



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Correlación Entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Deflexiones
Medidas Mediante Deflectometría de Impacto (FWD) Para la Optimización
del Análisis de Desempeño del Pavimento

Autores:

Mateo Patricio Armijos Garate

CI: 0105500813

Correo electrónico: mateoarmijos@gmail.com

Ivan Schneider Fernández Landívar

CI: 0107320517

Correo electrónico: ivan.fer.land@gmail.com

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco

Correo electrónico: mogrovejo.daniel@gmail.com

CI: 0301500476

*Trabajo de titulación
previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil.*

Cuenca - Ecuador

07-Marzo-2022



RESUMEN

Los parámetros viales de funcionalidad y capacidad estructural son indicadores para evaluar los pavimentos bajo el criterio de nivel de servicio y capacidad. (AASHTO, 1993) En el Ecuador, la falta de control y mantenimiento, se debe a la baja disponibilidad de equipos de evaluación como el deflectómetro de impacto (FWD).

En el presente trabajo de titulación se busca una correlación entre mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y la deflexión medida con (FWD) en la vía Cuenca – Molleturo, en el tramo comprendido entre las abscisas 10+000 y 30+000. Para la medición del IRI se utiliza las aplicaciones móviles RoadRoid e IRI.Calc.Free que deben ser calibradas para validar las mediciones. Mediante el uso de herramientas digitales, se georreferencia, tabula y filtra datos para analizar los parámetros que afectan a este tipo de mediciones. Además, las mediciones de deflexiones con deflectómetro de impacto, son proporcionadas por el MTOP. Se realiza un análisis de sensibilidad de variables para buscar el máximo coeficiente de correlación posible. Posteriormente se calibran las aplicaciones denotando una mejor precisión de posicionamiento para Roadroid razón por la cual se unifican las mediciones bajo este criterio.

Los resultados obtenidos luego de realizar análisis de sensibilidad, evidencian que existe una mejor correlación entre el IRI y la deflexión si se consideran: la deflexión central, un intervalo de medición a cada 100m y la implementación de la media móvil de orden 10, un coeficiente de determinación de 0.26. Además, al estimar el IRI para la misma fecha en la que se midió las deflexiones se llega a un coeficiente de determinación de 0.406, concluyendo que la relación disminuye con el tiempo.

Palabras claves: Deflectómetro de impacto. Índice de rugosidad internacional. Correlación. Calibración. Pavimento. Deflexiones.



ABSTRACT

The road parameters of functionality and structural capacity are indicators to evaluate the pavements based on the service level and capacity. (AASHTO, 1993) In Ecuador, the lack of control and maintenance is due to the low availability of evaluation equipment such as the Falling Weight Deflectometer (FWD).

In the present research, a relation between the International Roughness Index (IRI) and the deflection measured with (FWD) on the Cuenca – Molleturo road is search, in the section between the abscissa 10+000 and 30+000. For the IRI measurement, the mobile applications RoadRoid and IRI.Calc.Free are used, which must be calibrated in order to validate the measurements. Through the use of digital tools, georeference, tabulation and data filtration are used to analyze the parameters that affect this type of measurements. In addition, deflection measurements with Falling Weight Deflectometer are provided by the MTOP. A sensitivity analysis of variables is used to find the maximum coefficient correlation possible.

The results reached using a sensibility analysis show that exist a better relationship between IRI and the deflection, if consider: the central deflections, an interval of 100m the implementation of the moving average of 10th order, a determination coefficient of 0.26. In addition, when estimating the IRI for the same date when deflections were measured, a determination coefficient of 0.406 is reached, concluding that the relationship decreases with the time.

Keywords: Falling weight deflectometer. International roughness index. Correlation. Calibration. Pavement. Deflections.



CONTENIDO

Tabla de contenido

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
CONTENIDO	III
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES O GRÁFICOS	IX
ÍNDICE DE ANEXOS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	XIV
CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	XVI
DEDICATORIA	XVIII
AGRADECIMIENTO	XIX
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.1 Identificación del Problema	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 General.....	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 Alcance	4
1.5 Estructura del Documento	5
MARCO TEÓRICO	6
1.6 Conceptos Generales	6



1.6.1	Clasificación de Pavimentos	6
1.6.1.1	Pavimentos Flexibles	6
1.6.1.2	Fallas en pavimentos flexibles.....	7
	Fisuras y Grietas	7
	Deterioros superficiales.....	8
	Otros deterioros	9
1.6.1.3	Pavimentos Rígidos.....	10
1.6.1.4	Fallas en pavimentos Rígidos	10
	Fallas en juntas:	11
	Fisuras y grietas:	11
	Deterioro de la superficie:	12
	Otros deterioros:	13
1.7	Evaluación Funcional	14
1.7.1	Rugosidad	14
1.7.1.1	Antecedentes.....	15
1.7.1.2	Causas.....	15
1.7.1.3	Importancia	16
1.7.2	Índice de Rugosidad Internacional (IRI)	17
1.7.2.1	Normatividad Ecuatoriana e Internacional	17
1.7.2.2	Métodos y Equipos de Medición	20
	Mediciones de Clase 1: Utilización de perfiles de precisión:	20
	Mediciones de Clase 2: Otros métodos perfilométricos.	21
	Mediciones de Clase 3: IRI estimado a partir de ecuaciones de correlación.	22
	Mediciones de Clase 4: Valoraciones subjetivas y mediciones no calibradas.	25
1.7.3	Aplicaciones de Medición.....	27
1.7.3.1	Modelo Matemático	29
1.7.3.2	RoadRoid.....	32
	Desarrollo de la Aplicación.....	33
	Parámetros de Medición.....	34
	Parámetros de Ingreso.....	35
1.7.3.3	IRI Calc Free.....	36
	Parámetros de Ingreso.....	37
1.7.3.4	Estimación de la variación del IRI.....	38
1.8	Evaluación Capacidad Estructural	38
1.8.1	Tipos de Evaluación	38
1.8.1.1	Evaluación Visual	39
1.8.1.2	Evaluación Directa o Destructiva	39
1.8.1.3	Evaluación No Destructiva	39
1.8.2	Deflexión del Pavimento	39
1.8.2.1	Normativa de Deflexión o FWD.....	40
1.8.2.2	Métodos y Equipos de Evaluación No Destructiva	41
	Estática o Movimiento Lento	41
	Vibración.....	43
	Impacto.....	43
1.8.3	Mediciones con Deflectómetro de Impacto	45
1.8.3.1	Frecuencia y Localización de Ensayos.....	45



Pruebas a nivel de red:	45
Pruebas a nivel de proyecto general:	46
Pruebas a nivel de proyecto detallada:	46
1.8.3.2 Características del deflectómetro de impacto	46
1.8.3.3 Análisis del Cuenco de Deflexión.....	49
1.9 Análisis de Correlación.....	52
1.9.1 Correlaciones y regresión:	52
1.9.1.1 Regresión lineal simple:	52
1.9.1.2 Regresión no lineal:	53
1.9.1.3 Regresión polinomial:	53
1.9.2 Coeficiente de Correlación y Coeficiente de Determinación:	54
1.9.3 Media móvil	55
MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
1.10 Materiales y Equipos	56
1.10.1 Zona de Estudio.....	56
1.10.2 Equipos	58
1.10.2.1 Teléfono móvil.....	58
1.10.2.2 Vehículo de prueba	58
1.10.3 Bases de Datos	58
1.10.3.1 Datos IRI tramo Biblián- Campo Alegre:	58
1.10.3.2 Datos FWD tramo Cuenca-Molleturo:.....	59
1.10.4 Software y Aplicaciones de Medición.....	59
1.10.4.1 IRI. Regularidad. Carreteras.....	59
1.10.4.2 RoadROID 3.0.....	60
1.10.4.3 Microsoft Excel (Hoja de Cálculo).....	61
1.10.4.4 Google Earth:.....	61
1.11 Metodología.....	61
1.11.1 Calibración de Aplicaciones	62
1.11.1.1 Calibración de RoadROID	63
1.11.1.2 Calibración de IRI.Calc.Free	64
1.11.2 Medición de IRI con Aplicaciones	65
1.11.2.1 IRI con RoadROID	65
Ajuste de Parámetros	65
Medición del IRI.....	67
1.11.2.2 IRI con IRI.Calc.Free	70
Ajuste de Parámetros	70
Medición del IRI.....	71
1.11.3 Procesamiento del IRI medido con aplicaciones móviles:	73
1.11.3.1 Georreferenciación.....	74
1.11.3.2 Abscisado	74
1.11.3.3 Localización de Singularidades	75
1.11.3.4 Umbral de Velocidades	75
1.11.3.5 Ecuación de Transformación.....	76
1.11.4 Determinación de la Deflexión	76



1.11.4.1	Uso de Deflexión Central como Parámetro.....	76
1.11.4.2	Consideraciones	77
	Cuencos de Deflexión no Estándar.....	77
	Corrección por carga.....	77
1.11.4.3	Georreferenciación.....	77
1.11.5	Determinación de la Correlación.....	78
1.11.5.1	Consideraciones para la Correlación FWD – IRI.....	78
1.11.5.2	Metodología de la Correlación FWD – IRI - Criterios	78
	Criterio 1: Influencia de la ubicación del geófono	79
	Criterio 2: Influencia de la longitud de tramo de medición del IRI	79
	Criterio 3: Impacto del Diseño Geométrico de la vía.....	80
	Criterio 4: Uso de la media móvil para el análisis de la tendencia de la correlación	81
	Criterio 5: Variación de la Correlación en función del Tiempo.....	81
1.11.6	Descripción del Estado Vial.....	82
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		83
1.12	Calibración.....	83
1.12.1	Calibración con RoadRoid.....	83
1.12.2	Calibración con IRI.Calc.Free.....	86
1.13	Procesamiento de Mediciones de IRI.....	87
1.13.1	Análisis del Sentido de la Trayectoria	88
	1.13.1.1 Trayectoria con RoadRoid.....	88
	1.13.1.2 Trayectoria con IRI.Calc.Free	89
1.13.2	Análisis de Singularidades y Velocidad	89
	1.13.2.1 Filtros con RoadRoid	90
	1.13.2.2 Filtros con IRI.Calc.Free	91
1.13.3	Análisis de Longitud de Intervalo	92
1.14	Correlación entre aplicaciones	93
1.15	Análisis Estructural de FWD	95
1.16	Correlación Deflexiones vs IRI.....	97
1.16.1	Criterio 1: Influencia de la ubicación del geófono	97
1.16.2	Criterio 2: Influencia de la longitud de tramo de medición del IRI	98
1.16.3	Criterio 3: Impacto del Diseño Geométrico de la vía.....	99
1.16.4	Criterio 4: Uso de la media móvil para el análisis de la tendencia de la correlación	101
1.16.5	Criterio 5: Variación de la Correlación en función del Tiempo	104
1.17	Descripción del Estado de la Vía	109
1.17.1	Evaluación del Estado Funcional	109
1.17.2	Evaluación del Estado Estructural.....	112
1.17.3	Observaciones acerca del estado funcional y estructural	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		116
1.18	Conclusiones.....	116



1.18.1	Mediciones de IRI	116
1.18.2	Correlación entre IRI vs Deflexiones	116
1.18.3	Estado Vial.....	117
1.18.4	Conclusiones finales	117
1.19	Recomendaciones	118
1.19.1	En base a la literatura.....	118
1.19.2	Mediciones de campo	119
1.19.3	Recomendaciones de aplicabilidad.....	119
1.19.4	Posibles Investigaciones	119
REFERENCIAS.....		120
ANEXOS.....		127



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del PSR (Ventura Espinal & Alvarenga, 2005).....	15
Tabla 2. Valores de IRI para Pavimentos Asfálticos (NEVI-12, 2013)	18
Tabla 3. Valores de IRI para Chile y Honduras. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)	19
Tabla 4. Referencias Uruguayas IRI para Pavimento Asfáltico y Rígido. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)	20
Tabla 5. Espesores de banda y ecuaciones de correlación para diferentes pavimentos utilizando el Perfilógrafo California. (Pereyra, 2017).....	24
Tabla 6. Valores de Deflexiones normados en México (Secretaría de Comunicaciones y Transporte , 2017).....	41
Tabla 7. Espaciamiento entre 9 Geófonos (FHWA, 2006).....	48
Tabla 8. Espaciamiento entre 7 Geófonos Espaciamiento entre 9 Geófonos (FHWA, 2006)	48
Tabla 9. Tipos de Cuencos de deflexión y características del pavimento. (Bejarano, 2015)50	
Tabla 10. Parámetros del cuenco de deflexiones vs Condición estructural del pavimento (Horak & Emery, 2009).....	51
Tabla 11. Transformaciones para regresión (Devore, 2008)	53
Tabla 12. Rangos de coeficiente de correlación lineal de Pearson (Hernández & Peñaloza, 2018).....	55
Tabla 13. IRI medido con RoadRoid y estimado en 2021. Autoría Propia.....	85
Tabla 14. IRI medido con RoadRoid y estimado en 2021. Autoría Propia	87
Tabla 15. Coeficientes Correlación entre mediciones con RoadRoid. Autoría Propia	88
Tabla 16. Coeficientes Correlación entre mediciones con IRI.Calc.Free. Autoría Propia... 89	
Tabla 17. Coeficiente Correlación entre mediciones filtradas con RoadRoid Autoría Propia	90
Tabla 18. Coeficiente Correlación entre mediciones filtradas con IRI.Calc.Free Autoría Propia.....	91
Tabla 19. Coeficientes Correlación entre mediciones con diferentes intervalos. Autoría Propia.....	93
Tabla 20. Evaluación del Pavimento en función del tipo de cuenco. (Zhañay, 2021)	97
Tabla 21. Coordenadas de Inicio y Final de los trayectos considerados para el análisis del impacto del diseño geométrico en el coeficiente R^2	100
Tabla 22. Valores de coeficiente de correlación R^2 en los trayectos seleccionados.	101
Tabla 23. Coeficientes de correlación Do-IRI con medias móviles de diferente orden.	103
Tabla 24. Fecha de Captura del IRI vs Coeficiente R^2 de la correlación Do-IRI	105
Tabla 25. Coeficiente Correlación Do-IRI con media móvil	107
Tabla 26. Estado Funcional (IRI) de ambos lados del Pavimento.....	112
Tabla 27. Deflexiones máximas y promedio de deflexiones para cada lado del pavimento (Comportamiento estándar).	114



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES O GRÁFICOS

Ilustración 1. Estructura del Pavimento Flexible (Huang, 2004)	6
Ilustración 2, Estructura del Pavimento Rígido (Huang, 2004)	10
Ilustración 3. Escala de Valores IRI para diferentes tipos de pavimentos. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).....	17
Ilustración 4. Grafica PSI vs IRI Pavimentos Rígidos. Autoría Propia.....	19
Ilustración 5. Levantamiento con Mira y Nivel. (Pereyra, 2017).....	20
Ilustración 6. Face Dipstick. (Pereyra, 2017)	21
Ilustración 7. Gráfico del Perfilómetro Inercial APL. (Pereyra, 2017)	22
Ilustración 8. Perfilómetro Laser. (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2021).....	22
Ilustración 9. Perfilógrafo California (Pereyra, 2017).....	24
Ilustración 10. Equipo RTRRMS (Badilla, 2009)	25
Ilustración 11. Equipo MERLÍN. (Pereyra, 2017)	26
Ilustración 12. Histograma y Rango de Mediciones con Equipo MERLÍN	26
Ilustración 13. Esquema del Modelo Cuarto de Carro (Sayers & Karamihas, 1998).....	29
Ilustración 14. Diagrama de Cuerpo libre del Modelo Cuarto de Carro (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas , 1998).....	30
Ilustración 15. Logo aplicación RoadRoid	33
Ilustración 16. Casos de Rugosidad y Textura (Forslof, 2015)	34
Ilustración 17. Logo aplicación IRI Calc Free (Nieto, 2018).....	36
Ilustración 18. Deflexiones del Pavimento (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017).....	39
Ilustración 19. Viga Benkelman (Silva, 2019)	42
Ilustración 20. Deflectómetro Lacroix (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017).....	43
Ilustración 21. Equipo Dynaflect(Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017)	43
Ilustración 22. Deflectómetro de Impacto del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Abad & Sangurima, 2018)	44
Ilustración 23. Esquema de funcionamiento FWD. (Higuera, 2009)	47
Ilustración 24. Cuenco de Deflexiones. (Higuera, 2009)	49
Ilustración 25. Zonas y Parámetros críticos de cuenco deflexión.(Horak & Emery, 2009) .	50
Ilustración 26. Forma del cuenco de deflexiones. (Horak, Emery, & Maina, 2015).....	51
Ilustración 27. Cuenco de Deflexiones en pavimentos con comportamiento estándar. (MTO, 2020).....	51
Ilustración 28. Cuenco de Deflexiones en pavimentos con transmisibilidad no estándar. (MTO, 2020)	52
Ilustración 29. Regresiones polinomiales a) segundo grado, b) tercer grado, (Devore, 2008)	54
*X: variable independiente y Y: variable dependiente.....	54



Ilustración 30. Gráficas de un ajuste eficiente y un ajuste ineficiente. (Walpole, Myres, Myers, & Le, 2012) 54

Ilustración 31. Tramo de Estudio Cuenca Molleturo Naranjal. Autoría Propia. 57

Ilustración 32. Tramo Biblián- Campo Alegre. Autoría Propia. 57

Ilustración 33. Teléfono Xiaomi Utilizado en las Mediciones 58

Ilustración 34. Vehículo Utilizado para las Mediciones..... 58

Ilustración 35. KML Ruta con valores IRI generada por la Aplicación IRI.Calc.Free. Autoría Propia..... 59

Ilustración 36. Interfaz IRI.Regularidad.Carreteras. 60

Ilustración 37. Interfaz de la Nube Roadroid. Autoría Propia..... 60

Ilustración 38. Icono e interfaz de Microsoft Excel. 61

Ilustración 39. Ícono e Interfaz Google Earth. 61

Ilustración 40. Ajuste Tipo de Vehículo y Acelerómetro RoadRoid (Roadroid, 2021)..... 66

Ilustración 41. Coeficientes de Sensibilidad de Velocidad (Roadroid, 2021)..... 66

Ilustración 42. Calibración de Fricción. (Roadroid, 2021)..... 66

Ilustración 43. Parámetros cIRI, eIRI y longitud de intervalo (Roadroid, 2021) 67

Ilustración 44. Menú principal RoadRoid. (Roadroid, 2021)..... 68

Ilustración 45. Nivel de RoadRoid. (Roadroid, 2021)..... 68

Ilustración 46. Pantalla de medición con RoadRoid. (Roadroid, 2021)..... 69

Ilustración 47. Opción de Carga de Información en la nube de RoadRoid. (Roadroid, 2021) 69

Ilustración 48. Plataforma de RoadRoid. (Roadroid, 2021)..... 70

Ilustración 49. Información sobre los datos y correcciones por velocidad Nube Roadroid. 70

Ilustración 50. Lectura del último ensayo IRI.Calc.Free (Nieto, Manual IRI Android (2), 2018)..... 71

Ilustración 51. Interfaz inicial de la aplicación IRI.calc.free (Nieto, 2018) 72

Ilustración 52. Interfaz IRI.calc.free botón CONTEO (Nieto, 2018)..... 72

Ilustración 53. Interfaz IRI.calc.free botón PARAR (Nieto, 2018)..... 72

Ilustración 54. Interfaz IRI.calc.free botón DETENER (Nieto, 2018)..... 73

Ilustración 55. Archivos generados por la aplicación IRI.calc.free CSVs y KML (Autoría Propia) 73

Ilustración 56. Corrección de la ubicación de los puntos correspondientes a las deflexiones del carril derecho. (Autoría Propia)..... 78

Ilustración 57. Variación longitud de tramo de discretización del IRI. (Autoría Propia) 79

Ilustración 58. Perfil IRI MTOP 2014 vs RoadRoid 2021. Autoría propia..... 84

Ilustración 59. Correlación IRI MTOP vs RoadRoid. Autoría Propia. 84

Ilustración 60. Estimación de edad del Pavimento vs IRI. Autoría Propia. 85

Ilustración 61. Perfil IRI MTOP 2014 vs IRI.Calc.Free 2021. Autoría propia. 86

Ilustración 62. Correlación IRI MTOP vs IRI.Calc.Free. Autoría Propia..... 87

Ilustración 63. Perfil de IRI aplicando filtros en RoadRoid. Autoría Propia. 91



Ilustración 64. Perfil de IRI aplicando filtros en IRI.Calc.Free. Autoría Propia..... 92

Ilustración 65. Correlación entre a) IRI.Calc.Free vs cIRI b) IRI.Calc.Free vs eIRI. Autoría Propia..... 94

Ilustración 66. Perfil de IRI Promedio por Fecha. Autoría Propia. 95

Ilustración 67. Deflexiones centrales corregidas vs Abscisado- lado Izquierdo. Autoría Propia 96

Ilustración 68. Deflexiones centrales corregidas vs Abscisado - lado Derecho. Autoría Propia 96

Ilustración 69. Ubicación del Geófono vs Coeficiente R^2 de la correlación Deflexiones-IRI. 98

Ilustración 70. Tramo de Discretización del IRI vs Coeficiente R^2 de la correlación Do-IRI. 99

Ilustración 71. Clasificación de la zona de estudios por tramos (Recto y Sinuoso). 100

Ilustración 72. Perfiles IRI vs Do, aplicando media móvil de diferente orden. 102

Ilustración 73. Perfiles IRI vs Do iniciales y aplicando media móvil de orden 20. 102

Ilustración 74. Coeficientes de correlación Do-IRI vs medias móviles de diferente orden. 104

Ilustración 75. Fecha de Captura del IRI vs Coeficiente de correlación Do-IRI..... 106

Ilustración 76. Coeficiente de Correlación Do vs IRI 108

Ilustración 77. Gráfico de los valores residuales para la estimación de IRI de Diciembre del 2020, con Moving Average de 10. 108

Ilustración 78. Gráficos de la Probabilidad Normal del IRI estimado para Diciembre del 2020, con Moving Average de 10. 109

Ilustración 79. Estado Funcional (IRI) del Lado Derecho..... 110

Ilustración 80. Estado Funcional (IRI) del Lado Izquierdo..... 111

Ilustración 81. Estado Estructural Deflexiones (Do) del Lado Izquierdo. 113

Ilustración 82. Estado Estructural Deflexiones (Do) del Lado Derecho. 114



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Perfiles cIRI y eIRI, lado derecho e izquierdo (Roadroid).	127
Anexo 2. Graficas punto a punto de la correlación entre cIRIS y eIRIs.	129
Anexo 3. Gráficas de correlación con cada filtro.	130
Anexo 4. Tabulación del Coeficiente R^2 de la correlación Deflexiones vs IRI, a diferentes ubicaciones del geófono.	131
Anexo 5. Intervalo de discretización del IRI vs Coeficiente de Correlación $D0$ vs IRI.	132
Anexo 6. Graficas comparativas de la aplicación de distintas medias móviles.	133
Anexo 7. Coeficientes de correlación $D0$ vs IRI Estimado en Diciembre del 2020	134
Anexo 8. Gráficas de Residuales para cada Moving Average.	135
Anexo 9. Gráficos de la Probabilidad Normal del IRI estimado para Diciembre del 2020, con cada Moving Average	137



LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AASHO	American Association of State Highway Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
Do	Deflexión Central
FHWA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
GPS	Global Positioning System
HMA	Hot Mix Asphalt
IMD	Intensidad Media Diaria
IRI	Índice de Rugosidad Internacional
IRRE	International Road Roughness Experiment
LTPP	Long Term Pavement Performance
MAVG	Moving Average o Media Móvil
MDOT	Michigan Department of Transportation
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NEVI	Norma Ecuatoriana Vial
NDT	Non Destructive Test
PCI	Pavement Condition Index
PSI	Present Serviciability Index
PSR	Present Serviciability Rating
QCS	Quarter Car Simulation
RDW	Rolling Wheel Deflectometer
RTRRMS	Response Type Road Roughness Mesuring Systems
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIP	Structural Index of Pavement
SNRA	Administración Nacional de Carreteras de Suecia
UTM	Universal Transverse Mercator
WASHO	Western Association of State Highway Organizations



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Mateo Patricio Armijos Garate, autor del trabajo de titulación "Correlación Entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Deflexiones Medidas Mediante Deflectometría de Impacto (FWD) Para la Optimización del Análisis de Desempeño del Pavimento", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 07 de Marzo de 2022

Mateo Patricio Armijos Garate

C.I: 0105500813



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Iván Schneider Fernández Landívar, autor del trabajo de titulación "Correlación Entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Deflexiones Medidas Mediante Deflectometría de Impacto (FWD) Para la Optimización del Análisis de Desempeño del Pavimento", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 07 de Marzo de 2022

Iván Schneider Fernández Landívar

C.I: 0107320517



CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Mateo Patricio Armijos Garate en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Correlación Entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Deflexiones Medidas Mediante Deflectometría de Impacto (FWD) Para la Optimización del Análisis de Desempeño del Pavimento", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 07 de Marzo de 2022

Mateo Patricio Armijos Garate

C.I.: 0105500813



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Iván Schneider Fernández Landívar en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Correlación Entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Deflexiones Medidas Mediante Deflectometría de Impacto (FWD) Para la Optimización del Análisis de Desempeño del Pavimento", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 07 de Marzo de 2022

Iván Schneider Fernández Landívar

C.I.: 0107320517



DEDICATORIA

A mis padres Patricio y Jeaneth, por apoyarme durante toda mi vida y enseñarme a nunca darme por vencido e inspirarme a superarme cada día. A mis abuelitas Inés y Teresa, por haberme formado desde niño y demostrado el valor de la perseverancia y serenidad. A mis hermanos Rafaela y José por alentarme a lograr metas con su cariño y entusiasmo.

Mateo

A mi familia, que representa lo más importante para el corazón de un hombre y la brújula en mi camino siempre, mis padres Jimmy y Mariana, quienes con todas sus enseñanzas, esfuerzo y confianza me ayudan a escalar alto sin rendirme, a mis hermanos Jimmy y Vanessa por ser un ejemplo a seguir y sobre todo esos amigos incondicionales.

Iván



AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme guiado y bendecido durante toda la vida y en especial durante este difícil pero gratificante trayecto universitario. A mis padres y familiares que me han apoyado en todo momento y celebrado en cada logro alcanzado.

A mis amigos de toda la vida Esteban, Santiago y José quienes siempre han estado en los buenos y malos momentos, demostrando su cariño y lealtad. A mis amigos Esteban, Belén, Vale y Estefanía quienes supieron escucharme, apoyarme y alentarme a seguir adelante sin importar las circunstancias. A mis amigos mexicanos Raúl, Luis, Fernando, Brenda, Mafer, Fanny, con quien viví la mejor experiencia de mi vida y me recibieron con los brazos abiertos en Guadalajara.

Especial agradecimiento a mis compañeros y futuros colegas Iván y Fernando con quienes hemos superado varias adversidades universitarias y me han demostrado el valor del compañerismo, solidaridad y lealtad.

A todos mis maestros de la Universidad de Cuenca y de la Universidad de Guadalajara, quienes supieron transmitirme sus conocimientos y valores para ser un profesional con ética y moral en todo momento, especialmente al Dr. Daniel Mogrovejo, director del trabajo, por su gran apoyo para lograr este objetivo.

Mateo



Quiero agradecer primeramente a Dios por poner en mi camino toda la fortaleza, personas, decisiones y bendiciones que guían mi andar y sabiduría. Gracias a mis familiares y amigos que me impulsaron y animaron en cada momento.

Agradezco a quienes fueron mis amigos desde el inicio de esta hermosa vida universitaria y futuros colegas que el alma mater me brindo la dicha de conocer Mateo y Fernando, también a Mateo, Josué y Dome, quienes me ofrecieron su compañerismo y amistad. A mis entrañables amigos y personas especiales que me ayudaron a avanzar en cada paso que di Vladimir, Pablo, Jorge, Diana y July. A mis amigos del colegio que me dieron su fraternidad Sebastián, Sebas y Angy. A las personas mexicanas que me enseñaron mucho de un país desconocido Fanny, Bren, Mafer, Fernando, Luis y Raúl. Y todos los amigos que los trayectos de esta etapa y los pasillos de esta universidad me permitieron coincidir.

Un grande y sincero agradecimiento a mis docentes y en especial a mi tutor Ing. Daniel Mogrovejo. PhD. por su guía, ayuda y colaboración en la realización de este trabajo.

A mi alma mater la Universidad de Cuenca que junto con la Universidad de Guadalajara fueron mis hogares académicos y me abrieron las puertas de un mundo de conocimiento, que luego de años de dedicación, constancia y esfuerzo me regaló lecciones de sabiduría y responsabilidad.

Iván



Frase célebre

“A cada uno de nosotros, el hogar, el medio, la escuela, la Universidad, los amigos y los compañeros nos han ido forjando y vamos resultando lo que somos”

Jorge Matute Remus, Universidad de Guadalajara.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el Ecuador, la infraestructura vial es sin duda un pilar fundamental en el crecimiento económico del país, debido a que permite impulsar actividades productivas como el comercio o el turismo, aportando al desarrollo productivo de cada región. Es por esto que las entidades competentes como el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP deben evaluar y planificar el correcto mantenimiento de las vías para brindar seguridad a los usuarios. (NEVI-12, 2013) Dicha evaluación se logra a base de monitoreo y mediciones de indicadores tanto estructurales como funcionales del pavimento para lo cual existen diversos métodos y equipos de medición.

La evaluación de los pavimentos por medio de ensayos no destructivos representa una alternativa que requiere menor cantidad de recursos y tiempo para realizar las mediciones, proporcionando resultados confiables. La medición de la capacidad estructural y estado funcional del pavimento permite determinar la calidad de servicio que brinda el mismo, reflejando así, las propiedades del conjunto de capas que lo componen. (Solminihac, Cabrera, & Bengoa, 2002).

Hasta hace pocos años, el monitoreo estructural de un pavimento a nivel nacional se realizaba mediante el ensayo de la Viga Benkelman (Corros , Urbáez, & Corredor, 2009). Dicho método sigue vigente, sin embargo, han tomado lugar nuevos equipos con mayor sensibilidad que proporcionan datos más precisos y representativos como lo es el Falling Weight Deflectometer. Dicho equipo de medición, simula de manera certera los efectos que ocasiona el tránsito sobre el pavimento, a más de la facilidad de medición que posee, por lo que son utilizados mundialmente (Beltrán, 2012). En comparación con la Viga Benkelman, el FWD presenta una alternativa más actual, rápida y precisa con menos grado de incertidumbre al momento de recopilar los datos. Sin embargo, es un equipo más costoso que requiere mayor cantidad de recursos y un elevado presupuesto de operación y constante mantenimiento. En consecuencia, existe una baja disponibilidad de equipos de estas características, lo cual implica falta de información de mediciones que contribuyan a la formación de una base de datos mediante la cual se pueda realizar reportes del deterioro de las vías y planificar de mejor manera las rehabilitaciones pertinentes y necesarias en cada vía. (Feo & Urrego, 2013)

El Índice de Rugosidad Internacional o también llamado IRI, es un indicador de medida que permite realizar un monitoreo y control de calidad del estado superficial de la vía, es por eso que en varios países existen valores de referencia normados del IRI para sus respectivas vías o caminos. Las condiciones del pavimento requieren de un monitoreo periódico y control



permanente con equipos debidamente calibrados, para realizar mediciones certeras. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998). Existen una gran cantidad de equipos usados para medir la regularidad superficial, con varios índices y escalas para su aceptación, esto llevó a adoptar el IRI como un índice único. Este índice puede ser medido con equipos de diferentes características, costo y rendimiento, cuya correlación con el IRI permite una normalización para la medición y evaluación de la rugosidad como característica funcional superficial del pavimento. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998). El uso de aplicaciones móviles para mediciones de regularidad superficial obtiene resultados de buena correlación con mediciones de equipos de mayor precisión como mira y nivel, siendo su uso una posible alternativa para realizar a priori, un monitoreo rápido y ágil de la condición de las vías. (Moncayo, 2020)

Actualmente se han desarrollado proyectos que utilizan dispositivos portátiles y menos costosos para determinar ciertas características de los pavimentos como la rugosidad (IRI), estos se basan en el uso de acelerómetros de dispositivos móviles para obtener la rugosidad del pavimento en función del desplazamiento vertical y horizontal que experimenta el dispositivo dentro del vehículo en circulación, proporcionando una opción para obtener mediciones eficientes de una manera preliminar, proporcionando datos y gráficos de la superficie del pavimento. Algunas de las principales aplicaciones móviles que implementan este sistema son Roadroid, IRI.regularidad.carreteras, entre otras. (Putra & Suprpto, 2018).

En base a la aparición de nuevos equipos de medición, se han desarrollado investigaciones cuyo objetivo es optimizar y agilizar los procesos de medición mediante correlaciones entre parámetros como la rugosidad, condición del pavimento PCI, deflexiones con FWD, entre otros. Actualmente, dentro de los trabajos de titulación desarrollados en la Universidad de Cuenca, se han realizado varias investigaciones como: la búsqueda de la correlación entre IRI y PCI estudiando un tramo en la Avenida Loja de la ciudad de Cuenca, realizada por los ingenieros Andrés Chávez y Leida Peñarreta. Así como la búsqueda de correlación entre FWD y PCI en la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal realizada por los ingenieros Luis Abad y Álvaro Sangurima. Además, dentro de la Maestría en Vialidad y Transporte ofertada por la Universidad de Cuenca, el Ing. Wilmer Zhañay realizó correcciones por carga de las mediciones realizadas mediante FWD para poder realizar análisis más certeros de deflexiones. Finalmente, en la Universidad Santo Tomás de Colombia como parte de la Maestría en Infraestructura Vial, se buscó correlación entre cuencos de deflexión del pavimento y el IRI medido con perfilómetro.

1.1 Identificación del Problema

La falta de monitoreo y control de características de las vías como la Rugosidad Superficial o la Capacidad Estructural, conlleva a tener bajos niveles de servicio, falta de confort para los conductores, mayor desgaste de los componentes de los vehículos, menor vida útil del



pavimento y mayor probabilidad de ocurrencia de accidentes (AASHTO, 1993). Además, impide realizar una correcta planificación de rehabilitaciones, incrementando el deterioro de la vía y costos de mantenimiento. La falta de equipos de medición de rugosidad y capacidad estructural del pavimento, como son Falling Weight Deflectometer impiden conocer el estado de las vías por lo que se requiere agilizar el proceso de medición y monitoreo (Beltrán, 2012).

Todas estas problemáticas persisten en el Ecuador, debido a que se cuenta con un número limitado de equipos de medición lo que implica una falta de información del estado vial. Este problema da lugar al uso de alternativas más económicas y fáciles de usar como lo son los dispositivos móviles mediante los cuales se puede medir el IRI, el cual es un parámetro funcional que permite tener información georeferenciada de cada vía. Si además, se determinara la existencia de una correlación entre el IRI y el FWD, se obtendría datos para realizar un análisis preliminar del estado vial, permitiendo optimizar y focalizar el uso limitado del FWD en el país.

1.2 Justificación

Es de vital importancia mantener un óptimo desempeño de las vías de comunicación terrestre, debido a que influyen en ámbitos como el comercio, tiempos de traslado, costos de mantenimiento y desgaste de vehículos, calidad del transporte, entre otros. (FHWA, 2007). El deterioro constante en las vías del Ecuador debido a la falta de rehabilitaciones o mantenimientos preventivos en lugar de correctivos implica una inversión económica significativa para el país. Una de las principales razones de realizar rehabilitaciones correctivas es la falta de monitoreo y recolección de información sobre el estado en el que se encuentran las vías. Esto ha acelerado el deterioro de las vías con el paso del tiempo, lo cual conlleva al incumplimiento de la normativa vial nacional NEVI-12 y estándares internacionales, poniendo en riesgo la seguridad de los usuarios, incrementando costos operativos de los vehículos y disminuyendo tanto del nivel de servicio de las vías como de la vida útil del pavimento. (Corros , Urbáez, & Corredor, 2009). Radica aquí, la principal importancia del estudio a realizar, puesto que se busca una solución al problema relacionado con la dificultad de realizar mediciones por falta de recursos, equipos, tiempo, entre otros. Al emplear nuevas herramientas como son los dispositivos móviles, existen varias ventajas como su facilidad de uso, mediciones más rápidas que permiten abarcar mayores distancias, reducción de costos operativos y de mantenimiento. Permitiendo así, una amplia recolección de información, facilitando una correcta planificación para lograr una selección temprana del mantenimiento o rehabilitación requerida.



1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Determinar la correlación entre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido mediante aplicaciones móviles y Deflexiones obtenidas mediante Deflectometría de Impacto (FWD) para la optimización de mediciones y análisis de desempeño del pavimento.

1.3.2 Específicos

- Medición del IRI mediante las aplicaciones móviles Road Roid e IRI Calc Free.
- Revisión y compilación de datos de mediciones con FWD brindados por el MTOP.
- Establecer parámetros como abscisa y ubicación georreferenciada, que permitan comparar la información de mediciones con FWD y de IRI.
- Contrastar mediciones del IRI y FWD a lo largo de la vía, en búsqueda de zonas que permitan establecer una correlación.
- Identificar las zonas heterogéneas a lo largo de la vía, por medio del análisis de sensibilidad de variables y categorización de datos de deflexiones (FWD) y rugosidad (IRI); en búsqueda de potenciales concordancia en dichas zonas heterogéneas.
- Analizar la factibilidad de medir el IRI mediante aplicaciones móviles, para la generación de bases de datos que ayuden a analizar el desempeño del pavimento y de esa manera, optimizar y focalizar el uso limitado del FWD en el país.
- Verificar el cumplimiento del nivel de IRI en vías conforme la normativa nacional y las internacionales.
- Proponer alternativas de mantenimiento y rehabilitación, en base a la categorización de deflexiones y rugosidad establecidas mediante normativa.

1.4 Alcance

El alcance de este trabajo de titulación es en primer lugar, realizar mediciones de la rugosidad (IRI) utilizando aplicaciones móviles, para evaluar las variables que influyen durante la medición y el proceso de depuración de datos medidos. En base a las mediciones, analizar el cumplimiento de la normativa vigente en un tramo de vía seleccionado en base a los datos proporcionados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP. Posteriormente, se busca determinar zonas de baja capacidad estructural dentro del mismo tramo, por medio del análisis de datos procedentes de la medición de deflexiones efectuadas con el equipo Falling Weight Deflectometer en el mismo tramo de vía seleccionado. Una vez realizadas las mediciones de la rugosidad, junto con el análisis de los datos del deflectómetro de impacto, se busca obtener una correlación entre el Índice IRI y las deflexiones medidas



mediante el FWD. Además, se evaluará la variación de los parámetros en estudio a lo largo del tiempo, para determinar la factibilidad del uso de aplicaciones móviles como un análisis preliminar del desempeño del pavimento. Permitiendo determinar si el uso de dichas aplicaciones móviles son una herramienta que permita solventar la falta de información y disponibilidad de equipos para el monitoreo, medición y recolección de datos en Ecuador.

1.5 Estructura del Documento

Con la finalidad de desarrollar este proyecto de titulación, este documento se divide en los siguientes cinco capítulos.

1. **Generalidades:** En el primer capítulo, se presenta el alcance del proyecto, su justificación, los objetivos planteados y una breve descripción de la metodología que se seguirá durante el desarrollo del proyecto de titulación.
2. **Marco Teórico:** Este capítulo contiene la descripción de los tipos de pavimentos, junto con los tipos de fallas que se pueden encontrar. Se presentan los diversos métodos de evaluación tanto funcional como estructural del pavimento, con los respectivos equipos de medición, haciendo énfasis en la medición del IRI mediante dispositivos móviles, así como la medición de deflexiones mediante FWD. Además, se describe la metodología para determinar la existencia de la correlación entre los parámetros antes mencionados, que permitan agilizar el proceso de medición y recolección de datos.
3. **Materiales y Métodos:** En este capítulo se detalla el proceso a seguir para realizar las mediciones en campo del IRI mediante diversas aplicaciones móviles y de esta manera obtener datos que permitan buscar una correlación con las deflexiones medidas con FWD. Además, indica el proceso para buscar una correlación existente entre los dos parámetros en análisis, planteando algunas alternativas de comparación de datos.
4. **Análisis de Resultados:** En base a los resultados obtenidos del análisis de datos de las mediciones realizadas del IRI y los datos de deflexiones del FWD, se interpreta el comportamiento de los datos y se realiza un análisis de correlaciones. Se determina la relación existente entre el IRI y las deflexiones del FWD y la influencia del tiempo en ambos parámetros. Se determinan los tramos conflictivos, en base a los cuales se sugiere algunas alternativas de rehabilitación y mantenimiento.
5. **Conclusiones y Recomendaciones:** Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la investigación y el respectivo análisis, brindando también, recomendaciones para realizar futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1.6 Conceptos Generales

En este capítulo, se presentan los conceptos generales de los tipos de pavimentos, tipos de fallas que pueden presentarse en cada uno. Se describen los diversos métodos de evaluación funcional, enfocándose en las mediciones del IRI, así como también se describen los métodos de análisis estructural, profundizando el uso del FWD con una revisión de la normativa nacional e internacional. Además, se detalla el proceso a seguir para determinar la existencia de la correlación entre los dos parámetros en estudio y finalmente se presenta los tipos de falla encontrados en el tramo de vía seleccionado y posibles alternativas de rehabilitación.

1.6.1 Clasificación de Pavimentos

Los pavimentos son una estructura que está conformadas por capas superpuestas de diferentes características, las cuales son más resistentes en la superficie debido a que son las primeras en soportar el efecto de carga de los neumáticos de los vehículos que transitan por la vía. Los pavimentos se clasifican en dos grandes grupos: flexibles y rígidos.

1.6.1.1 Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles consisten principalmente de material asfáltico junto con materiales granulares graduados, componiendo una mezcla bituminosa en su capa superficial o de rodadura.

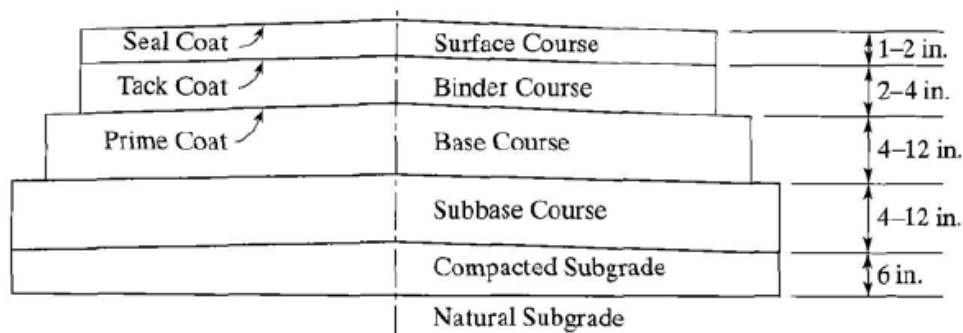


Ilustración 1. Estructura del Pavimento Flexible (Huang, 2004)

La estructura convencional, está compuesta generalmente por una capa de imprimación superficial que proporciona adherencia y evita el hidropilano, una capa superficial asfáltica delgada compuesta por una mezcla HMA, una capa intermedia que tiene mayor cantidad de agregado que de asfalto en comparación con la capa superficial lo cual la hace más económica, por lo que es una capa de mayor espesor. Entre la capa superficial y la intermedia se coloca una emulsión asfáltica de baja viscosidad para garantizar la unión entre capas. Bajo



la capa intermedia se encuentra la capa base, la cual está compuesta de material granular al igual que la capa subbase que se encuentra debajo. La diferencia es la calidad del material granular y por ende su costo, razón por la cual la capa base es más delgada que la subbase. Finalmente se encuentra la subrasante que es el suelo natural el cual debe ser compactado previo a la colocación de la estructura de pavimento. (Huang, 2004).

1.6.1.2 Fallas en pavimentos flexibles

Existen varios tipos de fallas presentes en los pavimentos flexibles. Dichas fallas pueden ser fisuras o grietas, así como deformaciones o deterioros superficiales. Cada falla posee causas principales las cuales se detallan a continuación.

Fisuras y Grietas

Fatiga

Son fisuras conectadas con patrones. Se inicia en el fondo de la capa asfáltica debido a que existen mayores esfuerzos de tracción, formando un patrón tipo piel de cocodrilo. Es considerado un daño importante y suele presentarse junto con ahuellamiento.

Las causas principales son: Espesor de las capas deficiente y grandes deformaciones debido a las repeticiones de la carga en la superficie, asfalto envejecido, compactación deficiente, deficiencias en la mezcla como exceso de mortero. (Miranda, 2010)

Bloque

Se las puede identificar debido a que dividen el pavimento en secciones de geometría rectangular, son más grandes que las generadas por fatiga. Son un indicador que el asfalto se ha endurecido, no relacionado específicamente con las cargas. (Corredor & Corros, 2010)

Las causas principales son: La contracción del pavimento por la variación de la temperatura, cambio volumétrico entre el agregado y mezcla, baja capacidad de la subrasante. (Miranda, 2010)

De Borde

Son grietas longitudinales localizadas en el borde de la calzada, generalmente sobre la berma de la vía.

Las principales causas son: La ausencia o deficiente confinamiento lateral lo que produce que el tránsito que circula cerca del borde de la calzada genere fisuras. (Miranda, 2010)

Reflexión de juntas de losas de concreto

Estas grietas ocurren en pavimentos que tienen una superficie asfáltica colocada sobre losas de hormigón. Se generan debido al movimiento o fallas presentes en la losa de hormigón, lo cual afecta a la capa superior, viéndose reflejadas en la superficie asfáltica. Es un daño no relacionado con las cargas.



Las causas principales son: Debido al movimiento de las juntas del pavimento rígido ubicado bajo la capa asfáltica, puesto que las losas de hormigón soportan cambios de temperatura y humedad lo que incrementa las fisuras en áreas cercanas. (Corredor & Corros, 2010).

Longitudinales y Transversales

Este tipo de fisuras se presentan como irregularidades o discontinuidades en dirección transversal o longitudinal al tránsito, indicando que el esfuerzo máximo admisible a tracción de una capa la estructura del pavimento fue superado, afectando al material de la capa.

