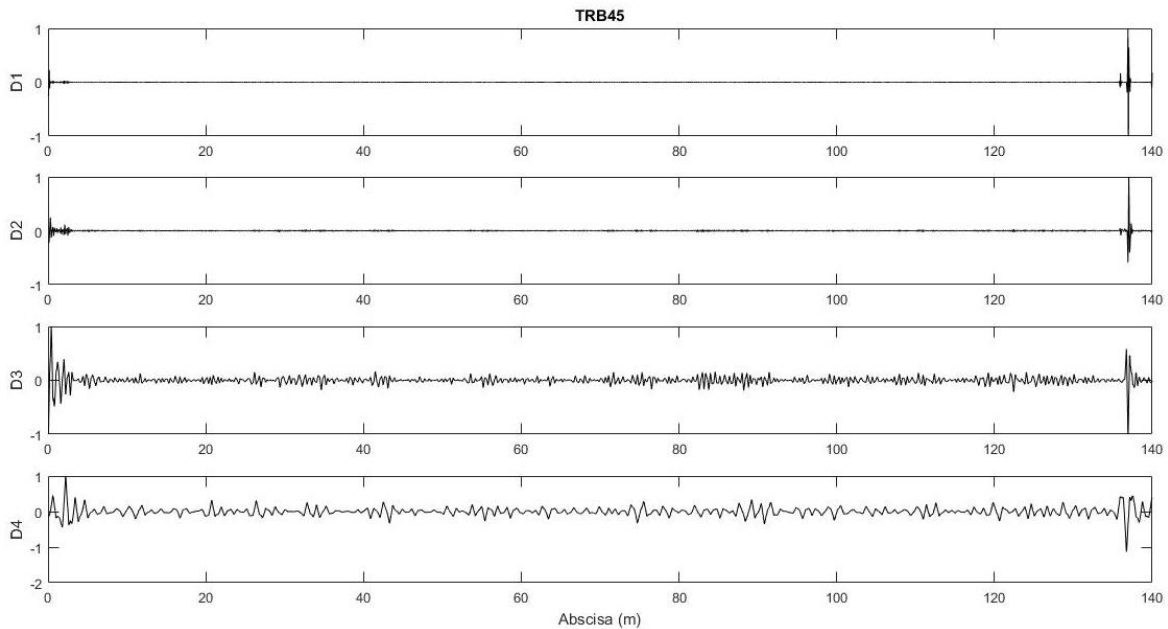
Para el tramo TRM se observa un comportamiento similar al tramo TRA en donde la descomposición de la señal muestra la existencia de irregularidades a lo largo del todo el tramo, sin embargo, los picos máximos ubicados en las abscisas 36, 58, 77, 120, 143, 156 metros desde el inicio de la vía tienen una intensidad más baja con respecto al tramo con un nivel de deterioro alto y son mostrados en la siguiente figura.

Figura 5-15: Lugares con mayores daños sobre el tramo TRM.



5.1.3.3 Tramo TRB

Figura 5-16: Descomposición wavelet (DB3) en el tramo TRB.



En la figura anterior se evidencia de manera clara que la descomposición de la señal en el tramo TRB, muestra bajas intensidades sin puntos máximos a lo largo de este. Únicamente existen picos más altos al inicio y final del tramo asociados a reductores de velocidad y finalización del tramo que inciden directamente en el perfil en estos puntos. Luego del análisis mediante DWT, es claro que para cada sub banda de descomposición es posible discretizar las componentes frecuenciales de cada tramo, observando claramente los sectores en donde se presentan concentraciones relacionadas con el estado superficial en cada uno.

5.2 Evaluación estructural

Luego de obtener los valores de deflexión corregidos por carga y temperatura, se realizaron los cálculos de módulo de la capa de subrasante M_R y numero estructural SN del pavimento empleando la metodología AASHTO del año 1993 y la metodología YONAPAVE¹¹ mostradas en el Capítulo 2 e ítem 2.3.4 Métodos de retrocálculo. Estos

¹¹ Metodología empleada tomada de: Hoffman, Mario S., A Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections, 2003

resultados se presentan en la Figura 5-17 y Figura 5-18 para cada uno de los tramos de estudio. Los valores de deflexión y cálculos de módulo M_R y numero estructural SN son mostrados en el ANEXO C.

Figura 5-17: Módulo de subrasante M_R para cada uno de los tramos evaluados.

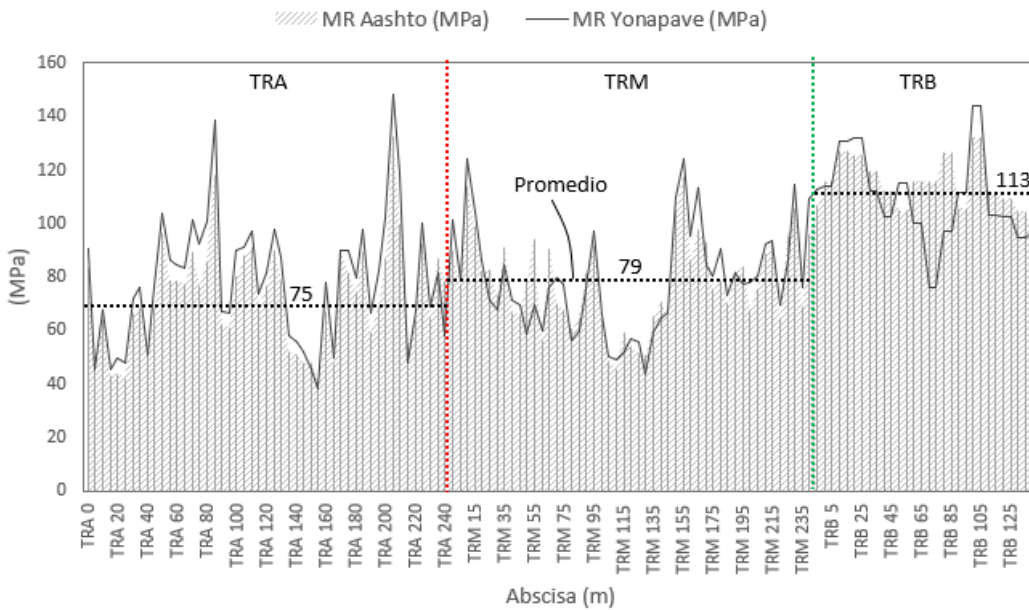
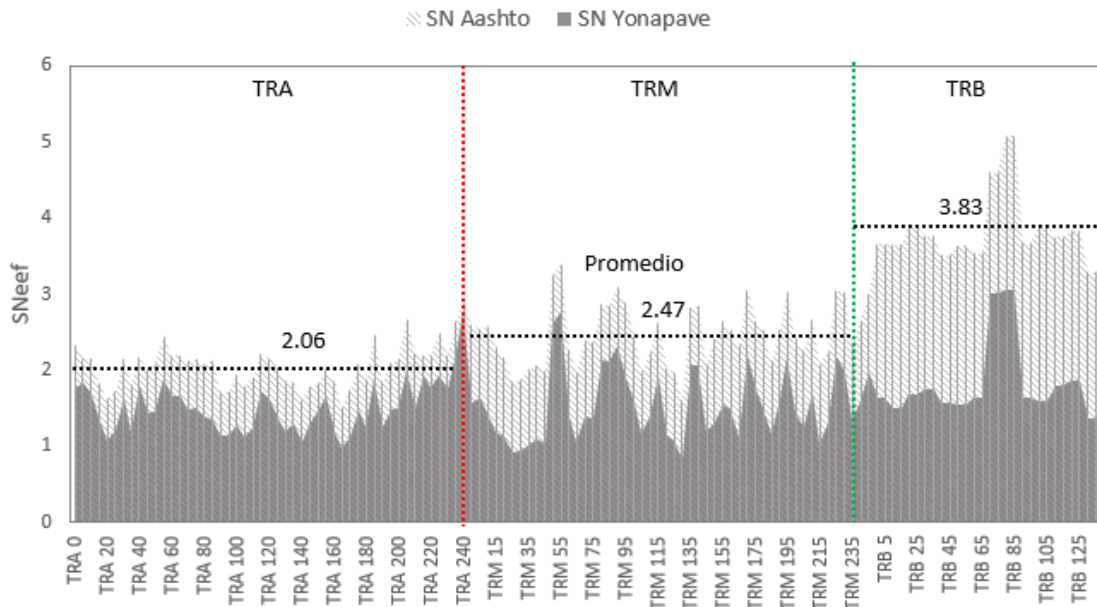


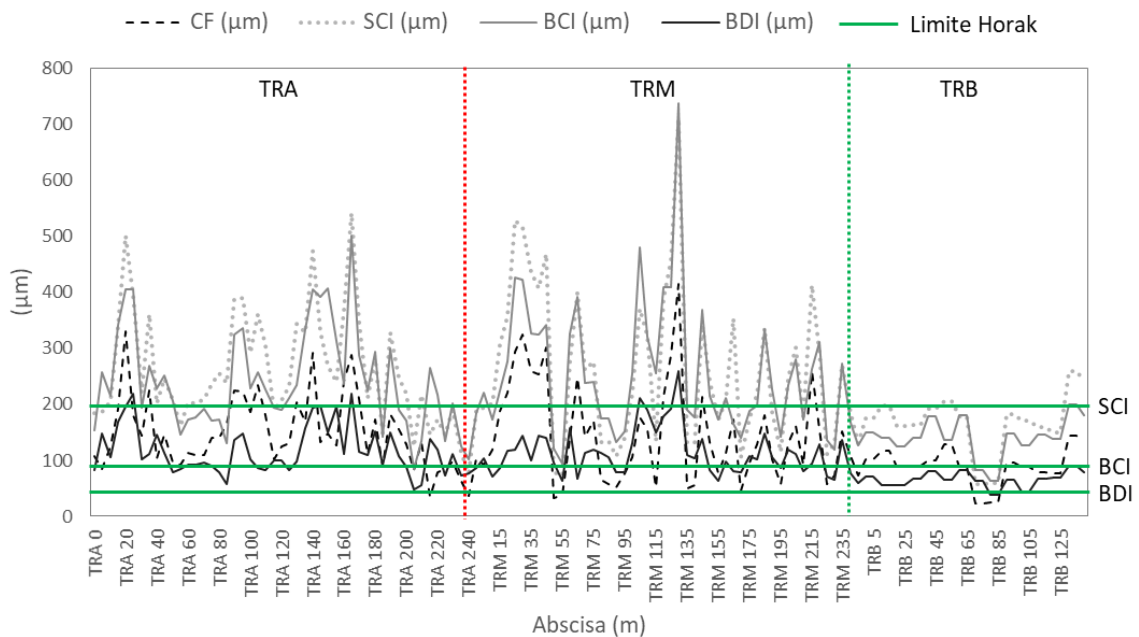
Figura 5-18: Numero estructural SN para cada uno de los tramos evaluados.



De los valores de módulo de la capa de subrasante M_R y numero estructural SN del pavimento calculados, se puede observar que los valores más altos se obtuvieron con la metodología AASHTO, sin embargo, para el tramo TRB con valores más altos respecto a los demás tramos se observa menor diferencia en los resultados entre las dos metodologías.

Adicional a los valores de módulo M_R y numero estructural SN, fueron calculados los parámetros del cuenco de deflexión CF correspondiente a la capa superficial, SCI correspondiente a la capa de base, BCI a la capa de subbase y BDI a las capas inferiores o subrasante. Estos resultados son mostrados en la siguiente figura.

Figura 5-19: Parámetros del cuenco de deflexión CF, SCI, BCI, y BDI.



Respecto a los parámetros del cuenco de deflexión, se observa que los valores de los tres parámetros son superiores a los límites establecidos en la Tabla 2-10 correspondientes a las investigaciones realizadas por el profesor Horak (Horak, 2008) en todos los tramos, con la única excepción en el tramo TRB en donde el parámetro SCI no es superado en la mayoría de todo el segmento. Adicional a esto, en los tramos TRA y TRM se presentan valores similares de BCI y BDI indicando un comportamiento mecánico de las capas de cuerpo y de subrasante similar en ambos tramos.

5.3 Análisis comparativo

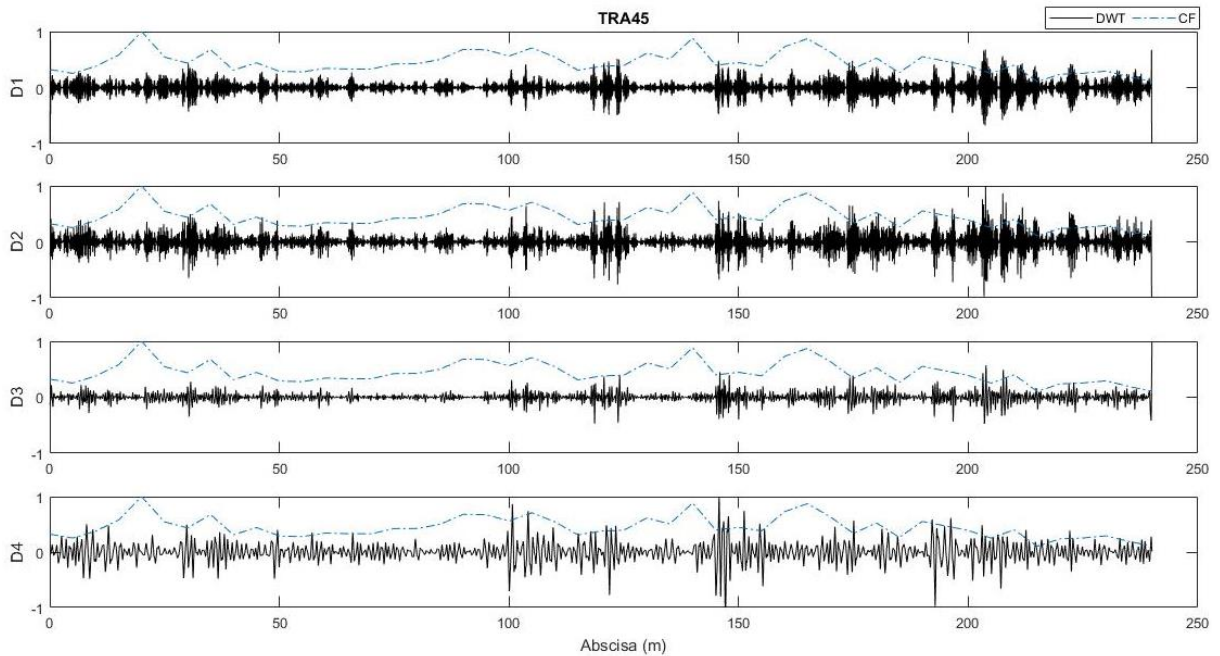
5.3.1 Correlación DWT y CF

A lo largo de todo el documento se ha presentado el análisis superficial y estructural de los tres tramos de estudio con diferentes niveles de deterioro, con el fin de encontrar y evaluar las variables y características que influyen en el tipo de evaluación realizado, buscando además un comportamiento típico de los resultados en cada tramo.