Las principales causas son: Por la presencia excesiva de material fino, rigidización asfáltica por gradientes térmicos altos mayores a 30°C, existencia de grietas reflejadas en capas inferiores, fatiga por tránsito, diseño deficiente y espesor insuficiente de la capa de rodadura. (Miranda, 2010)

Deterioros superficiales

Baches

Los baches son orificios redondeados formados por el desprendimiento de asfalto, según Miranda, para ser considerado bache, una de sus dimensiones debe ser mayor a 15cm.

Las causas principales son: Debido a fatiga por tránsito constante, drenaje deficiente, pavimento con mezclas superficiales deficientes, puntos débiles de la subrasante. (Corredor & Corros, 2010).

Ahuellamiento

Son depresión localizada bajo la trayectoria del neumático, suele encontrarse junto a depresiones y elevaciones. Si es de gran magnitud la depresión causada tiende a generar riesgos estructurales y disminución de la rugosidad provocando hidropelano.

Las principales causas son: Principalmente se debe a la constante exposición a altas temperaturas y la variación de las mismas, así también, a deformaciones plásticas de la subrasante o de las otras capas del pavimento debido al efecto de las cargas. Compactación deficiente y el uso de cantos rodados como material granular en lugar de material triturado. (Miranda, 2010)

Exudación

Se puede identificar como una superficie brillante debido a la formación de una película sobre el pavimento. Tiene características pegajosas y reflectoras debido a la presencia de mezcla bituminosa.

Las principales causas son: Bajo contenido de vacíos de aire, exceso de asfalto en la mezcla, residuos de aceites, debido a que en altas temperaturas los vacíos son llenados por asfalto y genera una expansión hacia la superficie del pavimento. (Corredor & Corros, 2010)



Deformaciones Transversales

Estas deformaciones ocurren cuando no existe adherencia entre carpeta asfáltica superficial y la capa inferior. La presencia de agua, polvo o aceites no permiten la adherencia entre capas, es por esto que se debe colocar un riego y así garantizar la adherencia entre capas.

Las principales causas son: El pavimento no responde adecuadamente ante las condiciones de la subrasante, presencia de agua por drenajes incorrectos, derrame de aceites. (Miranda, 2010)

Deformaciones por empuje y ondulaciones

Son deformaciones formadas por el desplazamiento longitudinal de un área del pavimento, debido a que al circular los vehículos, éstos generan un empuje contra el pavimento. Dicho empuje suele presentarse en zonas de aceleración o frenado, generando ondas cortas y abruptas en la superficie del pavimento.

Las principales causas son: Mezcla inestable por dosificación deficiente, humedad excesiva, exceso de compactación en carpeta asfáltica, mala calidad del asfalto, exceso de riego de liga. (Corredor & Corros, 2010)

Desintegración

La capa de rodadura se desgasta y expone los materiales de manera progresiva, a la acción del tránsito y deterioro por el clima. Es un efecto en el cual, inicialmente se desgasta el ligante asfáltico y se forman paulatinamente partículas sueltas de material.

Las principales causas son: Adherencia deficiente asfalto-agregado, agregados muy absorbentes, condiciones lluviosas al momento de aplicar el ligante asfáltico, aplicación de ligante de manera no uniforme, mala compactación de la carpeta asfáltica, presencia de aceites. (Miranda, 2010)

Otros deterioros

Separación y Descenso de la Berma

Se genera un desnivel o una separación entre la calzada y el hombrillo o también llamada berma.

Las principales causas son: Debido a la diferencia de materiales entre la berma y la calzada, bombeo del material base de la berma o también separaciones debido a que existe una inestabilidad en el talud o no existen riegos de liga al construir individualmente la calzada y la berma. (Miranda, 2010)

Surgencia de finos y agua

Al transitar vehículos pesados, se puede evidenciar la expulsión o bombeo de agua junto con finos hacia la superficie.

Las principales causas son: Presencia de agua entre la capa superficial y la capa base de la estructura del pavimento por falta de drenaje o falta de sellado que garantice la correcta unión o ligue entre capas. (González, 2018)

1.6.1.3 Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos están compuestos de hormigón a base de cemento Portland. En este tipo de pavimento, el principal factor de diseño son los esfuerzos de tensión presentes en la capa superficial, así como el diseño de juntas entre losas de hormigón. Este tipo de pavimentos se analiza en base a la teoría de plato de carga en lugar de la teoría de capas usada en pavimentos flexibles para simular los esfuerzos de tensión que generan las cargas de los neumáticos de los vehículos.

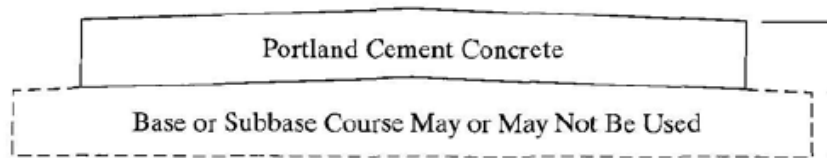


Ilustración 2, Estructura del Pavimento Rígido (Huang, 2004)

La estructura convencional, está compuesta por una capa superficial de hormigón, bajo la cual se encuentra una capa granular que puede ser base o subbase dependiendo de la calidad disponible del material granular. Dicha capa granular reduce los esfuerzos presentes en la capa de hormigón, lo cual permite reducir el espesor del hormigón y por ende el costo de la estructura de pavimento rígido. Bajo la capa granular, se encuentra la subrasante que es la capa de suelo natural debidamente compactado. Un aspecto muy importante a tener en cuenta es el lavado o expulsión de agua con material fino por las juntas, también llamado Pumping, el cual se produce por el efecto de las cargas de neumáticos (Huang, 2004).

Tipos de Pavimento Rígido

Existen cuatro tipos de pavimento rígido, en base a la presencia de refuerzo y el diseño del mismo en las juntas de la capa de hormigón.

- Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)
- Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)
- Continuous Reinforced Concrete Pavement (CRCP)
- Prestressed Concrete Pavement (PCP)

1.6.1.4 Fallas en pavimentos Rígidos

En los pavimentos rígidos se presentan varios tipos de fallas al igual que en los pavimentos flexibles. Dichas fallas pueden presentarse en las juntas, pueden ser fisuras o grietas, así como deformaciones o deterioros superficiales. Cada falla posee causas principales las cuales se detallan a continuación.



Fallas en juntas:

Deficiencia de sellado:

Este tipo de falla hace referencia a la acumulación de materiales finos o incluso agua, así como crecimiento de vegetación, lo cual conlleva al levantamiento o fisuración de las juntas.

Las principales causas son: Inadecuado o deficiente material sellante, lo que genera endurecimiento o despegado de las paredes por oxidación del mismo, sello en exceso que provoca la fluencia fuera del confinamiento de la junta, bermas no pavimentadas o automóviles que depositan material que se acumula en las juntas. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Juntas saltadas:

La fractura o desprendimiento de los bordes de las losas, localizada a una distancia máxima de 0.50 metros de las juntas o en sus esquinas, se denomina juntas saltadas.

Las principales causas son: Presencia de tensiones en las juntas, debido a las cargas de los vehículos, así como baja resistencia del hormigón en las zonas cercanas a las juntas. Además se puede deber a un diseño deficiente de la transferencia de carga en las juntas, incluyendo un proceso constructivo errado. (Miranda, 2010)

Separación longitudinal:

Es la presencia de aberturas, localizadas en las juntas longitudinales del pavimento, las cuales se ubican comúnmente entre carriles, debido al proceso constructivo de la vía.

Las posibles causas son: Carencia de barras de anclaje de acero en las juntas longitudinales, desplazamiento lateral de las losas ocasionado por un asentamiento de la subrasante, ausencia de bermas. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Fisuras y grietas:

Grietas longitudinales:

Agrietamiento lineal que divide a la losa en 2 o 3 secciones paralelas al eje de la vía. Suelen presentarse junto a la huella de trayectoria del neumático, también llamado (wheel path) o en el centro de la losa o calzada, cuando no existen juntas longitudinales.

Las posibles causas son: Fatiga del pavimento por exceso de repeticiones de carga, variación de tensiones por cambios de temperatura y de humedad, ausencia de juntas longitudinales o deficiente construcción de las mismas y por pérdida de soporte de capas inferiores. (MOPC-Rep. Dom, 2016)

Grietas transversales y/o diagonales:

Grietas transversales tienen sentido perpendicular al eje de la vía, mientras que las grietas diagonales u oblicuas tienen una ligera desviación respecto de las transversales. Las grietas diagonales también pueden iniciar en una junta transversal y terminar en el borde de la losa,



formando un triángulo, siempre que el lado paralelo a la junta transversal sea mayor que la mitad del ancho de la losa y el lado perpendicular a la junta transversal sea menor que la mitad del ancho de la losa.

Las principales causas son: Relación longitud / ancho excesiva en las losas, junta de contracción elaborada de manera tardía, retracción térmica, espesor deficiente de la losa o variaciones significativas en dichos espesores. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Grietas de esquina:

Fisura que interseca una junta longitudinal con una transversal, ubicada en el borde de la losa a una distancia menor a 1.3 metros desde la esquina. Se extiende de manera vertical, afectando a todo el espesor de la losa, lo cual lo diferencia del desprendimiento.

Las principales causas son: Fatiga de la losa de hormigón por la repetición de cargas, defectuosa transferencia de cargas en juntas lo que incrementa las deflexiones, variación de temperatura y humedad lo que produce alabeo de la losa y por efecto de surgencia o también llamado lavado de finos en las juntas. (Miranda, 2010)

Deterioro de la superficie:

Fisuramiento por retracción (tipo malla):

Presencia de un conjunto de fisuras longitudinales, transversales y/o diagonales, localizadas únicamente en la superficie del pavimento, dividiendo la losa en 4 o más partes, formando una red o malla. Generalmente las grietas longitudinales son las de mayor dimensión. Este tipo de fisuras puede conllevar al desprendimiento de la superficie

Las principales causas son: Hormigón con curado deficiente o inapropiado, clima frío o presencia de productos químicos durante el proceso de construcción, alisado de superficie con exceso de agua o demasiado amasado superficial. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Desintegración, desprendimiento o peladura:

Desintegración superficial debido a la pérdida de material fino de la matriz del hormigón, dejando expuesto el árido grueso, lo cual indica una capa de rodadura muy rugosa con pequeñas cavidades.

Las principales causas son: Hormigones mal dosificados de baja resistencia que sufren abrasión por el tránsito, curados deficientes, poca densificación y segregación de la mezcla, exposición a ciclos de hielo y deshielo, también puede ocasionarse por el ataque de agua y agregados angulosos sobre la pista. (MOPC-Rep. Dom, 2016)

Baches:

Cavidades con bordes irregulares, debido a un desprendimiento del hormigón superficial, su diámetro varía entre 25 - 100mm y la profundidad es mayor a 15mm.



Las principales causas son: Presencia de materiales indeseables como terrones de arcilla y cal viva, espesores insuficientes del pavimento, efecto abrasivo del tránsito en zonas débiles o que presentan fisuras, mortero poco homogéneo o pobre. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Otros deterioros:

Levantamiento localizado:

Levantamiento del pavimento, generalmente localizado en ambos lados de una junta transversal o grieta transversal. Usualmente el hormigón está quebrado en varias partes.

Las principales causas son: Ausencia de juntas de expansión y sometimiento a variaciones térmicas bruscas, mala colocación de barras para la transmisión de cargas, presencia de estratos expansivos en el suelo. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Escalonamiento de juntas y grietas:

Presencia de un desnivel entre losas que se puede evidenciar en las juntas.

Las principales causas son: Deficiente soporte de fundación que genera el descenso del nivel de una losa respecto de otra, ascenso de la losa debida al bombeo o lavado de finos, transferencia de carga incorrecta debido a las juntas. (Miranda, 2010)

Descenso y separación de la berma:

Diferencia de altura entre la berma y la losa del pavimento, lo que produce separación entre dichas superficies.

Las principales causas son: Asentamientos debido a una mala compactación de la berma, falta de revestimiento en la berma, erosión de los bordes de la berma debido al tránsito y escurrimiento de agua, exposición a ciclos de hielo y deshielo. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Parches Deteriorados:

Los parches consisten en reparaciones que se realizan al pavimento en zonas que presentan deterioro o fisuras que impiden la normal circulación vehicular. Consiste en remover y reemplazar el material del pavimento como medida de mantenimiento vial. Los parches deteriorados son indicadores de la necesidad de mejorar la estructura del pavimento debido al deterioro del mismo.

Las principales causas son: Mala construcción del parche o insuficiente capacidad estructural, deficiente adhesión entre el hormigón antiguo y el parche, espesor insuficiente que impide la correcta transferencia de cargas. (Miranda, 2010)



Surgencia de Finos:

El bombeo o Surgencia de finos es la expulsión de agua la cual arrastra un alto contenido de finos por las juntas o fisuras del pavimento, debido a la deflexión generada por el paso de cargas de los vehículos, ocasionando pérdida de soporte de las losas. Dicha expulsión se puede evidenciar por la presencia de material fino en la superficie del pavimento, especialmente cerca de juntas y grietas.

Las principales causas son: Agua que se infiltra por juntas y grietas, acumulándose entre la base y losa de hormigón, tráfico pesado muy recurrente, deficiente transferencia de cargas en las juntas, presencia de material erosionable en la base. (Miranda, 2010)

Textura Deficiente o Inadecuada:

Pérdida o falta de una textura en la superficie, que genere fricción entre el pavimento y los neumáticos.

Las posibles causas son: Falta o inadecuado texturizado, mala calidad del agregado, exposición a ciclos de hielo y deshielo junto a la acción del tránsito, superficie con demasiado mortero debido a la vibración o dosificación deficiente. (Dirección de Vialidad de Chile, 2014)

Fragmentación múltiple:

Combinación de múltiples fisuras tanto longitudinales, diagonales y/o transversales, formando una malla que divide a la losa en 4 partes o más. Implican un deterioro prolongado y severo del pavimento.

Las principales causas son: Elevada repetición de cargas, fatiga del concreto, deficiente soporte de fundación de la losa de hormigón. (Miranda, 2010)

1.7 Evaluación Funcional

La condición superficial del pavimento se evalúa en base a indicadores o parámetros. Uno de dichos indicadores es el Índice de Serviciabilidad (PSI), Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el Índice de Rugosidad Internacional, también conocido como IRI. La evaluación funcional se basa en la percepción de los conductores al transitar por una vía, mediante lo cual se puede llegar a determinar el confort y seguridad que brinda determinada vía.

1.7.1 Rugosidad

La especificación ASTM E867 Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems define a la rugosidad como la desviación de la superficie del pavimento en referencia a una superficie plana, lo cual afecta la dinámica del vehículo y la calidad de servicio. (Federal Highway Administration, 2017).



1.7.1.1 Antecedentes

Debido a que la rugosidad es un parámetro que influye en el confort, deterioro de los componentes del vehículo y especialmente en la seguridad de los usuarios, en 1962 la AASHO (American Association of State Highway Officials) inició un proyecto en el cual se determinó la Serviciabilidad como un parámetro de evaluación del pavimento. Dicho proyecto se denominó AASHO Road Test y cuantifica la serviciabilidad mediante el PSR (Present Serviciability Rating) el cual varía en una escala de cero a cinco, considerando cero como muy mala condición y cinco como muy buena condición del pavimento. La forma de cuantificar el PSR es en base a la calificación que proporciona un determinado número de conductores, usuarios de la vía en análisis. (Ventura Espinal & Alvarenga, 2005)

Clasificación de PSR	
PSR	Condición
0 – 1	Muy Mala
1 – 2	Mala
2 – 3	Regular
3 – 4	Buena
4 – 5	Muy Buena

Tabla 1. Clasificación del PSR (Ventura Espinal & Alvarenga, 2005)

Posteriormente, durante la década de 1970, el Banco Mundial financió varias investigaciones con la finalidad de estandarizar en una sola escala, todos los métodos de mediciones con diferentes equipos en distintos países. Una de dichas investigaciones fue la IRRE (International Road Roughness Experiment) que se realizó en 1982 en Brasil. En esta investigación, se determinó que existen correlaciones entre distintos equipos de medición de la rugosidad superficial. En base a los resultados previos, en 1986 se logró establecer al IRI como parámetro de referencia estándar de la rugosidad del pavimento. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

1.7.1.2 Causas

La rugosidad está presente en la capa superficial del pavimento tanto en vías nuevas como antiguas o existentes. Cabe destacar que la presencia de rugosidad se considera como un efecto negativo y no se lo debe confundir con la texturización, sea microtextura o macrotextura, la cual se la realiza durante el proceso constructivo del pavimento. Es por esto que la rugosidad presente en pavimentos antiguos se debe al desgaste por el tráfico vehicular y la falta de mantenimiento del mismo, mientras que la rugosidad presente en pavimentos nuevos se debe a un erróneo proceso constructivo. (Pereyra, 2017).

A continuación, se presentan las principales causas de la presencia de rugosidad debido a falencias durante el proceso constructivo, presentadas por Pereyra en su Informe de Rugosidad en Pavimentos, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Perú.



- Irregularidades en la superficie de la base o carpeta asfáltica sobre la que se construye la nueva capa
- No verificar la superficie asfáltica con la regla luego de la compactación para hacer correcciones necesarias mientras el asfalto se encuentra caliente.
- Detenimientos periódicos de la pavimentadora, luego de cada parada se debe cotejar el espesor de la capa de pavimento.
- Juntas de construcción mal construidas.
- Excesivo rastrillado del material colocado
- Detenimientos periódicos del rodillo.
- Mezcla y temperatura no uniforme del material.

De igual manera, Pereyra presenta algunos factores que influyen en el incremento de rugosidad en pavimentos antiguos o existentes.

- Edad del pavimento y presencia de fallas.
- Niveles de tráfico vehicular.
- Espesores del pavimento.
- Propiedades del asfalto como porcentaje de vacíos, peso específico y contenido de asfalto.
- Características del medio ambiente como elevadas temperaturas, precipitaciones y congelamiento.
- Propiedades del material granular como contenido de humedad y porcentaje de finos.
- Propiedades de la subrasante como el índice de plasticidad, contenido de humedad, contenido de limos y arcillas, y porcentaje de finos.

1.7.1.3 Importancia

La rugosidad o regularidad superficial es un parámetro de evaluación funcional y desempeño del pavimento, por lo que hay aspectos en varios aspectos.

- **Seguridad:** Garantiza la fricción de los neumáticos con el pavimento, lo cual aporta en aspectos como reducir la distancia de frenado y disminuye efectos de hidroplaneo, brindando condiciones de seguridad para los usuarios.
- **Costo de Operación:** Incrementa el desgaste de los componentes de los vehículos como neumáticos, amortiguadores, frenos, etc. Dependiendo del nivel de rugosidad y presencia de fallas.
- **Efectos dinámicos:** La rugosidad incrementa el desgaste del pavimento por impacto, modificando los estados de esfuerzo y deformación, conllevando a la necesidad de mantenimientos y rehabilitaciones más tempranas.

1.7.2 Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

Actualmente, el IRI “Índice de Rugosidad Internacional” es considerado como una medida de referencia para las deformaciones longitudinales, puesto que proporciona una escala común para todas las mediciones de regularidad superficial con equipos de diferentes clases, en base a las investigaciones realizadas por el Banco Mundial. Este índice representa la calidad del rodaje sobre el vehículo, establecida por las vibraciones que sufre un vehículo estándar, debido a la falta de regularidad en la superficie del pavimento.

El IRI se basa en el modelo denominado “cuarto de carro” del cual se obtiene la relación entre el movimiento acumulado de las masas amortiguadas y no amortiguadas, circulando a una velocidad de 80km/h, simulando los desplazamientos que experimentaría un pasajero dentro del vehículo. (Federal Highway Administration, 2017) Sus unidades regularmente son m/km o mm/m, como referencia un valor de 0 establece una superficie de un pavimento totalmente lisa. Mientras más elevado sea su valor, mayor será la cantidad de irregularidades que posea el pavimento, resultando en una vía intransitable. (MTOP, 2012)

1.7.2.1 Normatividad Ecuatoriana e Internacional

Las principales aplicaciones de las mediciones de regularidad son las siguientes:

- Monitoreo periódico de la comodidad para circulación vial y recolección de información para costos operativos de los vehículos.
 - Identificar tramos que requieren una rehabilitación o mantenimiento en particular de acuerdo a la magnitud de la rugosidad del mismo.
 - Control de calidad de los trabajos de construcción y rehabilitación según las Especificaciones Generales de Construcción MTOP.
- (MTOP, 2012)

El rango del Índice de Rugosidad Internacional IRI, depende del uso y tipo de vía como podemos apreciar en la siguiente ilustración:

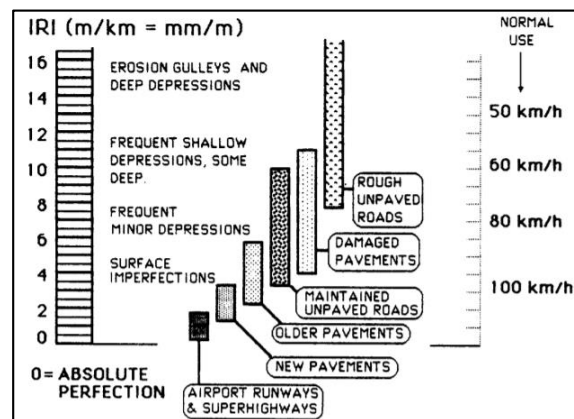


Ilustración 3. Escala de Valores IRI para diferentes tipos de pavimentos. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)



Dentro de la Normativa Ecuatoriana Vial se establece la calificación PSR o “Present Serviciability Rating” utilizada para calificar la serviciabilidad desde el criterio del usuario. La AASHO posteriormente desarrolló un indicador que permite omitir la necesidad de grandes grupos de evaluadores, obteniendo el PSI o “Present Serviciability Index”, el mismo que de acuerdo con las relaciones matemáticas presentadas en la normativa mencionada, según la Tabla 6.203.15 establece que los valores aceptables de IRI para pavimentos flexibles rondan los 1.5-2 m/km con una aceptabilidad del usuario de 100-95%, además menciona que valores de IRI de 5 m/km o superiores serían inaceptables para los usuarios. (MTOP, 2012)

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

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

La normativa ecuatoriana vial no establece valores para aceptar la recepción de pavimentos con capa de rodadura de hormigón, sin embargo, según el Manual de Especificaciones Generales Para la Construcción de Caminos y Puentes (MOP, 2002), se establece en la tabla 405-9.1 valores máximos aceptables de IRI para hormigón asfáltico de 2.5 y para tratamientos superficiales de 4 m/km. De igual manera, en la tabla 6.203.47 de la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 Volumen 6 Conservación Vial, se establecen valores de IRI referenciales para pavimentos asfálticos de carreteras en servicio. Dichos valores se presentan en la siguiente tabla.

Niveles de IRI en Pavimento Asfáltico			
Clasificación	Tránsito Bajo NT1 IRI [m/km]	Tránsito Medio NT2 y Alto NT3 IRI [m/km]	Condición Típica
Bueno	< 2.5	< 2	Pavimento con gran regularidad superficial; circulación muy cómoda
Aceptable	2.5 – 4.0	2.0 – 3.5	Pavimento algo rugoso; el valor superior es advertido por los usuarios al circular a la velocidad de operación de la vía.
Pobre	4.0 – 5.5	3.5 – 5.0	Rugosidad notoria; incomodidad para los conductores de los vehículos pesados
Muy Pobre	> 5.5	> 5.0	Pavimento muy rugoso y carente de confort para todos los usuarios

Tabla 2. Valores de IRI para Pavimentos Asfálticos (NEVI-12, 2013)

Adicional a esto tomando en cuenta las ecuaciones expuestas por la Normativa NEVI 12 que relaciona el PSI con el valor de IRI para pavimentos rígidos podemos obtener un valor de IRI aceptable correspondiente, es decir ocupando valores PSI 3.5-4 y PSI de 2.00 como límites de servicio, sustituyendo en la ecuación obtendremos un criterio de referencia para pavimentos rígidos respecto al valor del IRI, obteniendo entonces que valores IRI de 2.1 o

2.7 m/km son considerados aceptables y valores de IRI a 5.4 m/km son considerados terminales.

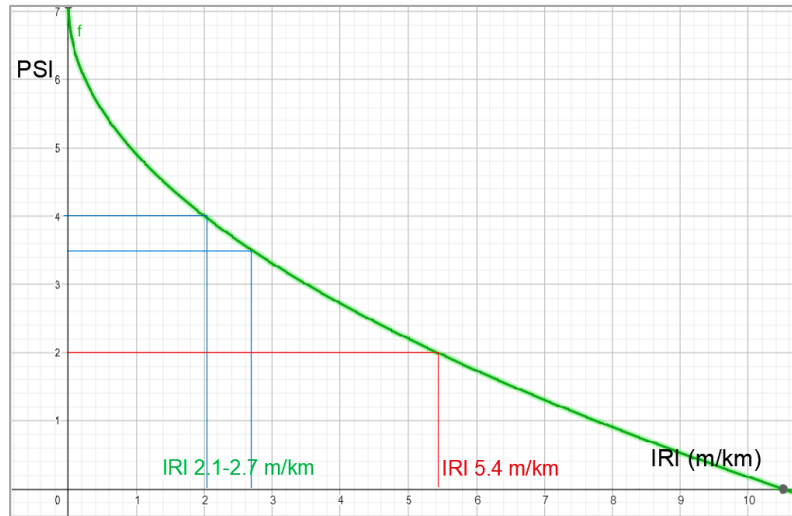


Ilustración 4. Grafica PSI vs IRI Pavimentos Rígidos. Autoría Propia

Según la Federal Highway Administration reporta que los rangos típicos para valores de IRI en carreteras están dentro de 0.8-4.5 m/km, considerando tramos con valores menores a 2.4 m/km como superficies en buen estado y tramos con valores mayores a 4.7 m/km como superficies rugosas no confortables. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

Para España según lo estipulado en la Orden Circular 308/89C y E, establece un IRI admisible de 2m/km para la recepción de carreteras y recepción con un valor de 2.5m/km si al menos el 80% del tramo tiene un valor máximo de 2m/km con un IRI inicial de 1.5 en la mitad del tramo. Actualmente, reciben carreteras con valores de IRI 1.85 m/km, considerando que para valores de “Intensidad Media Diaria” IMD >2000 el IRI máximo debe ser 4.5m/km y para valores IMD <2000 el valor máximo de IRI 3.5m/km. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

Para Latinoamérica se basa en la siguiente información recopilada de (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998) en la Tabla 1:

Normativa Internacional para valores de IRI		
Condición del camino	Valor IRI para Chile (m/km)	Valor IRI para Honduras (m/km)
Bueno	0 - 3.0	< 3.5
Regular	3.0 - 4.0	3.5 – 6.0
Malo	> 4.0	> 6.0

Tabla 3. Valores de IRI para Chile y Honduras. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

Además, se menciona que para Uruguay se tienen los siguientes valores, que incluyen pavimento Asfáltico e Hidráulico.

Normativa Uruguay para valores de IRI

Condición del camino	Pavimento Asfáltico IRI (m/km)	Pavimento Hidráulico IRI (m/km)
Muy Bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 – 3.9	2.8 - 3.5
Regular	4.0 – 4.6	3.6 – 4.3
Malo	> 4.6	> 4.3

Tabla 4. Referencias Uruguayas IRI para Pavimento Asfáltico y Rígido. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

1.7.2.2 Métodos y Equipos de Medición

Los métodos de medición de la rugosidad junto con sus respectivos equipos de medición, se clasifican en base a la precisión, cuán directo se realizan las mediciones y las calibraciones requeridas, es por esto que el Banco Mundial divide en cuatro clases los métodos de medición.

Mediciones de Clase 1: Utilización de perfiles de precisión:

Son los métodos con mayor exactitud. Estos establecen la medición basada en un perfil longitudinal con medidas espaciadas 0.25 m y cotas cuya precisión es de alrededor de 0.5mm en pavimentos muy lisos, las cuales pueden aumentar en pavimentos rugosos. Dentro de esta clase se encuentran los equipos como; el perfilómetro TRRL Beam y Método Rod and Level (Mira y Nivel). Estos métodos suelen ser utilizados para calibrar otros o cuando se necesitan datos altamente precisos. Son considerados métodos de Clase 1 aquellos que presentan errores de medición insignificantes a comparación con el grado de incertidumbre. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

Equipos de Clase 1:

- **Levantamiento con mira y nivel (Rod and Level):**

Se ocupan equipos topográficos, una mira de precisión con marcas en unidades métricas y un nivel de anteojo. Se determina por medio de estos equipos el perfil del pavimento con un costo bajo pero un procedimiento lento. Se aconseja utilizar en longitudes cortas y se utiliza un programa elemental de cómputo para traducir las mediciones a unidades IRI. (Pereyra, 2017)



Ilustración 5. Levantamiento con Mira y Nivel. (Pereyra, 2017)

- **Face Dipstick:**

Es un acelerómetro sobre una estructura con apoyos separados 300mm, junto a un mango que permite desplazar el equipo y girarlo 180°. El dispositivo incluye un equipo computador que graba y calcula resúmenes estadísticos de rugosidad, el acelerómetro incorporado mide la inclinación del equipo, con este dato y la separación de los apoyos se calcula las alturas y sus diferencias.

Su rendimiento ronda los 250m en una hora por una huella de neumático únicamente, su costo inicial es bajo y su uso es sencillo, sin embargo, sigue siendo una alternativa lenta. (Pereyra, 2017)



Ilustración 6. Face Dipstick. (Pereyra, 2017)

Mediciones de Clase 2: Otros métodos perfilométricos.

Dentro de esta clase están todos los métodos cuya rugosidad se establece en base del perfil longitudinal, pero con una precisión menor a la de la Clase 1. Se utilizan perfilómetros de mayor velocidad o de mediciones estáticas, pero con menor precisión que la anterior clase. Ambas clases realizan la medición en unidades IRI basándose en algoritmos matemáticos que se encargan de simular la respuesta de la suspensión del vehículo modelo, sintetizando el movimiento relativo vertical de la superficie del pavimento acumulado por cada unidad de longitud en unidades comunes de m/km. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

Equipos de Clase 2:

- **Perfilómetro Inercial APL:**

Su rendimiento está entre 100 – 300 km de carretera al día, la medición se realiza determinando los desplazamientos verticales de la rueda respecto a un péndulo inercial. El equipo es remolcado por un vehículo a velocidad constante.

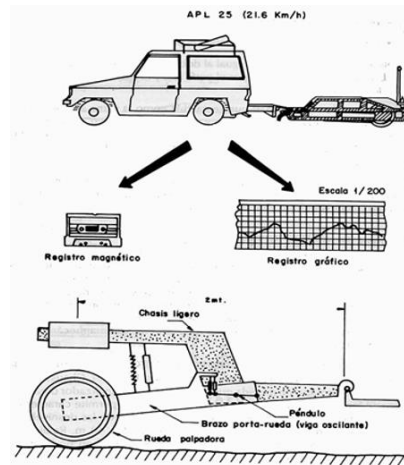


Ilustración 7. Gráfico del Perfilómetro Inercial APL. (Pereyra, 2017)

- **Perfilómetro Láser:**

El equipo mide la distancia existente entre el pavimento y el sensor láser ubicado en la barra de medición que puede estar en la parte delantera o trasera del vehículo. La barra de medición se ubica a una altura conocida y el sensor junto a un acelerómetro crea un sistema de referencia inercial el cual ayuda a que las mediciones sean únicamente representativas de la cota de la carretera. Este equipo está compuesto principalmente por un láser, acelerómetro, lector de distancia, interfaces de registros analógicos y por el computador que registra los valores medidos con los demás componentes y determina el valor de la rugosidad IRI. (Pereyra, 2017)



Ilustración 8. Perfilómetro Laser. (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2021)

Mediciones de Clase 3: IRI estimado a partir de ecuaciones de correlación.

Llamados también Medidores de tipo respuesta RTRRMS (Response Type Road Roughness Measuring Systems), el valor del índice de Rugosidad Internacional es estimado por medio de correlaciones. Las mismas que dependen de las propiedades dinámicas de cada vehículo y variables con el tiempo, por lo que se requiere una calibración inicial. Este método de medición es más rápido pero la precisión es menor en comparación a las anteriores clases.



En este caso, el vehículo cuenta con un equipo de medición particular el cual recolecta la información a raíz del comportamiento dinámico del vehículo. Posteriormente se determina el tipo de ecuación de correlación para determinar el valor del IRI. Los equipos que no hayan sido calibrados previamente no se consideran de clase 3. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

Para lograr realizar mediciones más satisfactorias, Sayers recomienda utilizar un mismo instrumento para realizar todas las mediciones con el objetivo de minimizar el error por repetición y garantizar una correcta calibración de los equipos, puesto que cada instrumento y vehículo tiene su propia respuesta dinámica. La variación entre mediciones de esta clase es del 14% o 0.5 m/km en la escala de IRI para vías pavimentadas y del 18% o 1 m/km para vías no pavimentadas. Existen algunos factores que limitan la precisión de las mediciones, por lo que es necesario seguir ciertas consideraciones como:

- Precisión del instrumento de medición: Mientras más actual sea el instrumento, las mediciones serán más precisas y se reduce los errores sistemáticos de calibración.
- Ubicación de los puntos de medición a lo largo de la vía: Mientras menor sea el intervalo entre los puntos donde se realiza la medición, menor variación existirá.
- Trayectoria sobre la calzada por donde circula el vehículo: En lo posible circular por el wheelpath en caso de que sea identificable sobre la calzada.

Estas consideraciones pueden reducir la variación de las mediciones del 14% en vías pavimentadas, a un 5%. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

Existen algunos filtros que permiten descartar mediciones erróneas para posteriormente procesar los datos y obtener resultados. (Pereyra, 2017)

- Análisis estadístico de media móvil para descartar mediciones que sean muy superiores a la media. De esta manera se logra obtener perfiles de IRI similares entre mediciones.
- Aplicación del Modelo Cuarto de Carro el cual es un algoritmo en el cual se relacionan dos masas, una amortiguada y otra no amortiguada, para determinar el valor del IRI

Los equipos de medición utilizados para realizar la presente investigación, corresponden a esta clase, por lo que en el literal 2.2.3 se realiza una descripción del modelo matemático a utilizar para obtener las correlaciones y mediciones del IRI.

Equipos de Clase 3:

- **Perfilógrafo California:**

Este equipo está compuesto por una rueda que posee un sensor que registra las variaciones verticales y es soportada por un marco metálico de alrededor de 25 pies que posee ruedas a

sus extremos. Mide las alturas de todas las elevaciones y depresiones que varíen respecto a la banda de referencia y la divide por la longitud del tramo de ensayo. La banda posee un ancho máximo de 5mm. El índice de perfil IP es determinado por el promedio de las tasas de regularidad de la banda en ambas rodadas de la sección de ensayo. Con el índice de perfil se calcula por medio de ecuaciones de correlación el valor IRI.

Propiedades del Perfilógrafo California			
Tipo de Pavimento	Clima	Banda de Referencia	Ecuación
Asfáltico	Todos	0.0 mm	$IRI = 2.66543 * IP + 213.01$
Asfáltico	Todos	5.0 mm	$IRI = 3.78601 * IP + 887.51$
Rígido	Húmedo	0.0 mm	$IRI = 2.35820 * IP + 317.19$
Rígido	Húmedo	5.0 mm	$IRI = 2.87407 * IP + 1229.63$

Tabla 5. Espesores de banda y ecuaciones de correlación para diferentes pavimentos utilizando el Perfilógrafo California. (Pereyra, 2017)



Ilustración 9. Perfilógrafo California (Pereyra, 2017)

- **Equipos RTRRMS:**

Este tipo de equipos se desarrollaron desde 1920 y consisten en vehículos o tráiler con dispositivos o sensores que miden los desplazamientos verticales que experimenta a lo largo del trayecto de medición. Este tipo de equipos se consideran de procesamiento complejo en base a las ecuaciones de correlación, pero de un nivel medio de precisión, por lo que requieren una constante y correcta calibración en base a mediciones de equipos de clase 1 o 2. (Sánchez M. C., 2019)

Actualmente, los smartphones cuentan con varias herramientas como giroscopio, sensores de aceleración, GPS, etc. Lo cual los convierte en potenciales nuevas alternativas de equipos de medición, con las ventajas de ser accesibles a un bajo costo y su facilidad de uso. Según la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) las agencias de transporte cada vez buscan sistemas automatizados para la recolección de datos, por lo que el uso de dispositivos celulares para medir el IRI puede ser la principal alternativa. (Islam, Buttlar, Aldunate, & Vavrik, 2015). Múltiples aplicaciones de medición del IRI se han desarrollado, por lo que este método de medición está en desarrollo. Dichas aplicaciones de mediciones se

basan en el Método Cuarto de Carro, el cual se basa en métodos de doble integración para relacionar los desplazamientos verticales experimentados por una masa suspendida o amortiguada que es el dispositivo celular y una masa no suspendida o no articulada que es el vehículo de medición. (Badilla, 2009) Mediante dicho modelo, se establecen las correlaciones que son utilizadas para poder determinar el valor del IRI.

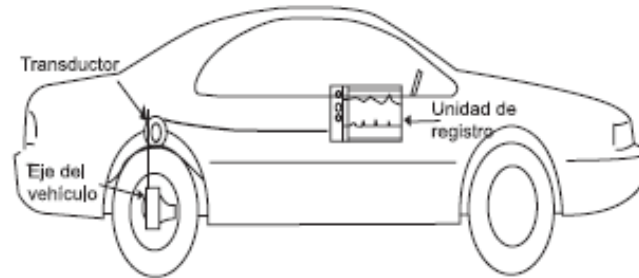


Ilustración 10. Equipo RTRRMS (Badilla, 2009)

Mediciones de Clase 4: Valoraciones subjetivas y mediciones no calibradas.

Utilizados en situaciones que requieren datos de rugosidad sin necesidad de gran precisión o no es posible contar con equipos pertenecientes a las clases anteriores, por lo que se determinan por medio de inspecciones visuales o la experiencia de viaje. También se consideran dentro de esta clase, los equipos RTRRMS que no han sido calibrados. Los valores obtenidos de IRI son considerados únicamente aproximaciones o estimaciones con una variación de 35% en la escala de medición del IRI. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

Equipos de Clase 4:

- **MERLÍN (Machine for Evaluating Rugness using Low-cost Instrumentation).**

Equipo que consta de una estructura metálica, una rueda de apoyo y un brazo móvil cuyo extremo inferior contiene un patín que registra las irregularidades superficiales y el extremo superior tiene un indicador deslizable sobre un tablero de registro. Con cada vuelta completa de la rueda, se marca la posición del indicador en el tablero hasta completar 200 mediciones que son aproximadamente 400m de longitud. El resultado es una gráfica que genera el puntero, la cual es un histograma de frecuencias de las desviaciones mediante el cual, junto con las correlaciones, sirven para determinar los valores del IRI en m/km. (Pereyra, 2017)

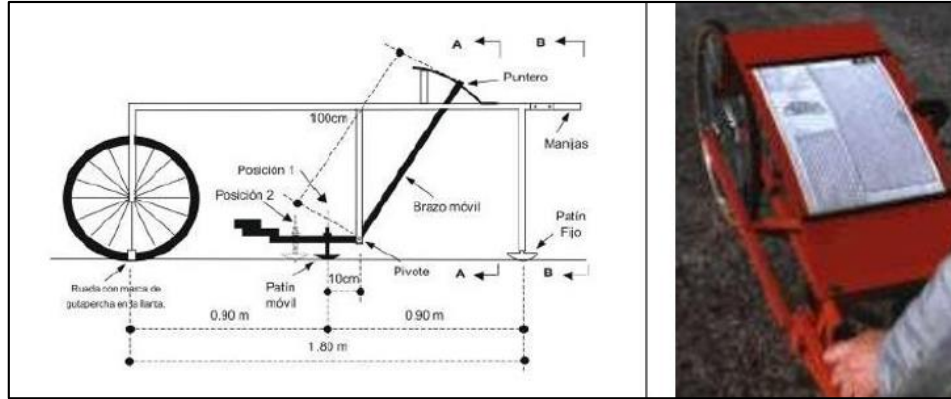


Ilustración 11. Equipo MERLÍN. (Pereyra, 2017)

Se utiliza el rango denominado “D” del histograma, en el cual se excluyen los 10 datos de frecuencias desde cada extremo. Dicho rango junto con ecuaciones de correlación sirven para obtener el valor IRI. (Pereyra, 2017)

Las ecuaciones de correlación para diferentes pavimentos son:

- Pavimento con capas asfálticas extendidas con terminadora:

$$IRI(m/km) = 0.592 + 0.0471 * D \quad (3)$$

- Pavimentos asfálticos nuevos:

$$IRI(m/km) = 0.0485 * D \quad (IRI < 2.4 m/km) \quad (4)$$

- Macadam de penetración:

$$IRI(m/km) = 1.913 + 0.049 * D \quad (97 < D < 202) \quad (5)$$

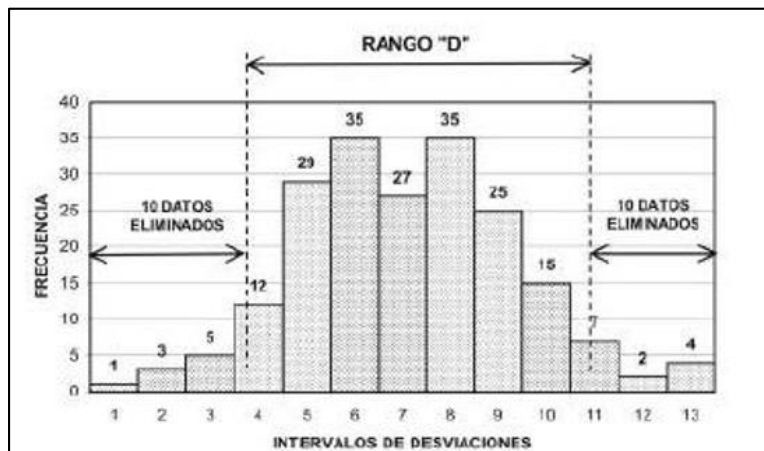


Ilustración 12. Histograma y Rango de Mediciones con Equipo MERLÍN



1.7.3 Aplicaciones de Medición

Dentro de la Clase 3 de los métodos y equipos de medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), se encuentran los equipos RTRRMS los cuales determinan el valor del IRI a partir de ecuaciones de correlación que surgen del Modelo Cuarto de Carro. Esta clase de equipos se caracteriza por la rapidez en la toma de datos, lo cual permite cubrir mayores distancias de vía en poco tiempo, optimizando tiempo y recursos, además de permitir recopilar una gran cantidad de información con el objetivo de formar bases de datos. Cabe recordar que este tipo de equipos requieren una calibración previa en base a mediciones realizadas con equipos de clase 1 o 2. (Sánchez M. C., 2019). Dicha calibración se realiza en base al conjunto de factores que afecta las mediciones, es por esto que mientras más factores se consideren y puedan calibrar, mejor será la precisión de las mediciones.

El dispositivo celular mediante el cual se realiza la recolección de datos, ha tenido múltiples denominaciones a lo largo del tiempo. Michael Sayers en su publicación técnica para el Banco Mundial en el año 1986 en Washington, denomina este equipo de medición como Roadmeter o Medidor de Ruta. El Roadmeter realiza una serie de mediciones a lo largo del trayecto, del desplazamiento vertical que experimenta, gracias a los 3 acelerómetros junto con el GPS con el que cuentan los actuales smartphones. Además, Sayers presenta una guía de calibración para mediciones de rugosidad para cada una de las clases de métodos de medición. En lo referente a la clase 3, indica que los principales factores o parámetros a considerar para realizar una calibración inicial son:

- Tipo y características del vehículo
 - **Amortiguadores:** El vehículo de medición debe tener un sólido sistema de suspensión que no sea independiente del eje trasero, es por esto que es preferible un vehículo con tracción trasera, además de amortiguadores helicoidales debido a que generan menor fricción. Dicho componente del vehículo es el que más afecta a las mediciones.
 - **Tipo de Vehículo:** Es posible utilizar un remolque con un eje sólido, independientemente del tipo de vehículo, recomendado utilizar un mismo vehículo para realizar las mediciones, caso contrario se debe calibrar nuevamente el equipo RTRRMS.
 - **Presión de Neumáticos:** Las mediciones de la rugosidad son afectadas por la presión de los neumáticos. Mientras mayor presión en el neumático, mayor es la medición de la rugosidad, por lo que se debe revisar que la presión sea la recomendada por el fabricante.
- Velocidad de Circulación
 - **Velocidad:** Las mediciones son dependientes de la velocidad. Se considera como velocidad estándar 80 km/h debido a que la probabilidad de repetitividad o reproducibilidad del ensayo es mayor a dicha velocidad. Sin



embargo, considerando que cada vía tiene distintas características como curvas o tráfico, dicha velocidad puede llegar a ser riesgosa, se plantea una velocidad mínima de medición de 50 km/h o incluso 32km/h en casos extremos. Es necesario realizar compensaciones para los datos que fueron medidos a una velocidad distinta de la estándar y así estimar el valor que habría obtenido a 80 km/h.

- Ubicación del Dispositivo Roadmeter
 - **Soporte o Acople:** El dispositivo Roadmeter debe estar colocado en un soporte fijo y resistente que impida el movimiento del teléfono celular dentro del vehículo.
- Ubicación de Mediciones
 - **Intervalo:** Mientras más pequeño sea el intervalo de análisis y recopilación de cada dato, existe menor error por repetitividad.
 - **Tramo de Calibración:** Se recomienda realizar entre 3 y 5 mediciones en el tramo de calibración para obtener una cantidad fiable de datos. Mientras más largo sean los tramos de calibración, permiten reducir el número de repetición de mediciones.
 - **Tipo de Superficie:** En base al tipo de superficie que existe en la vía de análisis, pavimentado o no pavimentado, se debe realizar las calibraciones correspondientes y ajustes por velocidad pertinentes.
 - **Trayectoria:** En lo posible circular por el wheelpath en caso de que sea identificable sobre la calzada, debido a que al realizar las mediciones por la misma línea de trayectoria reduce los errores por repetición y errores sistemáticos del dispositivo.
- Clima
 - **Temperatura:** La temperatura es un parámetro que afecta a todos los componentes del vehículo, como los amortiguadores y neumáticos, lo cual afecta a las mediciones realizadas. Al ser un parámetro que no se puede controlar, se considera que una variación máxima de 10 °C no presenta cambios o afecta las mediciones de rugosidad. lo recomendable es realizar las mediciones cuando la temperatura sea mayor a 0°C y el clima no genere cambios bruscos de temperatura.
 - **Lluvia:** La lluvia puede afectar las mediciones, debido a que el agua remanente en la superficie del pavimento puede salpicar a los componentes del vehículo, generando un cambio brusco de temperatura lo cual altera las mediciones. De igual manera, la humedad repercute en los cambios de temperatura, por lo que las condiciones climáticas en las que se realiza la calibración deben ser semejantes a las condiciones en las que se realiza las mediciones.