Luego de esto y teniendo en cuenta el objetivo principal de esta investigación, referente a la evaluación de la posible correlación entre el estado superficial y estructural de las estructuras de pavimentos en cada tramo de estudio, en este capítulo se expone el análisis y los resultados obtenidos de la comparación realizada entre los dos tipos de evaluación propuestos. Para esto se empleó el análisis realizado mediante la descomposición DWT y el cálculo de los índices de estado estructural mediante las deflexiones que fueron mostrados en capítulos anteriores.

En las siguientes figuras se muestran las cuatro (4) componentes frecuenciales del análisis de DWT (DB3) obtenida en cada tramo a una velocidad de 45 km/h. En estas componentes es posible observar los lugares en donde existe mayor concentración frecuencial relacionados con la existencia de daños o irregularidades. Superpuesta a cada sub-banda se encuentra la curva del índice de estado superficial CF, siendo este el índice más representativo de aporte estructural de la capa de rodadura que para este caso corresponde a la capa superficial asfáltica.

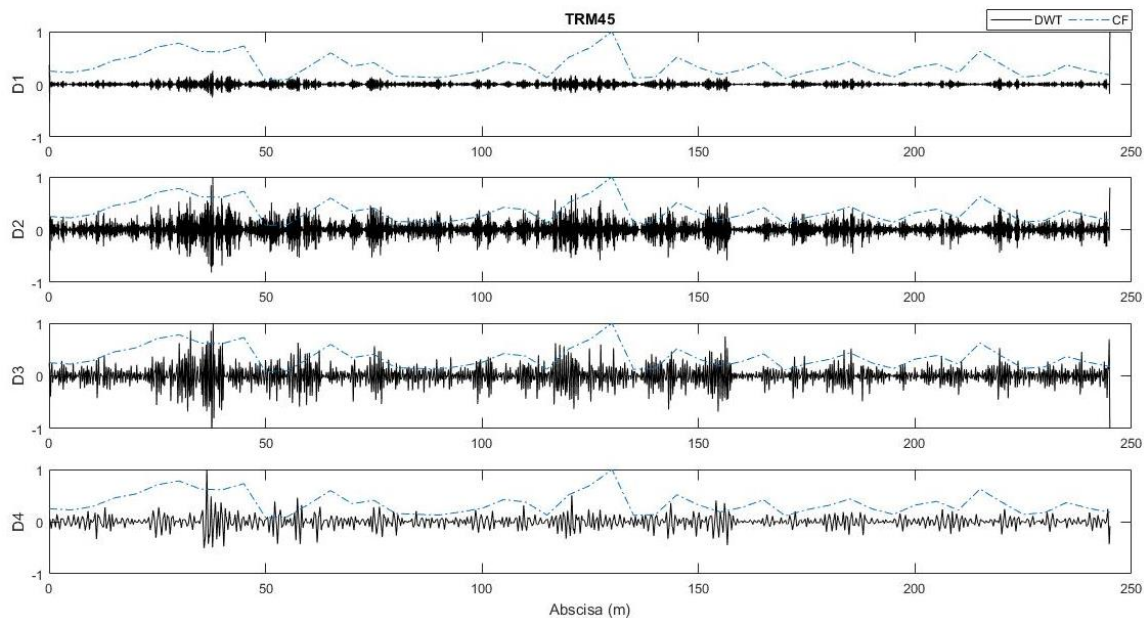
5.3.1.1 Tramo TRA

Figura 5-20: Descomposición DWT junto al con eficiente CF en el tramo TRA a 45 km/h.

En el análisis comparativo realizado en el tramo TRA, se observa que no existe un ajuste perfecto entre las dos variables estudiadas, sin embargo, en algunos sectores y puntos específicos si se presenta una relación, esto se da en las abscisas 30,100 y 200 metros en donde las dos variables muestran picos referentes a niveles de deterioro alto, contrario a los sectores desde 50 a 100 metros y desde 200 hasta 240 metros en donde ambas variables indican una disminución en el nivel de deterioro o irregularidades en el tramo.

Fue calculada la diferencia entre las dos variables en el tramo TRA y se encontró que en promedio la diferencia tiene un valor de 38 % en cada uno de los datos analizados.

5.3.1.2 Tramo TRM

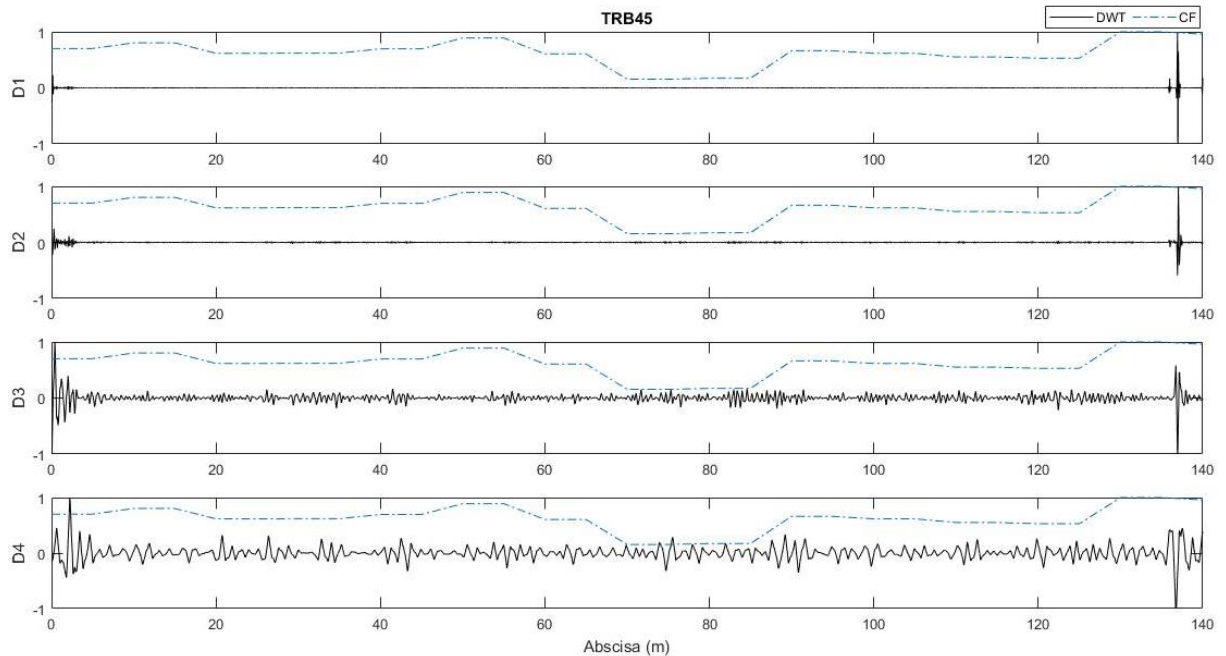
Figura 5-21: Descomposición DWT junto al con eficiente CF en el tramo TRM a 45 km/h.

Para el tramo TRM se obtuvo un resultado similar que el tramo TRA, en donde no fue posible obtener un ajuste perfecto entre el índice CF y la componente de descomposición D4, pero si se obtuvo buena relación en sectores y puntos específicos como se muestra en las abscisas 40, 100, 125 y 175 metros con incrementos en el nivel de deterioro o irregularidades y en sectores desde 75 a 100 metros y 225 hasta 235 en donde se presenta una disminución.

De manera similar al tramo TRA fue calculada la diferencia entre las dos variables para el tramo TRM y se encontró un valor de 29 % en todos los datos evaluados

5.3.1.3 Tramo TRB

Figura 5-22: Descomposición DWT junto al con eficiente CF en el tramo TRB a 45 km/h.



Finalmente, para el tramo TRB se observa que existe un buen ajuste entre las variables analizadas. Únicamente se tiene una disminución en el índice CF en el sector desde 70 hasta 90 metros, que es asumido a la existencia de una tubería o alguna obra de arte presente dentro de la estructura pero que no es visible a simple vista, tal como se había expuesto en capítulos anteriores.

En este caso se encontró un valor de 44 % calculado como la diferencia entre las variables estudiadas, siendo este el valor más alto de todos los tramos.

5.3.2 Índice de condición ICN

Como parte final de esta investigación y cumpliendo con los objetivos planteados, se propone un índice que involucra la evaluación superficial y estructural. En la Tabla 5-7 se presenta el resumen de la evaluación realizada en las tres estructuras de pavimento con diferente nivel de deterioro. Con base en estos valores obtenidos para cada uno de los parámetros estudiados, se calculan los rangos o umbrales mínimos y máximos que permiten caracterizar las estructuras de pavimento. Para cada parámetro evaluado es dado un porcentaje de importancia **PI** teniendo en cuenta el análisis de resultados ya presentado a lo largo de este documento, con el cual, es posible el cálculo del índice de condición **ICN** correspondiente a la evaluación de estado superficial y estructural.

Tabla 5-7: Resumen de parámetros y Rangos de evaluación.

Evaluación	Parámetro	Rango		Tramo			PI (%)
		(Min)	(Max)	TRA	TRM	TRB	
Superficial	1) PCI	20	100	25	44	100	5
	2) Profundidad media de macrotextura (mm)	0.400	0.700	0.507	0.447	0.623	1
	3) Aceleración max (g)	0	1	0.7	0.5	0.3	30
	4) IRI (mm/m)	3	10	9.7	8.9	4.2	7.51
	5) Amplitudes (FFT)	0.004	0.016	0.015	0.01	0.006	3
	6) NPO	2	6	2.32	2.20	5.09	1
	7) NMO	0	3	0.00	0.50	2.50	3
	8) NGO	1	4	1.40	2.53	3.50	1
	9) Clasificación perfil	E	A	D	C	A	5
Estructural	10) Deflexión (D0) (μm)	400	800	738	729	473	15
	11) SCI (μm)	160	265	261	262	168	1
	12) BCI (μm)	135	255	240	253	141	5
	13) BDI (μm)	60	118	117	113	66	1
	14) M_R (MPa)	70	115	75	79	113	8
	15) SN	2	4	2.1	2.5	3.8	13.49

En la ecuación (5-1) se muestra la expresión propuesta para el cálculo del índice ICN, teniendo en cuenta los parámetros de evaluación mostrados en la tabla anterior que presentan un porcentaje de importancia mayor e incluyen de manera implícito o explícito los demás parámetros, como ejemplo de esto se tiene que el numero estructural SN tiene

de manera implícita el valor de módulo resiliente Mr por este motivo el parámetro de modulo no es tenido en cuenta en la ecuación. En la expresión fueron utilizadas funciones matemáticas exponenciales y racionales, que permitieran evaluar mejor cada uno de los parámetros utilizados, dándole un mayor o menor peso o porcentaje dependiendo la importancia de cada uno.

$$ICN = 1.4 \left\{ \left(\frac{0.5}{ACE+0.2} \right) PI_3 + \left[4^{\left(\frac{NMO}{3} \right)} + 0.5 \right] PI_7 + \left[-0.133 - \left(\frac{D_0-400}{400} \right)^3 \right] PI_{10} + \left(\frac{SN-2}{2} \right) PI_{15} \right\} \quad (5-1)$$

Donde,

ICN: Índice de condición.

ACE: Aceleración vertical maxima, g.

NMO: Nota de onda intermedia, $\lambda = 10m$.

D₀: Deflexión maxima, μm .

SN: Número estructural efectivo.

PI_i: Porcentaje de importancia para el parametro i, mostrado en la tabla 5 – 7 .

En la Tabla 5-8 se muestra la escala de clasificación de estado mediante el índice de condición ICN, el cual es evaluado de 0 a 100 siendo 100 una condición excelente y 0 una condición mala. Esta escala se sustenta en los rangos asignados para cada parámetro evaluado según los resultado obtenidos mediante la experimentación realizada, de esta manera una condición con los valores superiores en cada uno de los rangos; condicionaran a una clasificación de estado de vía excelente y por el contrario los valores inferiores a una clasificación de estado de vía mala.

Tabla 5-8: Escala de clasificación índice ICN

Clasificación	ICN
Excelente	68-100
Regular	34-67
Mala	0-33

Como ejemplo, en la ecuación (5-2) se hace el cálculo del índice ICN para el tramo TRA. De la misma forma se realiza el cálculo para los tramos TRM y TRB.

$$ICN = 1.4 \left\{ \left(\frac{0.5}{0.7+0.2} \right) 30 + \left[4^{\left(\frac{0.00}{3} \right)} + 0.5 \right] 3 + \left[-0.133 - \left(\frac{738-400}{400} \right)^3 \right] 15 + \left(\frac{2.1-2}{2} \right) 13.49 \right\} \quad (5-2)$$

$$ICN = 15, \text{ tramo TRA}$$

Finalmente, en la Tabla 5-9 se presenta la clasificación obtenida para los tres tramos de estudio, en donde los tramos TRA y TRM son clasificados como estructuras de pavimento mala y el tramo TRB como una estructura excelente.

Tabla 5-9: Clasificación tramos de estudio.

Tramo	ICN	Clasificación
TRA	15	Mala
TRM	27	Mala
TRB	72	Excelente

De la tabla anterior se observa que el tramo de estudio TRM seleccionado inicialmente como un tramo en estado regular, en la clasificación propuesta mediante el índice de condición ICN, este tramo se encuentra en una condición Mala. Esta clasificación es representativa respecto a los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros de estudio tenidos en cuenta en esta investigación.

6. Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Tomando como base las necesidades existentes correspondientes al tema vial de nuestro país, esta investigación analiza uno de los temas de importancia como lo es la evaluación estructural y superficial de las estructuras de pavimento.

La campaña experimental se realizó en tres (3) tramos o segmentos de vía; el tramo TRA con un nivel de deterioro alto, el tramo TRM con nivel de deterioro regular y el tramo TRB con un nivel de deterioro bajo, al interior de la Universidad Nacional de Colombia. Para esto fueron empleados equipos de alta tecnología apropiados para este tipo de evaluación, cumpliendo con los requerimientos establecidos por cada normativa correspondiente.

Los análisis realizados en esta investigación están en función de la evaluación superficial y estructural de los tramos de estudio, en donde cada una de estas contempla las siguientes actividades:

Tabla 6-1: Evaluación superficial y estructural.