1.7.3.1 Modelo Matemático

A partir de la década de 1940 se desarrollaron modelos matemáticos enfocados en la respuesta de los vehículos militares. Posteriormente en la década de 1960, el departamento de investigación de la empresa General Motors (GMR) desarrolló un modelo de perfilómetro al igual que el Departamento de Transporte de Michigan (MDOT). A finales de esa década, las dos entidades se enfocaron en desarrollar un modelo electrónico equivalente al perfilómetro con un vehículo de simulación. Dicho modelo se denominó QCS (Quarter Car Simulation). (Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1986)

El fundamento teórico en base al cual se desarrollaron las aplicaciones RoadRoid e IRI Calc Free para realizar mediciones del IRI, es el denominado QCS (Quarter Car Simulation) o también llamado Modelo de Cuarto de Carro o Golden Car. Este modelo considera el movimiento del dispositivo de medición Roadmeter que experimenta dentro del vehículo tipo, mientras transita a velocidad estándar de 80km/h a lo largo del tramo de carretera que se va a evaluar. Es un modelo que considera las masas, amortiguadores, rigidez del vehículo y altitud, tomando en cuenta únicamente la cuarta parte del vehículo de prueba. (Sánchez & Solminihac, 1989)

Para aplicar este método, es necesario conocer el perfil longitudinal de la carretera, por lo que una forma aproximada de conocer el mismo, es mediante la localización con GPS incorporado en los teléfonos celulares actuales. El proceso consiste en medir la diferencia de desplazamientos verticales entre la masa no suspendida, la cual hace referencia al vehículo y la masa suspendida, que es el teléfono o Roadmeter, para realizar la sumatoria de dicha diferencia de desplazamientos y obtener un desplazamiento acumulado a lo largo de un tramo mediante un proceso de doble integración. A continuación, se presenta un esquema explicativo presentado por Sayers y Kamarihas.

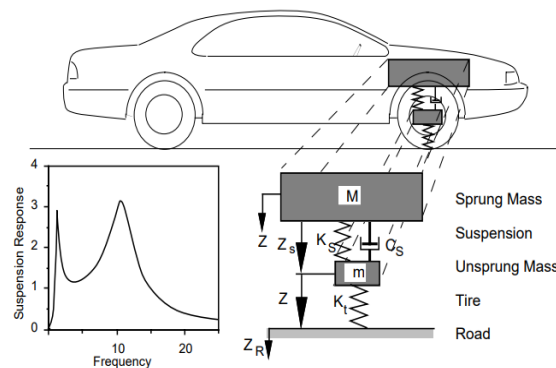


Ilustración 13. Esquema del Modelo Cuarto de Carro (Sayers & Kamarihas, 1998)

Primeramente, es necesario definir las cotas del perfil longitudinal de la vía, en intervalos Δx de longitud constante. Posteriormente, en base al sistema de masas y amortiguadores idealizado, es posible plantearse un sistema de ecuaciones diferenciales a partir del cual se

deduce las ecuaciones de correlación que sirven para determinar el valor del IRI. Las ecuaciones diferenciales que determinan el movimiento de la masa suspendida y no suspendida en base al diagrama de cuerpo libre, son:

$$m_2 \ddot{v} + c_2 (\dot{v} - \dot{u}) + k_2 (u - v) = 0 \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{v} + m_1 \ddot{u} + k_1 (u - y) = 0 \quad (7)$$

Donde v y u son derivadas respecto del tiempo:

- m_1 : Masa no Suspendida
- m_2 : Masa Suspendida
- k_1 : Constante de Resorte de la Rueda
- k_2 : Constante de Resorte de la Suspensión
- c_2 : Amortiguador
- y : Cota del Perfil Recorrido

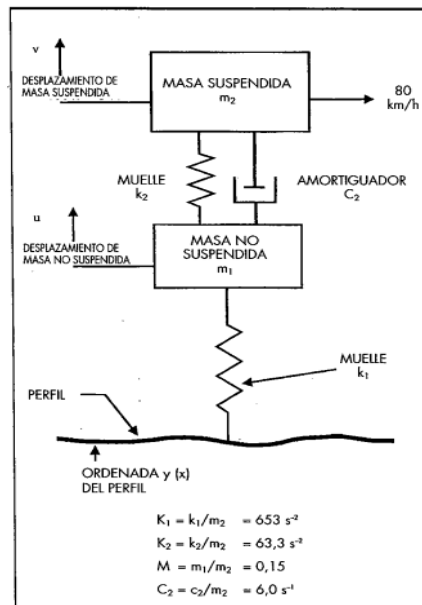


Ilustración 14. Diagrama de Cuerpo libre del Modelo Cuarto de Carro (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1998)

Al resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, se obtiene los siguientes coeficientes:

$$K_1 = \frac{k_1}{m_2} = 653 [1/s^2]; K_2 = \frac{k_2}{m_2} = 63,3 [1/s^2]; M = \frac{m_1}{m_2} = 0,15; C_2 = \frac{c_2}{m_2} = 6[1/s] \quad (8)$$

Los valores de los coeficientes anteriores, fueron establecidos por la NCHRP en su reporte 228 mediante un modelo estándar de vehículo denominado Golden Car. (Sayers & Karamihas, 1998).

Al resolver el sistema de ecuaciones diferenciales se puede determinar el desplazamiento que experimentan las dos masas en función de la cota del perfil. Debido a que el cálculo anterior se realiza en cada intervalo de longitud constante, se determina el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Z_{1,i} = S_{11}Z_{1,i-1} + S_{12}Z_{2,i-1} + S_{14}Z_{4,i-1} + P_1 * y' \quad (9)$$

$$Z_{2,i} = S_{21}Z_{1,i-1} + S_{22}Z_{2,i-1} + S_{24}Z_{4,i-1} + P_2 * y' \quad (10)$$

$$Z_{3,i} = S_{31}Z_{1,i-1} + S_{32}Z_{2,i-1} + S_{34}Z_{4,i-1} + P_3 * y' \quad (11)$$

$$Z_{4,i} = S_{41}Z_{1,i-1} + S_{42}Z_{2,i-1} + S_{44}Z_{4,i-1} + P_4 * y' \quad (12)$$

Donde: $Z_{1,i}$; $Z_{2,i}$; $Z_{3,i}$; $Z_{4,i}$ Son variables en función de la respuesta dinámica de las masas a lo largo del perfil de análisis, en cada intervalo.

- $Z_{1,i} = \Delta v / \Delta x$ Velocidad de la masa suspendida en una posición i .
- $Z_{2,i}$: Aceleración de la masa suspendida en una posición i .
- $Z_{3,i} = \Delta u / \Delta x$ Velocidad de la masa no suspendida en una posición i .
- $Z_{4,i}$: Aceleración de la masa no suspendida en una posición i .
- $y' = (y_i - y_{i-1}) / \Delta x$ Pendiente promedio del Intervalo
- $Z_{j,i-1}$: Valores correspondientes a posiciones previas $i-1$
- S_{ij} y P_i : Constantes en función del tiempo requerido para recorrer el intervalo Δx ; son obtenidas de combinaciones de simulación a diferente velocidad.

Al resolver el sistema de ecuaciones, es posible conocer las posiciones de las dos masas en un punto ($i-1$) y de esta manera plantear un nuevo sistema de ecuaciones para conocer las posiciones de las mismas masas en el siguiente punto (i). (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1998)

Una vez establecidas las posiciones de las masas a lo largo de todo el perfil, se procede a calcular la pendiente rectificadora (RS) de la siguiente manera:

$$RS_i = |Z_{3,i} - Z_{1,i}| = \left| \frac{\Delta u}{\Delta x} - \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| \quad (13)$$

De esta manera se define el IRI como:



$$IRI = \frac{1}{L} \sum |\Delta u - \Delta v| \quad (14)$$

$$L = n * \Delta x \quad (15)$$

Donde:

- L: es la longitud del tramo en el que se determina el valor del IRI.
- n: número de intervalos

Si se reemplaza la pendiente rectificada y la ecuación de la longitud en la fórmula del IRI, se obtiene:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum |RS| \quad (16)$$

Finalmente, se define al Modelo de Cuarto de Carro QC (Quarter Car) mediante la siguiente expresión. (Díaz & Ramírez, 2021).

$$QC = \frac{1}{L} \int_0^{x/v} |\dot{u} - \dot{v}| dt \quad (17)$$

Donde:

- QC: Índice de Cuarto de Carro
- L: Longitud de vía
- X: Distancia
- V: Velocidad del vehículo (80 km/h)
- \dot{u} : Velocidad vertical de la masa no suspendida o del vehículo
- \dot{v} : Velocidad vertical de la masa suspendida o del dispositivo móvil
- dt : Diferencial de tiempo

De esta manera se explica el proceso que sigue el Modelo Cuarto de Carro para determinar el valor del IRI al realizar mediciones con equipos RTRRMS. Dicho método es el utilizado por las aplicaciones celulares para realizar mediciones del IRI.

1.7.3.2 RoadRoid

Roadroid es una herramienta para ingenieros, la cual permite realizar mediciones de las vibraciones que experimenta un vehículo, con smartphones que cuentan con GPS y acelerómetros, para monitorear el estado de las vías. Las mediciones se cargan a un servidor

web mediante el cual se puede descargar y transferir la información como los datos, ubicación e incluso fotografías que se toman durante el trayecto.



Ilustración 15. Logo aplicación RoadRoid

El nivel de calidad de información en base a la clasificación del Banco Mundial es clase 3 (IQL3). La aplicación evalúa las vibraciones transmitidas del vehículo al dispositivo 100 veces por segundo para calcular el valor de la rugosidad mediante ecuaciones de correlación lineal obtenidas del Modelo Cuarto de Carro. Dichas vibraciones se miden mediante los 3 acelerómetros con los que cuentan los celulares, uno en cada eje (x, y, z). Esta aplicación determina la rugosidad por estimación y por cálculo, por lo que como resultado se obtiene dos valores de IRI. (Roadroid, 2021) Las principales ventajas de esta aplicación son:

- Facilidad de uso
- Rapidez de medición
- Accesibilidad a bajo costo
- Es portátil y durable
- Permite calibrar varios parámetros

Desarrollo de la Aplicación

El desarrollo de esta aplicación inició en el año 2001 por el ingeniero en vías Lars Forslof junto con los ingenieros informáticos Hans Jones y Tommy Niituula quienes formaron la compañía sueca Roadroid, con el objetivo de medir y determinar las condiciones del pavimento. Cabe destacar que, en esa época, los teléfonos celulares aun no contaban con GPS ni acelerómetros incorporados, por lo que se utilizó un computador para recopilar los datos medidos, un acelerómetro externo de alta resolución para medir las vibraciones, un GPS y un amplificador de señal para georreferenciar los datos de medición, sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios. (RoadRoid, 2014)

El primer prototipo fue publicado en el 2002 como Tesis de Maestría del Royal Institute of Technology gracias al financiamiento de la Administración Nacional de Carreteras de Suecia (SNRA). Posteriormente, a partir del 2006 se mejoró el método de análisis de vibraciones al variar la longitud de intervalos de medición, la velocidad de circulación del vehículo, la sensibilidad y frecuencia de muestreo. En 2010 se incluye el uso del teléfono celular, puesto que ya incluían acelerómetros. En dicho año, el director del proyecto Ing. Lars Forslof junto

con los ingenieros Hans Jones y Tommy Niituula iniciaron el desarrollo de la aplicación para teléfonos celulares.

Durante el 2011, los ingenieros realizaron ensayos de campo para calibrar y mejorar la aplicación, junto con el proceso de medición, gracias a la experiencia que tenían de las anteriores investigaciones y publicaciones. Al año siguiente, algunas ciudades utilizaron la aplicación de forma gratuita, para realizar las primeras mediciones y se obtuvo buenos resultados por lo que ganaron la Satélite Navigation Competition European. En el 2013 Roadroid ganó el premio UN Worl Summit Award como la mejor aplicación electrónica. (RoadRoid, 2014)

Actualmente, Roadroid es utilizado mundialmente, sin embargo algunos países y ciudades destacan por fomentar su uso y desarrollo. Algunos de estos ejemplos son el Ministerio de la Construcción del país asiático Brimania, Departamento de Obras Públicas de Afganistán región norte, Administración de Transporte de Suecia en varias ciudades como Upplands Väsby, Trafikverket y Lund. (RoadRoid, 2014)

Parámetros de Medición

Roadroid realiza dos mediciones en simultáneo un valor de IRI estimado (eIRI) y un valor calculado (cIRI). Dichas mediciones son afectadas por dos parámetros, la rugosidad y la textura. La rugosidad se determina mediante el valor del IRI, mientras que la textura que puede ser micro o macro, determina la interacción entre el neumático y el pavimento. El ingeniero Lars Forslof establece 4 casos que se pueden presentar en un pavimento. (Forslof, 2015)

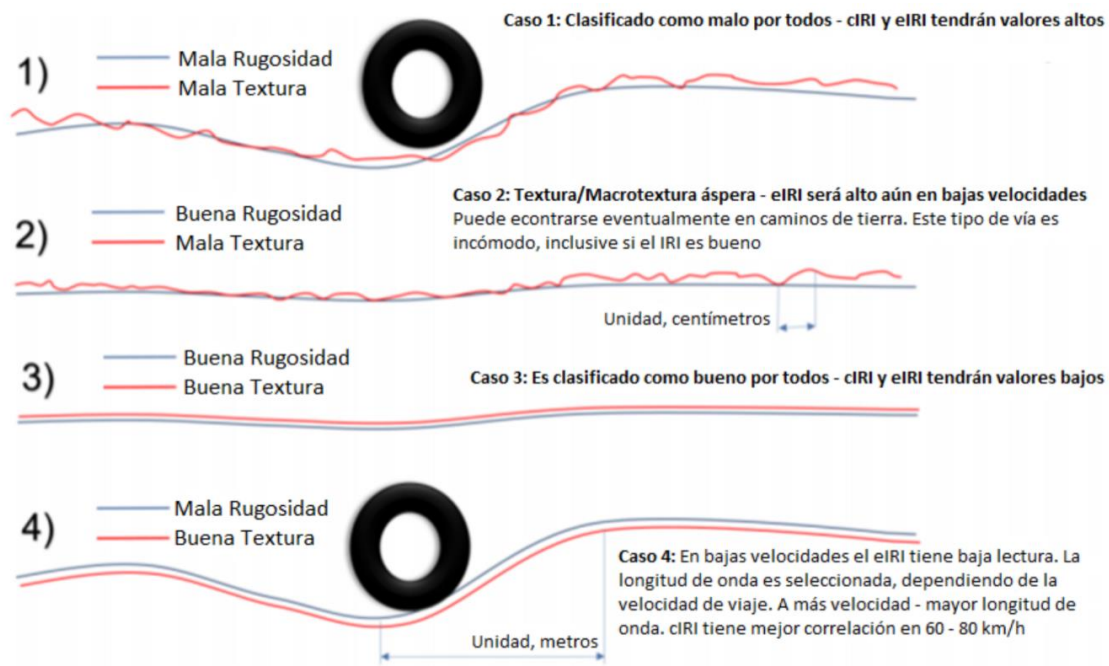


Ilustración 16. Casos de Rugosidad y Textura (Forslof, 2015)



- El caso 1 implica una vía deteriorada con mala rugosidad y mala textura por lo que la percepción del usuario es mala y las mediciones de eIRI y cIRI serán altas.
- El caso 2 indica una buena rugosidad por lo que con el valor del IRI se puede calificar a la vía como buena, mientras que, debido a la textura, la percepción del usuario sería mala, obteniendo valores elevados de eIRI.
- El caso 3 presenta buena rugosidad y textura, por lo que son condiciones óptimas del pavimento y se obtendrá valores bajos de eIRI y cIRI.
- El caso 4 la vía presenta ondulaciones que afectan el valor del eIRI, en este caso la mejor medición es cIRI circulando en la velocidad estándar 80km/h.

Estos cuatro casos pueden presentarse en una vía, lo cual afecta las mediciones de eIRI y cIRI, es por esto que se debe identificar el caso presente en la vía de estudio y de esta manera optar por la medición calculada o estimada. (Forslof, 2015)

Parámetros de Ingreso

- **Tipo de Vehículo:** La aplicación permite establecer el tipo de vehículo de medición, el cual puede ser bicicleta, carro pequeño o sedan, SUV o carro mediano, Jeep 4x4 o camioneta, e indefinido. En base a esta selección, se establecen los valores por default o preestablecidos en la aplicación para los demás parámetros.
- **Longitud de Intervalo:** Permite determinar la distancia entre la cual se realiza la toma de datos, puede ser de 10m, 20m, 40, 100m y 200m. La variación de este parámetro permite realizar diferentes secciones homogéneas para buscar un mejor ajuste o correlación.
- **Frecuencia del Acelerómetro:** Dependiendo de las características del dispositivo, se determina la frecuencia máxima de muestreo del sensor de aceleración, dicho muestreo es el número de repeticiones o análisis realizados en un segundo para determinar un valor de medición. Las opciones son (100Hz, 200Hz u otro). Los teléfonos actuales tienen incorporado acelerómetros de 200Hz, los de 100Hz corresponden a dispositivos antiguos y hay algunos teléfonos que cuentan con acelerómetros de mayor frecuencia.
- **Sensibilidad de Velocidad:** Puesto que no siempre es posible mantener la velocidad estándar de 80km/h durante la medición, debido a curvas, tráfico y más, se definen valores de ajuste para mediciones a distintas velocidades. La aplicación requiere valores de ajuste para velocidades de (20km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h y 120 km/h) a mayor valor de ajuste, menor sensibilidad de velocidad tendrán las mediciones.
- **Calibración de Fricción:** Este parámetro puede ser positivo o negativo para aumentar o disminuir los valores de medición. Los posibles valores son (-50%, -43%, -38%, -31%, -26%, -23%, -20%, -17%, -13%, -9%, -5%, 0%, +5%, +11%, +18%,

+25%, +33%, +43%, +54%, +67%, +82%, +100%.) este parámetro sirve para medir la skidding resistance.

- **eIRI Valor de Calibración:** Este parámetro de calibración, depende del tipo de vehículo seleccionado y exige mediciones a velocidades entre 20km/h y 100km/h. Mediante este valor inicial, se realiza la medición por estimación, la cual es más sensible a la textura.
- **cIRI Sensitividad del Vehículo:** Este valor se determina en función del tipo de vehículo, longitud del intervalo, frecuencia del acelerómetro, y velocidad dentro de un rango de 60km/h a 80km/h. Es un parámetro de ajuste basado en el modelo de Cuarto de Carro, mediante el cual se realizan las mediciones calculadas para obtener valores del IRI por lo que generalmente es el que más se ajusta a mediciones realizadas con equipos de clase 1 o 2.

La aplicación RoadRoid cuenta con varios parámetros o variables de entrada, lo cual mejoran las consideraciones de medición y cálculos de valores del IRI, siendo una herramienta de medición bastante útil en comparación con equipos clase 1 y 2. (Roadroid, 2021).

1.7.3.3 IRI Calc Free

La aplicación IRI. Regularidad. Carreteras o también llamada IRI.Calc.Free es un software disponible para el sistema operativo Android, desarrollado por ABAKAL Ingenieros Consultores de Madrid. ABAKAL es un equipo de ingenieros que han desarrollado varios softwares en diversos temas como: pavimentos, estructura, hidráulica, hormigón y cálculos estadísticos. El ingeniero Luis Nieto es el desarrollador de esta aplicación enfocada en el cálculo del IRI en un tramo de carretera.



Ilustración 17. Logo aplicación IRI Calc Free (Nieto, 2018)

Esta aplicación se basa en el Modelo Cuarto de Carro. Realiza la medición de desplazamientos verticales mediante el GPS y los 3 acelerómetros que poseen los celulares, uno en cada eje o dirección, para determinar el valor del IRI. El objetivo de esta aplicación es crear un sistema de medición del IRI a bajo costo y que sea sencillo de utilizar. Fue publicada en el 2015 y su última versión es la Civil-K actualizada el 14 de octubre de 2019 la cual cuenta con dos tipos de cálculos. (Nieto, 2015)



La velocidad de ensayo debe ser de 80km/h y la aplicación posee una escala de velocidades donde el margen recomendado es de 65km/h hasta 95km/h.

Parámetros de Ingreso

La aplicación tiene dos parámetros de ingreso que sirven para calibrar la aplicación en función de mediciones con equipos de clase 1 o 2 y de esta manera realizar correctamente las mediciones del IRI.

- ***Tipo de Cálculo***

La aplicación tiene un botón para determinar el tipo de cálculo a realizar, existen tiene dos opciones, cálculo estadístico o cálculo por máximos.

- Cálculo Estadístico: Este método es una ponderación relativa de la vibración transmitida del vehículo al dispositivo. Este tipo de cálculo es de ajuste ascendente, es decir que, a mayor coeficiente de ajuste, mayor serán los valores del ensayo
- Cálculo por Máximos: En este método, se determina valores máximos o límite de medición, en base a los cuales se pondera los datos. Este tipo de cálculo es de ajuste descendente o inverso, es decir que, a mayor coeficiente de ajuste, menor serán los valores del ensayo

No es posible determinar qué tipo de cálculo es el que mejor se adapta a las características del vehículo y del smartphone sin realizar una medición inicial. Dicha medición se compara con datos de IRI medidos con un equipo tipo 1 o 2 para realizar la calibración y posteriormente determinar cuál es el mejor tipo de cálculo y además el coeficiente de ajuste.

- ***Coefficiente de Ajuste***

Dentro de la aplicación, existe un botón que permite ingresar el coeficiente de ajuste. Este coeficiente debe obtenerse al realizar la calibración y está en función del vehículo y del dispositivo que tiene instalado el software, por lo que, si alguno de estos cambia, se debe volver a calibrar y determinar un nuevo coeficiente de ajuste. Este coeficiente debe ser determinado tanto para el cálculo estadístico como para el cálculo por máximos, dependiendo del que mejor se adapte a las características del vehículo y del smartphone.

Como resultado de la medición, la aplicación genera 3 archivos, el primero permite graficar el perfil del IRI en una hoja de cálculo, el segundo contiene información de cada punto de medición como la ubicación georreferenciada, la velocidad de medición, la abscisa y el valor del IRI. El tercer documento permite graficar el valor del IRI georreferenciado en Google Earth. (Nieto, 2018)

1.7.3.4 Estimación de la variación del IRI

En el año 2003, Al-Suleiman y Adnan Shiyab desarrollaron dos modelos de regresión en base a 440 ensayos, para la estimación del IRI en carriles lentos y rápidos en la ciudad de Dubai. Para la obtención de los modelos, los autores consideraron el parámetro IRI como variable dependiente de la edad del pavimento, describiendo una curva exponencial donde el valor inicial de IRI en un pavimento completamente nuevo corresponde a un tiempo cero. (Al-Suleiman & Shiyab, 2003):

$$IRI = 0.824 * e^{0.0539*t} \quad (18)$$

Donde:

- IRI: Índice de Rugosidad Internacional estimado para el carril de mayor tránsito.
- t: Edad del pavimento en años.

A esta ecuación se le realizó un ajuste en base a la normativa local, considerando que el valor de IRI de un pavimento nuevo como máximo debe ser de 2m/km. obteniendo la siguiente ecuación ajustada:

$$IRI_{ajustado} = 2 * e^{0.0539*t} \quad (19)$$

La ecuación anterior es utilizada para estimar la variación de IRI trascurrido un determinado tiempo en años y mediante este valor, calibrar la magnitud de las mediciones realizadas con aplicaciones móviles.

1.8 Evaluación Capacidad Estructural

La evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos permite establecer la resistencia o capacidad portante que posee la estructura del pavimento ante los esfuerzos producidos por el tránsito. Principalmente, permite analizar los efectos de la repetición de cargas para determinar las deflexiones que experimenta la estructura. De esta manera se puede tener información actualizada del estado estructural del pavimento, mediante lo cual se determina la vida útil o remanente de la estructura y la necesidad de rehabilitaciones. (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017).

1.8.1 Tipos de Evaluación

Al igual que la evaluación funcional del pavimento, los métodos de evaluación y medición han cambiado con el avance de la tecnología, ante la necesidad de mejorar los rendimientos, calidad, conservación estética, reducir tiempo de ejecución y costos. Según la AASHTO, los métodos de evaluación estructural del pavimento se pueden clasificar en 3 tipos:

1.8.1.1 Evaluación Visual

Inicialmente, se puede considerar la evaluación visual como un paso previo a realizar la evaluación estructural del pavimento. Dicha evaluación visual consiste en revisar datos históricos y estudios preliminares realizados en la zona de la vía, revisar los diseños previos y realizar un recorrido por la carretera para determinar la presencia de fallas y deformaciones del pavimento. (Montejo, 2002)

1.8.1.2 Evaluación Directa o Destructiva

La primera alternativa utilizada hace algunos años es el método de evaluación destructivo. Un ejemplo de este método son las exploraciones o evaluación mediante calicatas o pozos a cielo abierto para obtener muestras o testigos y realizar ensayos en el laboratorio que simulan las condiciones en campo. Este es un proceso de ensayo lento y costoso y tiene la desventaja de que destruye una sección de estructura del pavimento, que posteriormente deberá ser repuesta. Una ventaja de este método es que, al perforar para extraer las muestras, se puede observar el espesor de las capas, determinar si hay grietas, determinar la densidad y humedad de los materiales si se conservan las condiciones de campo. (Casia Boza, 2015)

1.8.1.3 Evaluación No Destructiva

Posteriormente, se desarrollaron los métodos no destructivos, con el principal objetivo de no alterar la conformación del pavimento y realizar las mediciones de forma más rápida. Cabe destacar que los modelos teóricos de Burmister, Boussinesq publicados en 1885 y el modelo de Hogg en 1944 que considera al pavimento como una placa delgada. En base a los modelos teóricos, se desarrollan equipos de auscultación o medición no destructivos, que consisten en evaluar la respuesta de la estructura del pavimento ante la acción de cargas externas que no altera la disposición del pavimento. La ventaja de estos métodos es la posibilidad de repetir las mediciones. (López & Mendoza, 1998)

1.8.2 Deflexión del Pavimento

La deflexión en la estructura del pavimento hace referencia a la deformación elástica debida al desplazamiento vertical que se evidencia en la capa superficial ante la aplicación de carga que hace alusión al paso de vehículos. Al aplicar una carga en la superficie del pavimento, se generan esfuerzos que se distribuyen en las capas que conforman la estructura del pavimento y esto a su vez puede generar deflexión. (Feo & Urrego, 2013)

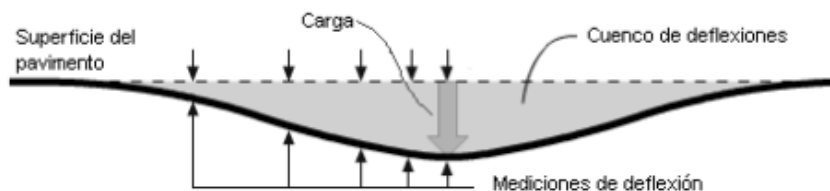


Ilustración 18. Deflexiones del Pavimento (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017)



Los principales parámetros que afectan las mediciones de la deflexión del pavimento son:

- Cargas: La magnitud y duración de aplicación de la carga, influyen en la deflexión del pavimento. Lo deseado en cada ensayo, es simular el efecto de carga de los neumáticos de los vehículos al circular sobre el pavimento, siendo uno de los principales motivos para el desarrollo de diversos equipos de medición.
- Temperatura: Es necesario ajustar las mediciones de deflexión en función de la temperatura a las cuales se realizaron las mediciones, puesto que al existir cambios en el gradiente térmico, las deflexiones varían significativamente.
- Humedad: Afecta a las capas inferiores de la estructura del pavimento como base, subbase y subrasante
- Condición del Pavimento: Evidentemente, al realizar las mediciones de la deflexión en zonas que presenten fallas, los valores de las mediciones incrementarán. Aquí surge la necesidad de evaluar las deflexiones y transferencia de cargas en juntas, puesto que son zonas que generalmente presentan fallas.

Al determinar la deflexión del pavimento, es posible definir varios parámetros como:

- Módulo de Elasticidad de cada capa que conforma el pavimento
- Módulo de Reacción de la Subrasante
- Número estructural del pavimento SN (Structural Number) mediante el método de la AASHTO de 1993. (NEVI-12, 2013)
- Eficiencia de transferencia de carga en juntas

Actualmente los métodos y equipos utilizados para medir la deflexión del pavimento son no destructivos. Debido al desarrollo tecnológico, se han desarrollado equipos cada vez más automatizados que simulan el efecto de carga de los neumáticos sobre la superficie del pavimento.

1.8.2.1 Normativa de Deflexión o FWD

En el apartado 405-10.06 de la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 Volumen 3, Especificaciones Generales para Construcción de Caminos y Puentes, se establecen valores mínimos para parámetros de seguridad, comodidad y estructurales. Dentro de los parámetros estructurales se incluye a la deflexión del pavimento cuyo equipo de medición es el Deflectómetro de Impacto FWD y en cuanto a los valores mínimos de referencia, se indica que éstos dependen del tipo de pavimento, por lo que no se presenta un rango de valores admisibles referencial. El principal motivo es debido a que dentro de la misma norma, se describen los métodos para determinar parámetros como módulo de elasticidad, módulo de reacción de la subrasante y número estructural del pavimento, a partir de las mediciones de deflexión. (NEVI-12, 2013)



Como ejemplo de normativa internacional se presenta el caso de México, donde se definen rangos de valores de deflexiones medidos en mm, para clasificar la condición estructural del pavimento en vías de primer y segundo orden.

Rango de Valores de Deflexiones [mm]		
Condición Estructural	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básicas y Secundaria
Buena	0 – 0.4	0 – 0.5
Regular	-	> 0.5 y < 0.8
Mala	> 0.4	> 0.8

Tabla 6. Valores de Deflexiones normados en México (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2017)

Las condiciones de medición son intervalos de entre 100m y 500m a una temperatura de 20°C y un esfuerzo de 700 kPa o 100 psi.

1.8.2.2 Métodos y Equipos de Evaluación No Destructiva

Los métodos y equipos de evaluación estructural no destructiva se pueden clasificar en 3 grupos, según el tipo de carga aplicada, puesto que generan respuestas distintas. Cargas estáticas o de movimiento lento, cargas dinámicas vibratorias y cargas dinámicas con impulso.

En un inicio, los equipos de carga estática eran los más utilizados, posteriormente se desarrollaron los de carga vibratoria y luego los de carga dinámica, lo cuales son los más utilizados en la actualidad. Es importante destacar que recientemente ha surgido un nuevo método de evaluación no destructiva que son los equipos de medición continua. Estos equipos se encuentran en pleno desarrollo y han sido probados en algunos países europeos. El equipo en desarrollo se llama Rolling Wheel Deflectometer RDW, el cual consiste en aplicar una carga rodante continua y realizar mediciones sin interrupción, mediante sensores de rayos láser. (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Itandehui, 2004)

Estática o Movimiento Lento

Dentro de este tipo de carga, los equipos de medición más utilizados y conocidos son la Viga Benkelman y el Deflectómetro Lacroix. Miden la deflexión del pavimento bajo el punto de aplicación de la carga, sin embargo, este método está quedando en desuso debido a que no representa los efectos de carga de los neumáticos a velocidad de circulación y no es sencillo evaluar la transferencia de carga en juntas.

Viga Benkelman

A partir de 1952 como parte del ensayo WASHO (Western Association of State Highway Organizations) se desarrolló este equipo de medición en el programa de ensayos viales de la WASHO Road Test. Su nombre lo lleva debido a su desarrollador, el ingeniero Alvin Carlton Benkelman. Es un equipo altamente utilizado debido a que realiza mediciones directas bajo el principio de la palanca, es sencillo de usar y el costo de operación es bajo. Su uso está

estandarizado por la ASTM-4695. El equipo consiste de 2 partes, el cuerpo y un brazo móvil. El cuerpo es la estructura de soporte que se ubica sobre el pavimento y tiene 2 apoyos fijos y uno ajustable. El brazo móvil está sujeto al cuerpo mediante una articulación, uno de sus extremos se apoya sobre el pavimento, mientras que el otro está en contacto con el vástago de medición de movimiento vertical mediante un dial. (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017)

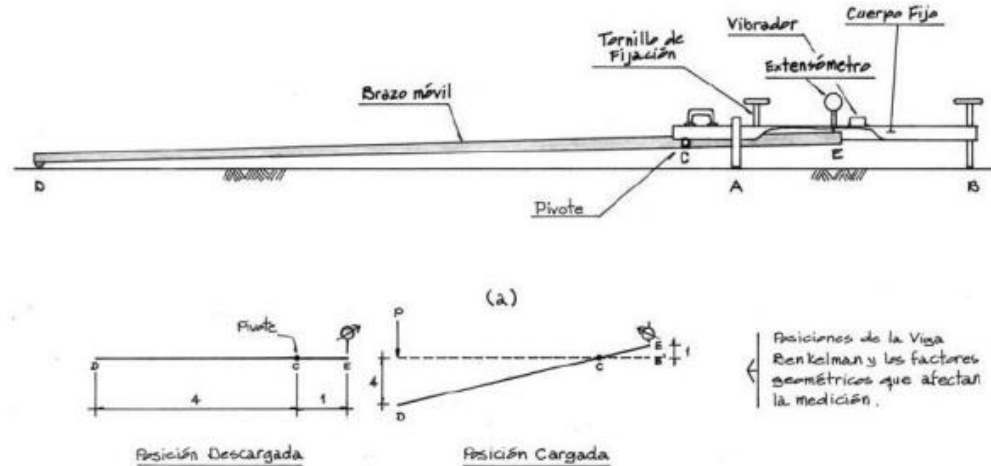


Ilustración 19. Viga Benkelman (Silva, 2019)

Para realizar las mediciones, se coloca el extremo libre del brazo o también llamado punta de la viga, ente las llantas dobles del eje trasero del camión o volqueta cargada con un peso estándar de 80KN. Debido al peso del vehículo, se produce una deflexión en el pavimento la cual genera un movimiento vertical en el brazo, el cual gracias a la articulación pivote, registra la medición a través del vástago y dial. Posteriormente al remover la carga, desapareciendo la deflexión y a su vez, el equipo vuelve a la posición inicial. La Viga Benkelman mide la recuperación del pavimento al retirar la carga, mas no directamente la deformación. Mediante las lecturas se establece la deflexión del pavimento basado en el modelo de Hogg. (Silva, 2019)

Deflectómetro Lacroix

El Deflectómetro Lacroix se desarrolló en Paris Francia, por el Laboratorio Nacional de Caminos y Puentes. Se lo puede considerar como la versión automatizada de la Viga Benkelman debido a que realiza las mediciones cada 6 metros mientras el vehículo circula a una velocidad constante entre 1.8 km/h y 2.5 km/h. Este equipo permite medir las deflexiones del pavimento bajo la carga del eje posterior de un camión o volqueta, de manera continua. Está formado por dos Vigas Benkelman sobre un vehículo, para analizar la trayectoria de los neumáticos a cada lado. El principio de medición, es el mismo que el de la Viga Benkelman, en donde se registra la recuperación del pavimento al retirar la carga, mediante la báscula y dial de medición de desplazamientos verticales. (López & Mendoza, 1998)



Ilustración 20. Deflectómetro Lacroix (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017)

Vibración

Este método se basa en equipos que aplican una fuerza sinusoidal dinámica en el pavimento, generando vibración. La medición de la deflexión se lo realiza mediante acelerómetros y geófonos ubicados bajo el punto de aplicación de carga, la cual está ubicada en un remolque. La ventaja respecto a equipos estáticos es que son más rápidos y no toman como referencia uno de los dos pares de neumáticos traseros, pero la desventaja es que la fuerza sinusoidal aplicada no simula el comportamiento del paso de neumáticos. El equipo más utilizado de esta categoría es el Dynaflect. (Casia Boza, 2015)

Dynaflect (Electro Mecánico)

Este equipo consiste en un remolque que aplica una carga cíclica de 1000lb a una frecuencia de 480 rpm, lo cual genera vibraciones sobre el pavimento. Dichas vibraciones causan deflexiones las cuales son medidas con geófonos ubicados a 0, 12, 24, 36 y 48 pulgadas de distancia desde el punto de aplicación. (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017)

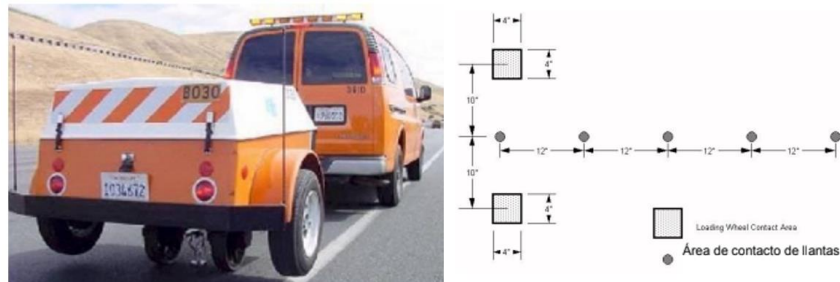


Ilustración 21. Equipo Dynaflect (Escobar Aguirre, García García, & Guzmán López, 2017)

Impacto

Se basan en el uso de geófonos para medir las deflexiones del pavimento, los cuales permiten modelar la magnitud y duración de los efectos al aplicar una carga que impacta el pavimento. El Falling Weigh Deflectometer FDW es el equipo más utilizado actualmente, puesto que permite evaluar la transferencia de carga en las juntas, registra los cuencos de deflexión y permite identificar oquedades en el pavimento.

Deflectómetro de Impacto (FWD)

En la década de 1960, el Laboratorio Central de Puentes y Caminos de París LCPC desarrolló una investigación como alternativa de la Viga Benkelman, mediante el uso de placas cargadas. En base al comportamiento del pavimento, no era viable un ensayo de tipo estático, por lo que el primer prototipo se basó en una masa que caía sobre muelles sin amortiguadores.

Con el fin de buscar un modelo semejante al de una rueda con un ciclo de carga de corto tiempo y de tipo sinusoidal, se creó un sistema con dos muelles sobre los cuales se apoya una masa y adicional a esto, se añadió un sistema de amortiguación que facilitaba el movimiento.

Se realizaron varios prototipos los cuales cargaban con una masa de gran tamaño que implicaba varios riesgos, hasta que en 1968 el ingeniero civil J.B Villadsen construyó una serie de deflectómetros de mayor seguridad y maniobrabilidad. Posteriormente en 1975, Villadsen reemplazó los amortiguadores por topes de goma. Las investigaciones continuaron hasta que en 1976 Dynatest en colaboración con Villadsen luego de incluir varias mejoras como uso de bombas hidráulicas, el uso de un remolque y mediciones electrónicas, entre otras, lanzan a la venta el primer deflectómetro de impacto. (Bohn, 2005)

Inicialmente las mediciones eran realizadas únicamente bajo el punto de aplicación de la carga, sin embargo, en 1970 C.P. Walkering plantea la necesidad de medir a una distancia igual a dos veces el radio de la placa aplicada, debido a que mediante dichas mediciones, se podría determinar características del pavimento como el módulo elástico de las capas de un sistema bicapa con espesores definidos. (Bohn, 2005)

Posteriormente, pese a la sofisticación de los componentes del equipo FWD, el instrumento requiere una calibración adecuada para determinar soluciones correctas referentes al estado estructural del pavimento. Es por esto que en los años 80s, el programa de la FHWA denominado LTPP (Long Term Performance Programme) desarrolla los procesos de calibración requeridos y adoptados por la American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO. (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Itandehui, 2004)



Ilustración 22. Deflectómetro de Impacto del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Abad & Sangurima, 2018)



El deflectómetro de impacto es un equipo de medición, que simula el paso de un neumático sobre el pavimento dejando caer un plato de carga de 40KN y 300mm de diámetro. Debido a la fuerza aplicada sobre el pavimento, se producen deformaciones captadas por los geófonos colocados a varias distancias desde el centro del punto de aplicación de la carga, formando un cuenco de deflexión. El equipo FWD mide 2 parámetros principales, el primero es la celda de carga la cual se deja caer en una placa de carga y mide la fuerza del impacto. El segundo sensor consta de un deflectómetro que está compuesto por los geófonos de medición.

Los dispositivos adicionales son un odómetro que mide con precisión a la distancia recorrida por el equipo y un sensor de temperatura tanto del ambiente como de la superficie del pavimento. Estos parámetros son fundamentales debido a que ocasionan variaciones en las mediciones de deflexión. (FHWA LTPP, 2006)

El ensayo del deflectómetro de impacto consiste en medir las deflexiones en la parte superficial del pavimento como efecto de la aplicación de una carga y medición mediante sensores ubicados a varias distancias desde el centro o eje de aplicación de la carga. Si se conoce el grosor de las capas que conforman la estructura del pavimento, se pueden obtener valores de módulo de elasticidad y rigidez de las mismas. Las deflexiones medidas pueden correlacionarse para obtener el rendimiento del pavimento o para determinar las características de las capas in situ como una evaluación del desempeño. (ASTM D4694, 1996-2003)

1.8.3 Mediciones con Deflectómetro de Impacto

La ASTM D4695 es la normativa que determina los parámetros y proceso a seguir para realizar mediciones con deflectómetro de impacto FWD. En dicha normativa se detallan los siguientes puntos

1.8.3.1 Frecuencia y Localización de Ensayos

La ubicación del ensayo comúnmente sigue la trayectoria de los neumáticos o wheelpath, con el objetivo de simular el efecto del paso de un vehículo sobre el pavimento. También, se suele realizar ensayos entre las trayectorias del wheelpath para observar la variación y determinar si existen daños dentro y fuera del wheelpath. La ubicación y frecuencia variará dependiendo de la necesidad y uso que se den a los datos. (ASTM D4695, 2003)

Pruebas a nivel de red: Estas pruebas representan la capacidad de carga, con un número de repeticiones limitado de al menos 7 pruebas por sección uniforme. Los ensayos deben realizarse en intervalos de 100m a 500m dependiendo de las condiciones y longitud del pavimento.



La ubicación de la carga, en pavimentos de concreto AC es sobre la trayectoria externa de la rueda y en pavimentos de concreto reforzado CRCP a lo largo de la línea central de las losas. En pavimentos de hormigón articulado JCP, la carga se debe colar sobre el centro geométrico de la losa y también se debe realizar el ensayo en al menos el 10% de las juntas, para comprobar la transferencia de carga.

Pruebas a nivel de proyecto general: Estas pruebas proporcionan un análisis más detallado del pavimento y son útiles para realizar diseños de rehabilitaciones. Debe realizarse al menos 15 pruebas por cada sección uniforme, desde 50-200m según las condiciones y extensión del pavimento.

La ubicación de la carga es semejante al nivel de red con la diferencia que para pavimentos JCP debe colocarse en primer lugar sobre el centro geométrico de la losa y posteriormente moverse a la junta más cercana y posicionarse a lo largo de la misma alineación. Se recomienda la prueba del 25% de las juntas.

Pruebas a nivel de proyecto detallada: Son pruebas que proporciona un análisis detallado y específico para fines como identificación de áreas de alta deflexión o daños localizados en pavimentos PCC. Se realizan generalmente en tramos de 10-100m. Suelen realizarse en ambas trayectorias de neumáticos.

La ubicación es semejante al nivel general, para pavimentos JCP se coloca en el centro geométrico de la losa y luego en la junta o grieta más cercana, ya sea a lo largo de la trayectoria del neumático, esquina de losa o ambos lugares. (ASTM D4695, 2003)

1.8.3.2 Características del deflectómetro de impacto

Está conformado por los siguientes elementos principales (ASTM D4694, 1996-2003):

Sistema de instrumentación: Conformado por los elementos expuestos a la intemperie debiendo soportar temperaturas entre -10°C y 50°C y condiciones de humedad. También involucra instrumentos no expuestos a la intemperie como con elementos de procesamiento, los cuales deben tener una resistencia a temperaturas de entre 5°C y 40°C .

Sistema de impulso o fuerza “Falling weight”: Es el sistema que incluye el peso que se deja caer desde alturas predeterminadas. El pulso generado debe responder a una diferencia o variación menor al 3% en 5 cargas de prueba, caso contrario se debe revisar las condiciones del dispositivo. El pulso en el pavimento debe aproximarse a una onda semi-senoidal con una fuerza máxima de 50kN. En este consta un sistema guía diseñado para que el peso caiga perpendicular a la superficie del pavimento.

Plato de carga: Es el encargado de distribuir uniformemente la carga en la superficie del pavimento, usualmente tienen un tamaño de 300mm a 450mm de diámetro para mediciones

en carreteras convencionales. Su construcción debe ser adecuada para permitir la medición de las deflexiones del pavimento en el centro del plato de carga.

Sensores de deflexiones: Es el encargado de medir el máximo movimiento vertical del pavimento y está montado de tal manera que se minimice la rotación angular respecto del plano de medición. Conformado por varios sensores espaciados usualmente 300mm uno de otro, los cuales pueden ser de varios tipos como acelerómetros, entre otros.

Procesamiento de datos y sistema de almacenamiento: Los datos recolectados deben registrarse en un dispositivo de almacenamiento magnético o en un registrador de tiras de papel o ambos. Se registrará también la información como temperatura del aire, de la superficie del pavimento, distancias y datos de ubicación e identificación de cada punto. Este registro puede ser manual o automático.

Celda de carga: Para la medición de la carga aplicada en cada impacto, se debe colocar la celda de carga de tal manera que no impida la medición de deflexiones debajo del plato de carga. Deberá resistir condiciones de humedad, lluvia, choques o golpes recibidos en el funcionamiento del dispositivo.