Superficial	Estructural
Auscultación visual <ul style="list-style-type: none"> • Índice PCI 	Auscultación de capas <ul style="list-style-type: none"> • Espesores mediante GPR
Rugosidad <ul style="list-style-type: none"> • Macrotextura superficial (H) 	Capacidad estructural <ul style="list-style-type: none"> • Deflexiones mediante FWD • Análisis de parámetros de cuenco de deflexión • Cálculo de módulo resiliente M_R • Cálculo de numero estructural SN
Regularidad <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de Aceleraciones verticales • Análisis de perfil de vía • Análisis espectral mediante FFT • Análisis Espectral de Potencia PSD • Análisis de Notas de Onda NPO, NMO y NPO • Clasificación vial ISO 8608 • Índice de Regularidad IRI 	

Teniendo en cuenta el segundo objetivo propuesto en esta investigación, relacionado con la caracterización y condiciones de servicio de cada uno de los tramos de estudio, a continuación, se exponen las actividades y análisis realizados:

Como parte de la evaluación superficial, se realizó una inspección visual encontrando que en los tramos TRA y TRM prevalecen los daños de tipo falla en bloque, dando como resultado valores de PCI de 25 y 44 correspondientes a un estado muy malo y malo respectivamente, y para el tramo TRB un PCI igual a 100 para un estado bueno.

Fueron realizados ensayos de macrotextura superficial empleando el círculo de arena. Estos ensayos se llevaron a cabo en sectores definidos para cada uno de los segmentos de estudio. Como resultados se obtuvo que el tramo con mayor profundidad media de macrotextura es el tramo con menor nivel de deterioro TRB, definiéndose como una macrotextura más rugosa seguido por el tramo TRA y por último con menor profundidad media el tramo TRM clasificada como macrotextura lisa. Este resultado se asocia con el tiempo en servicio de cada una de estas estructuras de pavimento en donde el tramo TRB fue construido recientemente y los tramos TRM y TRA ya tienen un periodo de uso más antiguo.

En el análisis de la regularidad, se obtuvo curvas de aceleración vertical y perfiles de vía representativos al estado real de cada estructura de pavimento. Se realizó un análisis de las aceleraciones verticales correspondientes a las vibraciones del vehículo inducidas por las irregularidades de la superficie y el sistema de amortiguación del vehículo, lo cual es corregido de manera adecuada mediante el modelo matemático empleado para el cálculo de perfil de vía de cada tramo de estudio.

Mediante el cálculo del parámetro estadístico denominado coeficiente de variación se determinó que existe una buena repetitividad entre los ensayos realizados con el PL, con valores del coeficiente inferiores al 25 % en los tramos TRA y TRM.

Se encontró una excepción en el tramo TRB en donde el coeficiente de variación es más alto, dicho resultado es relacionado directamente con la longitud corta de este, según como lo menciona en sus investigaciones (Lushnikov & Lushnikov, 2017) que es necesario evaluar tramos con longitudes superiores a los 500 metros. Sin embargo, teniendo en cuenta que las vías en la ciudad de Bogotá identificadas cada una con un Código de

Identificación Vial denominado CIV, presentan longitudes inferiores a los 100 metros de longitud, esta investigación es necesaria para el entendimiento claro de este tipo de vías. Por otra parte, los valores altos de variación en el tramo TRB también son asociados a las limitaciones del equipo PL con relación a la toma de datos a velocidades inferiores a 30 km/h.

Se profundizó en el análisis de señales de perfiles viales por medio de transformaciones matemáticas. Se obtuvo los espectros de aceleración mediante el empleo de la Transformación Rápida de Fourier, observando una buena repetitividad entre los ensayos.

Además, fue posible el análisis de señales de regularidad utilizando el cálculo de la Densidad Espectral de Potencia PSD, encontrando resultados acordes al estado real de los tramos estudiados en donde el tramo TRA presenta mayores amplitudes respecto a los demás.

Este resultado también es presentado por medio de las notas de onda pertenecientes a la clasificación empleada directamente por el equipo PL en donde la nota de onda intermedia NMO es un indicador adecuado de la condición de cada estructura evaluada. Mediante el cálculo de las gráficas de PSD y el uso de la clasificación de perfiles viales ISO 8608 del año 2016, se determinó las frecuencias espaciales en las cuales el perfil de cada tramo presenta mayores concentraciones de potencia. De esta manera se observó que en todos los tramos existe una mayor densidad de potencia en frecuencias espaciales superiores a uno (1/m), las cuales son impuestas por las cargas dinámicas del vehículo hacia la estructura de pavimento tal como lo muestra en su investigación (Hassan & Kerry, 2001).

En el análisis de señales de descomposición mediante la Transformación Discreta Wavelet DWT, empleando la familia Daubechies con una función de nivel DB3, una frecuencia de 0.80 ciclos/m y una categoría de cuatro (4) sub-bandas, fue posible la identificación de las irregularidades existentes en la superficie de cada tramo de estudio con mayor precisión.

En la evaluación estructural, fueron empleadas las metodologías de retrocálculo propuestas por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras AASHTO y la metodología propuesta por el profesor Hoffman (Hoffman, 2003) denominada YONAPAVE, para el cálculo de módulo resiliente de subrasante M_R y número estructural SN. Se obtuvieron valores de M_R y SN mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 6-2: Valores de retrocálculo AASHTO y YONAPAVE

Tramo	AASHTO		YONAPAVE	
	M _R (MPa)	SN	M _R (MPa)	SN
TRA	73	2.1	79	1.5
TRM	79	2.5	80	1.6
TRB	116	3.9	109	1.8

De los valores presentados en la tabla anterior se puede observar que, existe un incremento de cada uno conforme la estructura de pavimento presenta menor deterioro. Además, los valores de módulo M_R presentan diferencias bajas entre las metodologías AASHTO y YONAPVE con un aumento de 1.5 a 8 %, diferente a los valores de número estructural SN que si presentan mayores diferencias de 40 a 116 %.

Se realizó una comparación de los parámetros obtenidos del cuenco de deflexión con los límites establecidos en la Tabla 2-10 correspondientes a las investigaciones realizadas por el profesor Horak, (Horak, 2008), con lo cual se validó los rangos de valores en todos los tramos. Los parámetros calculados para cada segmento de vía superan los límites, excepto el parámetro SCI en el tramo TRB.

Teniendo en cuenta el tercer objetivo planteado al inicio de esta investigación, relacionado con los rangos y umbrales de medición junto con la correlación entre la evaluación estructural y superficial de las estructuras de pavimento; se realizaron los cálculos correspondientes de correlación entre la evaluación superficial con los resultados del análisis de señales mediante Transformación Wavelet DWT y la evaluación estructural con el índice de estado superficial CF. De esta manera es posible concluir, que existe una buena similitud entre las dos variables estudiadas identificando los sitios con mayor concentración de daños e irregularidades.

Se emplearon todos los resultados obtenidos de los diferentes parámetros de evaluación superficial (IRI, PCI, macrotextura, aceleración vertical, entre otros) y estructural (deflexiones, espesores de capas, módulo resiliente, numero estructural, entre otros), tenidos en cuenta en esta investigación, en la definición de los rangos o umbrales, logrando obtener un ajuste adecuado de estos a las estructuras de pavimento evaluadas en esta investigación.

Se definió un índice de condición propio denominado ICN, asociando los parámetros de la condición superficial y estructural, con el cual es posible establecer una clasificación numérica de 0 a 100 siendo 100 una condición excelente y 0 una condición mala. De esta manera se obtuvo resultados más aproximados a las características y condiciones reales de cada tramo evaluado, en donde los tramos TRA y TRM fueron clasificados en una condición mala con índices ICN de 15 y 27 respectivamente y el tramo TRB con un índice ICN igual a 72 para una clasificación de condición excelente.

6.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta la influencia de la longitud de los tramos en los resultados del análisis de regularidad, se recomienda realizar una campaña experimental que incluya tramos con longitudes superiores a 500 metros.

En el análisis realizado mediante las Transformadas Discretas Wavelet DWT, fue utilizada la familia Wavelet correspondiente al tipo Daubechies DB3 por ser una de las familias con mejores resultados en investigaciones ya realizadas. Sin embargo, es conveniente realizar análisis con diferentes familias Wavelet como la familia Haar, Meyer, Symlets, Gaussian, entre otras.

Debido a que esta investigación se realizó únicamente en estructuras de pavimento de tipo flexible con superficie de rodadura en concreto asfáltico, se recomienda adelantar trabajos de investigación en otro tipo de estructuras con superficies en concreto hidráulico y afirmado.

7. Referencias bibliográfica

- Abelló, N. (2015). Una infraestructura vial que avanza y se afianza. In *Ministerio de Transporte de la Republica de Colombia*. Bogotá: Publicacion, La Republica.
- Alhasan, A., White, D. J., & De Brabanterb, K. (2016). Continuous wavelet analysis of pavement profiles. *Automation in Construction*, 63, 134–143.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.013>
- American Association of State Highway and Transportation Officials, W. D. (1993). *AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures*. Washington D.C.
- American Society for Testing and Materials ASTM D 6433. (2007). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials ASTM D950. (2004). *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling*. West Conshohocken.
- Andren, P. (2015). Power spectral density approximations of longitudinal road profiles. *International Journal of Vehicle Design*, 40(No 1/2/3, January 2006).
<https://doi.org/10.1504/IJVD.2006.008450>
- ApuntesDeSeñales. (2006). *Introducción a la Transformada Wavelet Introducción*. Pamplona, España. Retrieved from
<http://www.exa.unicen.edu.ar/escuelapav/cursos/wavelets/apunte.pdf>
- Arriaga Patiño, M. C., Anguas, P. G., & Rico Rodriguez, A. (1998). Índice Internacional De Rugosidad En La Red Carretera De México, (108), 1–57. Retrieved from
<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>
- Benedetto, A., & Tosti, F. (2013). Inferring bearing ratio of unbound materials from dielectric properties using GPR : the case of Runaway Safety Areas. *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, ASCE, 1336–1347.
- Benedetto, A., Tosti, F., Schettini, G., & Twizere, C. (2011). Evaluation of geotechnical

- stability of road using GPR. *2011 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2011*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2011.5963858>
- Caicedo, B., Murillo, C. A., & Trisancho, J. A. (2017). "Medida Perfil Longitudinal de un Pavimento Mediante Navegacion Inercial," (September 2017), 19–26.
- Caro, F., & Peña, G. (2012). Análisis y criterios para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica. *Intekhnia*, 7(51), 57–72.
- Chen, D., Roohi Sefidmazgi, N., & Bahia, H. (2015). Exploring the feasibility of evaluating asphalt pavement surface macro-texture using image-based texture analysis method. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 405–420.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1016547>
- Cote, L. J., Kozin, F., & Bogdanoff, J. L. (1996). 'Introduction to a statistical theory of land locomotion - I'. *Journal of Terramechanics*, 2, 17–23.
- Goenaga, B., Fuentes, L., & Mora, O. (2017). Evaluation of the methodologies used to generate random pavement profiles based on the power spectral density : a n approach based on the International Roughness Index Análisis de las metodologías utilizadas para generar perfiles aleatorios, 2017, 49–57.
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n1.57277>
- Gomez, O., & Murillo, C. (2015). *Criterios de optimización del diseño de sobrecarpetas asfálticas para Bogotá, basados en ensayos no destructivos*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/48570/>
- Hasanuddin, Setyawan, A., & Yulianto, B. (2018). Evaluation of Road Performance Based on International Roughness Index and Falling Weight Deflectometer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 333(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012090>
- Hassan, R., & Kerry, M. (2001). Estimating dynamic loading of pavements from surface profile properties. *Road and Transport Research*, 10(3).
- Hoffman, M. S. (2003). A Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible

Pavements Based on FWD Deflections. *Engineering Consulting, Israel*, 1–13.

- Hoffman, M. S., & Aguila, P. M. D. E. L. (1985). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos).
- Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *South African Institute of Civil Engineering Journal*, 50(2), 2–9.
- Horak, E., & Emery, S. (2006). Falling Weight Deflectometer Bowl Parameters as Analysis Tool for Pavement Structural Evaluations. *22nd Australian Road Research Board Conference*, 15. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=795808>
- Houbolt, J. C., Walls, J. ., & Smiley, R. F. (1955). "On spectral analysis of runway roughness and loads developed during taxiing." *Technical Note 348, Langley Aeronautical Laboratory, National Advisory Committee for Aeronautics, Langley Field, VA*.
- Hu, F. (2006). *Development and evaluation of an inertial based pavement roughness measuring system*. University of South Florida.
- ISO. (2016). Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data - International Organization For Standardization, 2016.
- J.C. Wambold, L.E. Defrain, R.R. Hegmon, K. Mcghee, J. Reichert, E. B. S. (1981). State of the Art of Measurement and Analysis of Road Roughness. *Transportation Research Procedia*.
- James, J. F. (2011). *A Student's Guide to Fourier Transforms* (3th editon). New York: Cambridge University Press.
- Lahouar, S., & Al-qadi, I. L. (2007). Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. *NDT and E International*, 41, 69–81.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.09.001>
- Liu, B. (2009). *159.735 Studies in Parallel and Distributed System-Parallel Fast Fourier*

- Transform*. University of New Zealand.
- Losa, M., Leandri, P., & Bacci, R. (2008). Monitoring and Evaluating Performance Requirements of Flexible Road Pavements. *Transportation and Development Innovative Best Practices, 2008*, 1–6.
- Lushnikov, N., & Lushnikov, P. (2017). Methods of Assessment of Accuracy of Road Surface Roughness Measurement with Profilometer. *Transportation Research Procedia, 20*(September 2016), 425–429. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.069>
- Meier, R. W. (1995). Backcalculation of flexible pavement moduli from falling weight deflectometer data using artificial neural networks. *ProQuest Dissertations and Theses*, (April), 239-239 p. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/304208449?accountid=41453>
- Michael W Sayers, Thomas D. Gillespie, and W. D. O. P. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. World Bank Technical Paper Number 46*. Retrieved from <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf?sequence=2>
- Miller, T., Swiertz, D., Tashman, L., Tabatabaee, N., & Bahia, H. (2012). Characterization of Asphalt Pavement Surface Texture. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2295*, 19–26. <https://doi.org/10.3141/2295-03>
- Moreno, L. J. (2016). *Influencia de la velocidad en la medición de IRI con el equipo perfilometro láser*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Osgood, B. (2019). *Lectures on the Fourier Transform and its Applications*. (Committee, Ed.). Providence Rhode Island: American Mathematical Society.
- Park, S. S., Bobet, A., & Nantung, T. E. (2018). *Correlation between Resilient Modulus (MR) of Soil, Light Weight Deflectometer (LWD), and Falling Weight Deflectometer (FWD)*. West Lafayette-Join Transportation Research Program Publication No. FHWA/IN/TRP-201/08. <https://doi.org/10.5703/1288284316651>
- Pawar, P. R., Tom, A., & Saraf, M. R. (2018). IRI (International Roughness Index): An Indicator Of Vehicle Response. *Materials Today: Proceedings, 5*(5), 11738–11750.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.143>

Poularikas, A. D. (2010). *Transforms and Applications Handbook*. (T. and F. Group, Ed.) (3rd ed). New York.

Praticò, F. G., & Vaiana, R. (2015). A study on the relationship between mean texture depth and mean profile depth of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 101, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.021>

Rajaei, M., Sefidmazgi, N., & Bahia, H. (2014). Establishment of Relationship Between Pavement Surface Friction and Mixture Design Properties. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2457(1), 114–120. <https://doi.org/10.3141/2457-12>

Sayers, M W, & Karamihas, S. M. (1998). *The little book of profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*.

Sayers, Michael W. (1986). On the Calculation of International Roghness Index from Longitudinal Road Profile. *Transportation Research Record*, 12.

Sayers, Michael W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. a V. (1986). *The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. The World Bank Technical Paper*.

Stéphane, M. (2009). *The Fourier Kingdom. A Wavelet Tour of Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.00006-9>

Stokoe, H., Hudson, R., & Miner, B. F. (1991). *The Falling Weight Deflectometer And Spectral Analysis of Surface Waves Test For Characterizing Pavement Moduli: A Case Study*. Center for Transportation Research The University of Texas, Austin-Texas.

Thenoux, G., & Gaete, R. (1995). Evaluación Técnica Del Pavimento Y De Refuerzo Asfáltico. *Revista Ingeniería de Construcción*, (14), 22. <https://doi.org/10.7764/ricuc.0.14.364>

Universidad Nacional de Colombia, I., & INVIAS, I. (2006). *Estudio e investigación del*



- estado actual de manual para la inspección visual de las obras*. Convenio Interadministrativo 0587-03, Bogotá D.C.
- Vargas, G. B., & Obando, D. S. (2010). Definición De Rangos Para La Clasificación Estructural Y Funcional De La Red Vial Nacional De Costa Rica, *20*, 109–119.
- Villa, C. A. C. (2007). Predicción del índice de rugosidad internacional en pavimentos flexibles usado redes neuronales artificiales, *71*, 39–47.
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2008.04.008>
- W. Carey, H. Huckins, R. L. (1962). Slope Variance as a Measure of Roughness And the CHLOE Profilometer. *Highway Research Board Conference on the AASHO Road Test*, (St Louis MO United States).
- Wei, L., Fwa, T. F., & Zhe, Z. (2005). Wavelet Analysis and Interpretation of Road Roughness. *Journal of Transportation Engineering*, *131*(2), 120–130.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:2\(120\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:2(120))

8. Anexos



8.1 Anexo A: Auscultación visual

Tomado como referencia la metodología de cálculo de Índice de Condición de Pavimento PCI según la normativa ASTM D 6433, se presenta a continuación el cálculo del valor de PCI de cada uno de los tramos de estudio, mediante el uso del software Unal-PCIA desarrollado por el ingeniero Luis Ricardo Vásquez de la Universidad del Cauca.

8.1.1 Tramo TRA

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE BOGOTÁ											
		ESTUDIO DE CONDICIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS ASFALTICOS - ASTM 6433											
TRAMO:		TRA-CAPILLA			SECCIÓN:		S1		UNIDAD DE MUESTRA:		U1, U2 Y U3		
RESPONSABLE:		NICOLÁS HERNÁNDEZ				AREA:		2136		FECHA:		27-feb-18	
1. Piel de cocodrilo (PL)	11. Parcheo (P)	ESQUEMA: 											
2. Exudación (E)	12. Pulimiento de agregados (PA)												
3.Fallas en bloque (FB)	13. Baches (B)												
4. Abultamiento y Hundimientos (AH)	14. Cruce de via férrea (CF)												
5. Corrugación (C)	15. Ahuellamiento (H)												
6. Depresión (D)	16. Desplazamiento (DZ)												
7. Grieta en borde (GB)	17. Grieta parabolica slippage (GP)												
8. Grieta de reflexion de junta (GR)	18. Hinchamiento (HI)												
9. Desnivel carril / berma (DB)	19. Desprendimiento de agregados (DA)												
10. Grietas long y transv. (G)													
DAÑO/SEVERIDAD	CANTIDAD										TOTAL	DENSIDAD %	VALOR DEDUCIDO
10. GT H	16	10	20	30							76	8.90	15
3. FB H	40	30									70	8.19	29
3. FB H	53.7	32.4	20	20	20						146.1	17.10	59
13. B H	1	1.5	1	1.5	1						6	0.70	33
11. P H	4	6.4	3	5.3	14	4	9				45.7	5.35	37
4. AH H	20										20	2.34	41
4. AH H	2										2	0.23	59
3. FB H	164.8	21									185.8	21.75	40
11. P H	11.2	18.6									29.8	3.49	17
13. B H	4	4									8	0.94	78
11. P H	30	30									60	14.04	30
11. P H	6.9	10.8	4	15	30						66.7	15.61	36
10. GT M	20	20	30								70	16.39	35
3. FB H	39	13.8	10	30	30						122.8	28.75	31
1. PL H	8.6	2									10.6	2.48	60

8.1.2 Tramo TRM

		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE BOGOTÁ													
		ESTUDIO DE CONDICIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS ASFALTICOS - ASTM 6433													
TRAMO:		TRM-CANCHAS			SECCIÓN:		S1		UNIDAD DE MUESTRA:		U1 Y U2				
RESPONSABLE:		NICOLÁS HERNÁNDEZ			AREA:		1300.5		FECHA:		27-feb-18				
1. Piel de cocodrilo (PL)		11. Parcheo (P)			ESQUEMA: 										
2. Exudación (E)		12. Pulimiento de agregados (PA)													
3. Fallas en bloque (FB)		13. Baches (B)													
4. Abultamiento y Hundimientos (AH)		14. Cruce de via férrea (CF)													
5. Corrugación (C)		15. Ahuellamiento (H)													
6. Depresión (D)		16. Desplazamiento (DZ)													
7. Grieta en borde (GB)		17. Grieta parabolica slippage (GP)													
8. Grieta de reflexion de junta (GR)		18. Hinchamiento (HI)													
9. Desnivel carril / berma (DB)		19. Desprendimiento de agregados (DA)													
10. Grietas long y transv. (G)															
DAÑO/SEVERIDAD		CANTIDAD										TOTAL	DENSIDAD %	VALOR DEDUCIDO	
10. GL	H	2	4	2	4	15	5	25					57	8.77	15
10. GL	M	5	5										10	1.54	5
10. GT	H	3	5	4	2	10	10	25					59	9.07	16
10- GT	M	4	5										9	1.38	5
13. B	H	0.36	0.3	0.2	1	2							4	0.59	20
3. FB	H	3	2	2	3	10	30						50	7.69	9
3. FB	H	4	4	20.1	4	20							52.1	8.01	20
11. P	M	21	3	25									49	7.54	19
13. B	M	4	3	2									9	1.38	30

PROCESADOR AUTOMÁTICO DE DATOS PARA EL CÁLCULO DEL PAVEMENT CONDITION INDEX

Por: Luis Ricardo Vásquez

Varela

Pavimentos

asfálticos

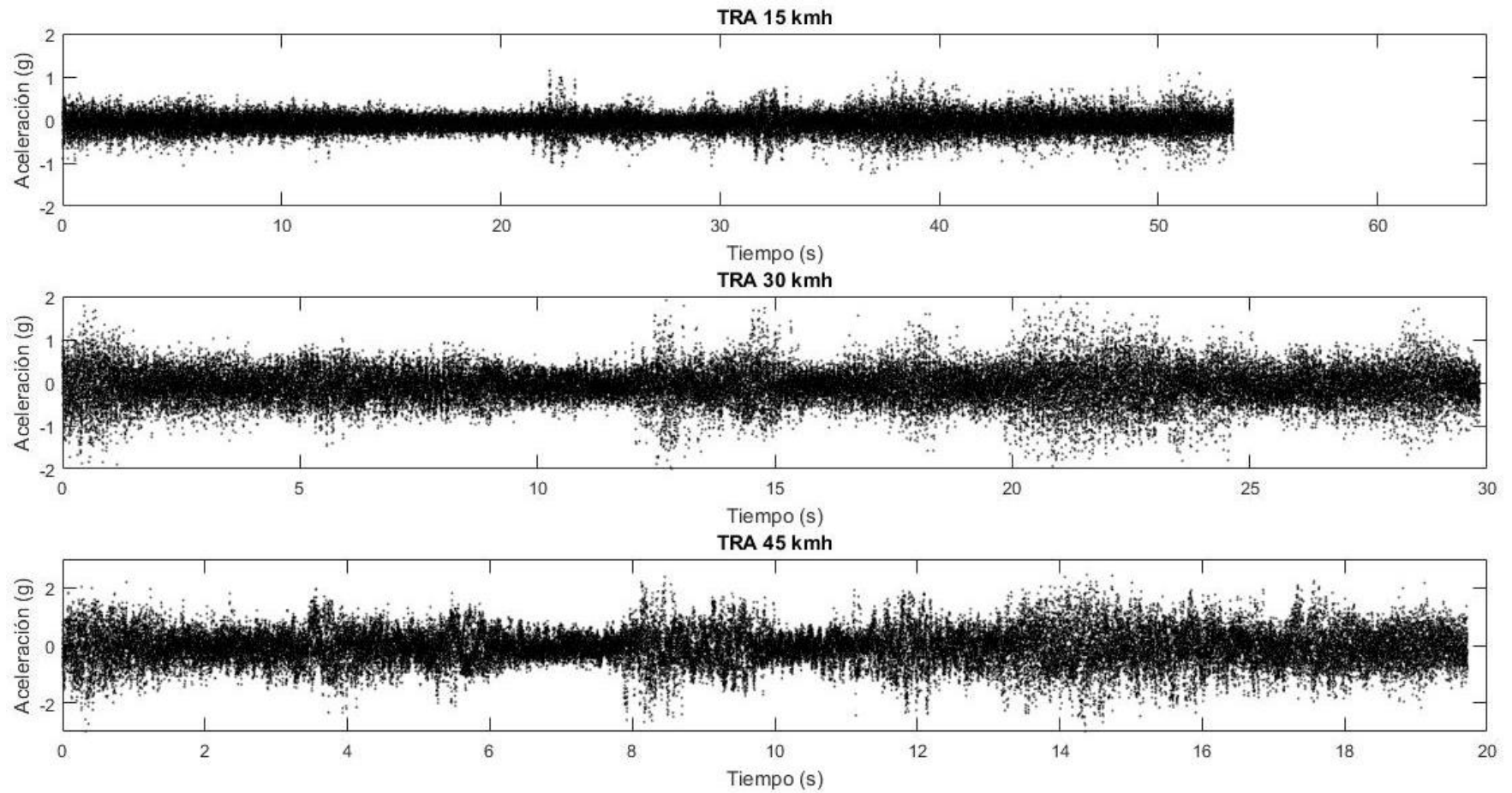
=====
 Archivo IV_Datos_csv.csv
 =====

Tramo	No.	Inicio	Final	PCI	Piel de cocodrilo (m ²)	Parcheo (m ²)	Huecos (un)
TRB	1	0	70	100	0	17	25
TRB	2	70	140	100	0	0	0
TRM	1	0	43	42	0	0	0
TRM	2	43	86	41	0	0	0
TRM	3	86	129	36	0	3	86
TRM	4	129	172	58	0	0	0
TRM	5	172	215	58	0	0	0
TRM	6	215	258	26	0	49	9
TRA	1	0	29	25	0	0	0
TRA	2	29	59	39	0	0	0
TRA	3	59	88	17	10	6	0
TRA	4	88	118	33	0	45	0
TRA	5	118	148	19	0	136	0
TRA	6	148	177	29	0	0	0
TRA	7	177	207	17	0	29	0
TRA	8	207	236	21	0	0	0
TRA	9	236	267	22	0	0	0

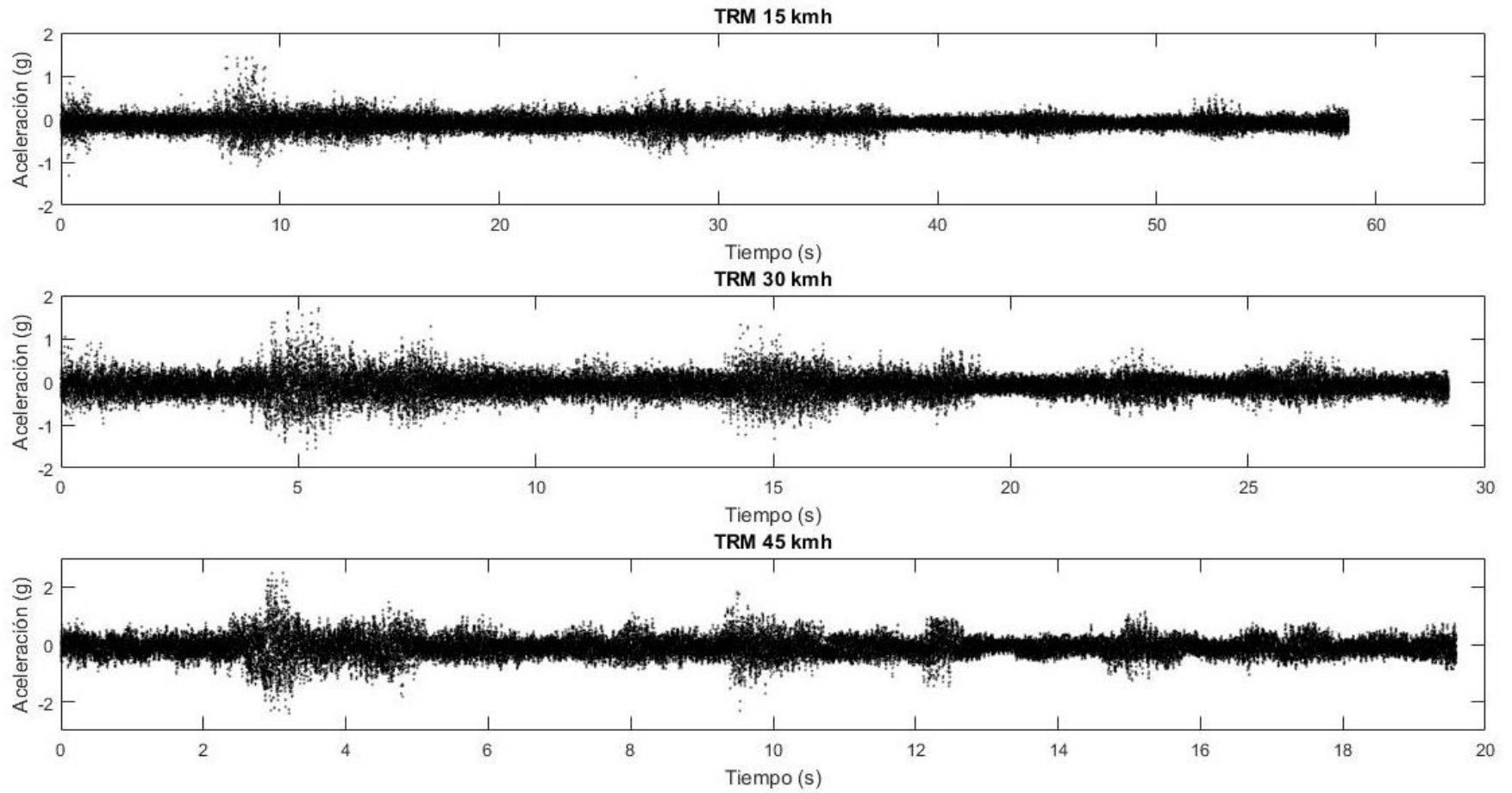
8.2 Anexo B: Resumen datos obtenidos con el PL

A continuación, se presenta un resumen de los datos de aceleración y perfil obtenidos de los diez (10) ensayos con el equipo PL en cada uno de los tramos de estudio, con los cuales se realizaron los cálculos referentes a la evaluación de regularidad. El resumen se presenta en gráficas y no en tablas debido a que la cantidad de datos supera las 15000 filas y no es adecuado presentarlos de esa manera. En el anexo "Perfilómetro "entregado de forma magnética (CD), se encuentra el reporte de todos los ensayos realizados.