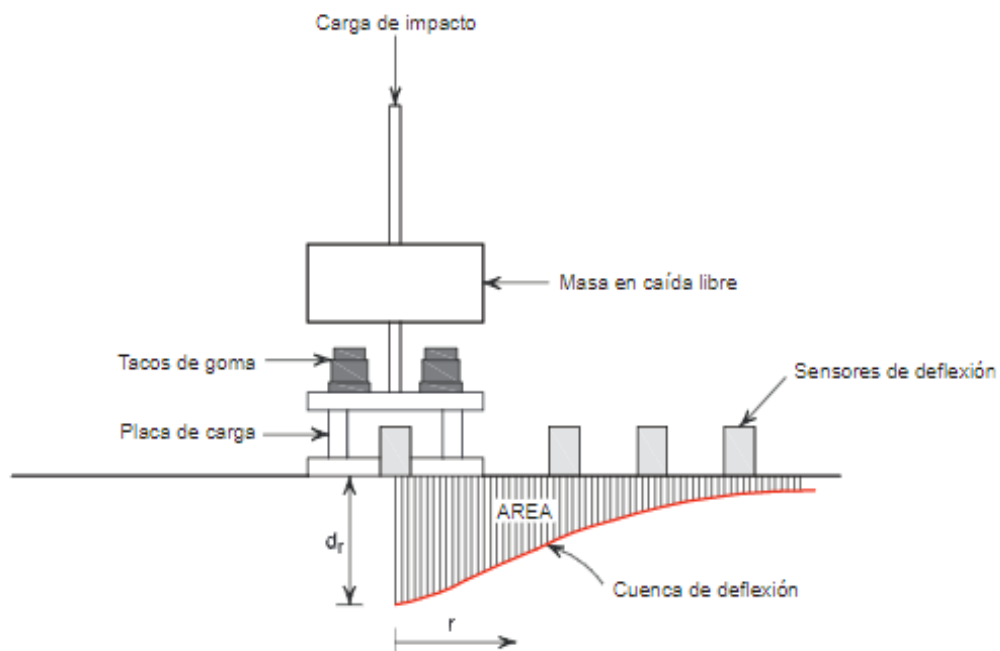


Ilustración 23. Esquema de funcionamiento FWD. (Higuera, 2009)

Ubicación de geófonos:

La disposición de los sensores y su espaciamiento debe medirse para evitar errores acumulados. Las distribuciones para geófonos de 9 y 7 sensores recomendados por la Federal Highway Administration se presentan a continuación (FHWA LTPP, 2006).



Distribución de Geófonos	
Sensor	Espaciamiento (mm)
D1	0
D2	203
D3	305
D4	457
D5	610
D6	914
D7	1219
D8	1524
D9	-305

Tabla 7. Espaciamiento entre 9 Geófonos (FHWA, 2006)

Distribución de Geófonos		
Sensor	Espaciamiento (mm)	
	Pav. Flexibles	Pav. Rígidos
D1	0	0
D2	203	-305
D3	305	305
D4	457	457
D5	610	610
D6	914	914
D7	1524	1524

Tabla 8. Espaciamiento entre 7 Geófonos Espaciamiento entre 9 Geófonos (FHWA, 2006)

Los valores negativos están en dirección de la defensa trasera.

Cabe mencionar que, la disposición de los geófonos queda a disposición y criterio del ingeniero encargado de los ensayos en campo, en base al modelo del equipo.

Parámetros a considerar en la toma de datos

El proceso de toma de datos depende del tipo de dispositivo a utilizar, sin embargo, en la ASTM D4694 se mencionan algunas sugerencias.

Carga: En ensayos con cargas por impacto, debe medirse la carga pico aplicada por el equipo de deflectometría.

Geometría del área cargada y la ubicación de los sensores de deflexión: Es necesario tomar en cuenta las ubicaciones de la carga, de los sensores o geófonos, las grietas del pavimento y juntas, para tener la información necesaria que permita un modelado adecuado y proceder con el retro cálculo. Debe registrarse la ubicación de grietas y juntas dentro de los 2m del punto central de aplicación de la carga. Debe registrarse la distancia entre los sensores

desde el punto central de carga, la falta de estos registros podría ocasionar problemas en el procesamiento de los datos. (ASTM D4694, 1996-2003)

Hora: Es importante registrar la hora en la que se realizó el ensayo.

Estación o encadenamiento: Se debe registrar el número de estación o punto de prueba en cada ensayo de deflexión realizada.

Temperaturas: Como mínimo debe registrarse la temperatura del aire y del pavimento al momento de la medición y en intervalos específicos de acuerdo a lo requerido. Se tomarán temperaturas adicionales como temperaturas de capas específicas por medio de perforaciones al pavimento si así lo requiriesen.

Intervalo de las pruebas: El intervalo debe ser registrado y dependerá del nivel de estudio realizado como se mencionó anteriormente, pudiendo ser nivel de red, proyecto general o proyecto a detalle.

Método aplicado: En dispositivos de impacto, se pueden aplicar varias cargas y varios sensores de deflexión, pudiendo medir la eficiencia conjunta en pavimentos PCC articulados colocando la carga en un lado de la junta y sensores a cada lado de la misma.

1.8.3.3 Análisis del Cuenco de Deflexión

El cuenco de deflexión está formado por las deflexiones registradas en cada sensor o geófono, al realizar un ensayo de deflectometría de impacto con el FWD. Gracias al cuenco de deflexión, se puede caracterizar la condición estructural del pavimento existente.

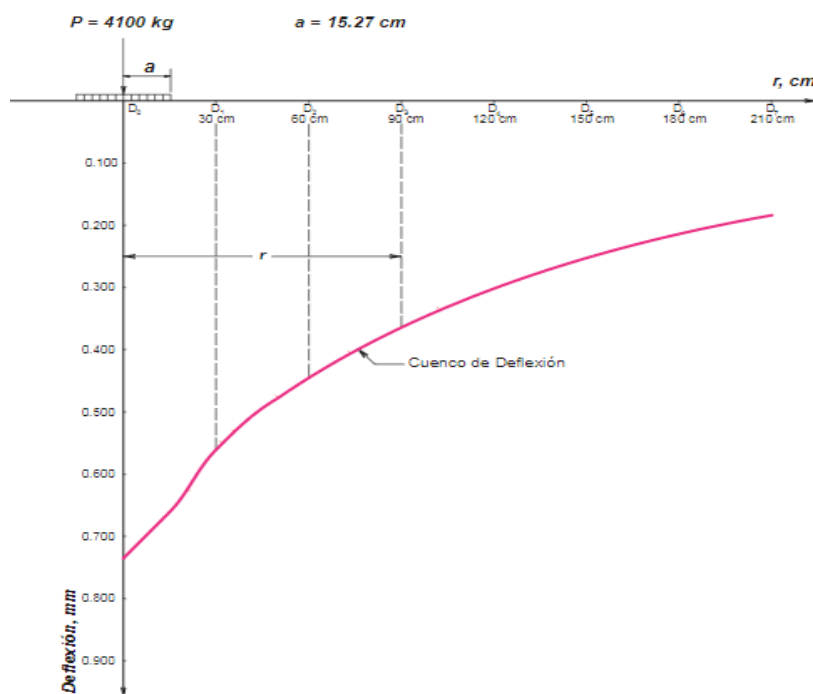


Ilustración 24. Cuenco de Deflexiones. (Higuera, 2009)

Parámetros del Cuenco de Deflexiones:

Dentro del cuenco de deflexiones podemos identificar 2 parámetros iniciales: Do o profundidad máxima y Lo o extensión del cuenco, en base a estos parámetros, se puede caracterizar el estado y comportamiento del pavimento.

Parámetros de Cuenco de Deflexión				
Do	Lo	Tipo de cuenco	Características de la curva	Pavimento
Bajo	Alto	TIPO I	Curva extensa Poco profunda	Buen Pavimento Buena Subrasante
Alto	Alto	TIPO II	Curva extensa Profunda	Buen pavimento Mala Subrasante
Bajo	Bajo	TIPO III	Curva corta Poco profunda	Mal Pavimento Buena Subrasante
Alto	Bajo	TIPO IV	Curva Corta Profunda	Mal Pavimento Mala Subrasante

Tabla 9. Tipos de Cuencos de deflexión y características del pavimento. (Bejarano, 2015)

Evaluación de las zonas del cuenco de deflexiones:

El cuenco puede dividirse en 3 zonas, cada una descrita por la diferencia entre la deflexión inicial y final de cada zona. Mediante la diferencia de deflexión, se pueden obtener los parámetros que definen cada zona: Índice de Curvatura Superficial (SCI), Índice de daño en la base (BDI) e índice de curvatura en la base (BCI). (Horak & Emery, 2009)

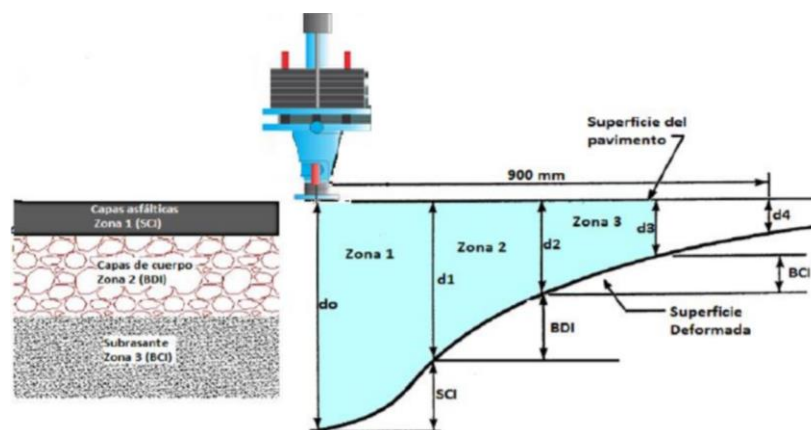


Ilustración 25. Zonas y Parámetros críticos de cuenco deflexión. (Horak & Emery, 2009)

Considerando estos parámetros críticos o característicos, se puede clasificar la condición estructural del pavimento como se muestra en la siguiente tabla (Horak & Emery, 2009):

	Condición Estructural	Parámetros del Cuenco de Deflexiones			
		d0 (μm)	SCI (μm)	BDI (μm)	BCI (μm)
Base Granular	Bueno	< 500	< 200	< 10	< 50
	Alarma	500 - 750	200 - 400	100 - 200	50 - 100
	Grave	> 750	> 400	> 200	> 100

Tabla 10. Parámetros del cuenco de deflexiones vs Condición estructural del pavimento (Horak & Emery, 2009).

Cuencos que representan un comportamiento no estándar del pavimento:

La forma característica del cuenco de deflexiones frente a un comportamiento estándar del pavimento responde a la siguiente gráfica.

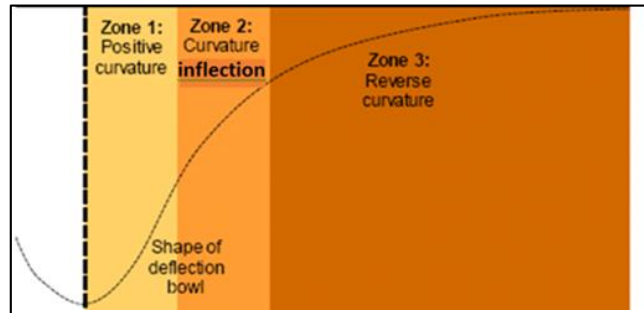


Ilustración 26. Forma del cuenco de deflexiones. (Horak, Emery, & Maina, 2015)

La tendencia del cuenco debe ser analizada al momento de depurar los datos obtenidos por el equipo Falling Weight Deflectometer. Es decir, se consideran puntos críticos, aquellos cuencos que presenten una tendencia distorsionada, que no represente al comportamiento común de transmisión de deflexiones del pavimento, puesto que representan casos aislados.

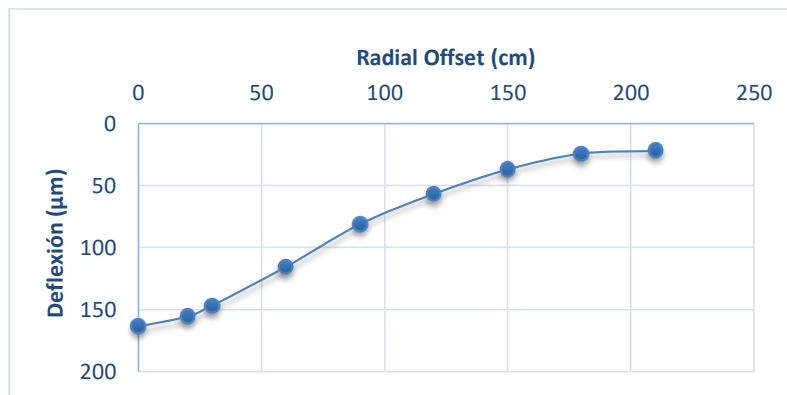


Ilustración 27. Cuenco de Deflexiones en pavimentos con comportamiento estándar. (MTO, 2020)

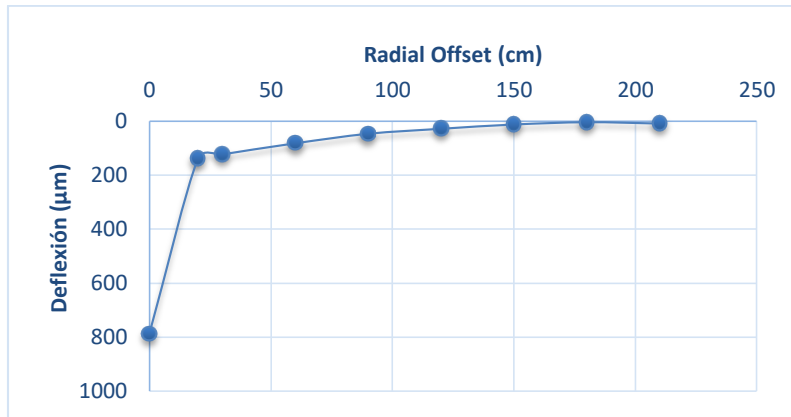


Ilustración 28. Cuenco de Deflexiones en pavimentos con transmisibilidad no estándar. (MTOPI, 2020)

1.9 Análisis de Correlación

Correlación se define como la relación existente entre dos parámetros representados como variables. El objetivo es representar dicha relación, mediante una ecuación que puede ser de tipo lineal, polinomial, exponencial, logarítmica, etc. (Walpole, Myres, Myers, & Le, 2012)

1.9.1 Correlaciones y regresión:

La búsqueda de una correlación, surge de la hipótesis de la existencia de una ecuación que relacione variables, las cuales se clasifican en: variable independiente o regresores, ubicada en el eje de las abscisas y variable dependiente o respuesta, ubicada en el eje de las ordenadas.

1.9.1.1 Regresión lineal simple:

Una correlación lineal simple, es aquella que se representa con una ecuación lineal de primer orden la cual describe la relación entre ambas variables X es la variable independiente o regresor y Y es la variable dependiente o respuesta.

$$Y = \beta_0 + x * \beta_1 \quad (20)$$

En donde B_0 es la intersección con el eje de las ordenadas y B_1 la pendiente de la ecuación lineal. (Walpole, Myres, Myers, & Le, 2012)

Regresión de variables transformadas: se denominan de esta manera a toda regresión que presenta una relación lineal, donde los valores iniciales X, Y fueron transformados mediante algún factor u operación matemática para obtener las variables transformadas (X' , Y').

$$Y' = \beta_0 + x' * \beta_1 \quad (21)$$



Donde Y' es la variable dependiente transformada y x' es la variable independiente transformada. (Devore, 2008)

1.9.1.2 Regresión no lineal:

Existen casos en los cuales los valores de las variables a relacionar no siguen una tendencia en línea recta, por lo que existen otro tipo de regresiones que se pueden ajustar a la tendencia de los datos para determinar una correlación. Pueden ser regresiones polinomiales, exponenciales, logarítmicas, entre otras, la elección depende de la interpretación de su ajuste mediante el valor del coeficiente R^2 .

En la siguiente tabla podemos apreciar algunas de estas transformaciones:

Tipos de Regresión no Lineal		
Función	Transformación(es) para linealizar	Forma Lineal
a. Exponencial: $y = \alpha \cdot e^{\beta x}$	$y' = \ln(y)$	$y' = \ln(\alpha) + \beta x$
b. Potencia: $y = \alpha \cdot x^{\beta}$	$y' = \log(y), x' = \log(x)$	$y' = \log(\alpha) + \beta x'$
c. $y = \alpha + \beta \cdot \log(x)$	$x' = \ln(x)$	$y = \alpha + \beta \cdot x'$
d. Recíproca: $y = \alpha + \beta \cdot \frac{1}{x}$	$x' = \log(x)$	$y = \alpha + \beta \cdot x'$

*Log se puede utilizar como de base 10 o base e

Tabla 11. Transformaciones para regresión (Devore, 2008)

1.9.1.3 Regresión polinomial:

Los modelos anteriores comprenden variables cuya tendencia creciente o decreciente es única, existen situaciones en los que una gráfica de puntos sugiere varias tendencias, picos o valles, con al menos un mínimo o máximo relativos. Una solución a este caso es la ecuación polinomial que puede ser de grado variable dependiendo del ajuste. (Devore, 2008)

$$Y = \beta_0 + x * \beta_1 + x^2 * \beta_1 + x^2 * \beta_2 + x^3 * \beta_3 + \dots + x^k * \beta_k \quad (22)$$

Donde (k) es el máximo exponente el cual indica el grado del polinomio, (β) representa los coeficientes de cada término. A continuación, se ejemplifica dos casos de regresión polinomial, donde el eje X corresponde a la variable independiente y el eje Y la variable dependiente.

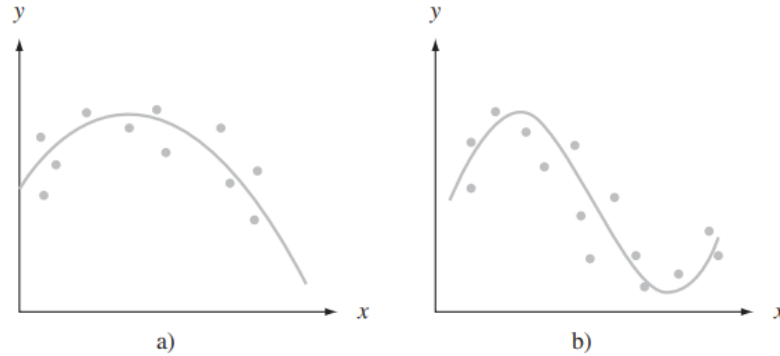


Ilustración 29. Regresiones polinomiales a) segundo grado, b) tercer grado, (Devore, 2008) *X: variable independiente y Y: variable dependiente.

1.9.2 Coeficiente de Correlación y Coeficiente de Determinación:

El coeficiente de correlación o r contabiliza la intensidad de la relación entre la variable dependiente e independiente, su rango va de -1 a 1 denotando si la relación es inversa o directa. El coeficiente de determinación llamado R^2 responde a la proporción de la variabilidad del modelo ajustado, el valor va de 0 a 1, siendo 1 una correlación perfecta con todos los residuales iguales a cero y siendo 0 una inexistencia absoluta de correlación. (Walpole, Myres, Myers, & Le, 2012).

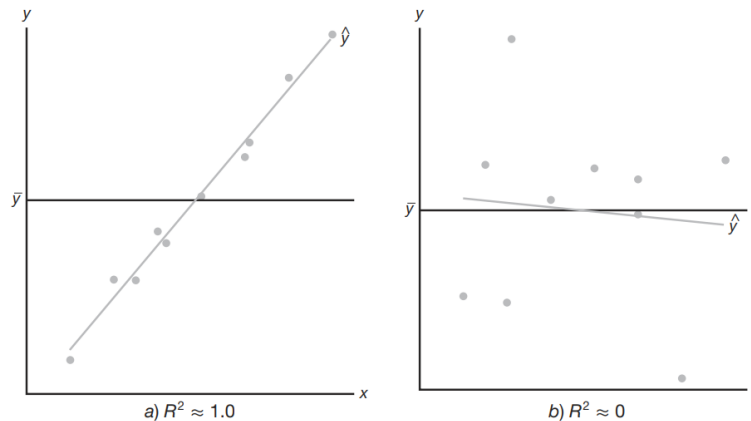


Ilustración 30. Gráficas de un ajuste eficiente y un ajuste ineficiente. (Walpole, Myres, Myers, & Le, 2012)

El valor de R^2 es útil en el análisis del ajuste debido a su simplicidad, sin embargo se debe tomar en cuenta algunas observaciones como: la confiabilidad del valor depende del tamaño del conjunto de datos involucrados en la regresión y del tipo de aplicación, es decir que el valor de R^2 aceptable para la relación entre las variables variará según el tipo de aplicación y su finalidad. (Walpole, Myres, Myers, & Le, 2012).

Los equipos que requieran de alta precisión podrían requerir valores cercanos a 0.99 como mínimos aceptables, mientras que variables que requieran un ajuste preliminar o de

observaciones podrían tomar como aceptable valores cercanos a 0.70, por lo que la aceptación de la correlación tomando en cuenta el valor de R^2 , depende del equipo y objetivo de la aplicación. El coeficiente también es independiente de las unidades. (Devore, 2008). A continuación, se presentan rangos de valores y su interpretación respecto a la correlación:

Coeficiente de Correlación Lineal	
Rango de Valores r	Interpretación
$0.0 \leq r < 0.1$	Correlación nula.
$0.1 \leq r < 0.3$	Correlación débil.
$0.3 \leq r < 0.5$	Correlación moderada.
$0.5 \leq r < 1.0$	Correlación fuerte.

Tabla 12. Rangos de coeficiente de correlación lineal de Pearson (Hernández & Peñaloza, 2018)

1.9.3 Media móvil

La media móvil sirve como un indicador técnico de la existencia de tendencia en los datos, permitiendo realizar un análisis técnico de los mismos. Es también una herramienta que permite suavizar los movimientos bruscos de tendencia o puntos elevados que se puedan deber a singularidades específicas en el conjunto de mediciones.

El cálculo de la media móvil simple, de orden n , se obtiene a través de la media aritmética de los valores (n) anteriores, permitiendo estandarizar la tendencia de los puntos y eliminar valores excesivos en un conjunto de datos. (Burguillo, 2015)

$$MAvg(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Dato \quad (23)$$



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo, se detallan los materiales utilizados para realizar las mediciones y conformar las bases de datos que posteriormente fueron utilizados para realizar la búsqueda de la correlación entre el IRI y la deflexión medida con FWD. Además, se describe el proceso de depuración y análisis de sensibilidad de variables, para obtener resultados.

1.10 Materiales y Equipos

1.10.1 Zona de Estudio

En los últimos años la vía Cuenca- Molleturo- Naranjal ha sido una vía de alta demanda, por lo que con el pasar del tiempo, se ha evidenciado un deterioro considerable de la vía, existiendo grietas en el pavimento, ahuellamiento e incluso deslizamientos de tierra que obstaculizan la vía, de manera que los conductores realizan maniobras de riesgo como cambios de carril, lo cual produce accidentes de tránsito. Los acontecimientos más críticos, ocurren durante el invierno, dado que es una temporada lluviosa entre los meses de febrero y abril. (Baldeón, 2017). Por todo esto, para precautelar la seguridad, es indispensable monitorear y conservar la funcionalidad y capacidad estructural del pavimento.

El tramo de estudio está ubicado en la vía Cuenca- Molleturo- Naranjal. Esta vía pertenece al zonal 6 que abarca las provincias del Azuay, Cañar y Morona Santiago. La zona de la vía cuenta con una temperatura que va desde los 10 °C a los 19°C regularmente. (Weather-Atlas, 2021). La capa de rodadura de la vía dentro del tramo de estudio actualmente es de pavimento rígido. El punto inicial del tramo de estudio pertenece a la abscisa 10+000.00 (720691.4; 9684093.1) UTM, con Latitud: 2°51'22.90" S y Longitud: 79°0.5'52.74" O; el punto final del tramo corresponde a la abscisa 30+000.00 (699173.9; 9691783.2) UTM con Latitud: 2°47'13.71" S y Longitud: 79°12'29.74" O. En la siguiente ilustración se detalla el tramo usado de una extensión de 20km.

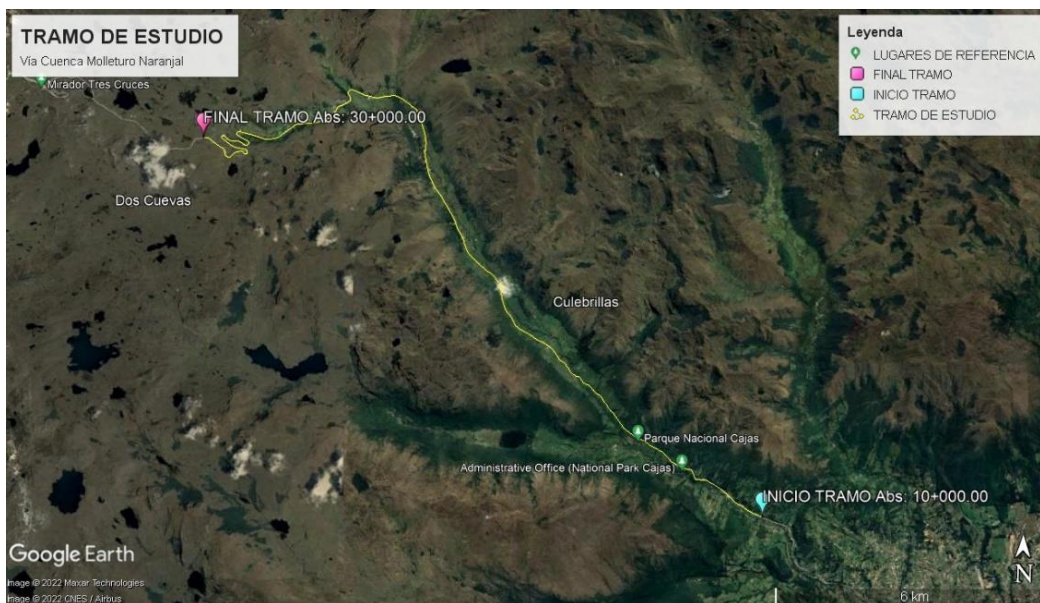


Ilustración 31. Tramo de Estudio Cuenca Molleturo Naranjal. Autoría Propia.

Además, se realizó medición del IRI con las aplicaciones correspondientes, para comparar con mediciones realizadas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en la vía Biblián – Zhud. Específicamente en el tramo 3 que va de Biblián a Campo Alegre. El tramo está comprendido entre la abscisa 47+500.00 (733614.6; 9704821.6) UTM con Latitud: 2°40'7.49" S y Longitud: 78°53'55.58" O y la abscisa 53+019.00 (734407.8; 9700550.5) UTM con Latitud: 2°42'26.46" S y Longitud: 78°53'29.67" O; el punto final pertenece a Con una extensión aproximada de 5.48 km. El mismo se puede apreciar en la siguiente ilustración:

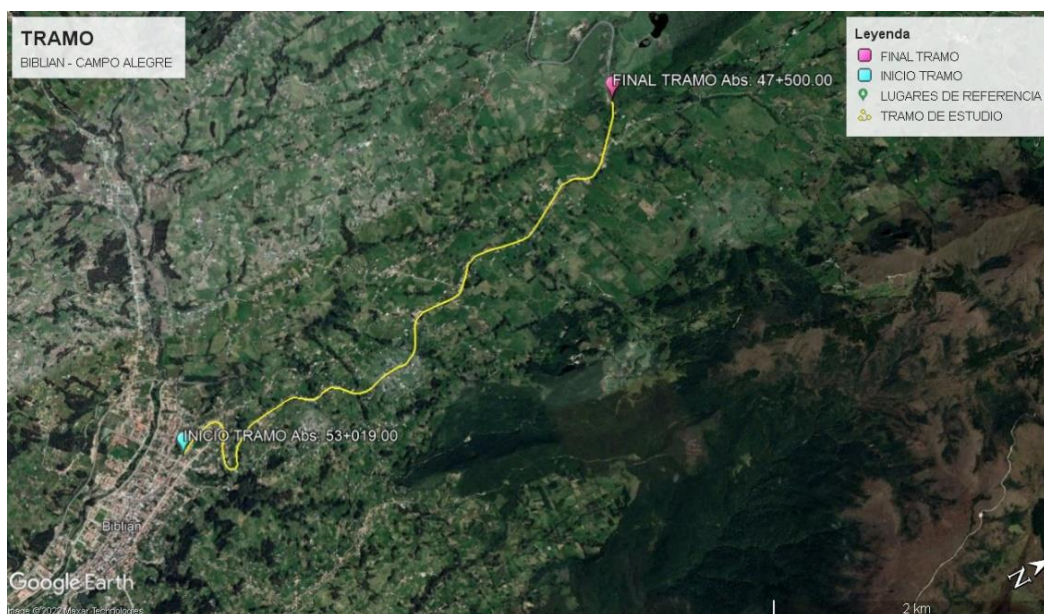


Ilustración 32. Tramo Biblián- Campo Alegre. Autoría Propia.

1.10.2 Equipos

Para la medición del valor del índice de rugosidad internacional IRI tanto con la aplicación IRI.Calc.Free como Roadroid, se utilizaron los siguientes equipos:

1.10.2.1 Teléfono móvil

Xiaomi Redmi Note 9, el mismo que cuenta con un acelerómetro capaz de medir las vibraciones características del estado funcional de la vía, además de un sistema operativo Android 11 compatible con ambas aplicaciones, cuenta con un procesador Snapdragon 720G a 2.3Ghz. El modelo del acelerómetro y giroscopio de 3 ejes incorporado es Ism6ds3c el cual es un modelo de sensor de orientación y estimación espacial 3D llamados iNEMO. (Xiaomi Global Inc, 2021)



Ilustración 33. Teléfono Xiaomi Utilizado en las Mediciones

1.10.2.2 Vehículo de prueba

El vehículo utilizado es del tipo SUV de la marca Volkswagen modelo T-Cross el cual cuenta con amortiguación delantera independiente y trasera de brazo longitudinal. El vehículo cuenta con un tanque de gasolina de 50 litros. Y un motor de 1.6 cc. Este vehículo cuenta con un soporte de celular de gran resistencia integrado en el tablero del mismo. (Volkswagen, 2022)



Ilustración 34. Vehículo Utilizado para las Mediciones

1.10.3 Bases de Datos

1.10.3.1 Datos IRI tramo Biblián- Campo Alegre:

Los datos ocupados para la calibración de las aplicaciones móviles corresponden a mediciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) mediante perfilómetro láser, en el tramo 3 de la vía Biblián – Zhud, como se mencionó anteriormente en el tramo

entre las abscisas 47+500.00 y 53+019.00. Con una extensión de 5.52 km y mediciones de IRI a cada 100m, proporcionando información como la velocidad de captura (km/h), abscisa, atura (m), coordenadas geográficas y valor del IRI en (m/km).

1.10.3.2 Datos FWD tramo Cuenca-Molleturo:

Los datos utilizados para el análisis de deflexiones, corresponden a mediciones realizadas en la vía Cuenca - Molleturo, entre las abscisas 10+000.00 (Inicio del Tramo) y 30+000.00 (Final del Tramo). El quipo utilizado para medir las deflexiones en el pavimento fue el Falling Weight Deflectometer PRI-MAX 2100 perteneciente al Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. Estos datos están medidos a cada 100m de longitud, los mismos corresponden a la siguiente configuración de geófonos: 0, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y -30cm desde del centro del punto de aplicación de la carga.

1.10.4 Software y Aplicaciones de Medición

1.10.4.1 IRI. Regularidad. Carreteras

Aplicación para dispositivos móviles disponible únicamente en el sistema Android, cuya versión actualmente es Civil-K, esta aplicación es de libre acceso y gratuita en la PlayStore, no requiere una cuenta o un pago para su descarga.

Se basa en el modelo de cuarto de carro por medio de la amortiguación y acelerómetro del automóvil, determinando así los valores correspondientes al IRI. La aplicación ofrece únicamente una configuración de longitud de tramos de medición, que es a cada 100m. Los datos son almacenados directamente en el dispositivo contando con dos archivos xls o Excel y un archivo kml que contiene una ruta con simbología de alturas correspondiente al valor de IRI de cada tramo de 100m y puede ser abierto por medio de Google Earth. (Nieto, Manual IRI Android (2), 2018)

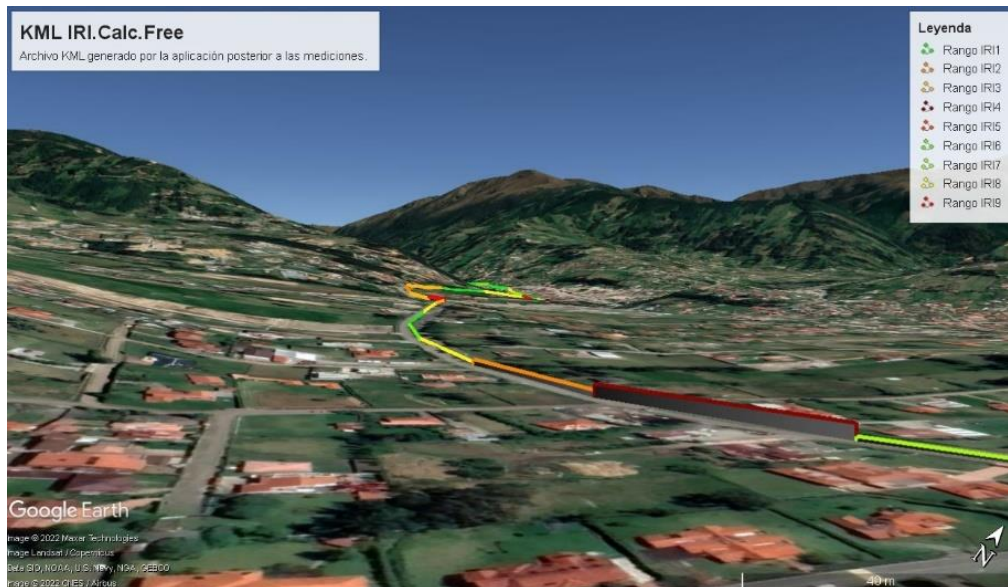


Ilustración 35. KML Ruta con valores IRI generada por la Aplicación IRI.Calc.Free. Autoría Propia.

En la interfaz podemos apreciar las coordenadas medidas por el GPS del teléfono celular y su precisión o error, la velocidad y distancia recorrida, además se puede modificar el factor de ajuste o calibración y el método de cálculo estadístico o de máximos. La interfaz de la misma se muestra en la siguiente ilustración:

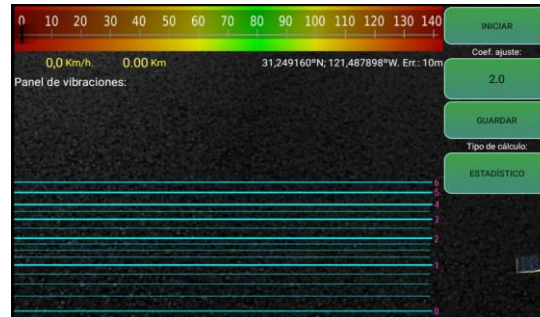


Ilustración 36. Interfaz IRI.Regularidad.Carreteras.

1.10.4.2 RoadRoid 3.0

Es una aplicación móvil para el sistema operativo Android que actualmente se encuentra en su versión 3.0, el uso de la misma es restringido y mediante una cuenta, la cual debe tener una autorización de acceso. Para acceder a la misma se deben seguir los pasos que están descritos en su página web. Es importante que si existen actualizaciones del sistema operativo la aplicación sea configurada nuevamente. La aplicación utiliza el acelerómetro del dispositivo móvil y el sistema de amortiguación delantera del automóvil para simular un modelo cuarto de carro, por medio de estimaciones y cálculos de obtiene el valor de IRI. (RoadRoid, 2014)

Esta aplicación almacena los datos en dispositivo momentáneamente y luego con una conexión de internet los sube a una nube propia de Roadroid, desde la cual se pueden seleccionar los datos que se desean descargar y la modificación de algunos parámetros como son: longitud del tramo (10, 20, 40, 100 y 200m) y nombre del archivo a descargar.

Adicional a esto el tramo la nube ofrece un gráfico de la ruta extraíble en shapefile o kml para Google Earth.

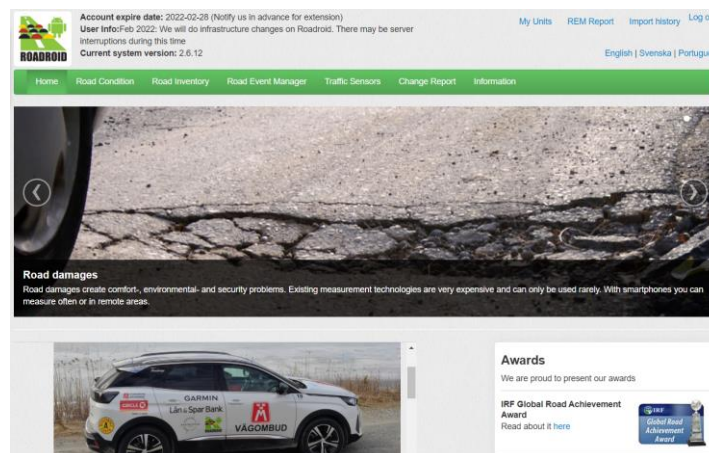


Ilustración 37. Interfaz de la Nube Roadroid. Autoría Propia.

Dentro de la misma nube se pueden revisar los valores que han sido utilizados según la calibración del dispositivo para la corrección de velocidades y valores iniciales o de calibración del eIRI y cIRI.

1.10.4.3 Microsoft Excel (Hoja de Cálculo)

Se empleó la herramienta computacional de hojas de cálculo del paquete Office, la misma que permite la creación de hojas de cálculo de forma intuitiva y sencilla, facilita el procesamiento de bases de datos y permite utilizar sus herramientas para la depuración, correlación y corrección de las mediciones que se ocuparán.

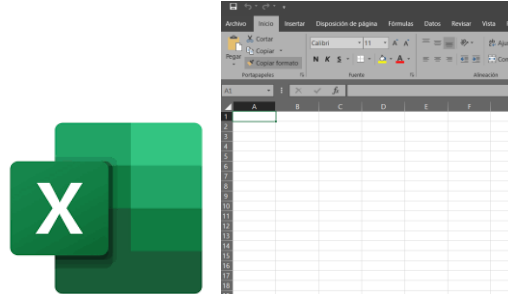


Ilustración 38. Icono e interfaz de Microsoft Excel.

1.10.4.4 Google Earth:

Google Earth es un programa que permite visualizar imágenes satelitales de todo el planeta, por medio de mapas o vistas cartográficas y topográficas 3D. Inicialmente conocido como Keyhole posterior a la compra por Google Inc. Se convirtió en una aplicación gratuita que permite introducir puntos en coordenadas UTM o Geográficas, además de generar archivos Shape compatibles con otras aplicaciones SIG y permitir el ingreso de archivos csv provenientes de Excel. (Google Inc, 2022)

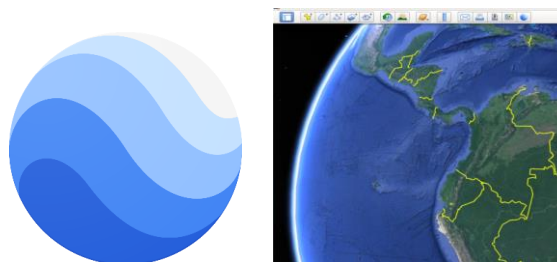


Ilustración 39. Ícono e Interfaz Google Earth.

1.11 Metodología

El presente trabajo de titulación es experimental y cuantitativo, en el cual se mide la rugosidad de la vía Cuenca – Molleturo en el tramo entre las abscisas 10+000 hasta la 30+000 en ambos sentidos de la vía, para determinar el valor del IRI y buscar una correlación con los datos de deflexiones del FWD proporcionadas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas.



El proceso de recolección de datos, es decir la medición del IRI, se lo realiza mediante aplicaciones móviles. Dichas aplicaciones son software desarrollados para teléfonos móviles, a través de los cuales se registran los desplazamientos verticales y horizontales que experimenta el mismo, mientras está fijo dentro de un vehículo, el cual circula por el tramo de vía en estudio. (Putra & Suprpto, 2018).

Para validar las mediciones de IRI, es necesario calibrar la primera medición realizada con cada aplicación, comparándolas con una medición de referencia realizada con perfilómetro láser por el MTOP. La calibración se realiza para determinar los factores de sensibilidad con los que cuenta cada aplicación y así garantizar que las mediciones de IRI representan la condición de la vía. (Canavos, 2001).

Los datos recopilados mediante las aplicaciones, son tabulados y georreferenciados para poder cotejar los tramos de análisis y posteriormente compararlos con la información de deflexión a lo largo de los mismos tramos de análisis. De esta manera se busca una correlación entre los valores del IRI y de la deflexión en pavimentos (Díaz & Ramírez, 2021). Dicho análisis permitirá determinar zonas que presenten un elevado valor del IRI y deflexiones, lo cual es un indicio de la existencia de fallas superficiales y estructurales en el pavimento y el requerimiento de alternativas de rehabilitación.

Mediante esta metodología, se pretende probar la hipótesis de que existe una correlación entre el IRI y la deflexión que permita definir valores de deflexión mediante la medición del IRI a través de una aplicación móvil instalada en un teléfono celular. Este método de agiliza y facilita el proceso de medición del IRI, para determinar valores críticos que indiquen zonas de fallas en el pavimento y de esta manera se focalice los tramos que requieren rehabilitación (Díaz & Ramírez, 2021). Los resultados esperados de la investigación son: una correlación entre el IRI y la deflexión del pavimento medida con FWD, la identificación de zonas de falla que requieren rehabilitación y mantenimiento y valores de IRI de una vía para verificar su cumplimiento con la normativa nacional e internacional.

1.11.1 Calibración de Aplicaciones

En la presente investigación, la calibración consiste en comparar mediciones con diferentes equipos con el objetivo de estandarizar escalas, teniendo la medición de un equipo de mayor precisión considera como base para calibrar las mediciones con equipos de menor precisión. En el presente caso, las mediciones realizadas mediante las aplicaciones RoadRoid e IRI.Calc.Free, corresponden a equipos de medición tipo RTRRMS de clase 3 que requieren calibración, en base a la clasificación del Banco Mundial presentada en el apartado 1.7.2.2 Dicha calibración se la realiza en base a la medición del IRI mediante perfilómetro láser que corresponde a un equipo clase 1, obtenida gracias al Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP, realizadas en el 2014 y que constan como base de datos para ésta investigación.



Las mediciones de IRI en la vía Biblián – Zhud, realizadas en el 2014 son los datos más recientes que dispone el MTOP en vías del Austro Ecuatoriano, por lo que la calibración se enfocará en el método para predecir la vida de servicio remanente del pavimento desarrollado por los ingenieros Al-Suleiman y Adnan Shiyab en Dubai U.A.E. El cual permite determinar la edad del pavimento en relación con la medición del IRI, debido a que las mediciones son realizadas en distintas fechas. (Al-Suleiman & Shiyab, 2003)

1.11.1.1 Calibración de RoadRoid

El primer paso para realizar la calibración es estandarizar un mismo sistema de abscisado tanto con la medición de perfilómetro como con las aplicaciones, el cual va de la abscisa 47+500 hasta la 53+019 de la vía Biblián – Zhud, correspondiente al tramo 3 (Biblián – Campo Alegre) detallado en el apartado 1.10.1 como zona de estudio. Cabe destacar que, para realizar la primera medición con las aplicaciones, los parámetros de inicio son los predeterminados y los coeficientes de ponderación de 1 debido a que aún no se realiza la calibración.

Luego se procede a graficar los perfiles de medición del IRI, tanto los medidos con la aplicación RoadRoid, como los proporcionados por el MTOP. Una vez graficados, se ajusta los picos de medición debido a la variación en la precisión del GPS que posee cada equipo de medición, lo cual permite comparar las mediciones de IRI.

Debido a que las mediciones no son realizadas la misma fecha, es importante obtener información sobre la edad de la vía. Es por esto que en el informe del Estudio de Evaluación Funcional y Estructural del Pavimento del Tramo Biblián – Zhud de la vía E35 de la Provincia del Cañar, presentado por Ecuatest en el año 2014, se establece que la vía fue construida en 2009 y los ensayos de medición de IRI se los realizaron en el 2014 debido al deterioro prematuro del pavimento en dicha vía. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014)

Posteriormente, al conocer la fecha de construcción y realización de ensayos de medición del IRI, es necesario conocer los niveles de IRI aceptables para la recepción de proyectos, lo cual se detalla en el apartado 1.7.2.1 donde se presenta normativa nacional y se indica que el valor máximo de IRI debe ser de 2 m/km, puesto que representa el nivel de IRI inicial en el año de culminación de construcción. En base a este valor inicial, se determina el coeficiente inicial de la ecuación exponencial desarrollada por Al-Suleiman y Adnan Shiyab, presentada en la sección 1.7.3.4 (Al-Suleiman & Shiyab, 2003)

Mediante este método, en base al tiempo en años transcurrido desde la medición del MTOP hasta la fecha de medición con la aplicación RoadRoid, se puede determinar el incremento que tendría la medición del IRI en dicho intervalo de tiempo. Permitiendo definir la escala que debería tener las mediciones de IRI con las aplicaciones.



Finalmente, al determinar el incremento del IRI desde el año de medición realizada por MTOP, se calcula el valor del IRI que tendría en la actualidad, lo cual al compararse con la medición del IRI con RoadRoid permite obtener un factor de ponderación de la medición denominado cIRI. Dicho factor es el valor que debe ser ingresado en los ajustes de la aplicación para realizar las posteriores mediciones en la zona de estudio. (Roadroid, 2021)

Cabe destacar que, al realizar la calibración, se logra obtener un coeficiente de cIRI único, en función de la combinación de características del vehículo, teléfono celular y parámetros de ajuste de la aplicación. Es por esto que, en caso de cambiar el vehículo o el teléfono, se debe volver a realizar la calibración y encontrar un nuevo factor cIRI.