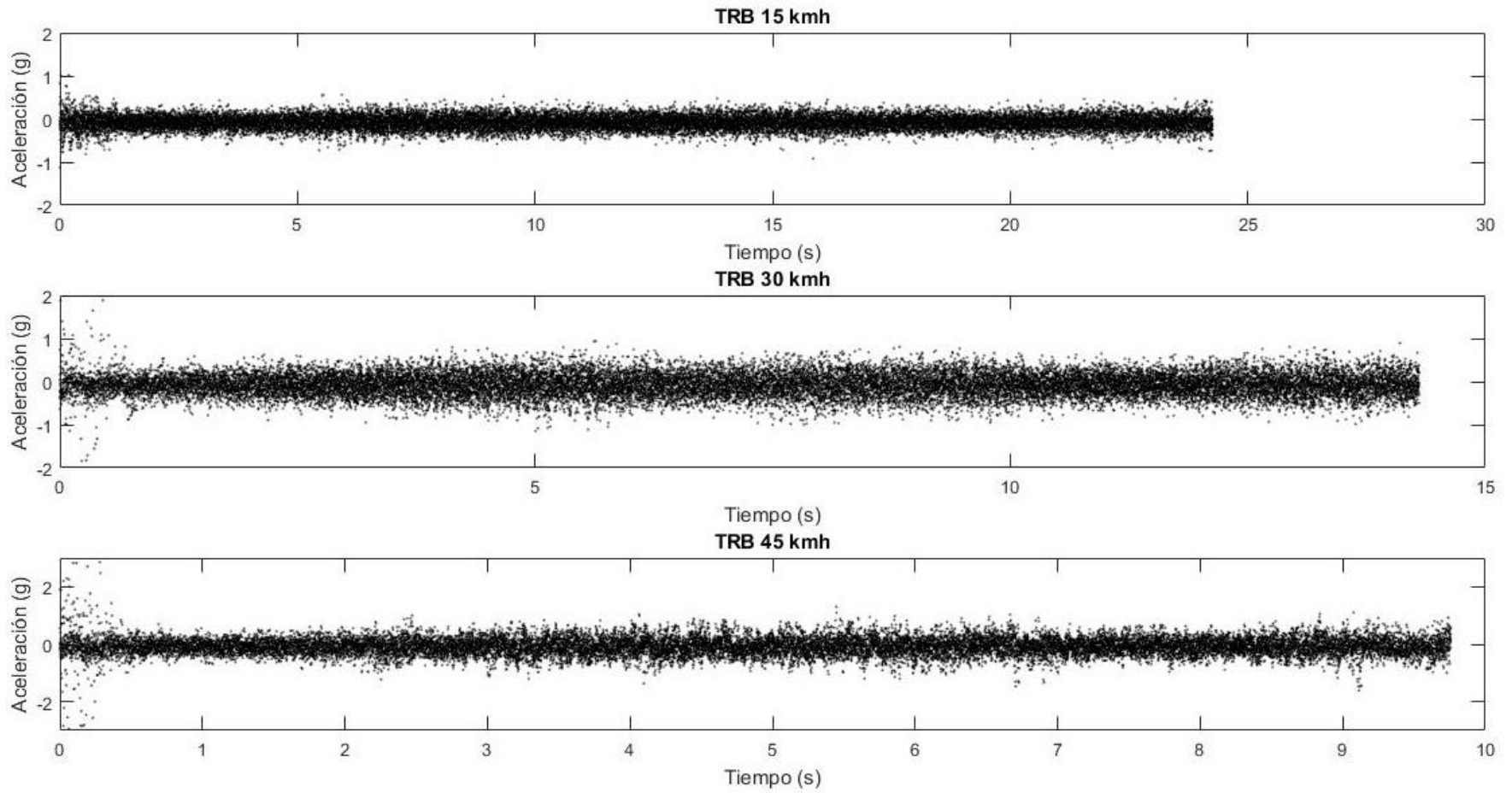
8.2.1 Aceleraciones tramo TRA



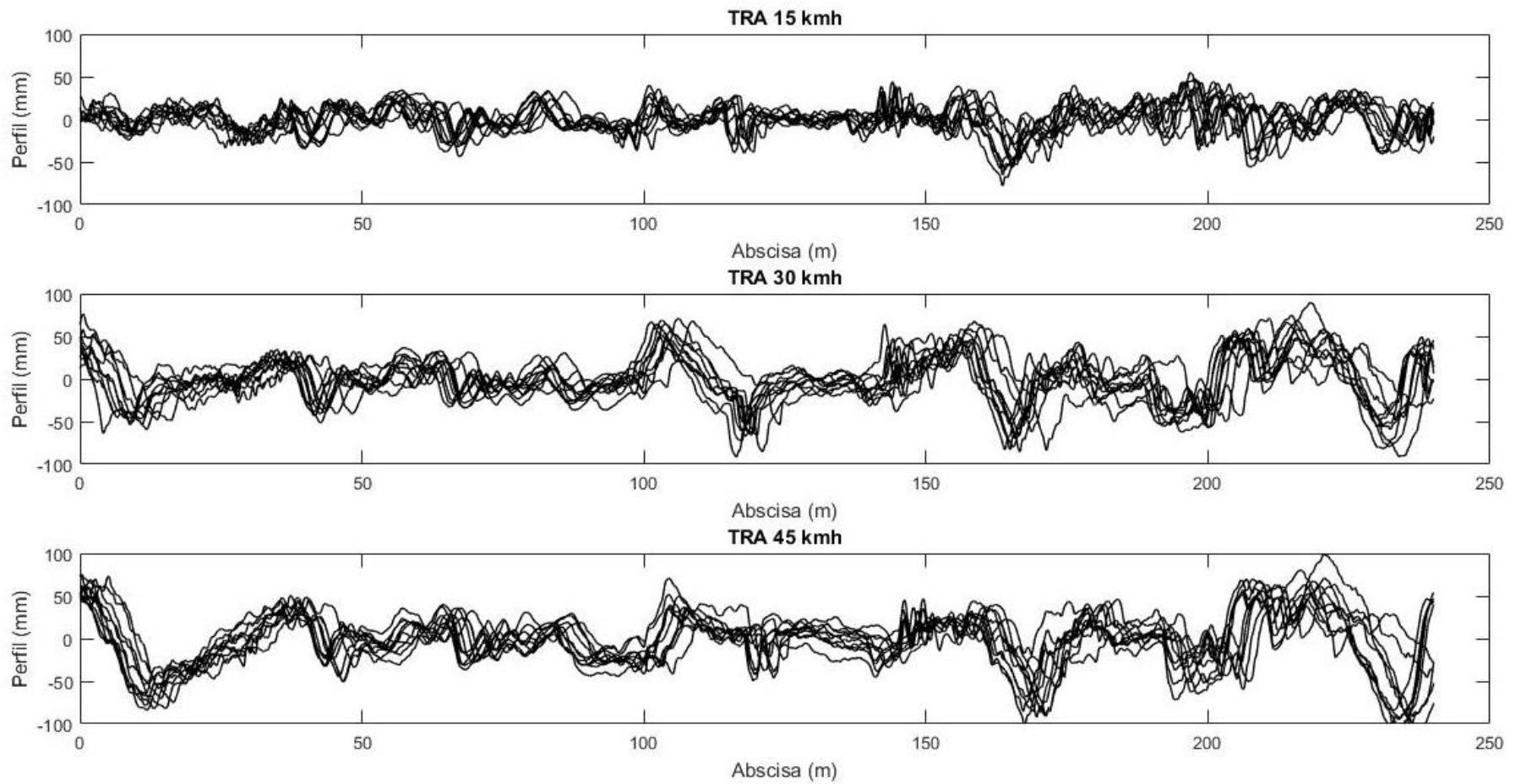
8.2.2 Aceleraciones tramo TRM



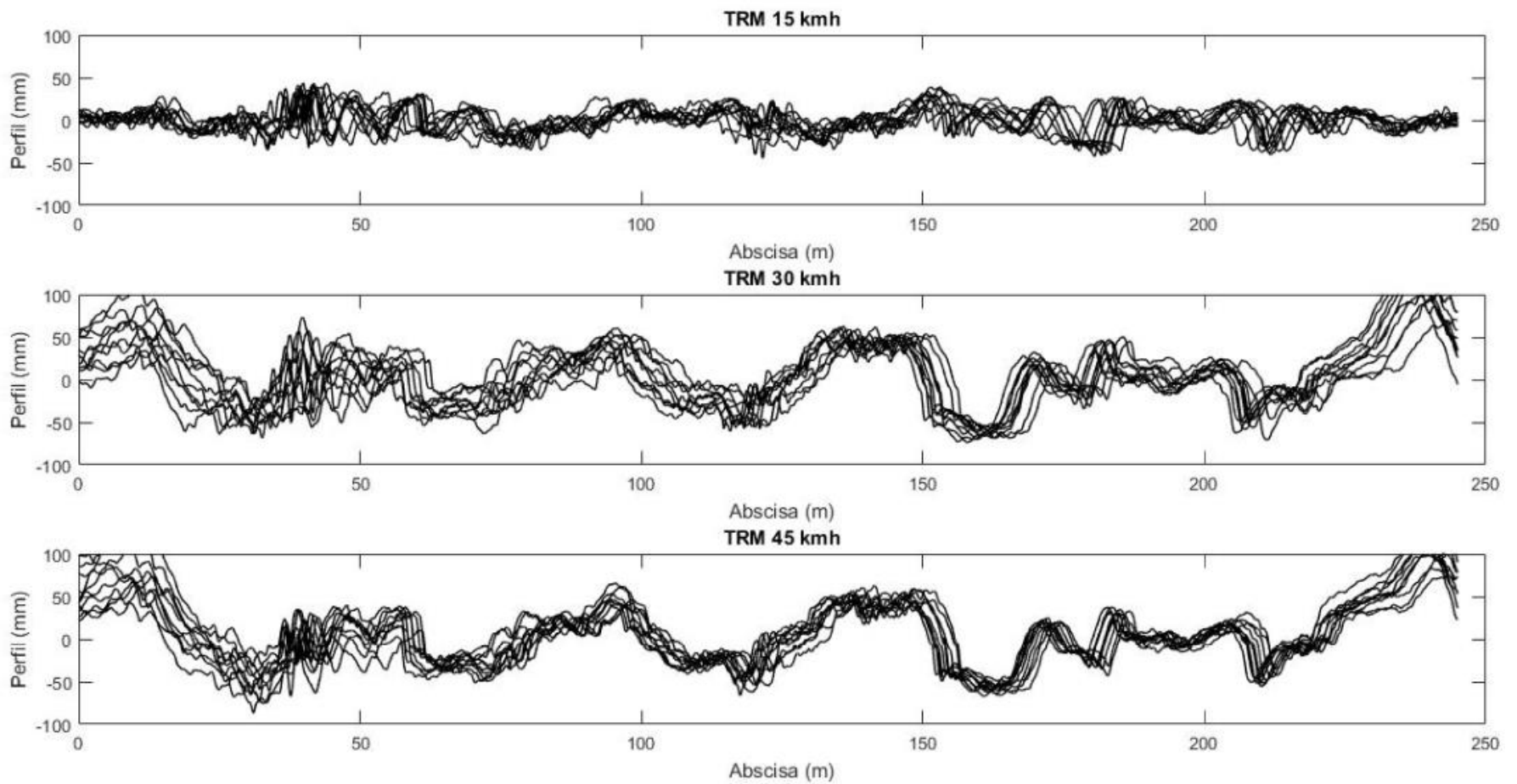
8.2.3 Aceleraciones tramo TRB



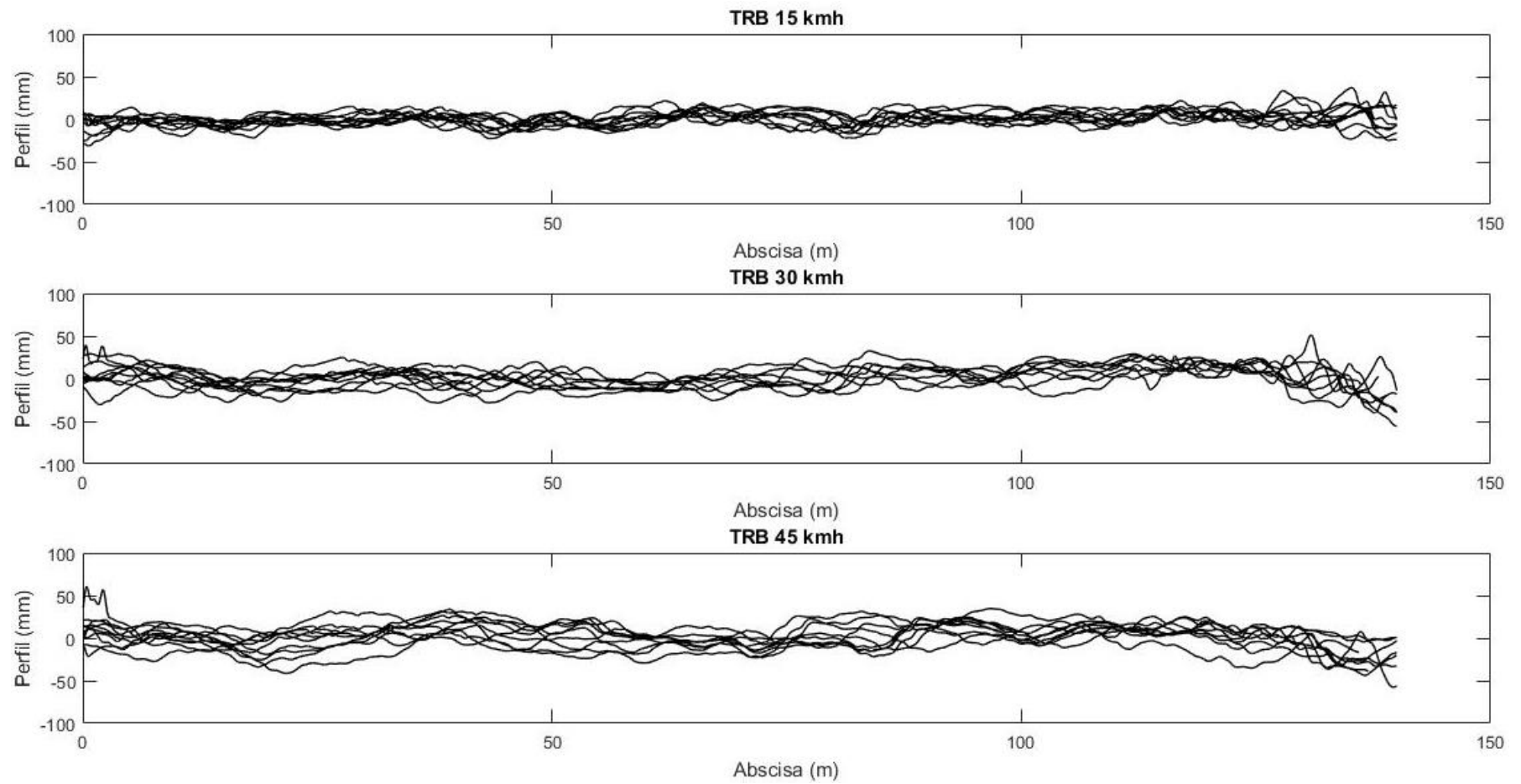
8.2.4 Perfiles tramo TRA



8.2.5 Perfiles tramo TRM



8.2.6 Perfiles tramo TRB



8.3 Anexo C: Retrocálculo, valores de M_R y SN

A continuación, se presentan las deflexiones corregidas por carga y temperatura seguido de los cálculos de módulo resiliente M_R y valores de número estructural SN para cada una de las metodologías de cálculo utilizadas AASHTO y YONAPAVE. En el anexo "FWD" entregado de forma magnética (CD), se muestran los datos crudos obtenidos de los ensayos realizados con el deflectómetro de impacto FWD.

8.3.1 Retrocálculo AASHTO tramo TRA

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in2	lb/in2	in	in			
TRA 0	530	423	346	266	192	109	86	69	427	12072.80	71469.56	0.021	23.6	23.3	16.3	2.3
TRA 5	760	677	575	448	318	171	92	68	562	7299.35	56138.86	0.031	23.6	25.3	17.7	2.2
TRA 10	669	544	464	354	249	144	93	75	560	9309.96	56133.30	0.027	23.6	23.5	16.4	2.2
TRA 15	1055	863	714	545	371	202	80	59	821	6256.60	35254.25	0.042	23.6	23.0	16.1	1.8
TRA 20	1271	941	770	546	365	169	93	72	994	6370.04	24059.36	0.051	23.6	20.3	14.2	1.6
TRA 25	1180	1000	785	571	380	161	82	66	815	6115.70	28282.05	0.047	23.6	21.6	15.1	1.7
TRA 30	654	510	434	336	241	138	82	77	541	9647.50	56417.07	0.027	23.6	23.2	16.3	2.2
TRA 35	865	641	503	359	234	124	84	71	640	9920.77	34006.14	0.034	23.6	19.7	13.8	1.8
TRA 40	739	636	537	424	308	162	90	75	579	7540.21	57344.62	0.030	23.6	25.2	17.7	2.2
TRA 45	731	585	485	347	234	121	77	68	594	9912.26	45508.38	0.029	23.6	21.6	15.1	2.0
TRA 50	579	483	371	256	166	88	51	40	367	14001.90	50966.70	0.023	23.6	20.1	14.1	2.1
TRA 55	510	418	349	275	203	118	62	40	374	11417.84	80929.59	0.020	23.6	24.7	17.3	2.4
TRA 60	581	468	377	287	204	113	69	55	454	11368.88	59700.28	0.024	23.6	22.5	15.7	2.2
TRA 65	585	475	383	291	206	115	70	14	466	11253.28	59586.19	0.024	23.6	22.5	15.8	2.2
TRA 70	581	471	372	270	179	84	48	41	387	12949.65	53796.77	0.024	23.6	20.9	14.6	2.1
TRA 75	614	475	379	290	208	119	69	51	448	11157.42	55338.18	0.025	23.6	22.1	15.5	2.1
TRA 80	615	475	359	266	186	107	69	46	407	12459.00	50499.43	0.025	23.6	20.8	14.5	2.1
TRA 85	504	338	266	196	135	77	45	28	363	17160.25	54360.83	0.021	23.6	19.3	13.5	2.1
TRA 90	971	746	583	408	258	122	76	65	718	9008.20	28867.90	0.039	23.6	19.3	13.5	1.7
TRA 95	987	764	597	415	261	113	70	64	796	8903.55	28378.33	0.040	23.6	19.3	13.5	1.7

140 Correlación del estado superficial y estructural de las estructuras de pavimento.

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in2	lb/in2	in	in			
TRA 100	721	535	428	305	200	97	82	61	669	11634.61	41005.01	0.029	23.6	19.9	13.9	1.9
TRA 105	800	566	440	294	182	95	66	59	567	12775.16	32151.88	0.032	23.6	18.0	12.6	1.8
TRA 110	709	529	403	276	176	94	65	58	518	13185.15	38377.11	0.028	23.6	18.8	13.1	1.9
TRA 115	613	511	423	324	230	130	85	72	511	10103.02	60422.47	0.025	23.6	23.4	16.4	2.2
TRA 120	607	481	398	302	209	110	57	45	488	11109.14	56726.36	0.025	23.6	22.3	15.6	2.2
TRA 125	622	492	390	254	178	95	63	60	468	13060.61	47816.20	0.025	23.6	20.1	14.1	2.0
TRA 130	783	580	439	309	203	105	67	59	512	11425.82	36145.70	0.031	23.6	19.2	13.5	1.9
TRA 135	971	803	643	474	309	152	94	84	641	7519.88	34831.53	0.038	23.6	21.6	15.1	1.8
TRA 140	1193	900	719	517	314	120	78	75	903	7397.65	23866.71	0.047	23.6	19.4	13.6	1.6
TRA 145	1058	926	728	523	336	139	68	60	480	6910.36	31682.08	0.042	23.6	21.6	15.1	1.8
TRA 150	1010	862	742	544	334	184	76	55	600	6958.33	34690.15	0.040	23.6	22.1	15.5	1.8
TRA 155	940	813	700	552	387	192	95	9	758	6001.14	45887.62	0.037	23.6	25.3	17.7	2.0
TRA 160	844	603	476	349	239	128	77	60	692	9712.20	36009.53	0.033	23.6	20.2	14.1	1.9
TRA 165	1379	1090	836	568	334	115	60	55	903	6948.60	19609.64	0.055	23.6	18.6	13.0	1.5
TRA 170	815	606	467	304	179	63	35	32	617	12991.34	30403.06	0.033	23.6	17.6	12.3	1.8
TRA 175	632	520	421	301	197	88	51	49	447	11814.67	50434.54	0.026	23.6	21.1	14.8	2.1
TRA 180	790	616	510	364	215	64	45	41	546	10800.19	37158.03	0.031	23.6	19.7	13.8	1.9
TRA 185	469	381	322	253	180	88	50	40	387	12932.71	83834.93	0.019	23.6	24.0	16.8	2.5
TRA 190	897	714	569	411	270	121	69	61	614	8590.50	35812.74	0.036	23.6	20.9	14.7	1.9
TRA 195	672	516	424	333	233	126	67	58	472	9958.13	52392.60	0.027	23.6	22.5	15.7	2.1
TRA 200	573	444	354	267	184	96	53	37	411	12620.21	56006.65	0.023	23.6	21.3	14.9	2.1
TRA 205	331	247	206	165	121	74	44	32	260	19202.54	106796.29	0.014	23.6	22.9	16.0	2.7

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in ²	lb/in ²	in	in			
TRA 210	512	379	295	216	161	105	73	63	390	14440.23	61869.88	0.021	23.6	21.1	14.8	2.2
TRA 215	702	667	555	425	291	152	87	73	518	7992.14	59415.29	0.028	23.6	25.1	17.5	2.2
TRA 220	640	561	466	356	249	130	72	59	495	9339.54	60347.16	0.026	23.6	24.0	16.8	2.2
TRA 225	453	369	307	241	174	100	57	43	401	13389.45	86400.37	0.018	23.6	24.0	16.8	2.5
TRA 230	640	543	449	346	247	137	74	60	521	9401.64	59955.04	0.026	23.6	23.9	16.7	2.2
TRA 235	422	358	308	248	184	110	69	53	351	12648.12	103700.32	0.017	23.6	25.8	18.1	2.6
TRA 240	383	347	306	261	204	128	67	28	306	11387.01	136831.79	0.016	23.6	29.2	20.4	2.9

8.3.2 Retrocálculo YONAPAVE tramo TRA

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS						PARÁMETROS CUENCO			
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l_0	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in ²			cm			MPa	(μm)	(μm)	(μm)
TRA 0	530	423	346	266	192	109	86	69	427	19.43	2.80	0.10	21.30	1277.60	-0.89	90.65	183.72	153.56	83.15
TRA 5	760	677	575	448	318	171	92	68	562	21.44	3.69	0.09	28.19	1152.10	-0.88	45.69	185.63	256.63	147.08
TRA 10	669	544	464	354	249	144	93	75	560	20.10	2.80	0.10	22.82	1277.60	-0.89	67.55	204.66	214.51	105.84
TRA 15	1055	863	714	545	371	202	80	59	821	19.49	2.80	0.10	21.43	1277.60	-0.89	45.27	340.76	342.82	169.76
TRA 20	1271	941	770	546	365	169	93	72	994	17.51	2.37	0.11	16.17	1344.20	-0.89	49.66	501.02	405.72	195.56
TRA 25	1180	1000	785	571	380	161	82	66	815	18.67	2.37	0.11	18.34	1344.20	-0.89	47.79	394.47	405.51	219.22
TRA 30	654	510	434	336	241	138	82	77	541	19.64	2.80	0.10	21.77	1277.60	-0.89	71.97	220.30	193.42	102.68

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS					PARÁMETROS CUENCO				
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l_0	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in ²			cm						
TRA 35	865	641	503	359	234	124	84	71	640	17.09	2.37	0.11	15.44	1344.20	-0.89	76.11	361.45	268.97	110.56
TRA 40	739	636	537	424	308	162	90	75	579	21.05	3.39	0.10	26.50	1193.93	-0.88	51.07	201.43	229.13	146.10
TRA 45	731	585	485	347	234	121	77	68	594	18.80	2.37	0.11	18.61	1344.20	-0.89	76.10	245.94	251.03	113.76
TRA 50	579	483	371	256	166	88	51	40	367	18.04	2.37	0.11	17.12	1344.20	-0.89	103.65	208.06	204.74	78.15
TRA 55	510	418	349	275	203	118	62	40	374	20.38	2.80	0.10	23.52	1277.60	-0.89	86.22	161.14	145.53	85.41
TRA 60	581	468	377	287	204	113	69	55	454	19.17	2.80	0.10	20.71	1277.60	-0.89	84.72	204.07	172.66	91.74
TRA 65	585	475	383	291	206	115	70	14	466	19.27	2.80	0.10	20.93	1277.60	-0.89	83.41	202.08	176.30	91.74
TRA 70	581	471	372	270	179	84	48	41	387	18.25	2.37	0.11	17.53	1344.20	-0.89	101.13	209.16	192.13	95.49
TRA 75	614	475	379	290	208	119	69	51	448	18.62	2.37	0.11	18.26	1344.20	-0.89	92.14	235.59	170.67	89.46
TRA 80	615	475	359	266	186	107	69	46	407	17.68	2.37	0.11	16.46	1344.20	-0.89	100.96	256.45	172.37	79.36
TRA 85	504	338	266	196	135	77	45	28	363	16.46	2.37	0.11	14.41	1344.20	-0.89	138.76	238.53	130.48	58.32
TRA 90	971	746	583	408	258	122	76	65	718	17.14	2.37	0.11	15.52	1344.20	-0.89	67.43	387.96	325.01	136.20
TRA 95	987	764	597	415	261	113	70	64	796	17.12	2.37	0.11	15.48	1344.20	-0.89	66.49	389.87	336.06	147.66
TRA 100	721	535	428	305	200	97	82	61	669	17.27	2.37	0.11	15.74	1344.20	-0.89	89.72	292.25	228.81	102.30
TRA 105	800	566	440	294	182	95	66	59	567	16.03	2.37	0.11	13.75	1344.20	-0.89	91.20	360.28	258.10	87.00
TRA 110	709	529	403	276	176	94	65	58	518	16.60	2.37	0.11	14.63	1344.20	-0.89	97.38	305.98	226.72	81.65
TRA 115	613	511	423	324	230	130	85	72	511	20.05	2.80	0.10	22.72	1277.60	-0.89	73.93	190.23	193.32	99.61
TRA 120	607	481	398	302	209	110	57	45	488	19.10	2.80	0.10	20.57	1277.60	-0.89	81.63	208.36	189.30	99.29
TRA 125	622	492	390	254	178	95	63	60	468	17.87	2.37	0.11	16.81	1344.20	-0.89	97.95	232.19	212.30	82.56
TRA 130	783	580	439	309	203	105	67	59	512	16.65	2.37	0.11	14.70	1344.20	-0.89	87.81	344.23	235.30	98.08
TRA 135	971	803	643	474	309	152	94	84	641	18.71	2.37	0.11	18.43	1344.20	-0.89	57.87	327.73	333.96	156.75