1.11.1.2 Calibración de IRI.Calc.Free

Para la calibración de la aplicación IRI.Calc.Free, se sigue un proceso similar al mencionado anteriormente para calibrar la aplicación RoadRoid. La medición base o de referencia es igualmente la realizada con perfilómetro láser por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP en el tramo 3 de la vía E35 de la Provincia del Cañar correspondiente a Biblián – Campo Alegre entre las abscisas 47+500 y 53+019.

La aplicación IRI.Calc.Free posee dos parámetros de ajuste necesarios para realizar las mediciones como se menciona en la sección 1.7.3.3 del presente texto, por lo que para realizar un primer ensayo que servirá para calibrar, se opta por un coeficiente de ajuste igual a 1, debido a que este factor lo que hace es ponderar la medición.

Posteriormente se procede a graficar los perfiles de medición del IRI con perfilómetro y con la aplicación, para ajustar los picos de medición debido a la variación en la precisión del GPS que posee cada equipo. Para finalmente en base a la información de la edad del pavimento, descrita en el informe del Estudio de Evaluación Funcional y Estructural del Pavimento del Tramo Biblián – Zhud de la vía E35 de la Provincia del Cañar, presentado por Ecuatest y de los valores de IRI máximos normados para la recepción de pavimentos, proceder a utilizar el método de estimación de la edad del pavimento en base a las mediciones de IRI de los ingenieros Al-Suleiman y Adnan Shiyab. (Al-Suleiman & Shiyab, 2003)

Mediante el método de estimación, se determina el valor de IRI que debería tener la vía en la actualidad y de esta manera definir el coeficiente de ajuste que sirve para ponderar las mediciones de IRI y obtener valores que reflejen las condiciones actuales de las vías en estudio.

De igual manera, el factor encontrado es exclusivo para el conjunto de características de los materiales utilizados como el vehículo y su sistema de suspensión y el teléfono con su acelerómetro y giroscopio de 3 ejes. En caso de existir algún cambio, se deberá volver a calibrar la medición para encontrar un nuevo factor de ponderación.



1.11.2 Medición de IRI con Aplicaciones

Sayers en la publicación número 46 del Banco Mundial de 1986, da una serie de recomendaciones para realizar una correcta toma de datos (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986):

- Se recomienda que dos personas realicen la medición, el conductor se encarga de mantener la velocidad estándar de 80km/h y de transitar por el wheelpath, mientras que la otra persona ingresa los parámetros de ajuste en la aplicación y registra la ubicación de puntos de interés.
- Utilizar el mismo dispositivo móvil o Roadmeter así como el mismo vehículo de medición para reducir los errores por repetición.
- Inspeccionar el correcto funcionamiento de las aplicaciones, así como los componentes del vehículo como presión de los neumáticos, soporte del teléfono.
- Evaluar que las condiciones climáticas sean similares durante las mediciones de calibración y las demás mediciones.
- Realizar un recorrido previo de entre 5 y 10 minutos con el objetivo de que los componentes del vehículo alcancen una temperatura estable.
- Alcanzar la velocidad estándar 80km/h previo a llegar al punto de inicio de medición.
- Recorrer la misma trayectoria por el wheelpath y registrar la ubicación de baches para posteriormente identificarlos en el perfil de medición del IRI.
- Realizar la calibración en el tramo que presenta la mayor rugosidad, debido a que dicho tramo limitaría los valores máximos de medición de IRI. Además, la longitud de dichos tramos puede ser de 1.5km a 5km como recomendación.
- Realizar mediciones periódicas para determinar la repetitividad de las mediciones, variaciones y sensibilidad a diversos factores como condiciones ambientales, etc.
- Evaluar la variación entre mediciones mediante formularios o formatos realizados previamente.

Cabe destacar que la calibración es un ajuste de las primeras mediciones realizadas con cada aplicación, por lo que se deben tener en cuenta las recomendaciones antes expuestas, en todo momento.

1.11.2.1 IRI con RoadRoid

Ajuste de Parámetros

Para realizar mediciones de IRI con la aplicación RoadRoid, es necesario ajustar todos los parámetros de ingreso que posee el programa. Es importante mencionar que este ajuste se lo debe realizar tanto para la primera medición, la cual sirve para realizar el proceso de calibración antes mencionado y obtener nuevos valores de ajuste para los parámetros que representen las condiciones locales, así como en cada medición posterior realizada.

Como se menciona en el apartado 1.7.3.2 del presente documento, la aplicación RoadRoid requiere varios parámetros de inicio, mediante los cuales se calibra la medición a realizar. Los parámetros ingresados para realizar la primera medición son:

- **Tipo de Vehículo:** Dentro de las opciones del tipo de vehículo, dado que las mediciones se realizaron en un Volkswagen T-Cross, la opción seleccionada es un SUV o carro mediano. En base a este parámetro se definen los coeficientes por default de corrección por velocidad.
- **Frecuencia del Acelerómetro:** En base a las características del teléfono usado, que en este caso es un Xiaomi Note9 Pro, el módulo de frecuencia del acelerador incorporado es de 200Hz por lo que se selecciona dicha opción como parámetro de entrada en la aplicación.

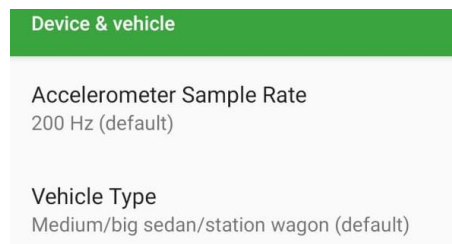


Ilustración 40. Ajuste Tipo de Vehículo y Acelerómetro RoadRoid (Roadroid, 2021)

- **Sensibilidad de Velocidad:** Los coeficientes de sensibilidad de velocidad recomendados por la aplicación para un vehículo mediano son los siguientes:

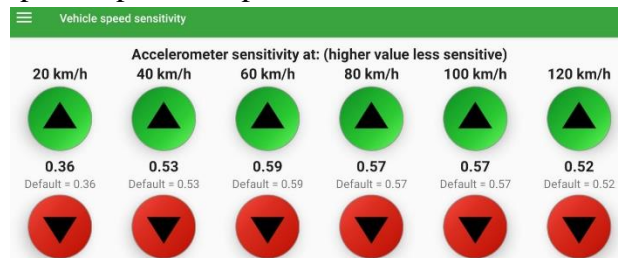


Ilustración 41. Coeficientes de Sensibilidad de Velocidad (Roadroid, 2021)

A pesar que existen factores para cada rango de velocidad, es recomendable realizar las mediciones a velocidad estándar de 80 km/h, excepto en zonas donde sea necesario reducir la velocidad como curvas cerradas, tráfico o presencia de obstáculos en la vía.

- **Calibración de Fricción:** Este parámetro puede ser positivo o negativo para aumentar o disminuir los valores de medición. El valor recomendado para vehículos medianos es de cero.

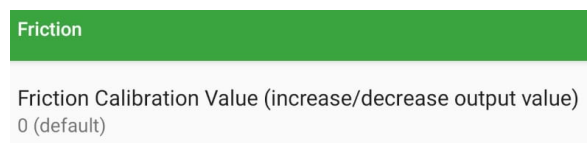


Ilustración 42. Calibración de Fricción. (Roadroid, 2021)

- **Longitud de Intervalo:** De todas las opciones de intervalo de distancia entre el cual se realiza la medición, la opción seleccionada es de 10m debido a que permite la mayor recolección de datos posible. Cabe destacar que, al momento de descargar las mediciones, este parámetro se puede modificar para efectos de análisis de sensibilidad de variables.
- **eIRI Valor de Calibración:** Este parámetro está en función del tipo de vehículo y se ajusta mediante calibración con mediciones de clase 1 o 2. Como parámetro inicial para realizar la primera medición, se seleccionó el valor recomendado de 1.
- **cIRI Sensitividad del Vehículo:** Al igual que el parámetro anterior, éste depende del tipo de vehículo y se ajusta mediante calibración con mediciones de clase 1 o 2. Como parámetro inicial para realizar la primera medición, se seleccionó el valor de 1. Luego de realiza la calibración, se determina que este coeficiente debe ser de 1.5, el cual se utiliza para todas las posteriores mediciones.

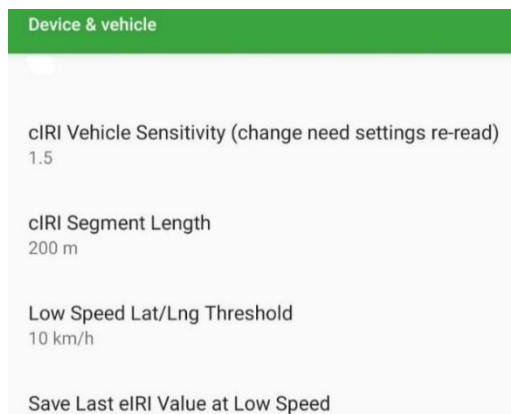


Ilustración 43. Parámetros cIRI, eIRI y longitud de intervalo (Roadroid, 2021)

Una vez ajustado el equipo, se procede a realizar la primera y consecuentes mediciones, siguiendo los pasos detallados a continuación.

Medición del IRI

Para realizar las mediciones de IRI con la aplicación RoadRoid, se debe seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Descargar la aplicación en el teléfono de medición y crear una cuenta solicitando la licencia respectiva a la página de RoadRoid, la cual dará acceso a la plataforma para la recolección de datos y posterior descarga.

Paso 2: Ubicarse en el punto de inicio de medición y colocar el teléfono celular en el soporte fijo del vehículo, mientras éste está detenido e ingresar al menú de la aplicación.

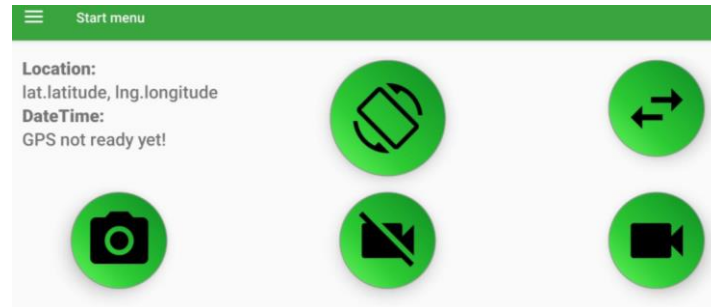


Ilustración 44. Menú principal RoadRoid. (Roadroid, 2021)

Paso 3: Ajustar el nivel que tiene incorporada la aplicación, la cual permite realizar mediciones únicamente cuando los valores de nivel de cada eje están entre -2 y 2 en cada eje x, y, z. Cuando se realiza el correcto posicionamiento del teléfono, el ícono con check pasa de color amarillo a verde, lo cual indica que el giroscopio de 3 ejes del teléfono se encuentra nivelado.

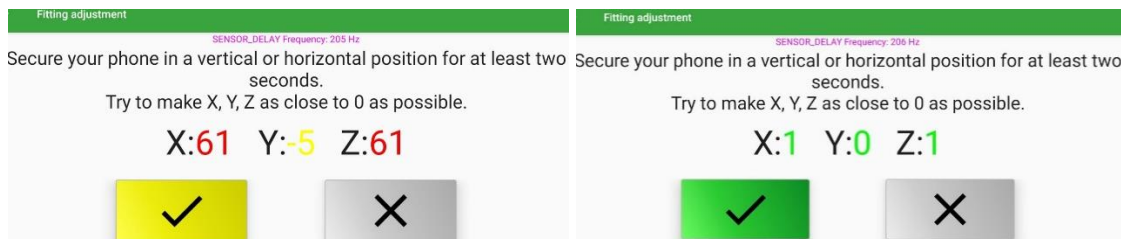


Ilustración 45. Nivel de RoadRoid. (Roadroid, 2021)

Paso 4: Ingresar todos los parámetros de ajuste de la aplicación, con los valores o configuraciones indicadas en el apartado 1.11.2.1 :

- Tipo de vehículo,
- Longitud de Intervalo
- Frecuencia de Acelerómetro
- Fricción
- Sensibilidad de Velocidad
- eIRI y cIRI

La aplicación permite guardar todos estos parámetros como un conjunto de ajustes denominado presets, para evitar ingresar uno por uno previo a cada medición.

Paso 5: Dependiendo del tipo de registro que se desee realizar se puede optar por captura de fotografías, registro de video durante toda la medición o sin registro de archivos visuales. Todos los archivos de media que sean registrados se cargan en la nube de RoadRoid y se georreferencia junto con los datos de medición de IRI.



Ilustración 46. Pantalla de medición con RoadRoid. (Roadroid, 2021)

Paso 6: Una vez finalizada la medición se da click en detener y se guarda la medición con un nombre que permita su identificación. Posteriormente cuando se disponga de conexión a internet, se dirige a la opción “Manage Uploads” y se da click en Upload Data and Media o únicamente en Upload Data si así se lo requiere.

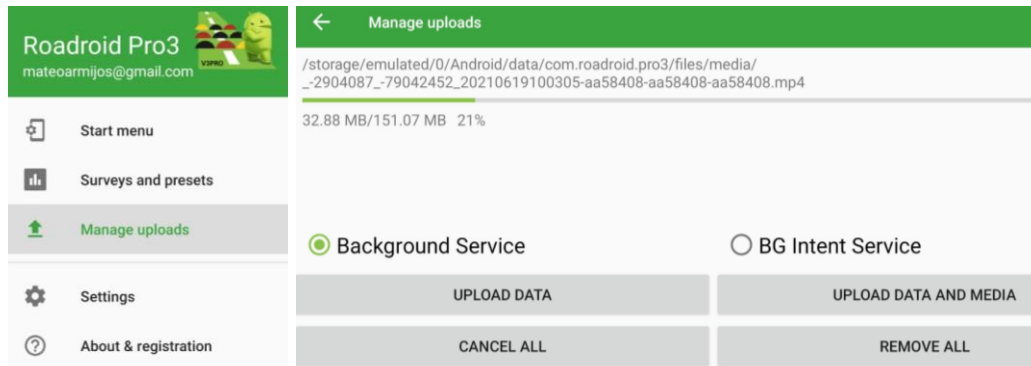


Ilustración 47. Opción de Carga de Información en la nube de RoadRoid. (Roadroid, 2021)

Paso 7: Luego de que se termine de subir los datos a la plataforma de RoadRoid, en un computador se ingresa a la página Roadroid.com con la cuenta registrada inicialmente.

Paso 8: Dentro de la página web, ingresar en la opción Import History, donde se almacenan todas las mediciones realizadas y cargadas en la plataforma. Cada una de las mediciones tiene la fecha de medición, nombre de usuario, modelo del teléfono utilizado, longitud total de medición, promedio de velocidad y de IRI.

roadroid.com/ImportHistory

Account expire date: 2022-02-28 (Notify us in advance for extension)
 User Info: Feb 2022: We will do infrastructure changes on Roadroid. There may be server interruptions during this time
 Current system version: 2.6.12

My Units REM Report Import history Log out

English | Svenska | Português

Home Road Condition Road Inventory Road Event Manager Traffic Sensors Change Report Information

Import History List

Show 25 entries Search: Type: All

Import date	User Name	Unit Name	Import Status	Avg eIRI	Avg cIRI	Avg Speed	Road Id	Survey Length (m)	Type
18/02/2022 19:31:20	ReadmiMateo	ReadmiMateo_Unit1	Import OK	7,5	11,0	70,7	LI3	26565	RoadCondition
18/02/2022 19:31:02	ReadmiMateo	ReadmiMateo_Unit1	Import OK	5,2	7,1	73,6	LICMRDR1	26625	RoadCondition
18/02/2022 19:30:35	ReadmiMateo	ReadmiMateo_Unit1	Import OK	5,2	6,4	62,5	LDCMRDR16	26733	RoadCondition

Ilustración 48. Plataforma de RoadRoid. (Roadroid, 2021)

Paso 9: Ingresar en los detalles de cada medición y ajustar el intervalo de discretización de los datos a descargar, el cual puede variar de 10 hasta 200 y es útil para tener una mejor precisión en la medición. Además, se puede generar archivos tipo KML y tipo Shapefile para georreferenciar las mediciones.

Home Road Condition Road Inventory Road Event Manager Traffic Sensors Change Report Information

Survey details

Show survey start- and endpoint on Google Maps (You must allow popups in web browser)
 Show survey data on map (Use the "Road Condition" tab above to view all surveys.)

Generate Shape File
 Generate KML file
 Generate aggregate file 100m Select aggregation length

Survey Details	Value
Measurement Id	184701
Import date	18/02/2022 19:31:20
User Name	ReadmiMateo
File Name	862520057435830-20220218122946-e9c0e272-RCP.zip
Survey start time	18/02/2022 12:29:46
Survey end time	18/02/2022 12:52:12
Import Status	Import OK
RoadId	LI3

Ilustración 49. Información sobre los datos y correcciones por velocidad Nube Roadroid.

1.11.2.2 IRI con IRI.Calc.Free

Ajuste de Parámetros

Para realizar las mediciones con la aplicación IRI.Calc.Free es necesario ajustar los parámetros de ingreso del programa, los cuales se describen en la sección 1.7.3.3 .

El primer parámetro que se debe ingresar en la aplicación, es el “coeficiente de ajuste”, el cual se encarga de ponderar las mediciones para obtener una correcta escala de IRI. En esta investigación, todas las mediciones se realizaron con el coeficiente de ajuste de 2 el cual se obtuvo mediante la calibración de la aplicación, explicado anteriormente en el apartado

1.11.1.2 , en base a la medición de referencia de IRI realizado con perfilómetro láser por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Este factor permite ajustar los parámetros de medición según las características específicas de los equipos como son el tipo de dispositivo móvil con su acelerómetro y giroscopio integrado, el tipo de vehículo con su amortiguación y las condiciones de la medición a lo largo de la vía, haciendo referencia especialmente a condiciones de tráfico y clima.

Cabe recalcar que, si cambian ciertos parámetros como la amortiguación del automóvil, el tipo de auto o el teléfono inteligente utilizado, se deberá volver a calibrar el coeficiente de ajuste, puesto que es único para la combinación de condiciones y equipos de medición. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

El otro parámetro es el tipo de cálculo, puede ser estadístico o por máximos. Este parámetro se puede cambiar antes o después de realizar la medición, puesto que la aplicación permite leer la última medición realizada como se muestra en la siguiente ilustración.

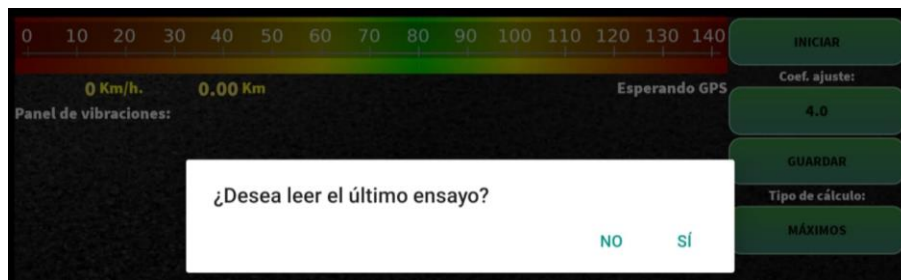


Ilustración 50. Lectura del último ensayo IRI. Calc.Free (Nieto, Manual IRI Android (2), 2018)

Luego de leer la última medición, es posible cambiar los parámetros de ajuste y posteriormente guardar los archivos con los datos de medición de IRI en función de dichos parámetros. Es por esto, que se analizó las mediciones tanto con el método estadístico que se encarga de ponderar las mediciones, así como con el método por máximos, que establece un valor límite de IRI a partir del cual trunca los valores medidos. (Nieto, 2015)

El método de cálculo por máximos, presenta dificultades debido a que, mediante el coeficiente de ajuste, pondera inversamente los valores y trunca aquellos sobre un límite superior a 6 e inferior a 0.2 lo cual implica pérdida de información, razón por la cual se realizó la calibración únicamente bajo el método de cálculo estadístico.

Medición del IRI

Paso 1: Instalar correctamente la aplicación IRI. Regularidad. Carreteras. Desde la Play Store, disponible para dispositivos Android versión 4.4 o superiores. Una vez instalado, es importante permitir que la aplicación acceda a la ubicación del teléfono móvil en tiempo real, luego se procede a ingresar en la app, en donde encontraremos la siguiente pantalla de inicio.

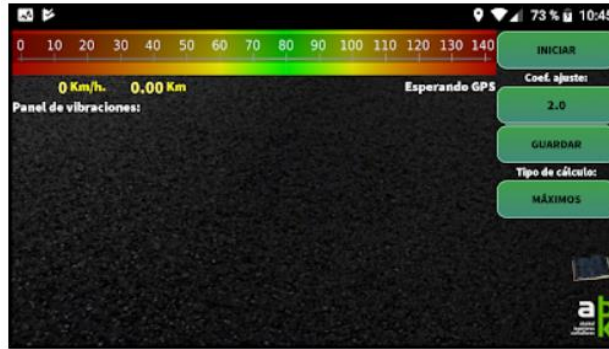


Ilustración 51. Interfaz inicial de la aplicación IRI.calc.free (Nieto, 2018)

Paso 2: Fijar el teléfono celular a un sujetador dentro del vehículo mientras se encuentra detenido y mantenerlo ahí durante todo el trayecto a medir.

Paso 3: Una vez colocado el celular en posición, se debe dar clic en el botón de INICIO, para que el programa se inicialice, en ese momento aparecerá un botón que dice CONTEO.

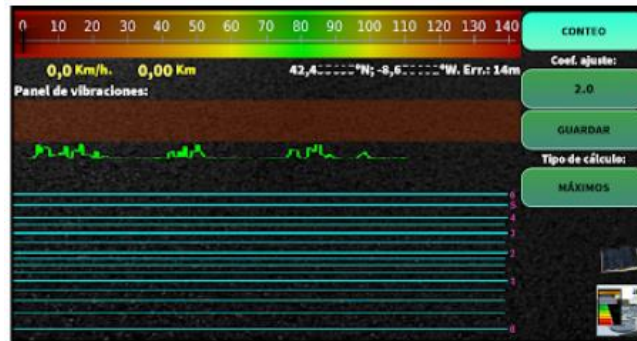


Ilustración 52. Interfaz IRI.calc.free botón CONTEO (Nieto, 2018)

Paso 4: Cuando aparezca la opción CONTEO, podemos encender el vehículo y dirigirnos hasta el punto de partida desde donde realizaremos la medición.

Paso 5: Posteriormente, cuando llegemos al punto de inicio, se debe dar clic en CONTEO e inmediatamente la aplicación iniciará a medir las vibraciones. En ese momento aparecerá un botón con la opción PARAR que nos permite realizar un pause en las mediciones.

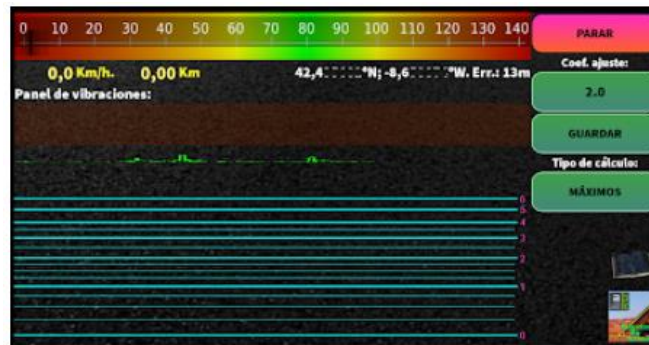


Ilustración 53. Interfaz IRI.calc.free botón PARAR (Nieto, 2018)

Paso 6: Una vez terminada la medición en el trayecto de análisis, se debe dar clic en la opción PARAR para pausar el registro de mediciones y a continuación en la opción DETENER para finalizar por completo la medición.

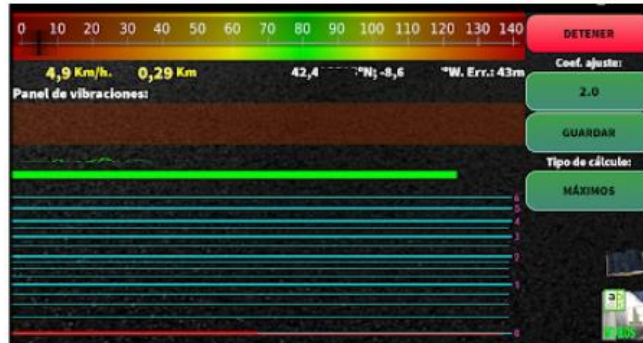


Ilustración 54. Interfaz IRI.calc.free botón DETENER (Nieto, 2018)

Paso 7: En ese momento, el ensayo se detiene y a continuación se debe dar clic en guardar. Esta aplicación guarda un total de 3 archivos, 2 de ellos tipo CSV en donde se encuentra la información tabulada, indicando la ubicación geográfica en Latitud y Longitud, Altitud, Velocidad de Circulación, el abscisado de la medición respecto al punto inicial y el valor del IRI en tramos de cada 100 metros. El otro documento tiene extensión KML los cuales se pueden abrir mediante Google Earth, en donde se grafica la trayectoria y clasifica el valor del IRI mediante colores.



Ilustración 55. Archivos generados por la aplicación IRI.calc.free CSVs y KML (Autoría Propia)

1.11.3 Procesamiento del IRI medido con aplicaciones móviles:

Las aplicaciones móviles antes mencionadas nos entregan los datos comúnmente en archivos Excel o txt, los mismos que deben ser georreferenciados y filtrados para proceder con el análisis de correlación entre el IRI y las deflexiones medidas con FWD. A continuación se describe todo el proceso a seguir para analizar y depurar los datos de mediciones de IRI tanto para la aplicación RoadRoid como para la aplicación IRI.Calc.Free



1.11.3.1 Georreferenciación

El primer paso luego de la descarga de los archivos con extensión (.csv; .txt y .kml) de cada aplicación, que contiene la información de cada medición, es abrirlo mediante el software Google Earth para visualizar los puntos que poseen los valores de IRI.

Para la aplicación IRI.Calc.Free este proceso es directo, debido a que uno de los archivos generados por la aplicación es kml el cual es compatible con el software de Google Earth. Para la aplicación RoadRoid, el proceso es distinto. Se debe ingresar en el software Google Earth y dar click en Archivo-Importar, luego seleccionar el archivo (.txt) generado por la aplicación y en base al separador de campos que puede ser (, o ;) definir la información de cada columna. Posteriormente se designa las columnas donde está la longitud y latitud de los datos medidos para georeferenciar los datos medidos. Finalmente se designa un símbolo para la gráfica de cada punto.

Es importante destacar que la aplicación RoadRoid posee la opción de discretizar en diferentes intervalos (5m, 10m, 20m, 50m y 100m) razón por la cual los datos medidos se grafican como puntos en lugar de una medición continua en cada intervalo como lo grafica IRI.Calc.Free.

Una vez que se georreferencia las mediciones, en base al abscisado de las mediciones de deflexión con deflectómetro de impacto del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, en la vía Cuenca – Molleturo, se procede a eliminar puntos que se ubique fuera del tramo con abscisas de la 10+000 hasta la 30+000.

1.11.3.2 Abscisado

En base a la ubicación de los puntos visualizados en Google Earth, se determina el desplazamiento o distancia entre la abscisa inicial 10+000 y el primer punto de medición para asignar un valor de abscisa. Para realizar esta asignación se debe abrir mediante Excel, los archivos tabulados de cada medición y asignar el valor de la abscisa correspondiente en una nueva columna. Este proceso se realiza con cada medición en cada fecha y se conforma una base de datos.

Una vez que se disponen las mediciones en un mismo sistema de abscisado, es necesario determinar el valor de IRI en las abscisas donde se realizaron mediciones de deflexión, para lo cual se desarrolló un código de programación en Excel en lenguaje Visual Basic, el cual consiste en buscar la abscisa con información de deflexión, en cada intervalo de abscisas de las mediciones de IRI.

La programación en Excel fue realizada bajo la herramienta de macros en la interfaz de Visual Basic, comprende un bucle while que recorre las celdas de los datos de abscisado de deflexiones cotejando por medio de una función if las abscisas de los datos IRI y asignando un valor a cada abscisa redondeada de las deflexiones que va de 100 en 100. De esta manera



se asigna un valor de IRI que es una medición continua, a cada punto de deflexión, puesto que es una medición puntual.

En la aplicación RoadRoid, debido a que el intervalo de discretización puede variar, los intervalos entre abscisas pueden ser de mayor o menor magnitud, por lo que el valor asignado a cada abscisa donde se realizó la medición de deflexiones varía ligeramente.

1.11.3.3 Localización de Singularidades

Las condiciones de medición afectan en gran medida los datos registrados, puesto que las mediciones de rugosidad son sensibles a la vibración del vehículo, las cuales pueden ser ocasionada por irregularidades específicas sobre la carretera o maniobras durante la conducción como: reductores de velocidad, presencia de escombros sobre la carretera, paso por puentes con juntas de neopreno, rebase de vehículos, cambios de marcha, entre otros.

Los datos con estas características fueron registrados manualmente con su ubicación para posteriormente realizar un proceso de filtrado y depuración de cada medición del IRI. Para realizar este proceso, se utiliza una programación de macros en Excel similar que ubica los puntos con singularidad en la abscisa correspondiente junto a una columna que permite identificar estas particularidades que serán eliminadas posteriormente.

Durante el análisis de las mediciones de IRI, se agrupa en un solo documento todos los valores medición con su respectiva fecha y velocidad de circulación. El primer paso es obtener coeficiente de correlación entre mediciones para evaluar si las aplicaciones RoadRoid e IRI.Calc.Free, poseen un alto nivel de repetitividad de las mediciones en base a lo cual validar este tipo de equipos.

Para analizar los datos obtenidos en cada medición, se procede a filtrar las abscisas donde se presenten singularidades como las anteriormente mencionadas y de esta manera analizar la correlación existente entre mediciones realizadas la misma fecha y entre aplicaciones.

1.11.3.4 Umbral de Velocidades

Como se menciona en la sección 1.7.3 , las aplicaciones de medición poseen sensibilidad ante la velocidad de circulación, razón por la cual Sayers en su publicación para el Banco Mundial en 1986 determina que la velocidad estándar de medición es 80km/h y puede reducir hasta 50 km/h en casos que las condiciones de manejo lo ameriten como aproximación a curvas o presencia de tráfico. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986)

Las dos aplicaciones guardan información de la velocidad de circulación entre cada punto de medición. La aplicación IRI.Calc.Free posee un umbral recomendado de 65km/h hasta 95km/h como se muestra en la Ilustración 51. Interfaz inicial de la aplicación IRI.calc.free Mientras que la aplicación RoadRoid posee coeficientes de sensibilidad de velocidad desde los 20km/h hasta los 120km/h como se muestra en la ilustración Ilustración 41. Coeficientes



de Sensibilidad de Velocidad). Las mediciones realizadas fuera de los rangos mencionados se consideran de baja precisión según cada desarrollador de las aplicaciones.

En base a los valores de velocidad antes mencionados, se realiza un filtrado de datos dentro de dos rangos de velocidad. El primer filtro consiste en analizar únicamente mediciones de IRI cuya velocidad de circulación está entre 50km/h y 95km/h, en base a lo expuesto por Michael Sayers. El segundo filtro es analizar mediciones de IRI que se encuentren dentro de un umbral de velocidades de 65km/h y 95km/h en base a lo recomendado por la aplicación IRI.Calc.Free.

El paso siguiente es analizar el comportamiento de la correlación entre mediciones, considerando la cantidad de datos disponibles versus datos filtrados. Este proceso se considera un análisis de sensibilidad de variables, que permita identificar en proceso mediante el cual se depura las mediciones de IRI con las dos aplicaciones, para obtener mejor correlación entre ensayos y de esta manera definir valores que permitan buscar la correlación entre IRI y deflexiones de pavimento medidas con deflectómetro de impacto FWD.

1.11.3.5 Ecuación de Transformación

Una vez definido el mejor proceso de filtrado, se obtiene la ecuación de transformación, la cual se considera como una ecuación que relaciona las mediciones entre la aplicación RoadRoid con IRI.Calc.Free. Su determinación se la realiza correlacionando mediciones realizadas el mismo día en la vía Cuenca – Molleturo con ambas aplicaciones, con el objetivo de estandarizar las mediciones en una sola escala de IRI. Dicha correlación se realiza luego de georeferenciar cada medición y filtrar datos donde existan particularidades como rompe velocidades, debido a que no representan mediciones del IRI del pavimento. Este procesamiento de las mediciones del IRI se detalla en la siguiente sección 1.11.3. Al graficar las mediciones de cada aplicación, se obtiene un coeficiente de correlación y ecuación de transformación, la cual sirve para estandarizar mediciones de IRI.Calc.Free en función de RoadRoid, debido a que ésta última posee mayor precisión a raíz de la cantidad de parámetros de ajuste que se debe ingresar. Este proceso se realiza debido a que cada aplicación tiene distinta sensibilidad en la escala de vibración del acelerómetro y al utilizar la ecuación de transformación, se establece una misma escala de IRI.

1.11.4 Determinación de la Deflexión

1.11.4.1 Uso de Deflexión Central como Parámetro

La deflexión central fue utilizada como valor característico óptimo para la correlación, basándose en la importancia de la misma para calcular el SIP (Structural Index of Pavement) dentro del método de análisis inverso Rohde. El SIP es un parámetro que describe la magnitud de la deformación que ocurre en la estructura del pavimento. (Ávila, Albarracín, & Bojorque, 2015)



Por consiguiente, la deflexión representativa utilizada es en primera instancia la deflexión central o deflexión bajo el punto de carga D_0 . Cabe destacar que la deflexión es un parámetro obtenido en base a una medición puntual, por lo cual es importante definir correctamente la ubicación de los puntos de ensayo mediante coordenadas y abscisado para efecto de posteriores comparaciones con parámetros como el IRI que se obtienen de mediciones continuas a lo largo de la vía.

1.11.4.2 Consideraciones

Cuencos de Deflexión no Estándar

Como se mencionó en el apartado Características del deflectómetro de impacto 1.8.3.2 “*cuencos que representan un comportamiento no estándar del pavimento*”, se omite los valores de deflexiones en cuencos con tendencia no estándar debido a que la transmisión de deflexiones es distinta en dicho punto. Estas condiciones de transmisión son inapropiadas para la comparación con la medición del IRI en la superficie del pavimento, puesto que puede alterar el resultado final del análisis y correlación.

Corrección por carga

La carga normalizada para las lecturas de deflexiones corresponde a un valor de 40kN/m, el factor de corrección por carga es igual a 40KN/m dividido para la carga aplicada. Posteriormente el factor de corrección calculado es multiplicado por los valores de deflexiones correspondientemente para realizar la corrección y obtener una deflexión normalizada. (AASHTO, 1993)

Los valores de deflexiones utilizados dentro del análisis de correlación correspondiente a esta investigación, fueron corregidos en función de la carga medida en el deflectómetro de impacto como lo describe el ingeniero Wilmer Zhañay en su Tesis de determinación del coeficiente de corrección de carga en pavimento rígido para mediciones con FWD precisamente en la misma vía de estudio. (Zhañay, 2021).

1.11.4.3 Georreferenciación

Para poder ubicar correctamente los datos correspondientes a las mediciones de deflexiones, se extraen las coordenadas geográficas, abscisado y deflexión de los puntos desde el archivo formato txt proveniente del equipo FWD a un archivo csv de Excel.

Posterior a ello, se importa el archivo de Excel desde la herramienta Google Earth, definiendo las columnas que contienen las coordenadas geográficas para poder localizar cada punto de medición. Al realizar este proceso, se identificó datos cuyas coordenadas no corresponden correctamente al trayecto de la vía, por lo que para su correcta ubicación se considera la secuencia de abscisado que es a cada 100m. Al identificar los puntos con coordenadas erróneas, se ubican sobre el trayecto a una longitud de 100m cumpliendo con el abscisado como se presenta en la siguiente ilustración.



Ilustración 56. Corrección de la ubicación de los puntos correspondientes a las deflexiones del carril derecho. (Autoría Propia)

1.11.5 Determinación de la Correlación

1.11.5.1 Consideraciones para la Correlación FWD – IRI

Para la correlación entre las variables de interés Deflexión e IRI se toman en cuenta las siguientes condiciones:

- Los datos del IRI fueron medidos bajo condiciones climáticas favorables, es decir, sin lluvia o altas temperaturas que puedan afectar la medición del IRI, puesto que es un parámetro superficial.
- Los intervalos entre mediciones de deflexión e IRI son constantes, lo que permite analizar y comparar mediciones punto a punto.
- Debido a que la aplicación Roadroid presenta resultados más precisos, se unifican las mediciones en base a la ecuación de transformación entre IRI.calc.free y Roadroid para estandarizar las mediciones y poder obtener promedios de IRI en cada fecha de medición.

1.11.5.2 Metodología de la Correlación FWD – IRI - Criterios

Para realizar la búsqueda de correlación entre el IRI medido con las aplicaciones RoadRoid e IRI.Calc.Free y las deflexiones medidas con deflectómetro de impacto FWD, es necesario realizar un análisis de sensibilidad de variables y determinar los parámetros que influyen en la correlación mediante los coeficientes de correlación. El análisis de sensibilidad de variables consiste en mantener constantes todos los parámetros, excepto el de análisis, el cual varía, para entender el comportamiento y la influencia o preponderancia que posee en la correlación estudiada. A continuación, se presentan los criterios o variables analizadas.

Criterio 1: Influencia de la ubicación del geófono

En base a lo mencionado en el apartado 1.11.4.1 el geófono central ubicado en el punto de aplicación de carga, es el que registra la deflexión más alta y representativa para evaluar el comportamiento del pavimento, sin embargo, es necesario evaluar si las mediciones registradas en este geófono son las que mejor correlación presentan respecto de las mediciones de IRI.

Para analizar la correlación del IRI con las mediciones de deflexión de cada geófono proporcionadas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, se obtiene el coeficiente de correlación de cada medición del IRI por fecha, respecto de cada una de las mediciones de la deflexión con los 9 geófonos, ubicados a 0, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180 y 210 cm del punto central de aplicación de la carga.

Este análisis se realiza para determinar el geófono cuyas mediciones más se correlacionan con el IRI y focalizar el análisis en dichos datos, realizando las variaciones de variables indicadas a continuación

Criterio 2: Influencia de la longitud de tramo de medición del IRI

Tal como se menciona en el apartado 1.11.2.1 , durante el proceso de descarga de los datos medidos con RoadRoid, existe la opción de variar la longitud en la cual se discretiza las mediciones de IRI. Es decir, esta aplicación asigna información a un punto cada cierta longitud, debido a que la medición de IRI es continua a lo largo del tramo de estudio.

La aplicación permite descargar datos que distan entre sí: 5m, 10m, 20, 50, y 100m. A continuación, se muestra la diferencia entre longitud de intervalos para un tramo de 300m desde la abscisa 29+700 hasta la 30+000 para observar la diferencia.

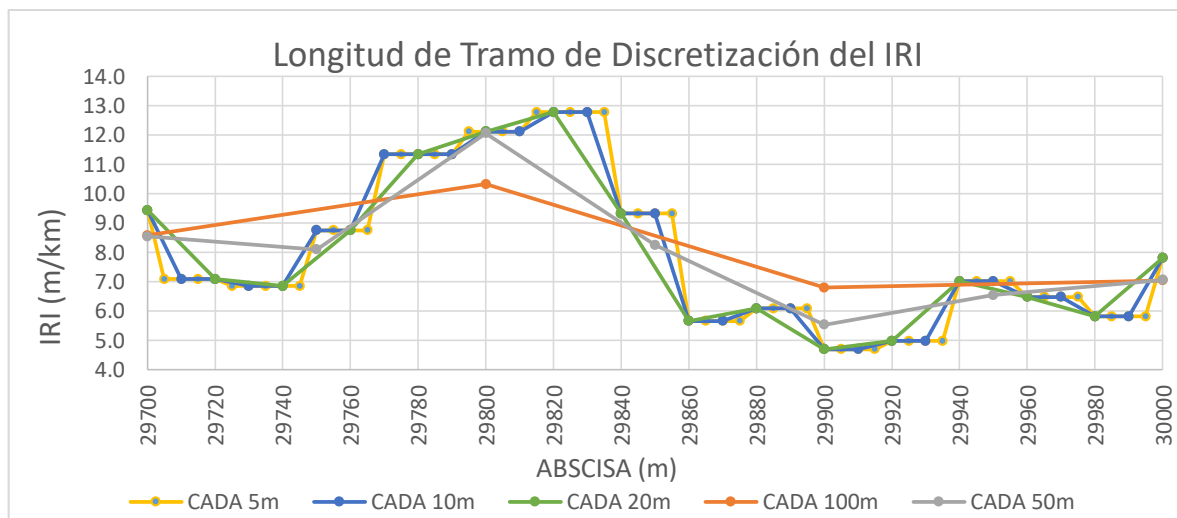


Ilustración 57. Variación longitud de tramo de discretización del IRI. (Autoría Propia)



En la gráfica anterior se puede distinguir que mientras menor es el intervalo entre mediciones, mayor cantidad de información se tiene. Además, la variación entre cada punto es significativa, mientras que a mayor intervalo entre mediciones como es el caso de cada 100m, la medición es un promedio de las tendencias de cada tramo, lo cual suaviza la gráfica al tener menor cantidad de puntos.

Debido a estas diferencias entre tramos de discretización de información, se realiza un análisis de correlaciones comparando mediciones de IRI realizadas con RoadRoid, así como comparando la deflexión con mediciones de IRI cuyos resultados se presentan en los literales 1.13.3 y 1.16.2 respectivamente, con el objetivo de determinar el intervalo con el cual se obtenga las mejores correlaciones.

Criterio 3: Impacto del Diseño Geométrico de la vía

Las pendientes longitudinales y curvas verticales en carreteras influyen en las condiciones de manejo como dificultades para mantener una velocidad constante, como ya se analizó anteriormente, Sin embargo, en relación con las curvas horizontales se presenta una variación significativa en las mediciones del IRI, sobre todo en curvas muy cerradas o secuenciales debido al peralte existente, siendo consideradas en casos extremos hasta como singularidades en el tramo de estudio. Se recomienda realizar un análisis y comprobar si las curvas presentadas en la vía de estudio influyen significativamente sobre todo en aquellas con radios de 0-240m. (Madrigal, 2017)

Las curvas horizontales requieren un enfoque particular debido a que las cortas distancias para el desarrollo de peraltes y el cambio de la pendiente transversal de la vía afectan significativamente en el modelo cuarto de carro utilizado para la medición del IRI, generando que el valor de medición no se establezca fácilmente y tienda a incrementar hasta rangos no admisibles por las normativas. (Jelves, 2000)

Ante la influencia del diseño geométrico de la vía en la medición del IRI mediante equipos RTRRMS como lo son RoadRoid e IRI.Calc.Free es necesario realizar un análisis y categorizar tramos que presenten curvas cerradas para estudiar el comportamiento de las mediciones en dichas zonas.

En base a las condiciones de la vía Cuenca – Molleturo, es posible distinguir un tramo de carretera en el cual no hay gran presencia de curvas cerradas, entre las abscisas 10+000 hasta la 21+900 el cual se lo denomina Tramo Recto para efectos de análisis. También se identifica otro tramo en donde existe la presencia de curvas cerradas el cual está comprendido entre las abscisas 21+900 hasta la 30+000 denominado Tramo Sinuoso. Cabe destacar que en este último tramo, también incrementa el porcentaje de pendiente, lo cual ocasiona una reducción de la velocidad en el lado derecho de la vía, es decir en la dirección Cuenca – Molleturo.



Criterio 4: Uso de la media móvil para el análisis de la tendencia de la correlación

Luego de analizar la sensibilidad de variables como la ubicación del geófono, longitud del intervalo y sectorización en tramo recto y sinuoso, se utiliza el análisis de media móvil descrito en la sección 1.9.3. El objetivo de implementar la media móvil es estandarizar la tendencia del perfil tanto del IRI como de las deflexiones centrales para determinar si la correlación buscada entre estos parámetros incrementa o disminuye.

Mediante la media móvil, se realiza el cálculo de la media aritmética de n valores de forma secuencial en todos los datos del perfil. El número de valores n representa el grado de media móvil. Para evaluar la influencia de este método en la correlación del IRI con las deflexiones, se calcula el coeficiente de correlación con diferentes grados de media móvil tanto en el IRI como en las deflexiones, para cada tramo: completo, recto y sinuoso.

Al estandarizar las tendencias de los perfiles, se reduce la ponderación o importancia que tienen los valores picos o máximos en el perfil del IRI y de deflexiones, puesto que se compara un conjunto de valores frente a otro, en lugar de buscar la correlación punto a punto, es por esto que se espera que el coeficiente de correlación entre parámetros incremente hasta llegar a un máximo.

Criterio 5: Variación de la Correlación en función del Tiempo

El pavimento está en constante deterioro, tanto superficial como estructuralmente. Es por esto que, para poder correlacionar dos parámetros, es necesario realizar las mediciones necesarias la misma fecha, para evitar que las condiciones o características del pavimento cambien significativamente.

En el presente estudio, las mediciones de deflexiones proporcionadas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas datan de diciembre del 2020. Mientras que las mediciones de IRI con las aplicaciones RoadRoid e IRI.Calc.Free se realizaron en los meses de Junio y Diciembre del 2021 y Febrero del 2022. Es importante mencionar que, durante este periodo, ante problemas de estabilidad de taludes en el kilómetro 49 de la vía Cuenca – Molleturo – El Empalme, el tránsito vehicular de esta carretera se ha reducido e incluso durante ciertos meses ha permanecido cerrada, lo cual evita que las condiciones del pavimento varíen significativamente y permitan realizar las comparaciones en búsqueda de una correlación.

Para analizar el efecto que tienen el transcurso del tiempo en la correlación, se comparó cada promedio de medición de IRI tanto de Junio, Diciembre y Febrero, con la medición de deflexión central con FWD para obtener un coeficiente de correlación junto con una ecuación de correlación, en cada intervalo de tiempo. En base a los coeficientes de correlación, se pretende establecer una tendencia de la relación entre parámetros, la cual, debido al deterioro



constante del pavimento, posiblemente disminuya con el paso del tiempo. Los resultados de este análisis se presentan en la sección 1.16.4 de este documento.

Como análisis complementario y final, mediante las ecuaciones de correlación entre el IRI y la deflexión, que son lineales, se evalúa la variación de cada término que conforma dichas ecuaciones respecto del tiempo. El objetivo es estimar los valores de IRI correspondientes a diciembre de 2020, fecha en la que se realizó las mediciones de deflexiones, para determinar si existe un incremento en el coeficiente de correlación.