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS					PARÁMETROS CUENCO				
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l_0	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in ²			cm						
TRA 140	1193	900	719	517	314	120	78	75	903	17.00	2.37	0.11	15.28	1344.20	-0.89	55.65	473.74	405.35	193.71
TRA 145	1058	926	728	523	336	139	68	60	480	18.86	2.37	0.11	18.74	1344.20	-0.89	52.30	329.54	392.09	197.71
TRA 150	1010	862	742	544	334	184	76	55	600	19.88	2.80	0.10	22.37	1277.60	-0.89	45.71	268.21	407.72	149.53
TRA 155	940	813	700	552	387	192	95	9	758	21.11	3.69	0.09	27.30	1152.10	-0.88	38.03	239.71	312.77	195.08
TRA 160	844	603	476	349	239	128	77	60	692	17.07	2.37	0.11	15.40	1344.20	-0.89	78.06	368.47	236.87	111.16
TRA 165	1379	1090	836	568	334	115	60	55	903	16.69	2.37	0.11	14.76	1344.20	-0.89	49.67	542.54	501.76	219.79
TRA 170	815	606	467	304	179	63	35	32	617	15.97	2.37	0.11	13.65	1344.20	-0.89	90.07	348.44	288.14	115.29
TRA 175	632	520	421	301	197	88	51	49	447	18.56	2.37	0.11	18.13	1344.20	-0.89	90.16	210.87	224.32	108.89
TRA 180	790	616	510	364	215	64	45	41	546	17.50	2.37	0.11	16.13	1344.20	-0.89	80.05	280.07	294.76	151.34
TRA 185	469	381	322	253	180	88	50	40	387	19.96	2.80	0.10	22.49	1277.60	-0.89	97.57	147.24	141.97	91.32
TRA 190	897	714	569	411	270	121	69	61	614	18.04	2.37	0.11	17.12	1344.20	-0.89	66.85	327.77	298.91	149.89
TRA 195	672	516	424	333	233	126	67	58	472	18.84	2.37	0.11	18.70	1344.20	-0.89	82.42	248.79	190.29	107.69
TRA 200	573	444	354	267	184	96	53	37	411	18.27	2.37	0.11	17.55	1344.20	-0.89	102.27	219.20	170.21	88.46
TRA 205	331	247	206	165	121	74	44	32	260	19.21	2.80	0.10	20.81	1277.60	-0.89	148.25	124.37	85.36	47.44
TRA 210	512	379	295	216	161	105	73	63	390	17.91	2.37	0.11	16.89	1344.20	-0.89	118.61	217.16	133.89	55.91
TRA 215	702	667	555	425	291	152	87	73	518	21.76	3.69	0.09	29.04	1152.10	-0.88	48.23	146.51	264.51	139.07
TRA 220	640	561	466	356	249	130	72	59	495	20.63	2.80	0.10	24.12	1277.60	-0.89	67.23	173.72	217.54	118.79
TRA 225	453	369	307	241	174	100	57	43	401	20.06	2.80	0.10	22.74	1277.60	-0.89	100.04	145.42	133.96	73.93
TRA 230	640	543	449	346	247	137	74	60	521	20.33	2.80	0.10	23.39	1277.60	-0.89	69.05	191.07	202.03	110.47
TRA 235	422	358	308	248	184	110	69	53	351	21.55	3.69	0.09	28.47	1152.10	-0.88	81.66	114.07	124.06	73.31
TRA 240	383	347	306	261	204	128	67	28	306	23.99	3.28	0.10	39.61	926.90	-0.86	57.99	76.77	102.28	75.97

8.3.3 Retrocálculo AASHTO tramo TRM

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in ²	lb/in ²	in	in			
TRM 0	551	448	362	264	178	91	55	49	392	13044.04	49780.95	0.02	23.62	25.31	17.72	2.61
TRM 5	621	529	427	304	207	104	60	42	499	11226.40	45874.37	0.03	23.62	25.86	18.10	2.54
TRM 10	517	397	314	221	141	69	47	44	401	16507.02	47844.95	0.02	23.62	23.22	16.25	2.57
TRM 15	693	505	386	262	162	75	50	44	518	14349.20	34120.40	0.03	23.62	21.83	15.28	2.30
TRM 20	829	608	472	316	195	78	56	52	649	11911.14	28585.91	0.03	23.62	21.89	15.32	2.17
TRM 25	1148	854	620	354	194	74	57	55	850	11988.65	17851.14	0.05	23.62	18.93	13.25	1.85
TRM 30	1158	834	642	403	219	75	58	56	869	10595.08	18561.59	0.05	23.62	19.88	13.92	1.88
TRM 35	938	679	502	313	176	76	58	13	684	13218.94	22527.95	0.04	23.62	19.71	13.80	2.00
TRM 40	973	720	566	390	240	96	57	15	765	9663.29	24697.28	0.04	23.62	22.33	15.63	2.06
TRM 45	1053	751	583	400	242	102	70	29	868	9607.85	22193.03	0.04	23.62	21.64	15.15	1.99
TRM 50	402	370	324	269	204	108	67	46	332	11409.42	96316.56	0.02	23.62	32.61	22.82	3.25
TRM 55	337	299	264	222	170	107	66	55	297	13647.56	109818.01	0.01	23.62	32.11	22.47	3.39
TRM 60	885	746	610	443	285	127	79	2	650	8159.18	32515.40	0.04	23.62	25.65	17.96	2.26
TRM 65	969	721	569	391	177	109	77	2	795	13158.90	21602.01	0.04	23.62	19.49	13.65	1.97
TRM 70	726	584	465	339	228	114	72	57	459	10209.19	38480.08	0.03	23.62	25.21	17.64	2.39
TRM 75	754	584	478	352	237	119	74	64	613	9785.67	37271.07	0.03	23.62	25.29	17.70	2.37
TRM 80	572	508	439	357	265	151	91	0	445	8756.70	66044.01	0.02	23.62	31.44	22.01	2.86
TRM 85	556	497	422	331	246	141	86	65	441	9431.86	65475.63	0.02	23.62	30.62	21.43	2.86

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in2	lb/in2	in	in			
TRM 90	435	383	328	265	196	117	73	57	348	11828.74	82434.17	0.02	23.62	30.65	21.46	3.08
TRM 95	465	389	326	252	174	95	62	50	375	13346.56	67733.49	0.02	23.62	27.70	19.39	2.89
TRM 100	725	618	505	375	249	118	70	63	527	9336.29	40870.27	0.03	23.62	26.43	18.50	2.44
TRM 105	1181	1005	809	564	329	117	72	21	815	7068.67	22095.58	0.05	23.62	23.77	16.64	1.99
TRM 110	994	837	671	508	351	160	91	86	803	6625.36	30988.82	0.04	23.62	26.99	18.89	2.23
TRM 115	660	608	526	417	270	121	83	75	533	8604.15	49987.53	0.03	23.62	28.92	20.24	2.61
TRM 120	1096	883	708	495	298	119	78	75	765	7801.93	23360.28	0.04	23.62	23.46	16.42	2.03
TRM 125	1175	886	718	498	310	118	77	57	977	7505.22	21522.17	0.05	23.62	23.14	16.20	1.97
TRM 130	1766	1351	1054	644	316	56	44	13	1387	7345.35	11869.50	0.07	23.62	19.40	13.58	1.62
TRM 135	567	516	435	343	246	136	80	63	450	9453.39	63045.34	0.02	23.62	30.23	21.16	2.82
TRM 140	535	479	404	316	226	122	71	51	402	10259.18	65388.14	0.02	23.62	29.79	20.85	2.85
TRM 145	954	740	613	421	244	104	64	63	665	9538.95	25560.66	0.04	23.62	22.66	15.86	2.09
TRM 150	610	478	367	250	153	71	48	44	435	15188.96	39727.69	0.02	23.62	22.49	15.74	2.42
TRM 155	483	406	310	214	136	74	52	48	441	17018.29	51424.80	0.02	23.62	23.52	16.46	2.64
TRM 160	603	490	396	286	186	87	54	48	445	12509.43	44953.78	0.02	23.62	24.83	17.38	2.52
TRM 165	683	509	330	242	164	83	52	47	532	14163.04	35089.46	0.03	23.62	22.11	15.48	2.32
TRM 170	417	371	311	242	172	93	55	46	323	13520.68	79861.15	0.02	23.62	29.07	20.35	3.05
TRM 175	574	479	400	305	212	105	58	13	466	10937.17	52349.26	0.02	23.62	27.19	19.03	2.65
TRM 180	622	494	403	300	204	102	61	53	430	11397.50	45346.88	0.03	23.62	25.64	17.95	2.53
TRM 185	898	717	563	383	229	80	50	52	676	10164.76	26893.98	0.04	23.62	22.57	15.80	2.12
TRM 190	610	508	423	301	195	91	55	10	466	11893.06	45497.73	0.02	23.62	25.33	17.73	2.53
TRM 195	449	391	333	264	191	105	63	53	358	12138.73	76961.71	0.02	23.62	29.74	20.82	3.01

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in2	lb/in2	in	in			
TRM 200	717	586	470	346	236	116	67	56	590	9841.31	40137.98	0.03	23.62	25.84	18.09	2.43
TRM 205	795	634	492	347	211	100	66	56	597	10999.53	32122.74	0.03	23.62	23.27	16.29	2.25
TRM 210	533	440	355	265	181	101	67	3	391	12836.43	52758.63	0.02	23.62	25.91	18.14	2.66
TRM 215	848	589	436	274	172	77	36	28	639	13499.83	25460.99	0.03	23.62	20.33	14.23	2.08
TRM 220	851	695	559	378	248	119	78	61	577	9381.06	31763.10	0.03	23.62	24.38	17.06	2.24
TRM 225	415	358	305	236	168	97	63	31	313	13810.85	79257.29	0.02	23.62	28.81	20.16	3.04
TRM 230	400	328	270	211	151	85	58	50	318	15347.99	77813.03	0.02	23.62	27.69	19.38	3.03
TRM 235	777	624	506	368	233	96	63	43	640	9965.58	35218.39	0.03	23.62	24.70	17.29	2.32
TRM 240	519	412	334	245	167	90	60	53	421	13900.89	52165.26	0.02	23.62	25.17	17.62	2.65
TRM 245	408	335	277	213	150	91	62	51	326	15453.31	75379.88	0.02	23.62	27.35	19.15	2.99

8.3.4 Retrocálculo YONAPAVE tramo TRM

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS						PARÁMETROS CUENCO			
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l_0	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in ²			cm			MPa	(μm)	(μm)	(μm)
TRM 0	551	448	362	264	178	91	55	49	392	18.74	2.37	0.11	18.50	1344.20	-0.89	101.50	189.50	183.74	86.97
TRM 5	621	529	427	304	207	104	60	42	499	19.25	2.80	0.10	20.89	1277.60	-0.89	78.61	194.15	220.34	103.01

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS					PARÁMETROS CUENCO				
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l_0	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in^2			cm			MPa	(μm)	(μm)	(μm)
TRM 10	517	397	314	221	141	69	47	44	401	17.37	2.37	0.11	15.91	1344.20	-0.89	124.02	202.69	173.10	71.39
TRM 15	693	505	386	262	162	75	50	44	518	16.13	2.37	0.11	13.89	1344.20	-0.89	104.32	307.59	223.95	86.98
TRM 20	829	608	472	316	195	78	56	52	649	16.23	2.37	0.11	14.04	1344.20	-0.89	86.42	356.64	277.29	117.13
TRM 25	1148	854	620	354	194	74	57	55	850	14.90	2.37	0.11	12.13	1344.20	-0.89	71.11	527.59	426.25	119.77
TRM 30	1158	834	642	403	219	75	58	56	869	15.31	2.37	0.11	12.69	1344.20	-0.89	67.68	516.36	422.51	144.49
TRM 35	938	679	502	313	176	76	58	13	684	15.16	2.37	0.11	12.50	1344.20	-0.89	84.78	435.27	326.68	100.02
TRM 40	973	720	566	390	240	96	57	15	765	16.53	2.37	0.11	14.51	1344.20	-0.89	71.43	407.82	325.29	144.46
TRM 45	1053	751	583	400	242	102	70	29	868	15.98	2.37	0.11	13.67	1344.20	-0.89	69.67	469.67	341.43	140.14
TRM 50	402	370	324	269	204	108	67	46	332	23.35	3.28	0.10	37.06	926.90	-0.86	58.49	78.28	120.26	95.62
TRM 55	337	299	264	222	170	107	66	55	297	23.34	3.28	0.10	37.03	926.90	-0.86	69.81	73.58	93.35	63.22
TRM 60	885	746	610	443	285	127	79	2	650	18.99	2.51	0.11	19.45	1322.00	-0.89	59.96	275.02	325.71	158.07
TRM 65	969	721	569	391	177	109	77	2	795	15.92	2.37	0.11	13.57	1344.20	-0.89	76.20	399.23	392.94	67.19
TRM 70	726	584	465	339	228	114	72	57	459	18.38	2.37	0.11	17.78	1344.20	-0.89	79.83	261.66	237.31	113.43
TRM 75	754	584	478	352	237	119	74	64	613	18.33	2.37	0.11	17.68	1344.20	-0.89	77.25	276.02	240.90	118.47
TRM 80	572	508	439	357	265	151	91	0	445	22.36	3.69	0.09	30.73	1152.10	-0.88	56.27	133.01	174.08	114.22
TRM 85	556	497	422	331	246	141	86	65	441	21.96	3.69	0.09	29.59	1152.10	-0.88	59.94	133.71	175.59	105.14
TRM 90	435	383	328	265	196	117	73	57	348	22.08	3.69	0.09	29.92	1152.10	-0.88	75.76	107.15	131.76	79.33
TRM 95	465	389	326	252	174	95	62	50	375	20.11	2.80	0.10	22.86	1277.60	-0.89	96.94	139.62	151.60	79.14
TRM 100	725	618	505	375	249	118	70	63	527	19.46	2.80	0.10	21.36	1277.60	-0.89	66.12	219.61	256.22	130.85
TRM 105	1181	1005	809	564	329	117	72	21	815	18.16	2.37	0.11	17.35	1344.20	-0.89	50.20	371.22	480.75	212.01
TRM 110	994	837	671	508	351	160	91	86	803	19.30	2.80	0.10	21.01	1277.60	-0.89	48.92	322.50	320.43	191.08