1.11.6 Descripción del Estado Vial

En función de las mediciones de IRI realizadas, es necesario evaluar si los valores obtenidos cumplen con la normativa. Para realizar este análisis, se emplea herramientas SIG para graficar y clasificar las mediciones según los rangos de clasificación de IRI presentados en la sección 1.7.2.1. De esta manera se puede determinar la condición superficial del pavimento a lo largo del tramo de vía en análisis que va de la abscisa 10+000 hasta la 30+000 de la carretera Cuenca – Molleturo.

De igual manera, para analizar el estado estructural del pavimento en el tramo de estudio, se utiliza herramientas SIG para graficar y clasificar las mediciones realizadas con deflectómetro de impacto FWD. La clasificación se realiza en base a normativa mexicana, mencionada en el apartado 1.8.2.1 la cual establece rangos de valores de deflexión en micrometros, debido a que en el Ecuador se utilizan las mediciones de deflexiones para determinar parámetros como módulo de elasticidad, módulo de reacción de la subrasante y número estructural del pavimento en base a los cuales se determina el estado estructural del pavimento. (NEVI-12, 2013).

En base a los resultados obtenidos, se puede recomendar alternativas de mejora que permitan cumplir las normativas en zonas que presentan deterioros excesivos. Es importante que dichas rehabilitaciones o mejoras, se las realicen a tiempo para que la vida útil de la vía no disminuya tempranamente y también para disminuir accidentes de tránsito lo cuales incrementan mientras más deteriorada se encuentra la vía.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y análisis realizados al seguir el proceso detallado en el capítulo anterior, tanto durante la calibración de las aplicaciones, el filtrado de datos de mediciones de IRI y mediante un análisis de sensibilidad de variables, obtener resultados de regresión que permitan determinar posibles correlaciones entre el IRI medido con aplicaciones y la deflexión medida con deflectómetro de impacto FWD.

1.12 Calibración

El proceso de calibración tanto para la aplicación RoadRoid como para la aplicación IRI.Calc.Free es similar, como se describe en los apartados 1.11.1.1 y 1.11.1.2 respectivamente. Los resultados presentados en esta sección son los factores de ponderación que se debe ingresar en cada aplicación previo a realizar las mediciones.

Cada factor de ponderación se determina en base a la comparación de las mediciones realizadas con las aplicaciones versus las proporcionadas por el MTOP y al aplicar el método de estimación de la edad del pavimento en función del IRI.

1.12.1 Calibración con RoadRoid

Para calibrar la medición del IRI con la aplicación RoadRoid en el tramo 3 de la vía Biblián – Zhud, se realiza una comparación con la medición de perfilómetro láser del MTOP. Previo a esta comparación, se realizó un ajuste o también llamado offset debido a que la precisión de los GPS de cada equipo es diferente. Existen tramos en los cuales los intervalos entre puntos de medición con RoadRoid no son exactamente de 100m entre abscisas, lo cual ocasiona que los picos del perfil de IRI queden desplazados respecto a la medición del MTOP. Es por esto que se realiza el offset y posteriormente se compara las mediciones.

A continuación, se presenta el perfil de medición de IRI con cada equipo.

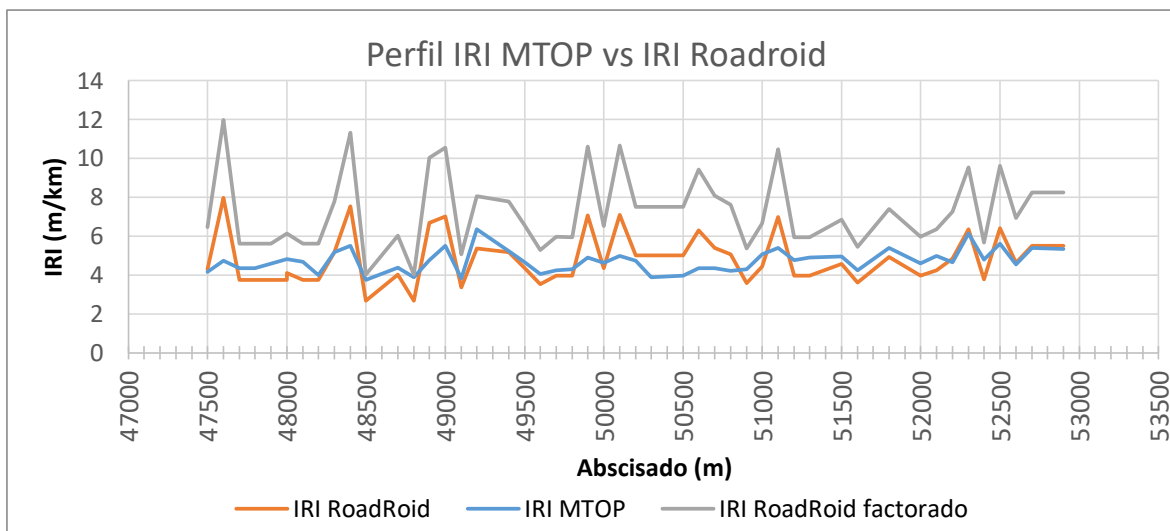


Ilustración 58. Perfil IRI MTOP 2014 vs RoadRoid 2021. Autoría propia.

Cabe destacar que la medición realizada por el MTOP fue Junio del 2014, como se describe en la sección 1.11.1. Mientras que la medición con RoadRoid se realizó en el 2021, por lo que, en el transcurso de los 7 años, existen zonas con deterioro uniforme y no uniforme. Las zonas con deterioro uniforme se pueden identificar especialmente en los picos o puntos máximos del perfil como por ejemplo entre las abscisas (47+500 y 47+700; 48+200 y 48+500) puesto que tienen la misma tendencia, pero su magnitud es distinta debido al transcurso del tiempo.

Es por esto que se busca una correlación entre mediciones que, a pesar del transcurso de 7 años, la cual se presenta en el siguiente gráfico e indica que el coeficiente de correlación entre mediciones es de 0.71, lo cual implica que al menos el 70% del tramo en estudio, ha sufrido un deterioro superficial uniforme, que ocasiona un incremento de IRI.

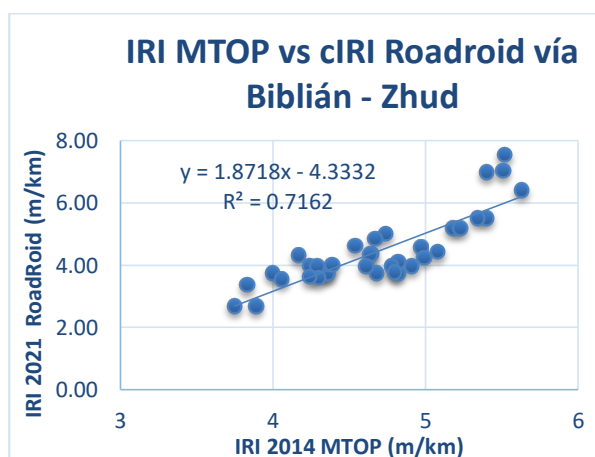


Ilustración 59. Correlación IRI MTOP vs RoadRoid. Autoría Propia.

Para determinar la magnitud del incremento o variación del IRI, se utiliza el método de estimación de la edad del pavimento, desarrollado en Dubai por los ingenieros Al-Suleiman y Adnan Shiyab, explicado en la sección 1.7.3.4 .

Para utilizar este método, en base a la normativa ecuatoriana, se considera que para un tiempo cero, cuando se termina la construcción de un pavimento, el valor máximo del IRI es 2m/km. (NEVI-12, 2013). Dicho valor es el coeficiente de la ecuación ajustada de estimación de la edad del pavimento respecto del IRI. Como vemos en la siguiente gráfica, la relación entre la edad del pavimento y el valor de IRI es representada por una ecuación exponencial.

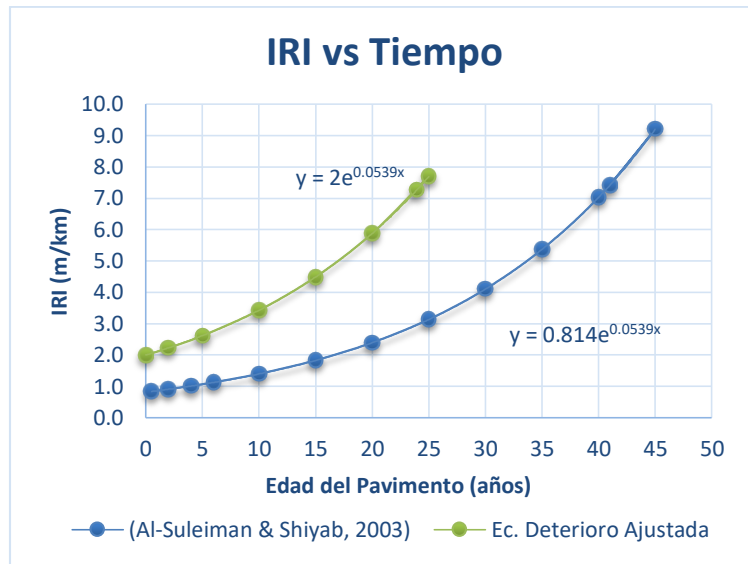


Ilustración 60. Estimación de edad del Pavimento vs IRI. Autoría Propia.

Mediante la información obtenida del MTOP, se conoce que el año cero corresponde al 2009 cuando se terminó la construcción del tramo de vía utilizado para calibrar. Además, la medición de IRI que dispone el MTOP es de inicios 2014, indica un valor promedio de 4.75m/km el cual al utilizar el método de estimación de la edad del pavimento resulta ser de aproximadamente 16 años, cuando en realidad solo transcurrieron 5 años desde su construcción, lo cual concuerda con el informe presentado por Ecuatest ante el deterioro temprano del pavimento. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014). La medición de IRI con la aplicación RoadRoid se realizó 7 años luego de las realizadas por el MTOP, por lo que la edad estimada sería 23 años, lo cual implica un valor promedio de IRI de 6.91m/km.

Estimación de la Edad del Pavimento según el IRI					
Año	IRI MTOP	Edad (años)	IRI Estimado	IRI RoadRoid	Factor de Ajuste
2014	4.75 m/km	16	4.75 m/km	-	-
2021	-	23	6.91 m/km	4.61 m/km	1.5

Tabla 13. IRI medido con RoadRoid y estimado en 2021. Autoría Propia

Finalmente, se divide el valor de IRI estimado de 6.91m/km para de valor de IRI medido con RoadRoid de 4.61m/km para determinar el factor de calibración de la aplicación, el cual resulta ser de 1.5. Este factor de ponderación es utilizado como factor cIRI que requiere la aplicación RoadRoid para ajustar la escala de medición de IRI y realizar las mediciones en la vía Cuenca – Molleturo.

1.12.2 Calibración con IRI.Calc.Free

La calibración de la aplicación IRI.Calc.Free es similar al proceso realizado para calibrar la aplicación RoadRoid, puesto que son equipos de medición del mismo tipo RTRRMS. Como se detalla en la sección 1.11.1.2 . La medición de esta aplicación se compara con la misma medición proporcionada por el MTOP realizada en Junio del 2014 con perfilómetro láser. Al igual que con la otra aplicación, previo a la comparación se realiza un ajuste debido a la diferencia de precisión en los GPS de cada equipo lo cual ocasiona un desplazamiento especialmente en lo putos más altos.

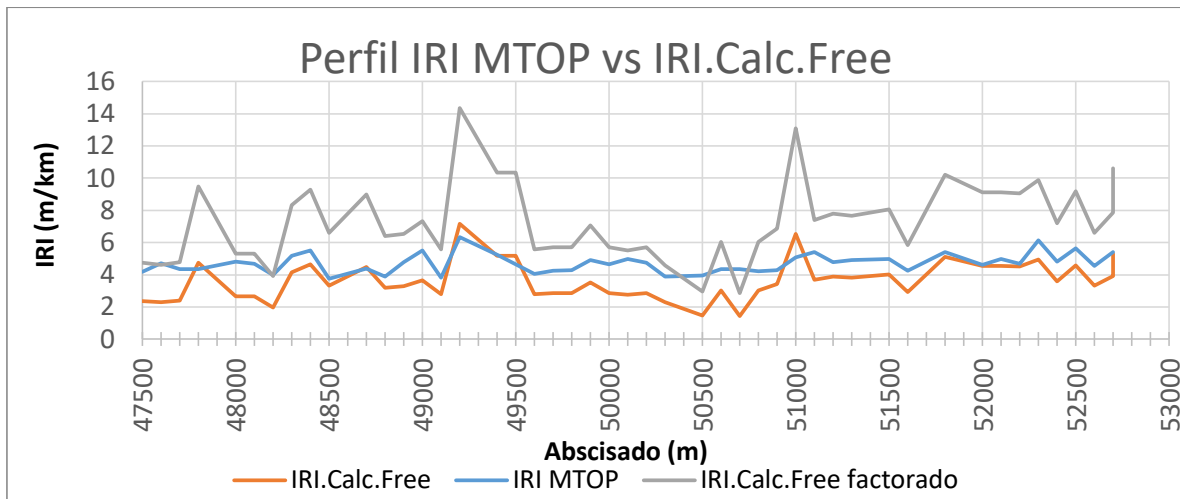


Ilustración 61. Perfil IRI MTOP 2014 vs IRI.Calc.Free 2021. Autoría propia.

En la gráfica anterior del perfil de medición de IRI, se puede evidenciar tramos que presentan la misma tendencia de IRI, lo cual indica un deterioro uniforme como entre las abscisas 48+200 y 49+600. Este argumento se fundamenta al graficar la medición realizada en 2014 respecto a la realizada en 2021 para determinar si existe correlación entre mediciones. En la siguiente gráfica se observa que el coeficiente de correlación es de 0.63, lo cual implica que el 63% del trayecto de 5.5km, es decir 3.47km, presentan un deterioro superficial uniforme.

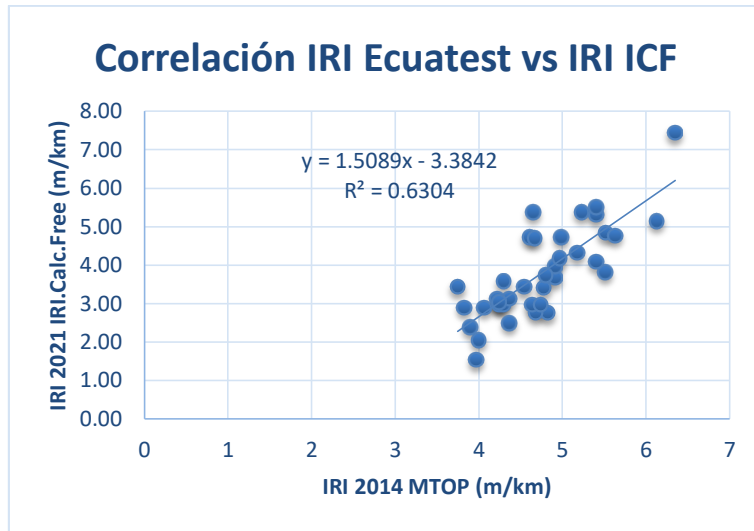


Ilustración 62. Correlación IRI MTOP vs IRI.Calc.Free. Autoría Propia.

Luego de determinar que existe una correlación entre mediciones a pesar del tiempo transcurrido, se procede a utilizar el método de estimación de la edad del pavimento en función del valor del IRI, desarrollado por los ingenieros Al-Suleiman y Adnan Shiyab presentado en la Ilustración 60. Estimación de edad del Pavimento vs IRI. Autoría Propia. En base al valor de IRI medido por el MTOP en 2014, se estima una edad del pavimento de 16 años, por lo que 7 años después, el valor de IRI estimado es 6.91m/km como se muestra en la siguiente tabla.

Estimación de la Edad del Pavimento según el IRI					
Año	IRI MTOP	Edad (años)	IRI Estimado	IRI Calc Free	Factor de Ajuste
2014	4.75 m/km	16	4.75 m/km	-	-
2021	-	23	6.91 m/km	3.46 m/km	2

Tabla 14. IRI medido con RoadRoid y estimado en 2021. Autoría Propia

Posteriormente, se compara el valor de IRI estimado para el año 2021 con respecto a la medición realizada con la aplicación IRI.Calc.Free para determinar el factor de ponderación resultante de 2, el cual es un parámetro de ajuste necesario para ajustar la escala de medición de IRI, previo a realizar las mediciones en la vía Cuenca – Molleturo.

1.13 Procesamiento de Mediciones de IRI

Después de realizar la calibración de la aplicación RoadRoid y las mediciones en la vía Cuenca – Molleturo entre las abscisas 10+000 y 30+000, se sigue un proceso de análisis y filtrado de la información medida, tal como se explica en el apartado 1.11.3 tanto para mediciones del derecho cuyo sentido es en dirección del abscisado, es decir desde Cuenca en dirección a Molleturo, como para el lado izquierdo que va en sentido opuesto al abscisado.

1.13.1 Análisis del Sentido de la Trayectoria

Luego de eliminar la información no correspondiente al tramo de estudio y asignar las abscisas correspondientes, es necesario comparar la correlación entre mediciones realizadas con la misma aplicación, para determinar el nivel de repetitividad del ensayo. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

1.13.1.1 Trayectoria con RoadRoid

Las gráficas de los perfiles de cIRI y eIRI se presentan en el *Anexo 1*, junto las gráficas de correlación punto a punto entre mediciones *Anexo 2*. En base a esta información, se obtuvo los coeficientes de correlación de cada comparación entre mediciones, obteniendo la siguiente tabla:

Comparación de Correlación entre lado Derecho e Izquierdo				
Coeficiente R ²	Lado Derecho		Lado Izquierdo	
	cIRI-cIRI	eIRI vs eIRI	cIRI-cIRI	eIRI vs eIRI
Feb/2021	0.248	0.291	0.564	0.872
Dic/2021- Feb/2022	0.449	0.261	0.735	0.786

Tabla 15. Coeficientes Correlación entre mediciones con RoadRoid. Autoría Propia

En base a la tabla anterior, se puede determinar que existe una mayor relación entre mediciones de IRI realizadas en el lado izquierdo que en el lado derecho. Esto se debe a que al realizar mediciones con la aplicación RoadRoid, existen varios parámetros que afectan la recolección de datos. Uno de los principales factores es la velocidad, la cual según recomendaciones de Michael Sayers, debe mantenerse estándar en 80km/h como se menciona en la sección 1.11.2. En el lado izquierdo es más sencillo mantener constante la velocidad a 80km/h debido a que la vía posee pendiente negativa desde la abscisa 30+000 hasta la 10+000, lo cual implica regular la velocidad mediante los frenos en lugar de la aceleración.

Otro factor que influye en la toma de mediciones de IRI y que además está vinculado a la velocidad, es la necesidad de realizar cambios de marcha. Al circular por el lado izquierdo con pendientes negativas, la circulación se realiza en velocidades altas por lo que no hay necesidad de realizar cambios de marcha para mantener velocidad constante, mientras que, en el lado derecho, al ser una trayectoria con pendiente positiva, es necesario realizar constantemente cambios de marcha para lograr mantener una velocidad constante de 80km/h. Al realizar un cambio de marcha, sea para acelerar o no perder velocidad en subidas, implica cambios de revolución los cuales generan un efecto de empuje en el vehículo lo cual se registra como una ligera o gran vibración, dependiendo de la magnitud en el cambio de revoluciones.

Existen más factores que afectan más a la medición en el lado derecho como por ejemplo el tráfico, debido a que obliga a reducir la velocidad, especialmente cerca de la abscisa 10+000 debido a que es una zona poblada. Si además del tráfico y la pendiente positiva, consideramos la presencia de curvas, las cuales obligan a reducir la velocidad, es evidente que las condiciones de manejo son distintas dependiendo del sentido de circulación por la vía, lo cual afecta las mediciones ante la sensibilidad del equipo de medición frente a las vibraciones.

Al considerar la dirección de circulación como un parámetro que influye en la medición, debido a las características y topografía de la vía, los posteriores análisis se enfocan en las mediciones del lado izquierdo, puesto que se realizan bajo condiciones óptimas.

1.13.1.2 Trayectoria con IRI.Calc.Free

El proceso de análisis de datos medidos con la aplicación IRI.Calc.Free es similar al realizado con RoadRoid, debido a que corresponden a mediciones de equipos RTRRMS. Es importante analizar si es que existe correlación entre mediciones y dado que dichas mediciones se realizan en ambos sentidos de la vía, es un parámetro adicional a analizar. En la siguiente tabla se presenta los coeficientes de correlación entre mediciones.

Comparación de Correlación lado Derecho e Izquierdo		
Fecha	LD	LI
Junio 2021	0.345	0.792
Diciembre 2021	0.291	0.614
-Febrero 2022		

Tabla 16. Coeficientes Correlación entre mediciones con IRI.Calc.Free. Autoría Propia

Al igual que con la aplicación RoadRoid, los coeficientes de correlación son mejores en el lado izquierdo, debido a las características geométricas de la carretera que permite mantener una velocidad constante sin la necesidad de realizar cambios de marcha y realizar la trayectoria por el mismo wheel path en cada medición, lo cual no ocurre con el lado derecho debido a la pendiente, curvas y tráfico. Este resultado demuestra que el modelo cuarto de carro en el cual se fundamentan las dos aplicaciones, es afectado por varios factores que se pueden presentar en la medición. Es por esto que se debe seguir las recomendaciones de Michael Sayers, además de cerrar la vía y monitorearla durante la medición para facilitar la circulación a una velocidad constante, así como usar de vehículos de transmisión automática para evitar cualquier vibración producida durante el cambio de velocidad por la diferencia de revoluciones.

1.13.2 Análisis de Singularidades y Velocidad

Durante el procesamiento de las mediciones de IRI con RoadRoid e IRI.Calc.Free descrito en el apartado 1.11.3.3 se indica que los puntos donde existe alguna singularidad como: reductores de velocidad, escombros en la vía o paso por puentes con juntas de neopreno, son localizados con su respectiva abscisa para posteriormente ser filtrados, puesto que son valores

de IRI que no corresponden al estado funcional superficial del pavimento. De igual manera, en base a la sección 1.11.3.4 se determinan dos umbrales de velocidad dentro de los cuales se considera que la precisión de las mediciones es buena. El primer umbral es de 50km/h hasta 95km/h y el segundo es desde 65km/h hasta 95km/h.

1.13.2.1 Filtros con RoadRoid

El análisis se realiza al comparar la correlación que existe entre mediciones del lado izquierdo, filtrando cada uno de los aspectos de singularidad y velocidad antes mencionados, con el objetivo de comparar únicamente mediciones de buena precisión. En el *Anexo 3* se incluye todas las gráficas de correlación con cada filtro. A continuación, se presenta una tabla que contiene todos los factores de correlación obtenidos entre las mediciones realizadas en Febrero del 2021, para poder analizar la influencia de las variables filtradas.

Coeficientes de Correlación según Filtro				
R ²	Sin Filtrar	Filtro singularidades	Filtro Velocidad: 50-95 km/h	Filtro Velocidad: 65-95 km/h
cIRI vs cIRI	0.564	0.882	0.891	0.897
eIRI vs eIRI	0.872	0.895	0.908	0.912

Tabla 17. Coeficiente Correlación entre mediciones filtradas con RoadRoid Autoría Propia

En base a la tabla anterior, se puede observar que al no considerar puntos que poseen alguna singularidad que altera el valor de IRI, la correlación entre mediciones mejora significativamente en el cIRI y eIRI debido a que la presencia de escombros, reductores de velocidad e incluso cambios de velocidad afectan el desplazamiento vertical registrado por el dispositivo, lo cual incrementa el valor del IRI. Mediante estos resultados se demuestra que es necesario identificar y filtrar los puntos en donde se presenten singularidades.

Al definir dos umbrales de velocidad, se puede determinar el grado de influencia de este parámetro en la medición de IRI. Se observa que, al limitar un umbral de velocidad, mejora la correlación entre mediciones, debido a que la precisión aumenta. Cabe destacar que si bien al reducir el umbral de velocidad de 50-95km/h a 65-95km/h la correlación mejora, también la cantidad de datos omitidos o filtrados incrementa significativamente. En el rango de velocidad de 50-95km/h la cantidad de datos filtrados está entre 5 y 8, mientras que, con el segundo umbral, esta cantidad aumenta de 14 incluso hasta 23 datos, lo cual implica pérdida de información, por lo que el rango de velocidad recomendado para la toma de datos y análisis es de 50km/h a 95km/h.

A continuación, se presenta el perfil de IRI medido con la aplicación RoadRoid, en el cual se visualiza el cambio del perfil al aplicar los distintos filtros establecidos anteriormente.

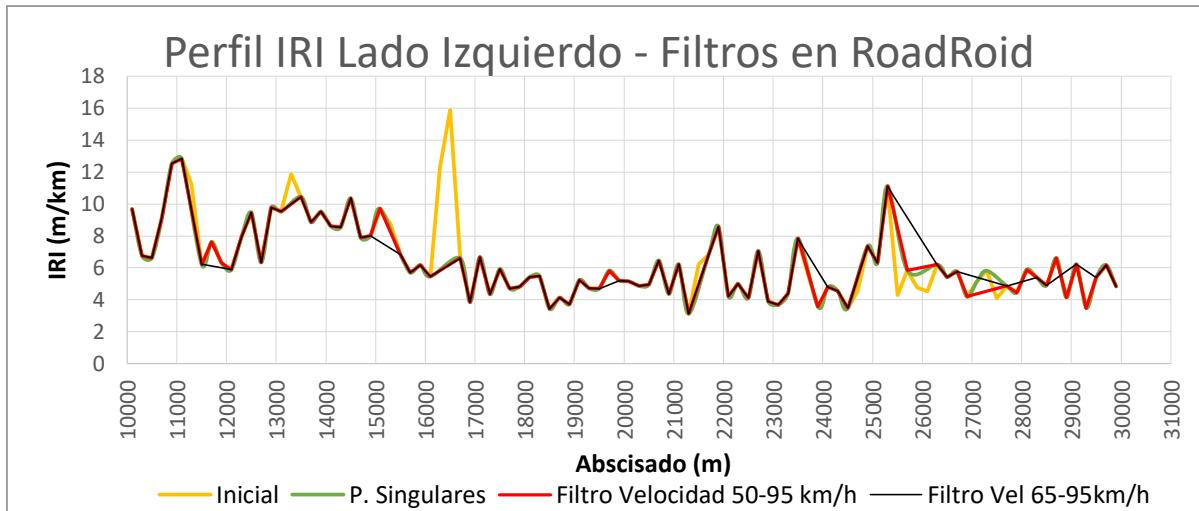


Ilustración 63. Perfil de IRI aplicando filtros en RoadRoid. Autoría Propia.

Al aplicar el primer filtro de puntos con singularidad, denominado depurado, se puede observar que se elimina un pico en la abscisa 16+500 que indicaría un valor inaceptable de IRI, pero que se debe a la presencia de reductores de velocidad, puesto que el lado izquierdo posee pendiente negativa y conforme se acerca a la abscisa 10+000 que es una zona poblada, es necesario reducir la velocidad.

El siguiente filtro aplicado es el umbral de velocidad de medición de 50km/h a 95km/h. Al aplicar este filtro, existe una ligera diferencia respecto al filtro de singularidades, puesto que la cantidad de datos filtrados, como se mencionó anteriormente, no es significativa, mientras que el filtro de velocidades entre 65km/h y 95km/h implica una pérdida significativa de datos lo cual varía el perfil. Es por esto que, para los posteriores análisis, se utiliza mediciones filtradas por puntos singulares y el umbras de velocidad cuyo rango es más amplio.

1.13.2.2 Filtros con IRI.Calc.Free

Al igual que en la sección anterior, con las mediciones de IRI.Calc.Free también se aplica un filtro en los puntos que presentan alguna singularidad, luego se aplica un filtro para un umbral de velocidades de 50km/h a 95km/h y posteriormente un umbral de velocidad de 65km/h a 95km/h como se indica en el apartado 1.11.3.4 para evaluar el comportamiento de las correlaciones entre mediciones realizadas la misma fecha. Los coeficientes de dichas correlaciones se presentan a continuación.

Coeficientes de Correlación según Filtro				
R ²	Sin Filtrar	Filtro singularidades	Filtro Velocidad: 50-95 km/h	Filtro Velocidad: 65-95 km/h
IRI vs IRI	0.792	0.9424	0.948	0.972

Tabla 18. Coeficiente Correlación entre mediciones filtradas con IRI.Calc.Free Autoría Propia

En la tabla anterior, también se observa una tendencia de incremento del coeficiente de correlación, pero al igual que con la aplicación RoadRoid, al reducir el rango del umbral de velocidades de medición aceptado, se pierde información que modifica el perfil. Esta pérdida de datos se ejemplificó para la aplicación RoadRoid en la Ilustración 63. Perfil de IRI aplicando filtros en RoadRoid. Autoría Propia. y se muestra para la aplicación IRI.Calc.Free en el siguiente gráfico:

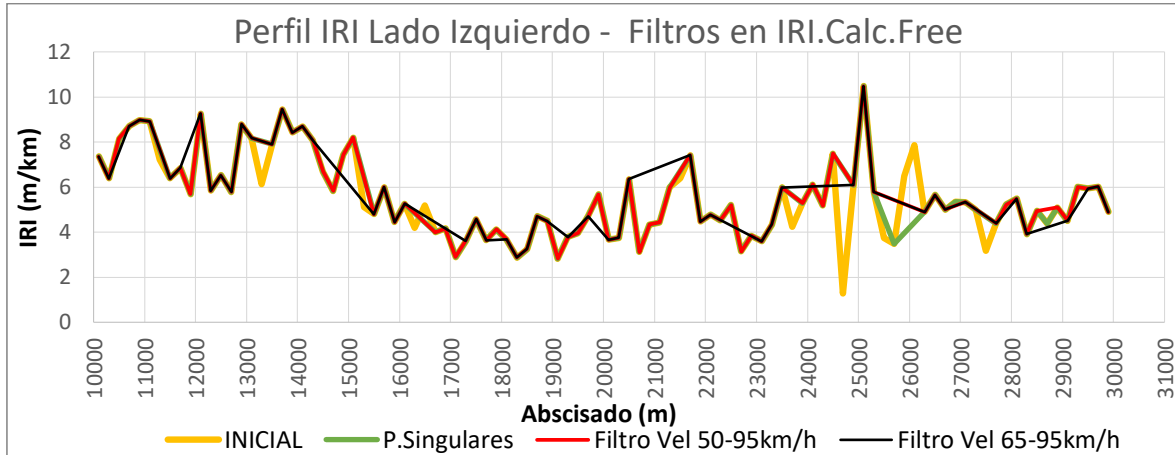


Ilustración 64. Perfil de IRI aplicando filtros en IRI.Calc.Free. Autoría Propia.

En la gráfica anterior es aún más visible la pérdida de información y discretización al aplicar el último filtro que posee un rango de velocidades aún mejor. En esta medición la cantidad de datos filtrados es de 33 de los 100 graficados, lo cual no permite tener la suficiente información para posteriores análisis, mientras que con el otro umbral apenas se filtran 3 datos. Por este motivo se verifica que el umbral de velocidades filtrado debe ser de entre 50km/h y 90km/h.

1.13.3 Análisis de Longitud de Intervalo

Únicamente la aplicación RoadRoid, al momento de descargar la información de cada medición, es posible variar la longitud de intervalo entre cada dato, es decir, varía la discretización de datos. En base a esto, se realiza un análisis de sensibilidad entre mediciones, para determinar el intervalo que mejor correlación posee.

Los datos utilizados para realizar este análisis son del lado izquierdo, filtrando las singularidades, así como definiendo el umbral de velocidad de 50km/h hasta 95km/h obtenidos en los resultados anteriores. A continuación, se presentan los coeficientes de correlación entre mediciones realizadas con RoadRoid el mismo día y en diferentes meses para evaluar el comportamiento.



Coefficientes de Correlación entre Mediciones con Distinta Discretización				
Fecha	Febrero 2021		Febrero 2021 - Diciembre 2020	
	(R ²)		(R ²)	
Intervalo	cIRI vs cIRI	eIRI vs eIRI	cIRI vs cIRI	eIRI vs eIRI
100m	0.891	0.908	0.691	0.790
50m	0.741	0.750	0.567	0.613
20m	0.657	0.663	0.368	0.437
10m	0.650	0.670	0.366	0.433
5m	0.623	0.640	0.363	0.400

Tabla 19. Coeficientes Correlación entre mediciones con diferentes intervalos. Autoría Propia

En la tabla anterior, se puede determinar que mientras más amplio es el intervalo de medición, mejor es la correlación debido a que considera un promedio de un conjunto de mediciones lo cual ocasiona que el perfil de IRI tenga una tendencia similar en cada tramo. Mientras menor es el intervalo de medición, la variación entre tramos es mayor debido a que no realiza promedios de un conjunto de mediciones lo cual vuelve más sensible la medición de IRI ante cualquier irregularidad superficial.

Luego de este análisis, se determina que el mejor intervalo de análisis para la aplicación RoadRoid es a cada 100m, el cual coincide con el intervalo de medición de la aplicación IRI.Calc.Free, permitiendo correlacionarlos posteriormente. Además, las mediciones de deflexión medidas con deflectómetro de impacto también poseen un intervalo de medida de cada 100m lo cual facilita la búsqueda de la correlación entre IRI y deflexión.

1.14 Correlación entre aplicaciones

Tanto la aplicación RoadRoid como IRI.Calc.Free se basan en el modelo del cuarto de carro, pero poseen diferente sensibilidad debido a los parámetros de ingreso que requiere cada uno. Es por esto que el coeficiente de ponderación obtenido durante la calibración es diferente en cada aplicación, sin embargo, al analizar la sensibilidad de variables como la velocidad, presencia de singularidades en la vía como reductores de velocidad e incluso el diseño geométrico de la vía, se evidenció que en ambas aplicaciones el lado izquierdo, filtrado por un umbral de velocidad de medición presentan elevadas correlaciones entre mediciones de la misma aplicación.

Para posteriormente poder realizar la comparación del IRI con las deflexiones, es necesario estandarizar las mediciones con ambas aplicaciones, una vez determinado que tienen el mismo comportamiento. Por esta razón, se realiza la comparación de mediciones con diferentes aplicaciones para determinar si existe correlación entre ellas y de ser éste el caso, establecer una ecuación que permita unificar las escalas de IRI. A continuación se presenta la gráfica de IRI medido con IRI.Calc.Free respecto al IRI medido con RoadRoid.

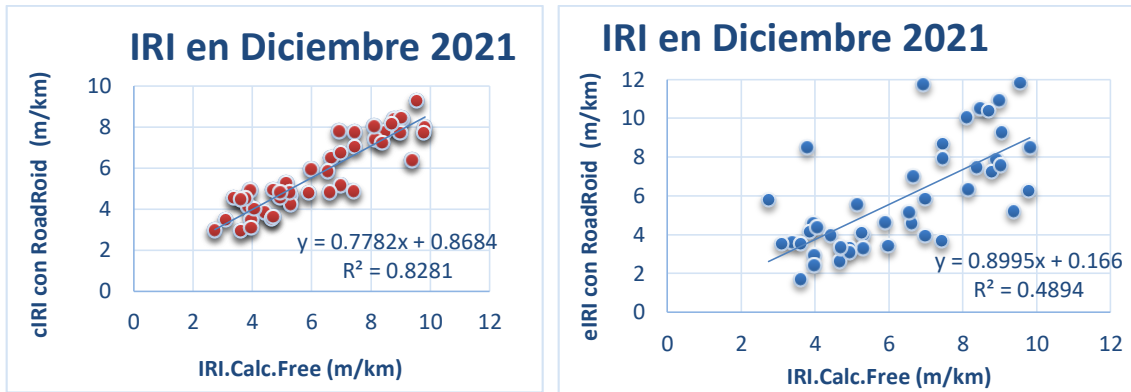


Ilustración 65. Correlación entre a) IRI.Calc.Free vs cIRI b) IRI.Calc.Free vs eIRI. Autoría Propia.

Debido a que la aplicación RoadRoid realiza mediciones de IRI estimado (eIRI) y también de IRI calculado (cIRI), se compara cada una de estas mediciones con la obtenida de IRI.Calc.Free. En los gráficos anteriores, el literal a) presenta un mayor coeficiente de correlación que el literal b) por lo que existe mayor correlación entre cIRI y el IRI medido con IRI.Calc.Free. Esto se debe a que el parámetro eIRI considera los efectos de la textura del pavimento como se explica en el apartado 1.7.3.2. Es por esto que se define la correlación entre aplicaciones con el parámetro cIRI.

La ecuación de correlación entre aplicaciones es la mostrada en el literal a) de la Ilustración 65. Correlación entre a) IRI.Calc.Free vs cIRI b) IRI.Calc.Free vs eIRI. Autoría Propia. Cuyo coeficiente de correlación es de 0.828 lo cual indica que si existe relación entre las mediciones de las aplicaciones.

$$y = 0.7782 * x + 0.8684$$

Donde:

- Y: cIRI medido con RoadRoid
- X: IRI medido con IRI.Calc.Free

Cabe destacar que la ecuación de correlación entre aplicaciones es únicamente válida para la calibración realizada con el conjunto de características vehículo – teléfono, implementados en esta investigación, para realizar las mediciones. En caso de cambiar algún parámetro, es necesario realizar la calibración de cada aplicación y determinación de la ecuación de correlación o también llamada de transformación entre aplicaciones.

Mediante el uso de la ecuación de transformación entre aplicaciones, se puede estandarizar las mediciones de IRI, para posteriormente sacar un promedio de mediciones de cada fecha que represente de mejor manera las características superficiales del pavimento. A continuación, se presenta el perfil de IRI promedio del lado izquierdo de la vía, en cada fecha de medición.

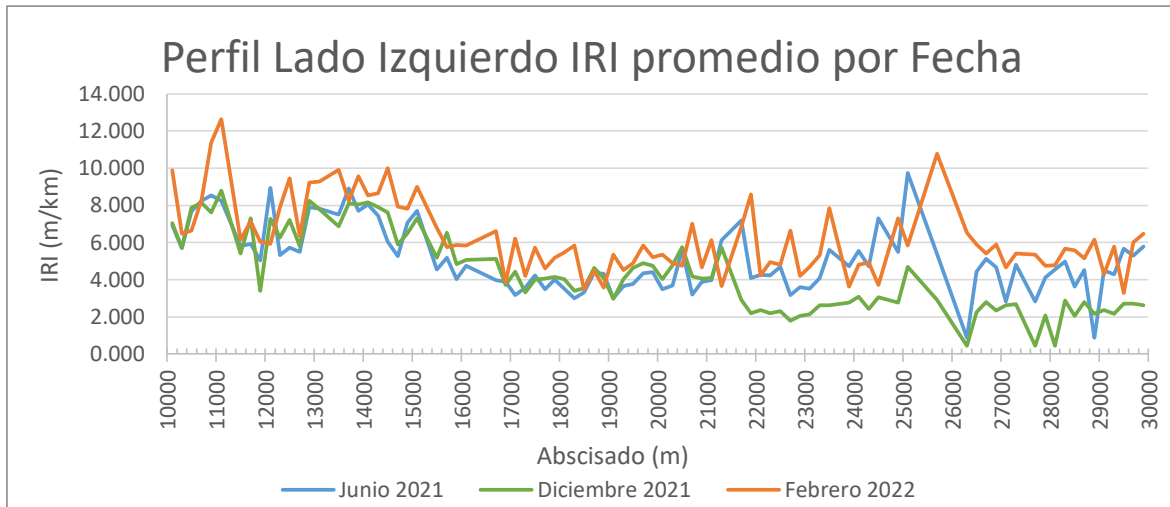


Ilustración 66. Perfil de IRI Promedio por Fecha. Autoría Propia.

En base a los valores de IRI de la gráfica anterior, se procederá a buscar la correlación con las deflexiones medidas con deflectómetro de impacto, realizando sensibilidad de variables.

1.15 Análisis Estructural de FWD

Análisis de las deflexiones obtenidas con FWD:

Las mediciones procedentes de la deflectometría de impacto con el equipo FWD fueron procesadas realizando una corrección por carga a 40 KN y un ajuste considerando los cuencos que representen un comportamiento no estándar del pavimento, debido a que este punto específico no responde a las características de la vía en general y representaría una singularidad específica, debiendo ser omitida.

Las ilustraciones Ilustración 67. Deflexiones centrales corregidas vs Abscisado- lado Izquierdo. e Ilustración 68. Deflexiones centrales corregidas vs Abscisado - lado Derecho. Presentan las variaciones entre los datos de deflexiones iniciales y luego de la corrección por carga. Los datos originales y corregidos ejemplificados en las siguientes gráficas fueron obtenidos de la Tesis denominada “Factor de corrección de carga para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos mediante Deflectómetro de impacto (FWD) caso de estudio: vía Cuenca – Molleturo – El Empalme” realizada por el Ing. Wilmer Zhañay, en base a las mediciones proporcionadas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, las cuales también son utilizadas en la presente investigación.



Ilustración 67. Deflexiones centrales corregidas vs Abscisado- lado Izquierdo. Autoría Propia

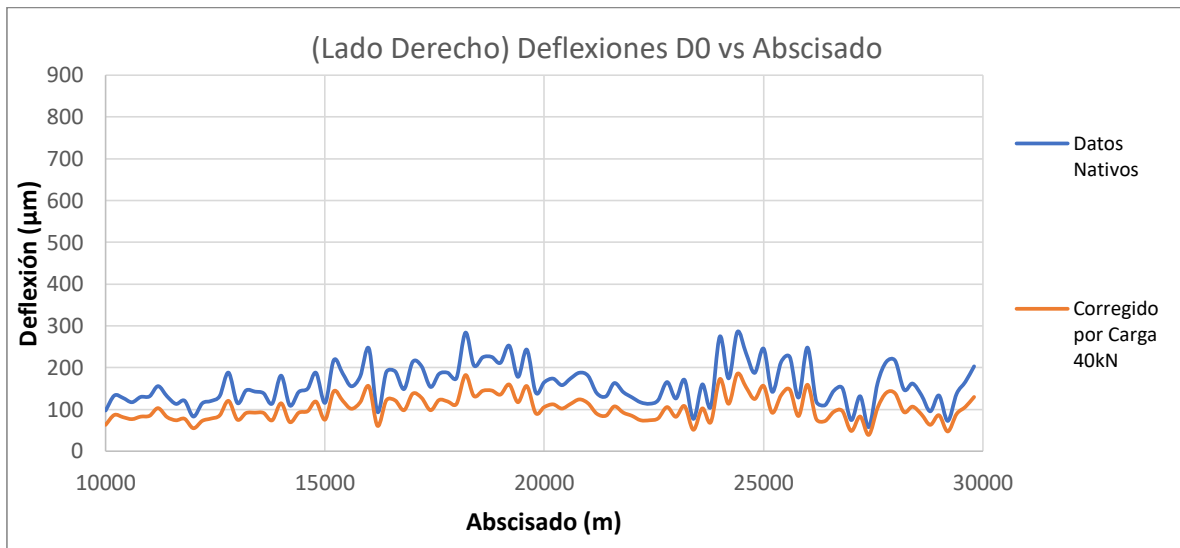


Ilustración 68. Deflexiones centrales corregidas vs Abscisado - lado Derecho. Autoría Propia

*En las mediciones de deflexiones del lado derecho o de corte, no encontramos cuencos que representen comportamiento no estándar del pavimento por lo cual únicamente se ha realizado la corrección por carga de 40kN.

Las deflexiones del carril derecho son menores que en el izquierdo, esto se deberá a que los puntos del carril derecho se encuentran en su mayoría en zonas de corte y las del carril izquierdo en terraplén. Esto involucraría una variación en las características estructurales de los carriles siendo el carril derecho aquel con mejores condiciones de subrasante. Esta evaluación se puede presentar de mejor manera en la siguiente tabla (Zhañay, 2021).



Tipo de Cuenco por Carril en la vía Cuenca - Molleturo

Carril	Tipo de Cuenco	Lo	Do	Evaluación
Izquierdo	Tipo 2	Alto	Alto	Buen pavimento- Subrasante deficiente.
Derecho	Tipo 1	Alto	Bajo	Buen pavimento-Buena Subrasante.

*Lo: Extensión del cuenco, Do: Deflexión máxima del cuenco.

Tabla 20. Evaluación del Pavimento en función del tipo de cuenco. (Zhañay, 2021)

En base a los resultados obtenidos al comparar las mediciones de IRI del lado izquierdo de la vía respecto del lado derecho, se establece que la comparación entre valores de IRI y deflexiones para determinar la existencia de una correlación, se realiza únicamente en el lado izquierdo.

1.16 Correlación Deflexiones vs IRI

En función de los análisis de las mediciones tanto de IRI con las aplicaciones RoadRoid e IRI.Calc.Free como de deflexiones medidas con deflectómetro de impacto, a continuación se detallarán los resultados del análisis de sensibilidad de variables en búsqueda de la correlación entre las deflexiones centrales D_0 y el índice de rugosidad internacional IRI, tomando en cuenta 5 criterios de variación, detallados en el apartado 1.11.5.2 .

1.16.1 Criterio 1: Influencia de la ubicación del geófono

Con el objetivo de analizar si en de la medición de deflexiones con FWD, el valor más significativo y representativo de este parámetro es la deflexión central, registrada en el geófono ubicado en el punto de aplicación de carga; se realiza un análisis de sensibilidad de variables, comparando la medición del IRI con las deflexiones medidas a 0, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180 y 210 cm del punto central de aplicación de la carga. En base a este análisis, se obtuvieron los coeficientes R^2 del ajuste punto a punto de la relación IRI vs deflexión para evaluar su comportamiento *Anexo 4*.

Las mediciones del IRI utilizadas para la correlación fueron previamente filtradas por singularidades y rango de velocidad óptimo de medición y corresponden a las mediciones realizadas en junio de 2021. De igual manera las mediciones de deflectometría a relacionar fueron corregidas previamente por carga y verificación de un comportamiento estandarizado del pavimento (cuenco con tendencia estándar).

Los coeficientes de correlación obtenidos y su tendencia son presentados en el siguiente gráfico:

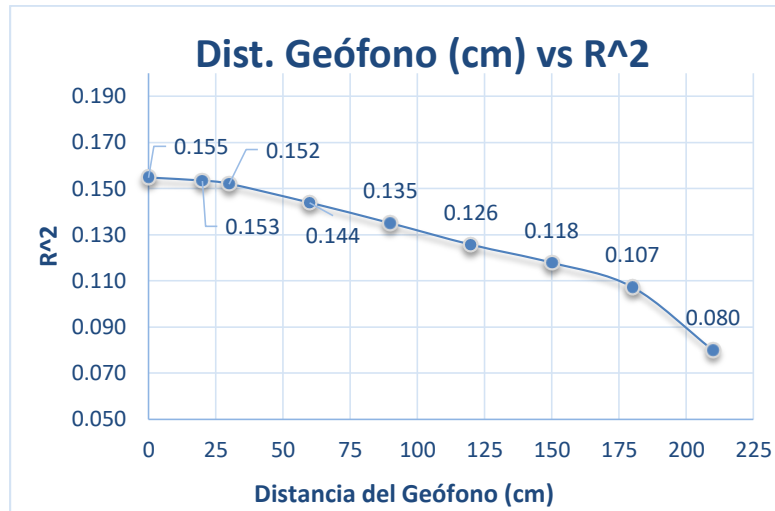


Ilustración 69. Ubicación del Geófono vs Coeficiente R^2 de la correlación Deflexiones-IRI.

En base a los resultados expuestos en la gráfica anterior, se puede evidenciar que el máximo coeficiente R^2 de la correlación deflexiones vs IRI, proviene de las deflexiones centrales D_0 , y dicha correlación disminuye conforme aumenta la distancia de ubicación del geófono. En base a este resultado, los siguientes análisis de variaciones se realizan únicamente con las mediciones de deflexión central, puesto que brindan una mejor correlación con las mediciones de IRI.

1.16.2 Criterio 2: Influencia de la longitud de tramo de medición del IRI

Como se mencionó anteriormente, en de la interfaz de Roadroid luego de haber realizado la medición, es posible seleccionar el intervalo de discretización del IRI de entre 5, 10, 20, 50 y 100m Anexo 5. Debido a que los datos de deflexión e IRI son comparados punto a punto, es de vital importancia analizar la influencia que tiene dicha selección del intervalo en la correlación con las deflexiones, de igual manera que se realizó en el apartado 1.13.3 para correlacionar mediciones únicamente de IRI.

Los datos utilizados en la correlación a analizar corresponden a las deflexiones centrales y el valor del IRI medido en febrero del 2021. A continuación, se presentan gráficamente los coeficientes de correlación (R^2) obtenidos al variar la longitud del intervalo de discretización de IRI en la correlación frente a la deflexión central D_0 .

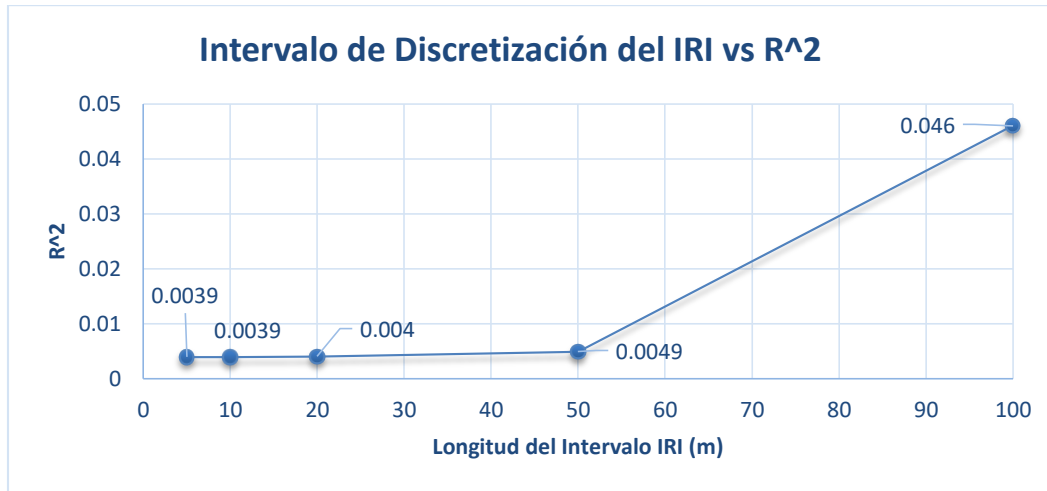


Ilustración 70. Tramo de Discretización del IRI vs Coeficiente R^2 de la correlación D_0 -IRI.

Con esto podemos evidenciar que la selección de 100m como intervalo de discretización del Índice de Regularidad Internacional proporciona el mejor coeficiente de correlación con la deflexión central, siendo las elecciones de intervalos de 5, 10, 20 y 50 m muy similares en cuanto a la influencia en el coeficiente de correlación. Esto se debe a que mientras mayor es el intervalo de discretización, se considera la influencia de una trayectoria mayor lo cual estandariza las mediciones y su tendencia. Este resultado permite corroborar lo expuesto en el apartado 1.13.3 donde al comparar mediciones de IRI, también se obtuvo que la mejor correlación se presenta mientras mayor es el intervalo de discretización.

1.16.3 Criterio 3: Impacto del Diseño Geométrico de la vía

Como se menciona en el apartado 1.11.5.2 es necesario analizar el comportamiento de las mediciones en tramos que presenten curvas horizontales muy cerradas, puesto que el peralte presente en dichas zonas, ocasiona que el vehículo adquiera una ligera inclinación la cual es registrada como desplazamiento vertical por el modelo de cuarto de carro. Esto ocasiona que los valores de IRI registrados con aplicaciones como RoadRoid o IRI.Calc.Free incrementen, alterando las mediciones.

Por lo mencionado anteriormente y condiciones del diseño geométrico de la vía Cuenca - Molleturo (Abscisado +10000.00 - +30000.00) se ha considerado la influencia del diseño geométrico en la correlación D_0 vs IRI, para lo cual se ha tomado en cuenta una división de la zona de estudio en 2 tramos: el primero que involucra una zona con un número de curvas con radios amplios denominado como “Tramo Recto”. Y un segundo tramo comprendido en su mayoría por curvas consecutivas, designado como “Tramo Sinuoso”.

Clasificación por Tramos de la Zona de Estudio

Trayecto	Abciscado	Coordenadas Geográficas	Coordenadas UTM
Tramo Recto	10+000 a la 21+900	Lat: 2°51'22.90" S; Long: 79°0.5'52.74" O hasta Lat: 2°46'55.06" S; Long: 79°09'59.18" O	720691.4 E; 9684093.1 N a la 703825.5 E; 9692349 N
Tramo Sinuoso	21+900 a la 30+000	Lat: 2°46'55.06" S; Long: 79°09'59.18" O hasta Lat: 2°47'13.71" S; Long: 79°12'29.74" O	703825.5 E; 9692349 N a la 699173.9 E; 9691783.2 N

*Lat: Latitud, Long: Longitud, UTM zona 17S

Tabla 21. Coordenadas de Inicio y Final de los trayectos considerados para el análisis del impacto del diseño geométrico en el coeficiente R²

Esta división del tramo de estudio o “Tramo Completo” se puede observar con más detalle en la siguiente ilustración:

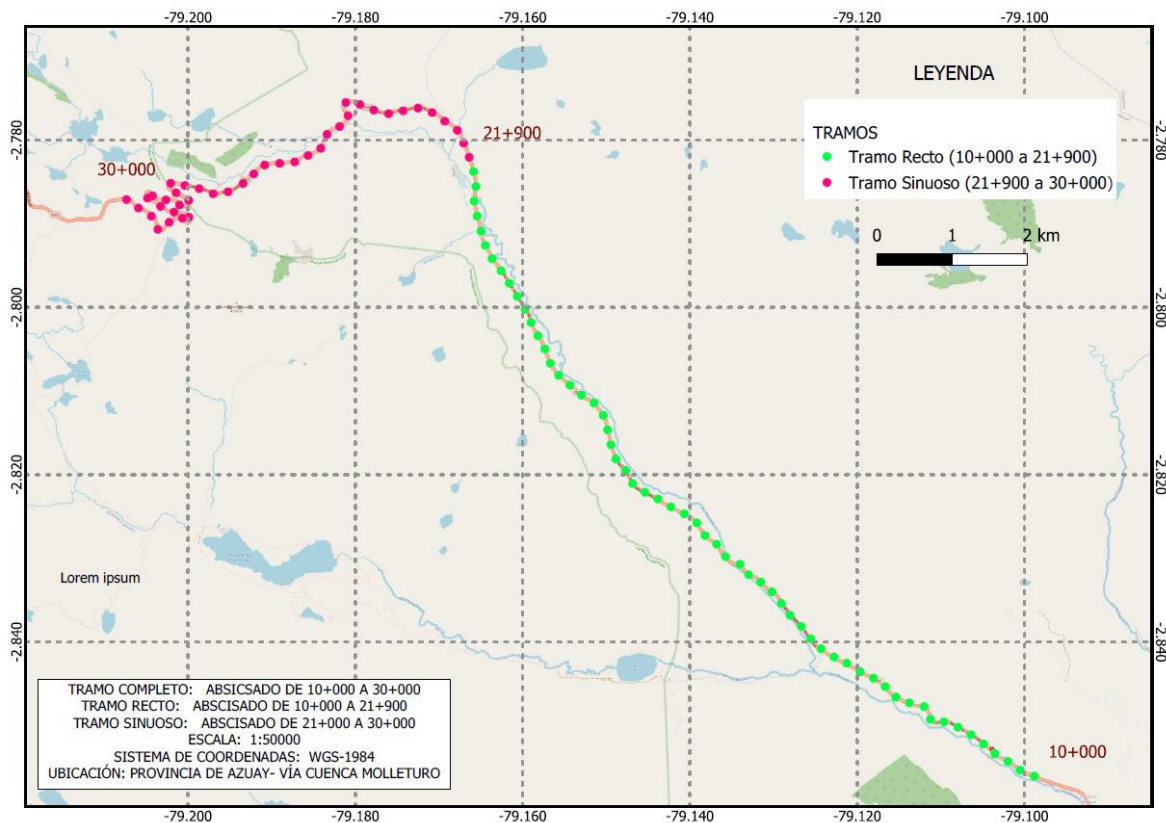


Ilustración 71. Clasificación de la zona de estudios por tramos (Recto y Sinuoso).

En función de los tramos detallados anteriormente, se analiza la relación entre mediciones de IRI en cada mes y la deflexión central D_0 , obteniendo los coeficientes de correlación, los cuales permiten analizar el comportamiento en cada tramo definido.



Coefficientes de Correlación por Tramos			
	Tramo Completo	Tramo Recto	Tramo Sinuoso
Jun/2021	0.155	0.009	0.386
Dic/2021	0.123	0.050	0.161
Feb/2022	0.046	0.025	0.001

Tabla 22. Valores de coeficiente de correlación R^2 en los trayectos seleccionados.

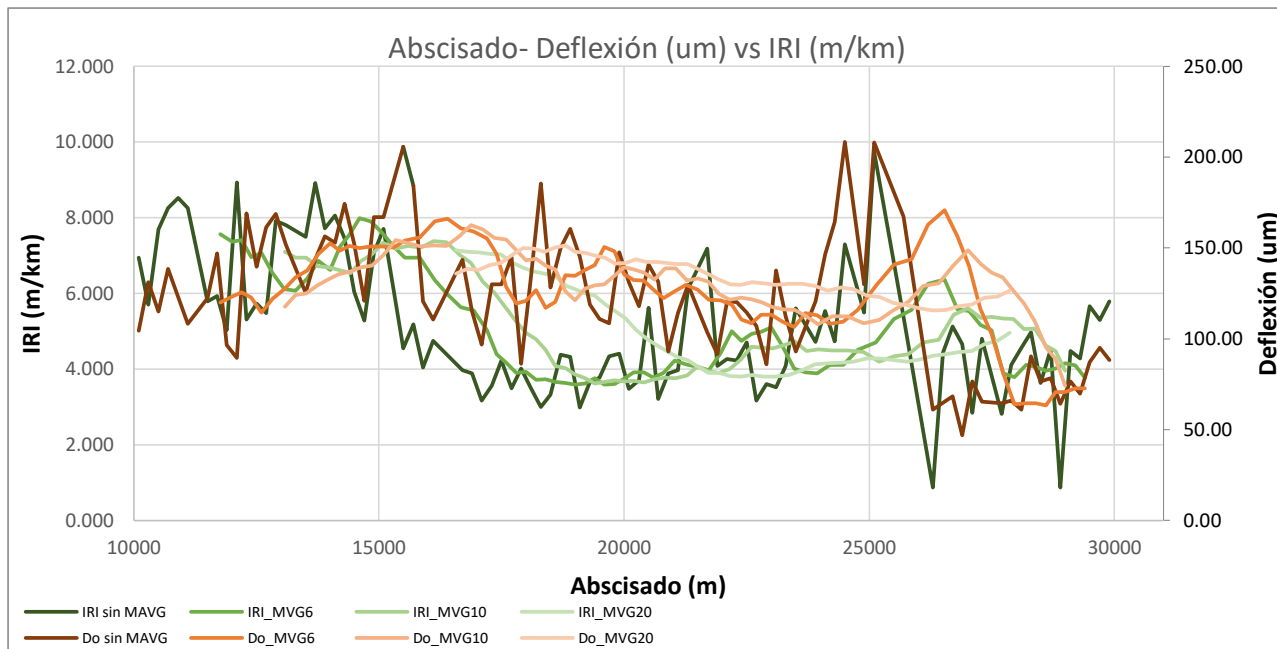
Como podemos apreciar en la tabla anterior, considerando el Tramo completo, el coeficiente de correlación R^2 es mayor mientras la fecha de medición del IRI es más cercana a la fecha de medición de deflexiones. Sin embargo, se puede apreciar que la variación del coeficiente de correlación no es igual para el tramo recto y sinuoso, razón por la cual se debe realizar un análisis más exhaustivo en los tramos que presentan curvas cerradas para determinar si la medición del IRI está siendo afectada por la presencia de peralte sumada a la reducción de velocidad en dicho trayecto.

En el siguiente punto se emplea la herramienta de medias móviles como un recurso estadístico de análisis de la tendencia de los datos en la correlación buscada. Se usa una media móvil para el análisis de los tramos recto y sinuoso con el objetivo de entender aún más el comportamiento de la correlación en dichos tramos.

1.16.4 Criterio 4: Uso de la media móvil para el análisis de la tendencia de la correlación

Como se mencionó en el apartado 1.9.3 la media móvil es una herramienta que utiliza la media aritmética para unificar la tendencia de los datos o mediciones. Al utilizar este método, se reduce la discretización de datos, suavizando la gráfica del perfil tanto de mediciones de IRI como de deflexiones. Para evaluar la influencia de este método al utilizarlo en la búsqueda de la correlación, se aplican medias móviles o moving average de diferente orden, es decir la cantidad de valores de los cuales se obtiene la media aritmética, para analizar el comportamiento y tendencia del coeficiente de correlación entre la deflexión central D_0 y el IRI.

A continuación, se presenta los perfiles de IRI y deflexiones originales, junto a perfiles con la aplicación de las medias móviles de diferente orden.

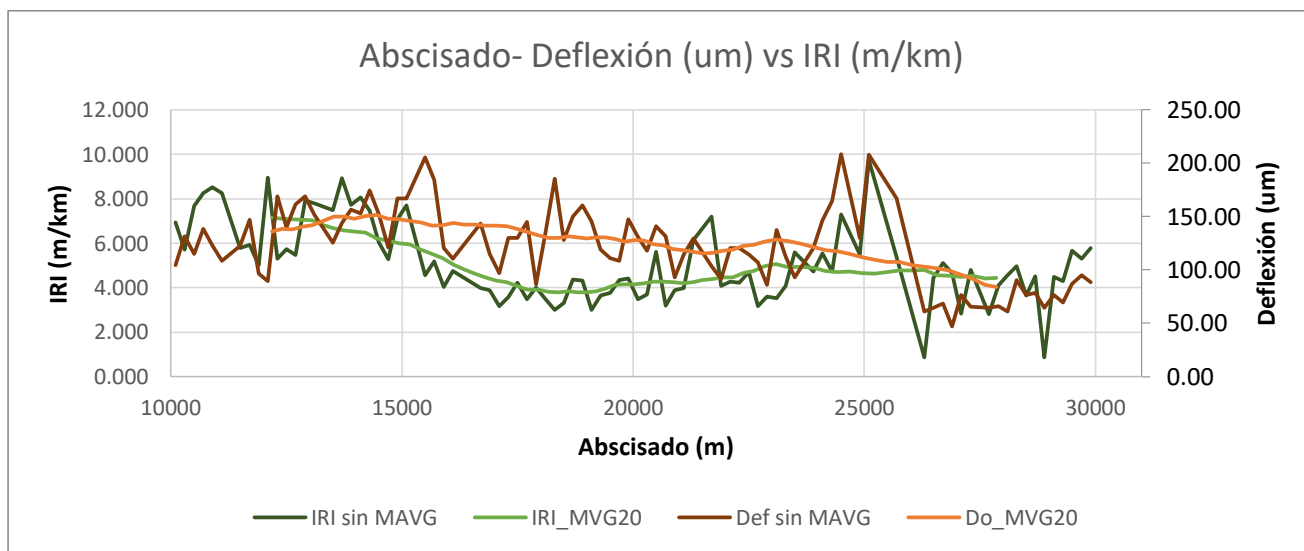


*MAVGn: Corresponde a la aplicación de una media móvil de orden n.

Ilustración 72. Perfiles IRI vs Do, aplicando media móvil de diferente orden.

Al graficar las medias móviles de orden 6,10 y 20 y comparar los perfiles de medición de IRI y deflexión Do originales, podemos identificar que existe una tendencia uniformizar los perfiles entre las dos variables conforme aumenta el orden de la media móvil.

Para visualizar de mejor manera la tendencia, en el siguiente grafico podemos observar únicamente los perfiles de los valores originales vs la aplicación de la media móvil de mayor orden (20).



*MAVGn: Corresponde a la aplicación de una media móvil de orden n.

Ilustración 73. Perfiles IRI vs Do iniciales y aplicando media móvil de orden 20.



En base a la gráfica anterior, se determina que los perfiles llegan a tener una tendencia similar, lo cual implicaría que el coeficiente de correlación entre parámetros aumenta, mientras mayor es el orden de la media móvil. El comportamiento frente a las medias móviles restantes se puede revisar en el *Anexo 6*.

Para evaluar los resultados obtenidos con la media móvil de diferente orden, se determina los coeficientes de correlación para cada tramo de estudio definido anteriormente (Tramo completo, recto y sinuoso). Los datos tabulados de los coeficientes de correlación (R^2) para los trayectos considerados se presenta a continuación:

Coeficientes de Correlación de Deflexión (Do) vs IRI								
Media Móvil	1	2	4	6	8	10	15	20
Tramo Completo	0.155	0.198	0.243	0.257	0.259	0.260	0.248	0.238
Tramo Recto	0.009	0.038	0.081	0.112	0.167	0.211	0.360	0.462
Tramo Sinuoso	0.386	0.465	0.647	0.748	0.743	0.789	0.849	0.650

Tabla 23. Coeficientes de correlación Do-IRI con medias móviles de diferente orden.

Mediante los coeficientes de correlación presentados en la anterior tabla, se puede determinar que al implementar el método de media móvil se maximiza el coeficiente de correlación entre IRI y deflexión central hasta un orden (n) de media móvil, a partir del cual se llega a una meseta en la cual el coeficiente de correlación ya no incrementa proporcionalmente. En la presente investigación, el orden n de la media móvil en el cual se maximiza el coeficiente de correlación es 10, a partir del cual el coeficiente no aumenta significativamente.

El orden 10 de la media móvil permite evaluar la tendencia de los datos, sin considerar la influencia de picos, pero a su vez sin perder resolución de datos o información que ocasiona el descenso del coeficiente de correlación. En el siguiente apartado 1.16.5 se realiza un análisis de regresión lineal junto con el gráfico de valores residuales, mediante el cual se fundamenta que el orden de la media móvil, en el cual existe una mayor correlación, es de décimo orden.

A continuación, se presenta la gráfica de los coeficientes de correlación en función del orden de la media móvil aplicada, para visualizar si existe una tendencia en los resultados.

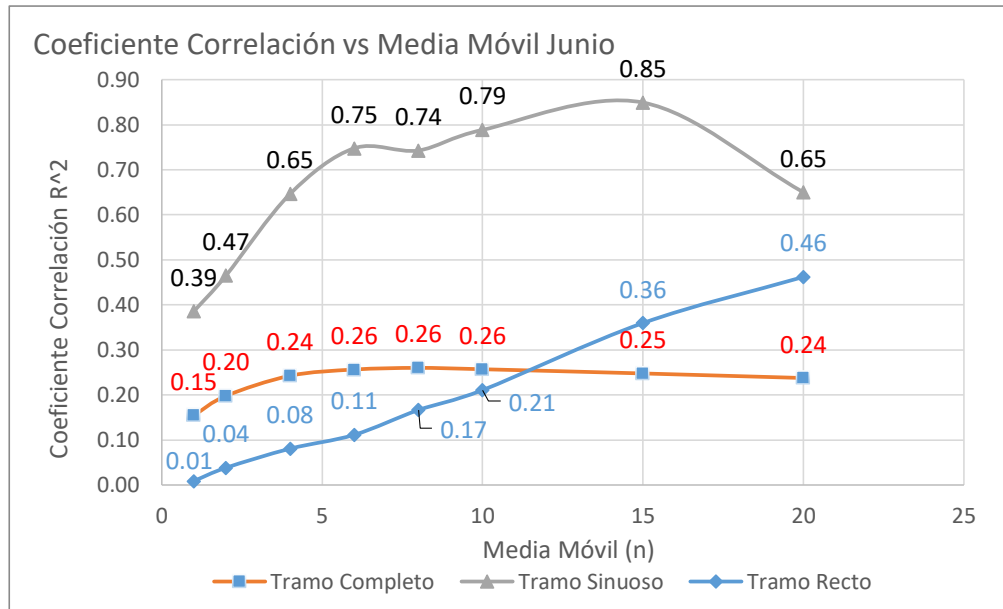


Ilustración 74. Coeficientes de correlación Do-IRI vs medias móviles de diferente orden.

En la ilustración mostrada anteriormente, podemos identificar que la correlación de deflexiones centrales Do vs IRI del tramo recto incrementa proporcionalmente conforme aumenta el orden de la media móvil, sin embargo, el tramo sinuoso se comporta de manera diferente con el uso de medias móviles de diferente orden incrementando su coeficiente de correlación hasta llegar a un máximo y luego marcando un declive precipitado de dicho coeficiente.

Este resultado permite determinar, como se mencionó en el criterio 3 del apartado 1.11.5.2, que la medición del IRI en el tramo sinuoso tiene una influencia en la correlación de la deflexión respecto al IRI del tramo completo. Sin embargo, la fluctuación en las mediciones del IRI debido al diseño geométrico de la vía basado en las investigaciones de Madrigal, indican que pueden estar dentro del rango entre 0.5 a 1m/km, lo cual representa una variación entre el 7% y 14% del nivel de IRI en las mediciones en tramo sinuoso. (Madrigal, 2017).

Además, debido a que la longitud del tramo sinuoso es menor que el tramo recto, la cantidad de datos a relacionar es menor, independientemente del orden de la media móvil. Por esta razón, se obtiene mejores coeficientes de correlación que al analizar el tramo recto o completo. Es por esto que, para el posterior análisis, se analiza el comportamiento de todo el tramo, es decir, el tramo completo respecto del tiempo.

1.16.5 Criterio 5: Variación de la Correlación en función del Tiempo

Debido a que las mediciones de deflectometría de impacto implican el uso de una gran cantidad de recursos, no es sencillo realizar mediciones periódicamente, razón por la cual se



han correlacionado mediciones de deflexiones correspondientes a diciembre del 2020, con mediciones del IRI realizadas en junio del 2021, diciembre del 2021 y febrero del 2022. El principal objetivo de realizar esta comparación es determinar la existencia de una variación entre la fecha de captura de datos y el coeficiente de correlación R^2 , o si simplemente la correlación se mantiene constante a lo largo del tiempo.

Para la evaluación del parámetro tiempo, se obtuvieron los coeficientes de correlación R^2 entre deflexión central y el IRI promedio de cada fecha de medición, para luego realizar el análisis de sensibilidad de variables, con el propósito de determinar el valor máximo de dicha correlación. Este conjunto de análisis consiste en seleccionar el lado izquierdo de la vía para realizar el análisis debido a las características de la carretera, filtrar mediciones que no cumplan el umbral de velocidad establecido o presenten singularidades, para analizar únicamente mediciones certeras y estandarizar las mediciones de las aplicaciones. También se determina que la longitud de intervalo de medición más óptimo es de 100m, el uso de las deflexiones centrales para la correlación, el análisis por tramos rectos y sinuosos de la vía y la implementación de la media móvil de orden 10 como método de análisis.

En la siguiente tabla, se establecen los coeficientes de correlación en base a los cuales se analizará la variación en el tiempo.

R2		Coefficiente		
Fecha/Tramo	Tiempo	Completo	Recto	Sinuoso
Junio	6	0.257	0.211	0.789
Diciembre	12	0.242	0.272	0.742
Febrero	14	0.224	0.278	0.116

Tabla 24. Fecha de Captura del IRI vs Coeficiente R^2 de la correlación Do-IRI

En base a esta tabla se puede determinar que la correlación entre IRI y deflexiones disminuye, mientras el intervalo de tiempo entre mediciones incrementa. Esto se debe probablemente a que el pavimento está en constante deterioro y las condiciones tanto superficiales como estructurales cambian con el paso del tiempo. Por este motivo, lo recomendado es realizar tanto la medición de IRI como la medición de las deflexiones con deflectómetro de impacto, en la misma fecha para garantizar que las condiciones del pavimento son similares y de esta manera obtener datos que maximicen la correlación entre estos parámetros.

En base a los coeficientes presentados en la tabla anterior y al tiempo transcurrido desde Diciembre del 2020 que es la fecha de medición de las deflexiones con deflectómetro de impacto, por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, se establece una estimación de una ecuación de ajuste donde la variable independiente sea el tiempo y la variable dependiente el coeficiente de correlación. En la siguiente gráfica se muestra los valores de los coeficientes respecto del tiempo y la ecuación de ajuste, la cual refleja que al acercarse a

la fecha de medición de deflexiones diciembre 2020 como: (tiempo transcurrido = 0 meses), el coeficiente de correlación mejora.

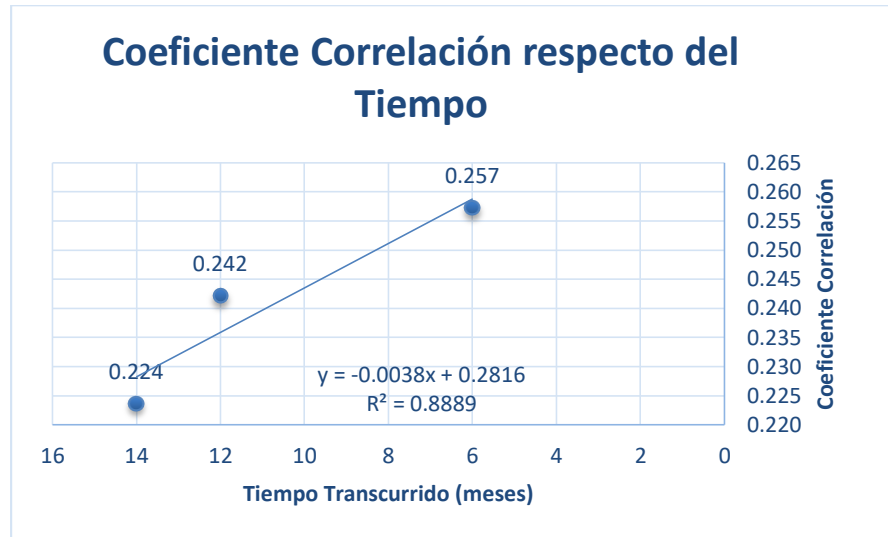


Ilustración 75. Fecha de Captura del IRI vs Coeficiente de correlación Do-IRI

A raíz de los resultados obtenidos, se pretende cubrir el objetivo final de la investigación que es analizar la variación de la correlación con el paso del tiempo, para determinar la correlación que existiría si las mediciones de IRI y deflexión se realizaran al mismo tiempo, por medio de una estimación de los valores de IRI correspondientes a diciembre de 2020.

Debido a que en cada punto de medición de IRI existe una tendencia distinta respecto del tiempo, se busca estimar la ecuación de variación de IRI respecto del tiempo para cada punto de medición, es por esto que se analiza las variaciones de IRI considerando a la medición de febrero de 2022, que es la medición más reciente, como punto de partida para estimar la variación de IRI respecto a diciembre de 2020 cuando se realizó la medición de deflexiones con FWD.

De esta manera se considera como variación de IRI 1 a las mediciones entre febrero de 2022 y diciembre de 2021 donde el tiempo transcurrido es de 2 meses. De igual manera, se considera la variación de IRI 2 entre las mediciones de febrero 2022 y junio de 2021 donde el tiempo transcurrido es de 8 meses. Finalmente, la variación 3, se considera como nula puesto que febrero de 2022 es la última fecha de medición y no ha transcurrido un tiempo que permita determinar un diferencial de dicha variable.

En base a cada diferencial de tiempo y de IRI, mediante la herramienta de estimación lineal, se obtiene la ecuación que relaciona dichas variables, en cada uno de los puntos de medición. Debido a que la información que se desea estimar es la correspondiente al IRI en diciembre de 2020, fecha en la cual se realizó la medición de deflexión con FWD, el diferencial de tiempo es de 14 meses en referencia de la última fecha de medición que es en febrero de

2022. Mediante la estimación lineal de la herramienta Excel, con un diferencial de tiempo de 14 meses se estima la variación de IRI para cada punto, en dicho periodo. Cabe destacar que este análisis se ha realizado considerando los puntos en los cuales la tendencia del IRI es incrementar con el paso del tiempo y sufrir un desgaste proporcional (Coeficiente R^2 IRI vs Tiempo mayor que 0.5) Considerando una correlación fuerte entre estas variables según lo mencionado en la Tabla 12. Rangos de coeficiente de correlación lineal de Pearson.

Una vez determinada la variación de IRI, es posible calcular el valor de IRI, con la siguiente ecuación:

$$IRI\ final_i = IRI\ inicial_i + \Delta IRI_i \quad (24)$$

$$IRI\ inicial_i = IRI\ final_i - \Delta IRI_i \quad (25)$$

Donde:

- IRI final: Medición de IRI en febrero de 2022 (m/km) en el punto i.
- IRI inicial: valor de IRI estimado en diciembre de 2020 (m/km) en el punto i.
- ΔIRI : Variación de IRI en un diferencial de 14 meses mediante estimación lineal (m/km) para el punto i.

En base a la estimación del IRI correspondiente a diciembre del 2020, se realiza un análisis de sensibilidad de variables similar a todo el proceso explicado en cada punto del apartado 4.5. De esta manera se determina que el mejor ajuste de correlación entre IRI y deflexiones centrales es de carácter exponencial y en el cual se utiliza el método de media móvil de distinto orden para evaluar la tendencia de la correlación.

En la siguiente tabla se establecen los coeficientes de correlación obtenidos para medias móviles de diferente orden, para determinar el comportamiento de la correlación. Los coeficientes corresponden a los ajustes exponenciales presentados en el *Anexo 7*.

Coeficiente Correlación Do vs IRI estimado diciembre 2020						
Orden Media Móvil	1	4	8	10	15	20
Coeficiente Correlación R^2	0.150	0.235	0.396	0.406	0.350	0.301

Tabla 25. Coeficiente Correlación Do-IRI con media móvil

En base a los datos presentados en la tabla anterior, se puede evidenciar que el coeficiente de correlación crece hasta una media móvil de orden 10, análisis en el cual no se pierde la definición de los datos y se depura valores picos. Para medias móviles de mayor orden, el coeficiente de correlación disminuye debido a que se pierde información por la disminución de datos, lo cual no refleja resultados fundamentados. En la siguiente gráfica se demuestra el comportamiento antes mencionado.

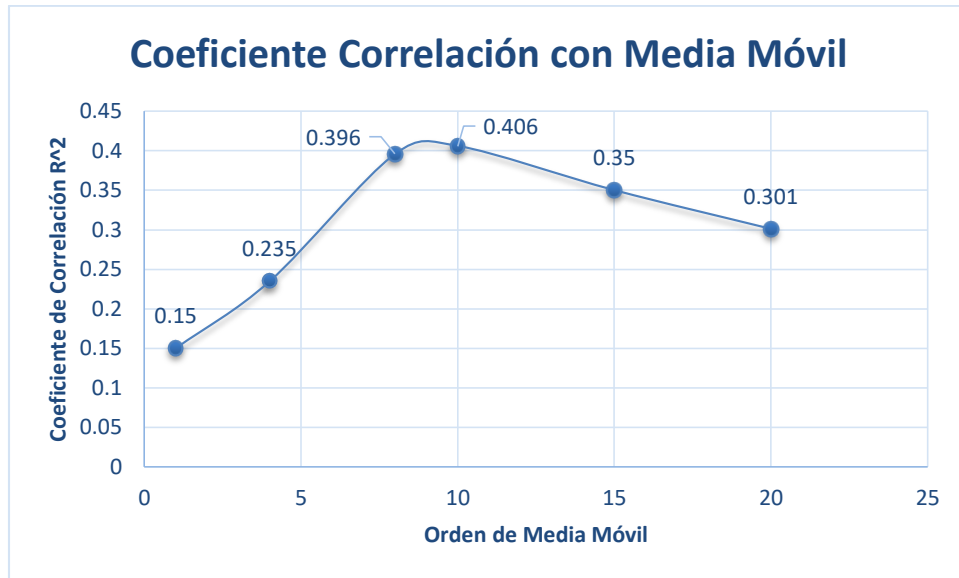
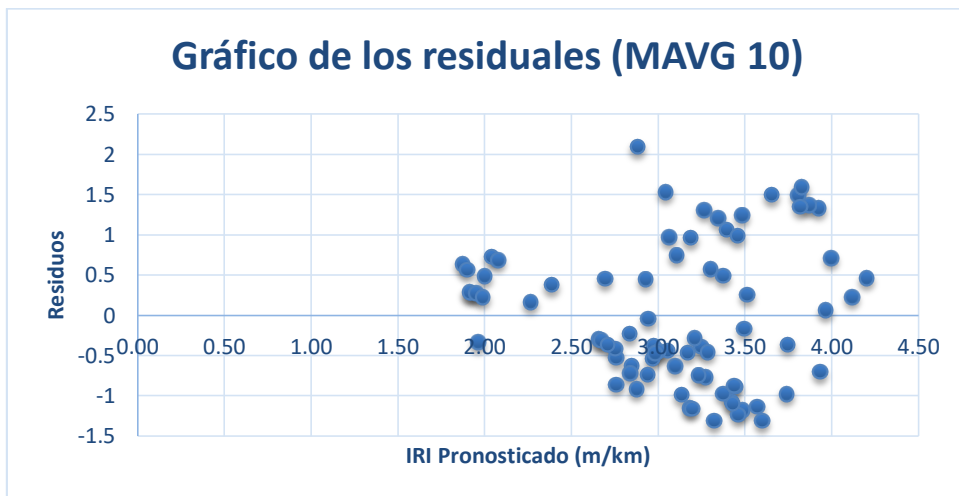


Ilustración 76. Coeficiente de Correlación Do vs IRI

Para analizar la razón por la cual el coeficiente de correlación es máximo con una media móvil de orden 10, se realiza un análisis de una regresión no lineal, linealizada, de lo cual obtenemos los valores residuales entre el IRI pronosticado del ajuste exponencial respecto del IRI establecido para diciembre del 2020. A continuación, se presenta la gráfica de valores residuales y de probabilidad normal.

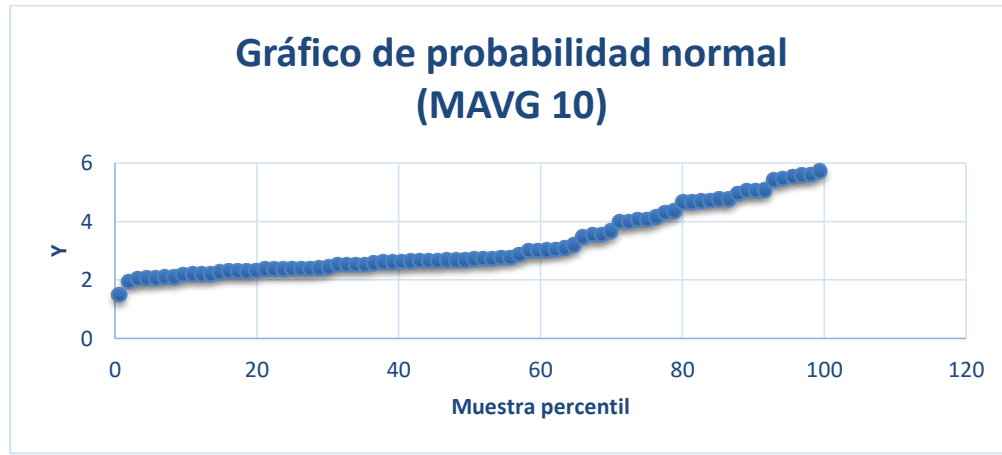


*MAVGn: Moving Average o Media Móvil de orden n.

Ilustración 77. Gráfico de los valores residuales para la estimación de IRI de Diciembre del 2020, con Moving Average de 10.

Mediante la gráfica anterior se determina que el diferencial entre el valor pronosticado y el utilizado para la correlación tienen un margen de 2.09 m/km a diferencia de las gráficas presentadas en el Anexo 8 donde se muestra que los valores residuales para medias móviles de diferente orden son mayores, llegando hasta 3.94 m/km lo cual significa que la depuración

de valores atípicos no es la óptima si el orden es menor a 10 o que se pierde definición de información en los datos cuando el orden de la media móvil es mayor a 10, reduciendo en ambos casos el coeficiente de correlación entre el IRI y la deflexión central.



*MAVGn: Moving Average o Media Móvil de orden n.

Ilustración 78. Gráficos de la Probabilidad Normal del IRI estimado para Diciembre del 2020, con Moving Average de 10.

En base a las gráficas anteriores, se evidencia que el valor del IRI sigue una tendencia uniforme, sin presentar saltos o espaciamentos que indicarían la dispersión de datos debido a la depuración errónea de datos y la presencia de valores atípicos. Esto se lo puede comparar con las gráficas correspondientes a medias móviles de diferente orden presentadas en el Anexo 9.

De esta manera, se establece que para los valores estimado de IRI de diciembre de 2020, mediante un ajuste exponencial y aplicando una media móvil de orden 10, se determina el coeficiente de correlación máximo que se puede alcanzar entre IRI y Deflexión, el cual es de 0.406.

1.17 Descripción del Estado de la Vía

1.17.1 Evaluación del Estado Funcional

En este apartado se evalúa la condición actual del índice de regularidad internacional (IRI) del pavimento, para poder establecer las condiciones de servicio en las que se encuentra la vía. A continuación, se han graficado los valores del IRI dentro del tramo de estudio tanto para el lado derecho (dirección 10+000.00 a 30+000.00), como para el lado izquierdo (dirección 10+000.00 a 30+000.00). considerando los rangos de valores IRI mencionados en el apartado 1.7.2.1 en el cual se presenta la normatividad Ecuatoriana e Internacional para el IRI, en la misma se menciona que debido a que no se presentan valores de IRI normados para la evaluación de pavimentos rígidos, se toma en cuenta la normatividad uruguaya (Tabla 4), y adicional a esto para valores superlativos del índice IRI en el pavimento se considera la

característica expuesta por Sayers en 1986, Ilustración 3. Escala de Valores IRI para diferentes tipos de pavimentos. De esta manera se considera valores superiores a 6m/km para el IRI como Pavimentos dañados.

Lado Derecho:

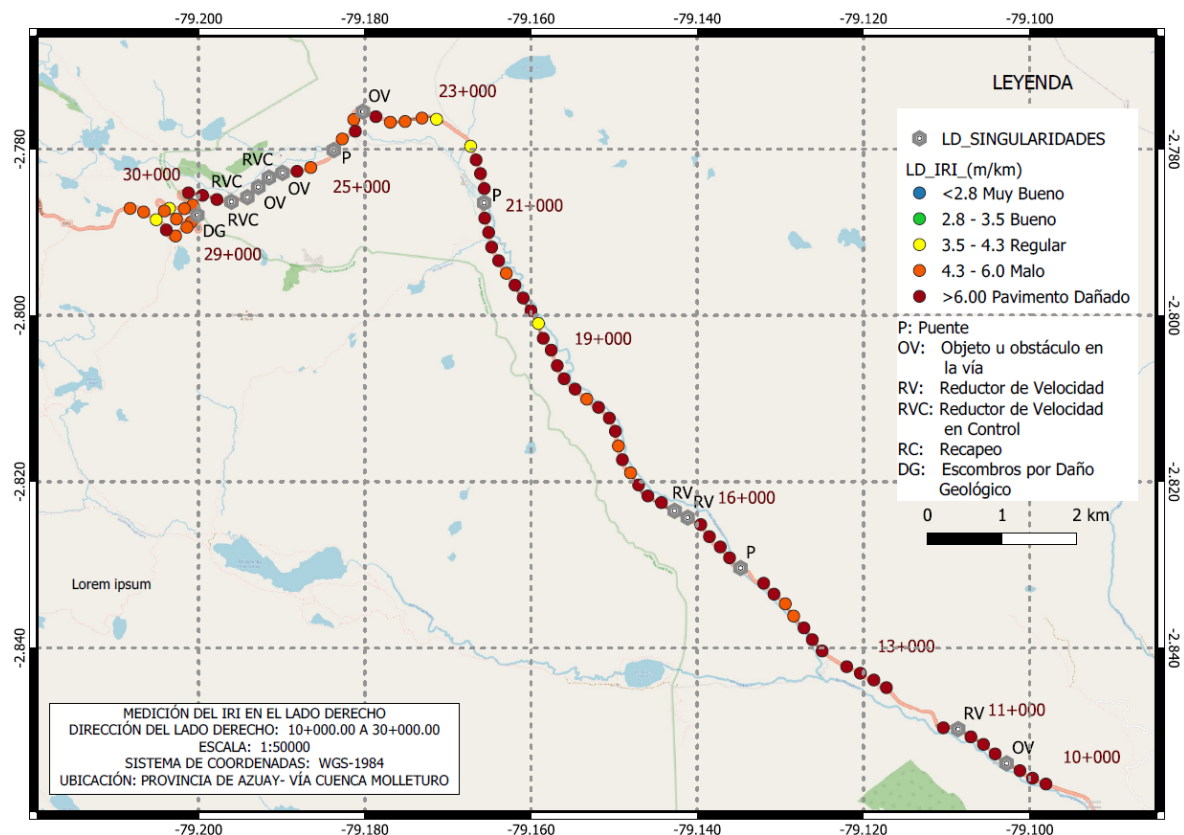


Ilustración 79. Estado Funcional (IRI) del Lado Derecho.

Analizando la gráfica que representa un total de 75 intervalos de medición del IRI (100% del tramo de estudio) correspondientes al lado derecho luego del filtrado, podemos observar que la mayoría del pavimento del lado derecho específicamente entre las abscisas 10+000 a 22+000 se encuentra en condiciones dañadas (IRI >6m/km), con condiciones ligeramente mejores entre el abscisado 23+000 a 30+000 pero “malas” (IRI entre 4.3-6 m/km) tomando de referencia la normatividad uruguaya antes mencionada. Se puede apreciar que la cantidad de intervalos en condiciones regulares es escasa (IRI entre 2.8-3.5m/km) y nula la existencia de condiciones buenas o muy buenas bueno (IRI < 2.8m/km), esto sugiere la necesidad de un mantenimiento funcional completo, debido a que la extensión total del pavimento se encuentra en condiciones deficientes. En la Tabla 26. Estado Funcional (IRI) de ambos lados del Pavimento. se detallan los porcentajes de cada rango de clasificación de IRI.

Lado Izquierdo:

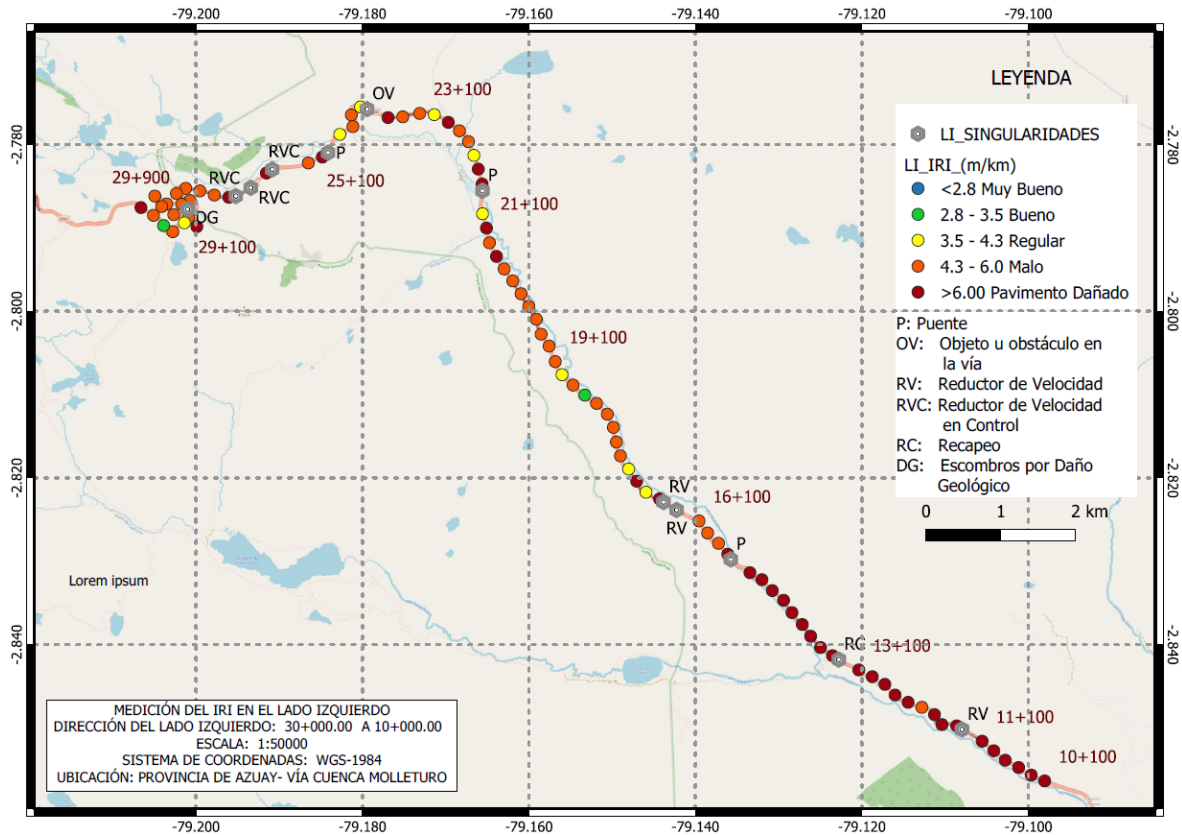


Ilustración 80. Estado Funcional (IRI) del Lado Izquierdo.