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (µm)									RETROCÁLCULOS					PARÁMETROS CUENCO				
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l ₀	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in ²			cm			MPa	(µm)	(µm)	(µm)
TRM 115	660	608	526	417	270	121	83	75	533	21.57	3.69	0.09	28.52	1152.10	-0.88	52.14	134.15	255.54	149.35
TRM 120	1096	883	708	495	298	119	78	75	765	17.67	2.37	0.11	16.44	1344.20	-0.89	56.79	387.86	410.05	178.75
TRM 125	1175	886	718	498	310	118	77	57	977	17.10	2.37	0.11	15.44	1344.20	-0.89	55.98	456.94	408.60	191.83
TRM 130	1766	1351	1054	644	316	56	44	13	1387	15.51	2.37	0.11	12.97	1344.20	-0.89	43.54	711.19	737.98	259.96
TRM 135	567	516	435	343	246	136	80	63	450	21.85	3.69	0.09	29.28	1152.10	-0.88	59.26	131.96	189.43	109.82
TRM 140	535	479	404	316	226	122	71	51	402	21.51	3.69	0.09	28.36	1152.10	-0.88	64.64	131.33	177.08	104.06
TRM 145	954	740	613	421	244	104	64	63	665	17.42	2.37	0.11	16.00	1344.20	-0.89	66.75	341.63	369.10	139.11
TRM 150	610	478	367	250	153	71	48	44	435	16.93	2.37	0.11	15.16	1344.20	-0.89	109.61	242.97	214.31	82.17
TRM 155	483	406	310	214	136	74	52	48	441	18.00	2.37	0.11	17.06	1344.20	-0.89	124.48	173.35	173.62	62.85
TRM 160	603	490	396	286	186	87	54	48	445	18.45	2.37	0.11	17.92	1344.20	-0.89	95.55	206.60	210.42	98.47
TRM 165	683	509	330	242	164	83	52	47	532	15.41	2.37	0.11	12.83	1344.20	-0.89	113.66	352.91	165.89	81.19
TRM 170	417	371	311	242	172	93	55	46	323	21.24	3.69	0.09	27.64	1152.10	-0.88	84.79	105.72	139.50	79.06
TRM 175	574	479	400	305	212	105	58	13	466	19.90	2.80	0.10	22.35	1277.60	-0.89	80.15	174.45	187.36	106.93
TRM 180	622	494	403	300	204	102	61	53	430	18.68	2.37	0.11	18.36	1344.20	-0.89	90.52	219.93	198.71	101.48
TRM 185	898	717	563	383	229	80	50	52	676	17.11	2.37	0.11	15.46	1344.20	-0.89	73.14	335.63	334.22	148.31
TRM 190	610	508	423	301	195	91	55	10	466	19.05	2.80	0.10	20.46	1277.60	-0.89	81.58	187.30	227.52	104.76
TRM 195	449	391	333	264	191	105	63	53	358	21.43	3.69	0.09	28.15	1152.10	-0.88	77.55	115.58	141.60	86.37
TRM 200	717	586	470	346	236	116	67	56	590	18.78	2.37	0.11	18.58	1344.20	-0.89	77.73	247.55	233.68	119.59
TRM 205	795	634	492	347	211	100	66	56	597	17.38	2.37	0.11	15.94	1344.20	-0.89	80.47	302.18	281.25	110.79
TRM 210	533	440	355	265	181	101	67	3	391	19.21	2.80	0.10	20.80	1277.60	-0.89	92.09	177.91	173.73	79.89
TRM 215	848	589	436	274	172	77	36	28	639	15.15	2.37	0.11	12.48	1344.20	-0.89	93.85	412.38	263.98	94.87

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS						PARÁMETROS CUENCO			
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco	A	B	l_0	m	n	Esr	SCI	BCI	BDI
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in^2			cm			MPa	(μm)	(μm)	(μm)
TRM 220	851	695	559	378	248	119	78	61	577	18.22	2.37	0.11	17.47	1344.20	-0.89	69.30	291.58	311.23	128.67
TRM 225	415	358	305	236	168	97	63	31	313	21.08	3.69	0.09	27.22	1152.10	-0.88	86.35	110.47	136.32	70.93
TRM 230	400	328	270	211	151	85	58	50	318	19.90	2.80	0.10	22.37	1277.60	-0.89	114.83	130.47	118.61	66.10
TRM 235	777	624	506	368	233	96	63	43	640	18.16	2.37	0.11	17.34	1344.20	-0.89	76.32	270.92	272.76	137.30
TRM 240	519	412	334	245	167	90	60	53	421	18.64	2.37	0.11	18.28	1344.20	-0.89	108.92	184.62	167.41	76.96
TRM 245	408	335	277	213	150	91	62	51	326	19.92	2.80	0.10	22.41	1277.60	-0.89	112.64	130.68	126.58	59.14

8.3.5 Retrocálculo AASHTO tramo TRB

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS						
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in ²	lb/in ²	in	in			
TRB2 ,0	487	386	312	228	163	92	65	52	401	16758.55	45141.01	0.02	35.43	32.31	22.62	3.66
TRB2 ,5	487	386	312	228	163	92	65	52	401	16758.55	45028.99	0.02	35.43	32.29	22.60	3.66
TRB2 ,10	479	362	280	199	140	84	63	50	364	18411.75	48540.73	0.02	35.43	32.09	22.47	3.75
TRB2 ,15	479	362	280	199	140	84	63	50	364	18411.75	48910.26	0.02	35.43	32.17	22.52	3.76
TRB2 ,20	428	338	267	196	141	85	64	52	306	18219.28	53356.31	0.02	35.43	33.20	23.24	3.87
TRB2 ,25	428	338	267	196	141	85	64	52	306	18219.28	54362.95	0.02	35.43	33.40	23.38	3.89
TRB2 ,30	458	368	295	219	156	89	65	52	348	17352.91	50247.39	0.02	35.43	33.08	23.15	3.79
TRB2 ,35	458	368	295	219	156	89	65	52	348	17352.91	52414.68	0.02	35.43	33.53	23.47	3.85

150 Correlación del estado superficial y estructural de las estructuras de pavimento.

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)								RETROCÁLCULOS							
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Mr	Ep	Do	r	ae	0.7*ae	SN
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	lb/in2	lb/in2	in	in			
TRB2 ,40	546	445	355	257	177	95	69	57	412	16268.69	42281.43	0.02	35.43	31.94	22.36	3.58
TRB2 ,45	546	445	355	257	177	95	69	57	412	16268.69	41107.82	0.02	35.43	31.65	22.16	3.55
TRB2 ,50	509	380	303	227	167	102	72	57	409	15184.96	46858.51	0.02	35.43	33.75	23.63	3.70
TRB2 ,55	509	380	303	227	167	102	72	57	409	15184.96	48820.11	0.02	35.43	34.21	23.95	3.75
TRB2 ,60	533	445	354	254	174	92	63	50	389	16813.99	41572.76	0.02	35.43	31.43	22.00	3.56
TRB2 ,65	533	445	354	254	174	92	63	50	389	16813.99	41156.84	0.02	35.43	31.33	21.93	3.55
TRB2 ,70	296	274	239	199	155	92	64	50	225	16791.46	92649.49	0.01	35.43	40.78	28.55	4.65
TRB2 ,75	296	274	239	199	155	92	64	50	225	16791.46	89457.19	0.01	35.43	40.32	28.22	4.60
TRB2 ,80	244	220	186	153	123	85	64	51	183	18320.83	121166.76	0.01	35.43	43.27	30.29	5.08
TRB2 ,85	244	220	186	153	123	85	64	51	183	18320.83	121166.76	0.01	35.43	43.27	30.29	5.08
TRB2 ,90	497	401	314	230	166	101	71	54	350	15343.72	45502.20	0.02	35.43	33.33	23.33	3.67
TRB2 ,95	497	401	314	230	166	101	71	54	350	15343.72	45502.20	0.02	35.43	33.33	23.33	3.67
TRB2 ,100	424	334	252	176	126	81	65	54	288	19166.50	54217.50	0.02	35.43	32.83	22.98	3.89
TRB2 ,105	424	334	252	176	126	81	65	54	288	19166.50	54217.50	0.02	35.43	32.83	22.98	3.89
TRB2 ,110	469	389	309	228	164	96	70	55	341	16136.17	48820.11	0.02	35.43	33.54	23.48	3.75
TRB2 ,115	469	389	309	228	164	96	70	55	341	16136.17	48820.11	0.02	35.43	33.54	23.48	3.75
TRB2 ,120	455	378	304	229	167	98	69	54	340	15864.77	52013.22	0.02	35.43	34.42	24.10	3.83
TRB2 ,125	455	378	304	229	167	98	69	54	340	15864.77	52013.22	0.02	35.43	34.42	24.10	3.83
TRB2 ,130	652	508	393	281	193	102	74	59	456	15179.35	32868.42	0.03	35.43	30.12	21.09	3.29
TRB2 ,135	652	508	393	281	193	102	74	59	456	15179.35	32868.42	0.03	35.43	30.12	21.09	3.29
TRB2 ,140	613	474	372	267	191	111	79	63	472	13943.72	36476.37	0.02	35.43	32.01	22.41	3.41

8.3.6 Retrocálculo YONAPAVE tramo TRB

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS					PARÁMETROS CUENCO				
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco in ²	A	B	l ₀	m	n	Esr MPa	SCI (μm)	BCI (μm)	BDI (μm)
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9				cm						
TRB2 ,0	487	386	312	228	163	92	65	52	401	18.83	2.37	0.11	18.67	1344.20	-0.89	113.87	175.58	148.99	70.49
TRB2 ,5	487	386	312	228	163	92	65	52	401	18.83	2.37	0.11	18.67	1344.20	-0.89	113.87	175.58	148.99	70.49
TRB2 ,10	479	362	280	199	140	84	63	50	364	17.59	2.37	0.11	16.30	1344.20	-0.89	130.98	198.83	139.79	56.01
TRB2 ,15	479	362	280	199	140	84	63	50	364	17.59	2.37	0.11	16.30	1344.20	-0.89	130.98	198.83	139.79	56.01
TRB2 ,20	428	338	267	196	141	85	64	52	306	18.63	2.37	0.11	18.27	1344.20	-0.89	132.27	160.95	125.73	56.01
TRB2 ,25	428	338	267	196	141	85	64	52	306	18.63	2.37	0.11	18.27	1344.20	-0.89	132.27	160.95	125.73	56.01
TRB2 ,30	458	368	295	219	156	89	65	52	348	19.00	2.66	0.11	19.91	1299.80	-0.89	112.49	162.64	139.35	66.84
TRB2 ,35	458	368	295	219	156	89	65	52	348	19.00	2.66	0.11	19.91	1299.80	-0.89	112.49	162.64	139.35	66.84
TRB2 ,40	546	445	355	257	177	95	69	57	412	18.73	2.37	0.11	18.46	1344.20	-0.89	102.66	191.40	177.97	81.58
TRB2 ,45	546	445	355	257	177	95	69	57	412	18.73	2.37	0.11	18.46	1344.20	-0.89	102.66	191.40	177.97	81.58
TRB2 ,50	509	380	303	227	167	102	72	57	409	18.28	2.37	0.11	17.58	1344.20	-0.89	115.13	206.31	135.70	64.95
TRB2 ,55	509	380	303	227	167	102	72	57	409	18.28	2.37	0.11	17.58	1344.20	-0.89	115.13	206.31	135.70	64.95
TRB2 ,60	533	445	354	254	174	92	63	50	389	18.94	2.51	0.11	19.34	1322.00	-0.89	100.18	178.32	180.50	81.78
TRB2 ,65	533	445	354	254	174	92	63	50	389	18.94	2.51	0.11	19.34	1322.00	-0.89	100.18	178.32	180.50	81.78
TRB2 ,70	296	274	239	199	155	92	64	50	225	23.82	3.28	0.10	38.92	926.90	-0.86	76.09	57.70	83.29	63.16
TRB2 ,75	296	274	239	199	155	92	64	50	225	23.82	3.28	0.10	38.92	926.90	-0.86	76.09	57.70	83.29	63.16
TRB2 ,80	244	220	186	153	123	85	64	51	183	23.21	3.28	0.10	36.51	926.90	-0.86	97.44	58.78	63.04	38.11
TRB2 ,85	244	220	186	153	123	85	64	51	183	23.21	3.28	0.10	36.51	926.90	-0.86	97.44	58.78	63.04	38.11
TRB2 ,90	497	401	314	230	166	101	71	54	350	18.83	2.37	0.11	18.67	1344.20	-0.89	111.75	182.52	147.59	65.50

Ubicación (cm)	VALOR DEFLEXIONES CORREGIDAS (μm)									RETROCÁLCULOS					PARÁMETROS CUENCO				
	0	20	30	45	60	90	120	180	-20	Área cuenco in ²	A	B	l ₀	m	n	Esr MPa	SCI (μm)	BCI (μm)	BDI (μm)
Abscisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9				cm						
TRB2 ,95	497	401	314	230	166	101	71	54	350	18.83	2.37	0.11	18.67	1344.20	-0.89	111.75	182.52	147.59	65.50
TRB2 ,100	424	334	252	176	126	81	65	54	288	17.86	2.37	0.11	16.79	1344.20	-0.89	144.09	171.11	126.73	44.92
TRB2 ,105	424	334	252	176	126	81	65	54	288	17.86	2.37	0.11	16.79	1344.20	-0.89	144.09	171.11	126.73	44.92
TRB2 ,110	469	389	309	228	164	96	70	55	341	19.34	2.80	0.10	21.10	1277.60	-0.89	103.34	159.41	145.41	67.90
TRB2 ,115	469	389	309	228	164	96	70	55	341	19.34	2.80	0.10	21.10	1277.60	-0.89	103.34	159.41	145.41	67.90
TRB2 ,120	455	378	304	229	167	98	69	54	340	19.72	2.80	0.10	21.94	1277.60	-0.89	102.80	150.70	137.40	69.40
TRB2 ,125	455	378	304	229	167	98	69	54	340	19.72	2.80	0.10	21.94	1277.60	-0.89	102.80	150.70	137.40	69.40
TRB2 ,130	652	508	393	281	193	102	74	59	456	17.71	2.37	0.11	16.52	1344.20	-0.89	94.91	259.76	199.45	91.15
TRB2 ,135	652	508	393	281	193	102	74	59	456	17.71	2.37	0.11	16.52	1344.20	-0.89	94.91	259.76	199.45	91.15
TRB2 ,140	613	474	372	267	191	111	79	63	472	18.10	2.37	0.11	17.24	1344.20	-0.89	97.24	241.30	181.01	79.71