Usando un total de 87 intervalos de medición del IRI (100% del tramo de estudio) correspondientes al lado izquierdo luego del filtrado, podemos identificar condiciones de pavimento dañado ($IRI > 6m/km$) específicamente entre las abscisas 10+000 a 16+100, y condiciones ligeramente más confortables pero malas (IRI entre 4.3-6 m/km) entre las abscisas 16+000 a 21+000 y en el abscisado final del tramo de estudio 25+000 a 30+000, intervalos de IRI regular (IRI entre 2.8-3.5 m/km) son muy escasas y no existen intervalos con IRI Muy bueno o bueno ($IRI < 2.8m/km$) lo que nos permite recomendar un mantenimiento funcional en la extensión completa de la vía para mejorar las condiciones del servicio y confort. En la tabla Tabla 26. Estado Funcional (IRI) de ambos lados del Pavimento. se detallan los porcentajes de cada rango de clasificación de IRI.

Comparativa:

Evaluando las condiciones de ambos tramos, podemos notar que se repiten patrones de intervalos específicos con un IRI mayor a 6 m/km , muy cercanos al comienzo de las curvas y cercanos a las singularidades como los reductores de velocidad y control del parque nacional “El Cajas”, esto puede sugerir a que hay un desgaste mayor posiblemente generado por acciones de frenado.



Además, la pendiente incrementa entre el tramo final con abscisas 25+100 a 30+000 en donde hay un aumento de la cantidad de intervalos con valor IRI superior a 6m/km especialmente en el lado derecho, posiblemente debido a que, en subida, los vehículos requieren mayor tracción, incrementando la fricción neumático pavimento, desgastando el pavimento.

En el tramo entre abscisas 16+100 y 21+000 existe una diferencia entre la clasificación propuesta por el IRI siendo clasificada como Malo (IRI entre 4.3-6 m/km) para el lado izquierdo y como Pavimento dañado (IRI superior a 6m/km) para el lado izquierdo.

Entre el abscisado 10+000 a +16100 en ambos lados del pavimento se presenta la mayor cantidad de intervalos con desgaste IRI o pavimento dañado (IRI>6m/km) en ambos lados, pudiendo ser ocasionado por las velocidades alcanzadas en este trayecto producto de que no existe una variación pronunciada de la pendiente a librar requiriendo menor tracción para superar el tramo y permitiendo una circulación a mayor velocidad.

Considerando los rangos expuestos en la ilustración anterior el informe del estado general de la vía se resume en la siguiente tabla:

Estado Funcional de la Vía (IRI)				
	Lado Derecho Estado Funcional		Lado Izquierdo Estado Funcional	
	Porcentaje	Extensión (km)	Porcentaje	Extensión (km)
Muy bueno	0%	0.000	0%	0.000
Bueno	2.67%	0.534	8%	1.600
Regular	4%	0.800	4.6%	0.920
Malo	28%	5.600	43.7%	8.740
Pavimento Dañado	65.33%	13.066	43.7%	8.740

Tabla 26. Estado Funcional (IRI) de ambos lados del Pavimento.

Con esto podemos concluir que más del 90% del pavimento en ambos lados se encuentra en condiciones deficientes denominadas “Malo y Pavimento dañado” (IRI superior a 4.3 m/km), además el lado izquierdo contiene un 20% menor de “Pavimento Dañado” (IRI superior a 6m/km) que el lado derecho. Pero aun así los intervalos que brindan condiciones de servicio adecuadas “Muy buenas o Buenas” (IRI < 3.5 m/km) conforme a la normativa en ambos lados son menores del 9%. Evidenciando la falta y necesidad de mantenimiento superficial del pavimento para alcanzar niveles de servicio óptimos en ambos sentidos de circulación.

1.17.2 Evaluación del Estado Estructural

En este apartado se evalúan las condiciones de la deflexión estructural a lo largo del abscisado del tramo de estudio en ambos lados de la vía, lado derecho (Abscisado 10+000 a 30+000) y lado izquierdo (30+000 a 10+000). En base a las mediciones proporcionadas por el ministerio de transporte y obras públicas MTOP, capturadas en diciembre del año 2020. En base a la normatividad especificada en el apartado 1.8.2.1 en la *Tabla 6. Valores de Deflexiones normados en México* y la *Tabla 10. Parámetros del cuenco de deflexiones vs Condición*

estructural del pavimento . que estipula valores superiores a 4 o 5 mm (400 o 500um) para considerar una condición estructural del pavimento como buena.

Se presentan entonces las ilustraciones correspondientes a cada lado del pavimento y las observaciones permitentes sobre la clasificación de las mediciones realizadas en cada abscisado.

Lado izquierdo:

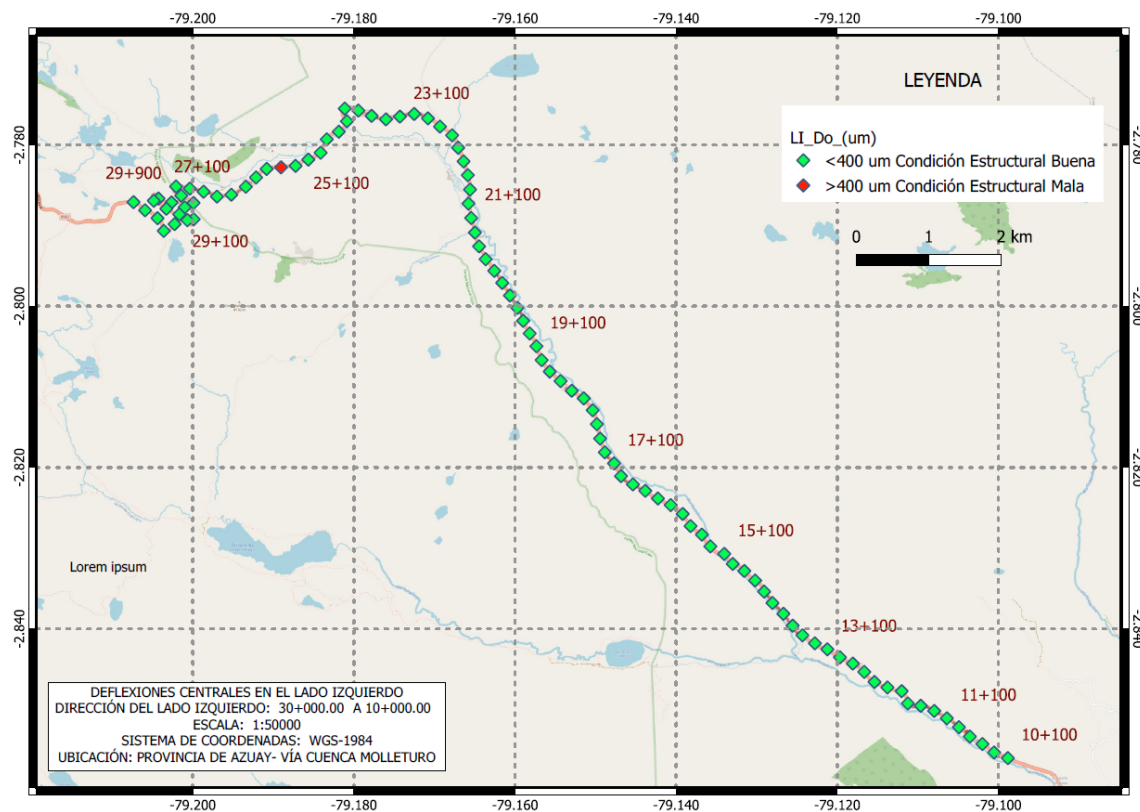


Ilustración 81. Estado Estructural Deflexiones (Do) del Lado Izquierdo.

Observando la *Ilustración 81. Estado Estructural Deflexiones (Do) del Lado Izquierdo*. Podemos asumir que el estado estructural de la vía en el año 2020 es satisfactorio y no excede los valores normados al menos en el 98% de la extensión del pavimento, sobresaliendo una deflexión central de 512 um, mayor al límite (400um), ubicada en la abscisa 25+300. Sin embargo, como se mencionó en el apartado 1.8.3.3 , es importante que el cuenco de deflexiones tenga una respuesta estándar del pavimento, en esta abscisa en particular la deflexión central se clasifica como elevada sugiriendo una capacidad estructural mala pero bajo la observación que el pavimento respondió de manera particular respecto a la transmisibilidad de la deflexión. En resumen, la condición estructural de la vía es “Buena” en la fecha de medición de la deflectometría de impacto con FWD.

Lado derecho:

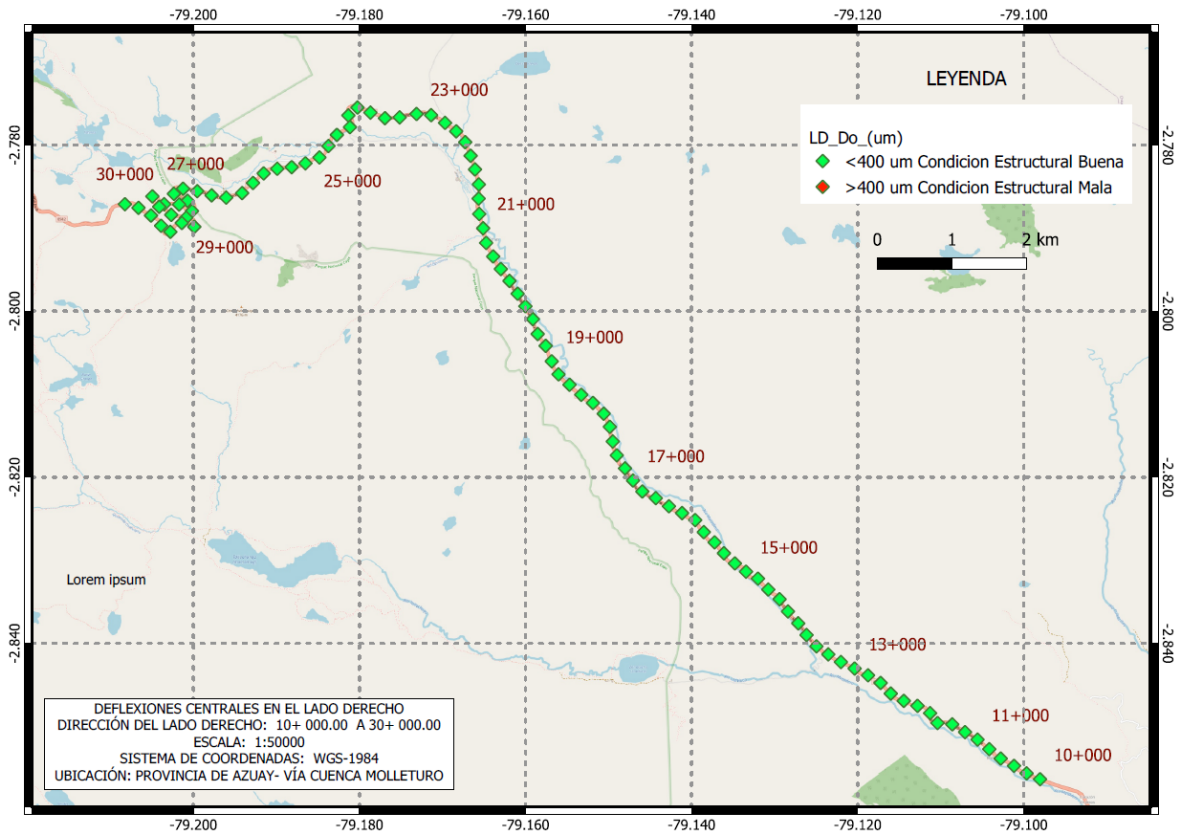


Ilustración 82. Estado Estructural Deflexiones (Do) del Lado Derecho.

La ilustración anterior permite visualizar que el estado de deflexiones del lado izquierdo es óptimo y no se encuentran mediciones con deflexión central mayor a la normatividad para la clasificación, siendo la extensión del 100% del pavimento correspondiente a una capacidad estructural “Buena”, conforme a lo establecido por las deflexiones centrales y para la fecha de captura de las deflexiones.

Estado Estructural del Pavimento			
Lado	Deflexión Do máxima (um):	Deflexión Do promedio (um)	
Derecho	185	104	
Izquierdo	212	121	

Tabla 27. Deflexiones máximas y promedio de deflexiones para cada lado del pavimento (Comportamiento estándar).

En base a las mediciones de deflexión, podemos observar que ambos lados de la vía se encuentran en condiciones “Buenas” según la normativa. Inclusive se tienen valores de deflexiones centrales promedio menores a 150um y deflexiones máximas menores a la mitad del valor máximo estipulado por normativa tomada como referencia, debido a que en el año 2021 la vía de estudio sufrió varios cierres a causa de inestabilidad de taludes en kilómetros posteriores al tramo en estudio, el deterioro estructural y el tráfico sobre la misma no se considera significativo como para que las deflexiones actuales hayan superado la normativa en el tramo entre las abscisas 10+000 y 30+000.



1.17.3 Observaciones acerca del estado funcional y estructural

Respecto al **estado funcional** del pavimento, este se encuentra en condiciones se bajó nivel de servicio y confort en casi todo su trayecto, razón por la cual se realizan las siguientes observaciones y recomendaciones:

El valor de IRI presentado en ambos lados del pavimento evidencian la necesidad de un reacondicionamiento, se sugiere una adición de concreto asfáltico del espesor mínimo recomendado, es decir 1plg, junto con un control adecuado de la superficie o acabados y medición del IRI resultante, además de un control de la densidad y segregación, recalcando que el IRI inicial del pavimento afecta directamente la vida útil y el nivel de servicio del mismo.

En vista a que el **estado estructural** proveniente del análisis de deflexiones centrales y el pavimento responde de manera óptima según los datos analizados, únicamente se toma en cuenta la siguiente recomendación:

En cuanto al análisis de deflexiones centrales, se tuvieron valores muy favorables denotando que existe una calidad óptima en el desarrollo estructural en cuanto a deflexiones se refiriese.

Si se desea examinar el comportamiento puntual en la cual el cuenco de deflexiones nos ayudó a evidenciar que el punto de medición corresponde a un pavimento con mala transmisibilidad o respuesta no estándar, se recomienda realizar una evaluación más a fondo del pavimento, ocupando un método destructivo o repetir pruebas de deflexiones para determinar la causa y extensión de este comportamiento, y determinar entonces el daño específico.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones, luego de realizar el análisis funcional y estructural en el tramo de la vía Cuenca – Molleturo, comprendido entre las abscisas 10+000 a 30+000 enfocado en la búsqueda de correlación entre el parámetro funcional IRI medido con aplicaciones móviles y las deflexiones como parámetro estructural, medido con Deflectómetro de Impacto (FWD).

1.18 Conclusiones

1.18.1 Mediciones de IRI

Al comparar los coeficientes de correlación entre mediciones de IRI del lado derecho (0.248 con RoadRoid y 0.345 con IRI.Calc.Free) respecto de las mediciones del lado izquierdo (0.564 con RoadRoid y 0.772 con IRI.Calc.Free) se concluye que el nivel de repetitividad de mediciones en el lado derecho es menor, debido a la influencia mecánica del vehículo en presencia de pendiente positiva que exige constantes cambios de marcha para mantener la velocidad dentro del umbral de 50 a 95km/h, razón por la cual la repetitividad de mediciones es mejor en tramos rectos o bajadas.

En cuanto al análisis de sensibilidad de variables realizado en las mediciones de IRI, se concluye que se debe filtrar los puntos con singularidades como reductores de velocidad o presencia de escombros en la vía, así como las mediciones que se realicen fuera del umbral de velocidad de medición recomendado de 50 a 95 km/h debido a que no corresponden a medidas precisas. Al realizar este filtro, el coeficiente de correlación entre mediciones incrementa de 0.564 a 0.891 en la aplicación RoadRoid y de 0.772 a 0.972 con IRI.Calc.Free, garantizando la repetitividad de mediciones de IRI con aplicaciones móviles.

Se concluye que el coeficiente de correlación entre las mediciones de RoadRoid e IRI.Calc.Free es de 0.828, marcando una tendencia lineal, por lo que se determina una ecuación que permita estandarizar las mediciones con aplicaciones móviles.

1.18.2 Correlación entre IRI vs Deflexiones

En base al análisis de sensibilidad de la influencia de la ubicación del geófono, se concluye que mientras más cercano se ubique el geófono al eje de aplicación de carga, las deflexiones registradas poseen mayor correlación respecto al IRI, ya que el coeficiente de correlación obtenido con las deflexiones registradas en el geófono ubicado a 210cm del eje de carga es de apenas 0.08 y el coeficiente obtenido con los registros del geófono central ubicado bajo el eje de carga es de 0.155.



Al realizar un análisis de sensibilidad de la longitud del intervalo, se concluye que la correlación aumenta mientras más grande es el intervalo, pasando de 0.004 con mediciones a cada 5m hasta 0.046 con mediciones a cada 100m.

Mediante el análisis de la correlación IRI vs deflexión dividido en tramo completo, recto y sinuoso, se concluye que la correlación disminuye con el paso del tiempo. Al considerar todo el tramo, en las mediciones realizadas en Junio del 2021 tienen un coeficiente de 0.155 el cual disminuye conforme avanza el tiempo llegando a ser de 0.046 luego de 8 meses, en Febrero del 2022. De igual manera ocurre con los coeficientes del tramo sinuoso el cual es de 0.386 en Junio de 2021 y decrece hasta 0.001 en Febrero del 2022.

Se puede concluir que al aplicar la media móvil, el orden con el cual mejor correlación se obtiene es de 10 debido a que representa un balance entre el filtrado de la influencia de los picos sin perder definición de los datos. Al utilizar la media móvil de orden 1, el coeficiente de correlación es de 0.155 e incrementa hasta 0.26 con una media móvil de 10, posteriormente dicho coeficiente vuelve a disminuir conforme aumenta el orden.

Luego de analizar la variación del IRI y su correlación con la deflexión central respecto del tiempo, se puede concluir que es posible estimar los valores de IRI siempre y cuando exista un incremento lo largo del tiempo, debido al desgaste y deterioro de la carretera. De esta manera se realiza una estimación lineal para estimar el valor del IRI correspondiente a la fecha de medición de las deflexiones (diciembre del 2020), en base al cual se calcula el coeficiente de correlación alcanzando un valor máximo de 0.406.

1.18.3 Estado Vial

En base a la evaluación funcional y estructural realizada, se concluye que la condición estructural del pavimento del tramo de la vía es Buena. Debido a que las mediciones de deflexión no superan los rangos establecidos en la normativa, mientras que la condición superficial del pavimento es mala en más de un 40% de la vía y otro 40% se considera pavimento dañado, es por esto que se debe realizar un mantenimiento para mejorar los niveles de IRI y el nivel de servicio de la vía.

1.18.4 Conclusiones finales

Se puede concluir que las aplicaciones móviles como RoadRoid o IRI.Calc.Free basadas en el modelo Cuarto de Carro, son una alternativa de equipos de medición, ágil y económica que permite medir grandes tramos de vía en poco tiempo, facilitando la recolección de datos y conformación de base de datos. Cabe destacar que es necesario realizar un correcto proceso de calibración comparando con mediciones de equipos más precisos, para garantizar una correcta medición. Además, la aplicación RoadRoid contempla muchos más parámetros que



la aplicación IRI.Calc.Free y posee una plataforma donde se almacena toda la información, por lo que se recomienda el uso de ésta aplicación.

Finalmente, se puede concluir que el mejor proceso a seguir para determinar la correlación es:

- Calibrar correctamente las aplicaciones de medición de IRI.
- Georreferenciar las mediciones y asignar un correcto abscisado.
- Evaluar el carril donde las condiciones de medición sean las más favorables
- Localizar singularidades y patologías en la vía
- Filtrar mediciones que no cumplan en umbral de velocidad recomendado de 50 a 95 km/h
- Definir el intervalo de medición de 100m
- Correlacionar mediciones entre aplicaciones
- Utilizar la deflexión central para el análisis de correlación con el IRI.
- Diferenciar el comportamiento de la correlación en tramos rectos y sinuosos.
- Implementar la media móvil de orden 10 para definir la tendencia de los datos.
- Determinar la variación de la correlación a lo largo del tiempo, para correlacionar mediciones de IRI y deflexión de la misma fecha.

De esta manera se evidencia que el comportamiento de las deflexiones tiende a estabilizarse debido a que la estructura alcanza un nivel de consolidación, mientras que el IRI tiene un comportamiento creciente con el paso del tiempo debido al deterioro producido por factores como el clima y presencia de fallas, a más de las deflexiones. Esta diferencia de comportamiento se debe a que la deflexión es netamente estructural y el IRI es funcional, ocasionando que la dispersión de datos incremente conforme avanza el tiempo, permitiendo llegar a una relación máxima del 40% entre ambos parámetros.

1.19 Recomendaciones

Luego de realizar este trabajo de titulación, se realizan las siguientes recomendaciones:

1.19.1 En base a la literatura

- Se recomienda verificar que las condiciones del vehículo sean similares en cada medición, como la presión de los neumáticos, estado de la amortiguación, peso del vehículo.
- Es importante que los neumáticos del vehículo estén balanceados, para que el peso del mismo se distribuya uniformemente y así evitar vibraciones que alteren la medición.



- Los ejes delanteros y traseros del vehículo deben estar alineados para que el vehículo siga una trayectoria adecuada.

1.19.2 Mediciones de campo

- Para realizar las mediciones de IRI mediante las aplicaciones RoadRoid o IRI.Calc.Free, utilizar un vehículo de transmisión CVT para evitar cambios bruscos de revoluciones que incrementan las mediciones de IRI debido a las vibraciones producidas.
- Realizar mediciones en horarios en los cuales no existan gran flujo vehicular para poder mantener la velocidad estándar de 80km/h o dentro del umbral de 65-95km/h.
- En lo posible, disponer de un vehículo guía que informe del estado vial kilómetros más adelante y capture la ubicación de puntos singulares como reductores de velocidad y patologías.
- Realizar las mediciones bajo condiciones climáticas similares, es decir, sin lluvia ni excesivo calor, a una misma hora del día.

1.19.3 Recomendaciones de aplicabilidad

- Para la calibración de las aplicaciones, comparar mediciones lo más cercanas para obtener un coeficiente de ajuste lo más exacto posible.
- Georeferenciar y asignar correctamente el abscisado a cada medición mediante un SIG para poder revisar y verificar visualmente la ubicación de los puntos medidos.
- Filtrar puntos singulares y que estén fuera del umbral de velocidad recomendado.
- Realizar mediciones de IRI y deflexiones en la misma fecha, que permitan analizar el desempeño del pavimento y así optimizar el uso del FWD.

1.19.4 Posibles Investigaciones

- Una posible línea de investigación es determinar la variación del IRI en función del diseño geométrico, enfocado en el análisis de los tramos que presentan curvas y contra curvas peraltadas, ocasionando cambios de dirección e inclinación en los equipos de medición.
- Realizar el análisis de correlación entre IRI y deflexión central medida con FWD en vías nuevas que presenten bajos niveles de deflexión y de IRI en la misma fecha, para corroborar que la correlación disminuye con el paso del tiempo e incremento de deterioro.



REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. En *Part 2: Pavement Design Procedures for New Construction or Reconstruction- Serviceability* (págs. 10-12). Washington, D.C.: AASHTO.
- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. En *Part 3: Pavement Design Procedures for Rehabilitation of Existing Pavements- NDT Deflection Measurement* (págs. 28-44). Washington, D.C.: AASHTO.
- Abad, L., & Sangurima, Á. (2018). “*Análisis de Correlación del Desempeño Estructural y Funcional de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal en el tramo Puente Tamarindo - Jesús María*”. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Al-Suleiman, & Shiyab. (2003). Prediction of Pavement Remaining Service Life Using Roughness Data—Case Study in Dubai. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Arriaga, M., Garnica, P., & Rico, A. (1998). Índice de Rugosidad en la red carretera de México. (págs. 8-15). Sanfandila. México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes SCT.
- ASTM D4694. (1996-2003). ASTM: D4694- Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. En A. S. Materials. West Conshohocken: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM D4695. (2003). ASTM D4695: Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. En A. S. Materials. West Conshohocken: ASTM INTERNATIONAL.
- Ávila, E., Albarracín, F., & Bojorque, J. (2015). Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso. *MASKANA*, 149-167.
- Badilla, G. (2009). *Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del índice de Regularidad Internacional (IRI)*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Infraestructura Vial.
- Baldeón, J. (2017). RECOMENDACIONES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN EL TRAMO DEL KILOMETRO 92-93 DE LA VÍA CUENCA-MOLLETURO. *UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL*.
- Bejarano, L. (2015). Análisis estructural de un pavimento flexible con presencia de deterioro por medio de deflexiones obtenidos con equipo de carga dinámica y estática. *Universidad Nacional de Colombia*.



- Beltrán, G. (2012). Análisis de Índices derivados de Pruebas de Deflexión por Impacto para Evaluación de Pavimentos . *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.*
- Bohn, A. O. (2005). The Hystory Of Falling Weight Deflectometer. *Grontmij Pavement Consultants* .
- Burguillo, R. V. (2015, Octubre 28). *Economipedia*. Obtenido de Media Móvil: Indicadores a corto y largo plazo: <https://economipedia.com/definiciones/media-movil.html#:~:text=Las%20medias%20m%C3%B3viles%20son%20indicadores,corto%20medio%20o%20largo%20plazo>.
- Canavos, G. (2001). *Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos*. McGraw-Hill.
- Casia Boza, J. (2015). *Evaluación Estructural de Pavimento Flexible usando el Deflectómetro de Impacto en la Carretera Tarma - La Merced*. Huancayo. Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas . (1998). *Norma NLT-330 Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en Pavimentos de Carreteras*. Madrid, España: CEDEX .
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2021). *CEDEX*. (M. d. Urbana, Editor, & Gobierno de España) Recuperado el 2021, de http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CET/EQUIPAMIENTO/Perfilometro.htm
- Corredor, G., & Corros, M. (2010). Módulo III Diseño de Pavimentos. *Evaluación de Pavimentos*. Managua, Nicaragua: Delegados de la Cámara de Construcción-Universidad Nacional De Ingeniería. Recuperado el 2021, de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/fallas-en-pavimentos1.pdf>
- Corros , M., Urbáez, E., & Corredor, G. (2009). Manual de Evaluación de Pavimentos. *Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Tecnología de la Construcción, Maestría en Vías Terrestres Módulo III, Diseño de Pavimentos I*.
- Devore, J. (2008). Regresion lineal simple y Regresion no lineal. En J. Devore, *Probabilidad y estadística para Ingeniería y Ciencias* (págs. 446-547). México D.F.: Cengage Learning.
- Díaz, P., & Ramírez, D. (2021). Estudio de la Correlación del Índice de Estado "IRI" Índice de Rugosidad Internacional, respecto de la capacidad eestructural del pavimento, específicamente con los cuencos de deflexión para concesiones de cuarta generación "4G". *Universidad Santo Tomás, Maestría en Infraestructura Vial*.



- Dirección de Vialidad de Chile. (2014). *Manual de Carreteras- Mantenimiento Vial* (Vol. No. 7). Chile: Dirección de Vialidad. Recuperado el 2021, de https://portal.ondac.com/601/articles-59862_doc_pdf.pdf
- Escobar Aguirre, K. A., García García, A. A., & Guzmán López, C. R. (2017, Diciembre). Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por Medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer FWD),. *Universidad de el Salvador*. Recuperado el 11 30, 2021
- Federal Highway Administration. (2017, 06 30). *U.S. Department of Transportation*. Recuperado el 10 25, 2021, de Federal Highway Administration: <https://www.fhwa.dot.gov/ohim/hpmsmanl/appe.cfm>
- Feo, M., & Urrego, B. (2013). Correlation between deflections measurements on flexible pavements obtained. *Maskana*, 393-398. Obtenido de http://www.cfms-sols.org/sites/all/lic/pages/download_pdf.php?file=393-398.pdf
- FHWA. (2007, 06 30). *Federal Highway Administration- HPMS Field Manual Appendix E*. Obtenido de FHWA.DOT: <https://www.fhwa.dot.gov/ohim/hpmsmanl/appe.cfm>
- FHWA LTPP. (2006). Falling Weigh Deflectometer Setup. En F. H. Administration, *LTPP- Falling Weigh Deflectometer Measurements* (págs. 9-13). Georgetown: McLean.
- Forslof, L. (2015). *Automated Collection of Road Condition Data with Smarthphones*. Suecia.
- González, D. (2018). Metodologías de Reparación de pavimentos Flexibles de Mediano y Bajo Tránsito- Tesis. *Universidad Andres Bello*, 43-45.
- Google Inc. (2022). Google Earth Information. EEUU.
- Gutiérrez, T., & Arce, M. (2004). *Índice de Regularidad Internacional*. LANAMME. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1347/LM-PI-PV-IN-24a-04%20%20C3%8Dndice%20de%20regularidad%20internacional.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández, J., & Peñaloza, E. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlacion de pearson: definicion de propiedades y suposiciones. *RevistaAVFT*.
- Horak, & Emery. (2009). Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. *ARRB Conference*. Canberra, Australia. Obtenido de <https://trid.trb.org/view/795808>



- Horak, E., Emery, S., & Maina, J. (2015). Review of falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields. *Conference on Asphalt Pavements in Southern Africa (CAPSA)*. Suncity, South Africa. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/276936321_Review_of_falling_Weight_Deflectometer_Deflection_Benchmark_Analysis_on_Roads_and_Airfields_Accepted_for_Conference_on_Aspphalt_Pavements_Southern_African_CAPSA_SunCity_August_2015
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. University of Kentucky: Pearson, 2nd Edition.
- Islam, S., Buttlar, W., Aldunate, R., & Vavrik, W. (2015). *Measurement of Pavement Roughness Using Android-Based Smartphone Application*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board.
- Jelves, E. (2000). *Influencia del diseño geométrico de los pavimentos en el Índice de Rugosidad Internacional (IRI)*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- López, L., & Mendoza, A. (1998). *Evaluación Estructural No Destructiva de Pavimentos*. Sanfandila. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT.
- Madrigal, J. (2017, Septiembre). *Análisis de la Influencia de la Geometría en los Valores de Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio: Universidad de Costa Rica.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2014). *ESTUDIOS DE VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE EVALUACIÓN FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO DEL TRAMO BIBLIÁN - ZHUD DE LA VÍA E35 DE LA PROVINCIA DEL CAÑAR, REALIZADO POR ECUATEST EN EL AÑO 2014*. CUENCA: MTOP.
- Miranda, R. (2010). Deterioros en Pavimentos Flexibles y Rígidos. *Universidad Austral de Chile-Tesis*, 16-34. Recuperado el 2021, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcm672d/doc/bmfcm672d.pdf>
- Moncayo, M. (2020). Procedimiento para determinar el Índice de Rugosidad Internacional con una aplicación móvil el Piura. *Universidad de Piura*, 69-70.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- MOP. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp->



content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf

- MOPC-Rep. Dom. (2016). *Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación*. (L. Simo, & J. Irigoyen, Edits.) Republica Dominicana. Recuperado el 2021, de <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>
- MTOP. (2012). Normativa Ecuatoriana Vial- Volumen 6. En M. d. Públicas, *Índice de Rugosidad Internacional* (págs. 371-375). Quito: MTOP.
- MTOP. (2012). Normativa Ecuatoriana Vial- Volumen 6- Conservación Vial. En Ministerio de Transporte y Obras Públicas, *Capítulo 6.200- Manual de Estudios para Programar Obras de Conservación de Pavimentos* (págs. 316-506). Quito: MTOP.
- MTOP. (2020, Diciembre 10). Medición de la Deflexión FWD en el tramo Cuenca Molleturo Empalme. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- NEVI-12. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial Volumen 2 para Estudios y Diseños Viales*. Ministerio de transporte y Obras Públicas del Ecuador, Subsecretaría de Infraestructura del Transporte, Quito. Recuperado el 11 14, 2021, de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_2A.pdf
- NEVI-12. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial Volumen 3 para Construcción de Caminos y Puentes*. Quito.
- NEVI-12. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial Volumen 6 Conservación Vial*. Quito.
- Nieto, L. (2015). *Manual IRI Android*. Recuperado el Agosto 2021, de Carreteras-laser-escaner: <http://carreteras-laser-escaner.blogspot.com/2015/02/manual-iri-android.html>
- Nieto, L. (2018). *Manual IRI Android (2)*. Recuperado el Agosto 2021, de Carreteras-laser-escaner: <http://carreteras-laser-escaner.blogspot.com/2018/10/manual-iri-android-2.html>
- Pereyra, Y. (2017). *Informe de Rugosidad en Pavimentos*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Escuela de Ingeniería Civil, Sistemas y Arquitectura., Lambayeque. Recuperado el 2021
- Pérez Salazar, A., Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Itandehui, G. E. (2004). *Uso y Calibración de Deflectómetros de Impacto en la Evaluación Estructural de Pavimentos*. Sanfandilla. México, México: Secretaría de Comunicaciones y



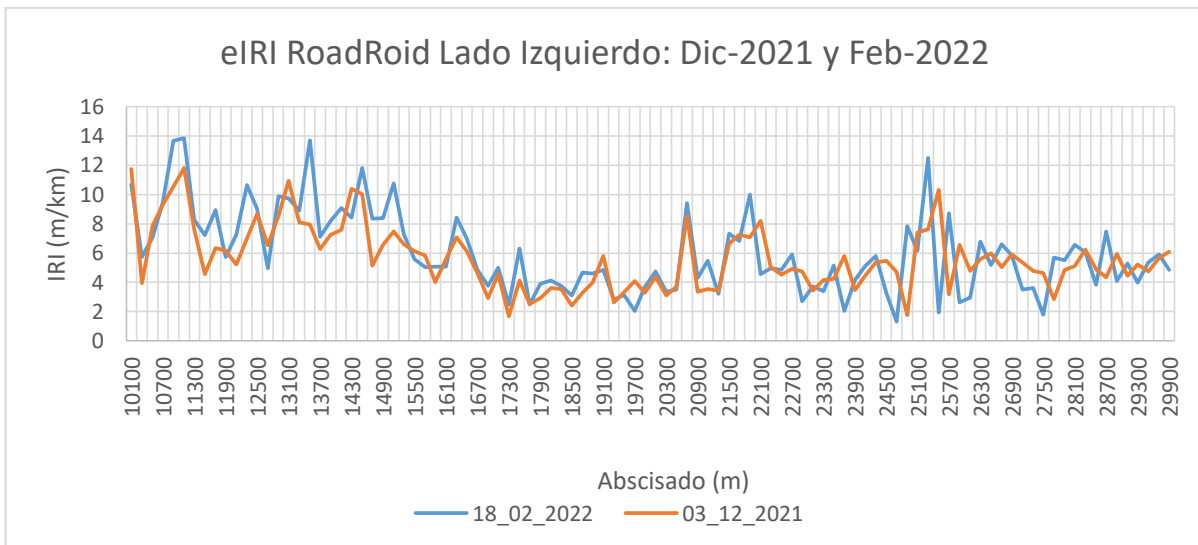
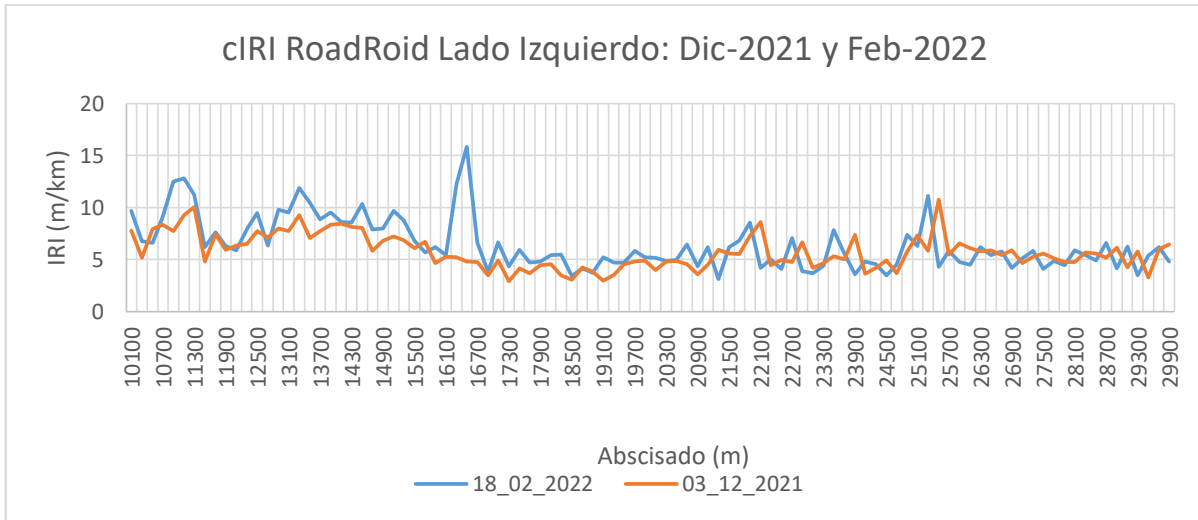
- Transportes SCT. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt252.pdf>
- Putra, D., & Suprpto, M. (2018). Assessment of the road based on PCI and IRI roadroid measurement. *MATEC Web of Conferences*.
- RoadRoid. (2014). *Referencias de Proyectos Roadroid*. Suecia. Obtenido de <https://www.roadroid.com/common/References/Roadroid%20Referencia%20de%20proyectos.pdf>
- Roadroid. (2021). *Road Surveys Using Smarthphones, Essentials for professionals*. Suecia.
- Rodríguez, E., Torres, L., & Villeda, M. (2019). Desarrollo de Metodología para la Medición de IRI mediante el uso de un Rugosímetro basado en el Merlin, para evaluación de Pavimentos Flexibles y Rígidos en el Salvador. *Universidad del Salvador*, 39-62.
- Sánchez, I., & Solminihac, H. (1989). El IRI: un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción N°6*.
- Sánchez, M. C. (2019). *Procedimiento para determinar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) en pavimentos, a partir del procesamiento de imágenes obtenidas por cámaras convencionales*. La Habana: Universidad Tecnológica de la Habana.
- Sayers, M., & Karamihac, S. (1998). *The Little Book of Profiling*. Michigan: University of Michigan.
- Sayers, M., Gillespie, T., & Paterson, W. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibration Road Roughness Measurements*. Washington D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development.
- Sayers, M., Gillespie, T., & Queiroz, C. (1986). *The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*. Washington D.C: World Bank Technical Paper N°45.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte . (2017). *Norma de Conservación de Carreteras. Evaluación de Pavimentos*. Ciudad de México: SCT. Secretaría de Comunicaciones y Transporte .
- Silva, J. (2019). *Evaluación Visual y Estructural del Pavimento Flexible de la Urbanización Los Jardines, Barranca 2017*. Huaraz - Perú: Universidad Santiago Antúnez de Mayolo.
- Solminihac, H., Cabrera, C., & Bengoa, E. (2002, Noviembre 13). Evaluación de la Capacidad Estructural y Funcional del Pavimento durante el Proceso de Construcción. *Provia Chile*.

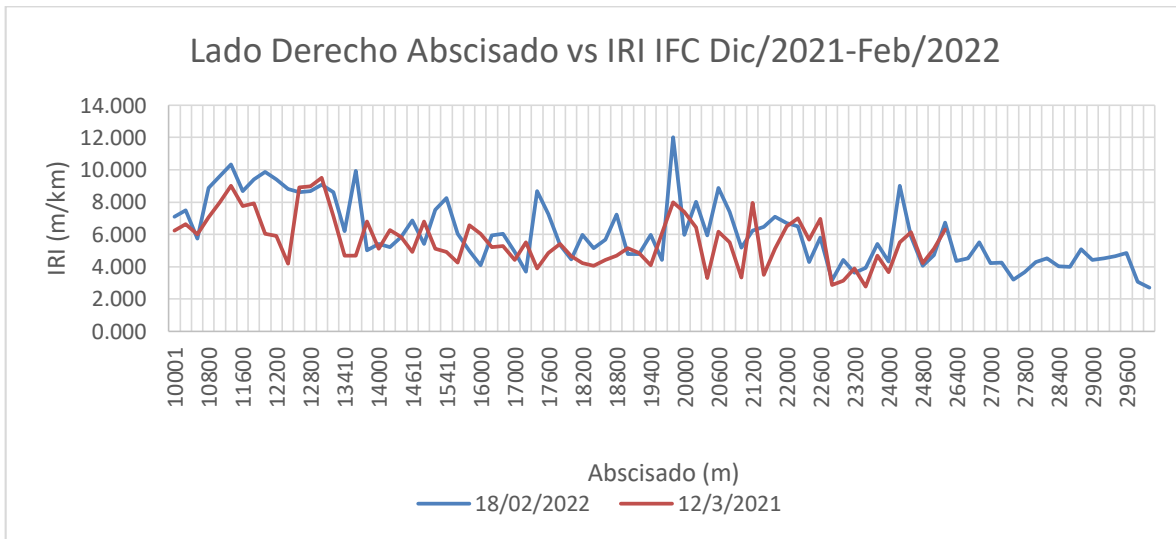
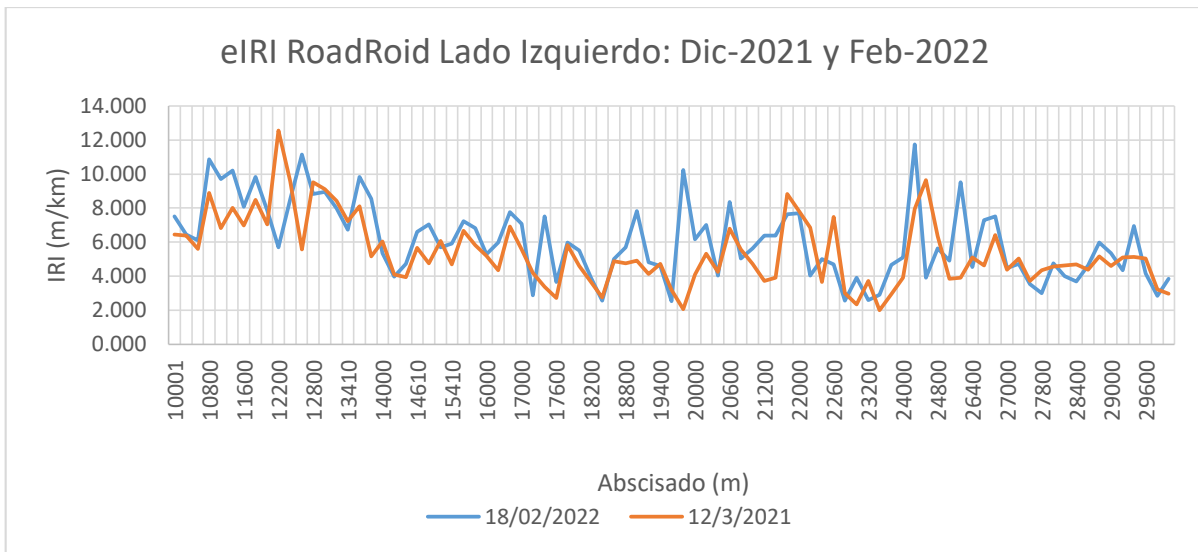
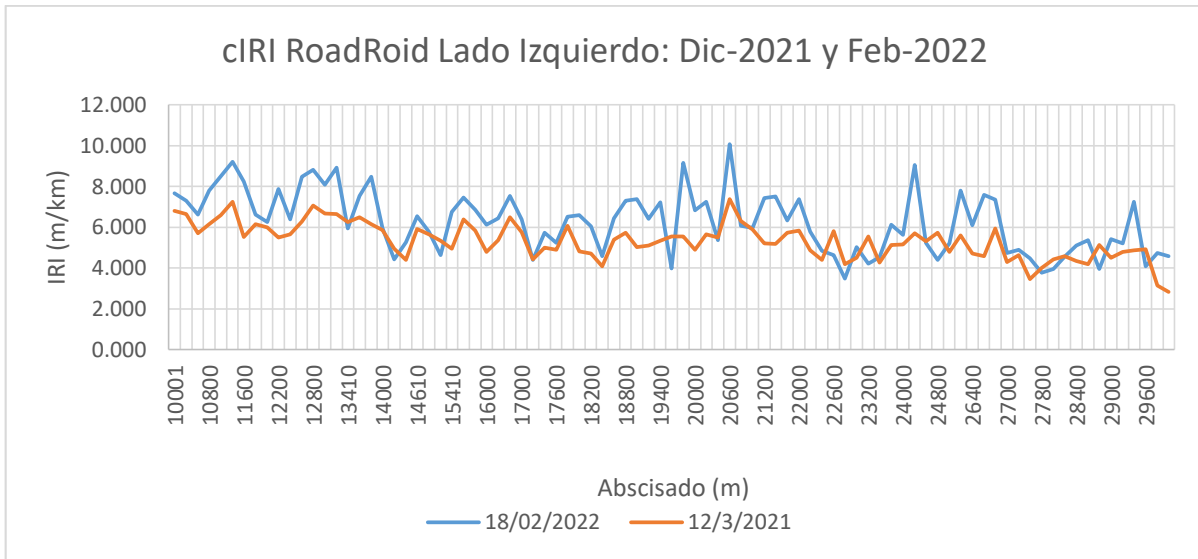


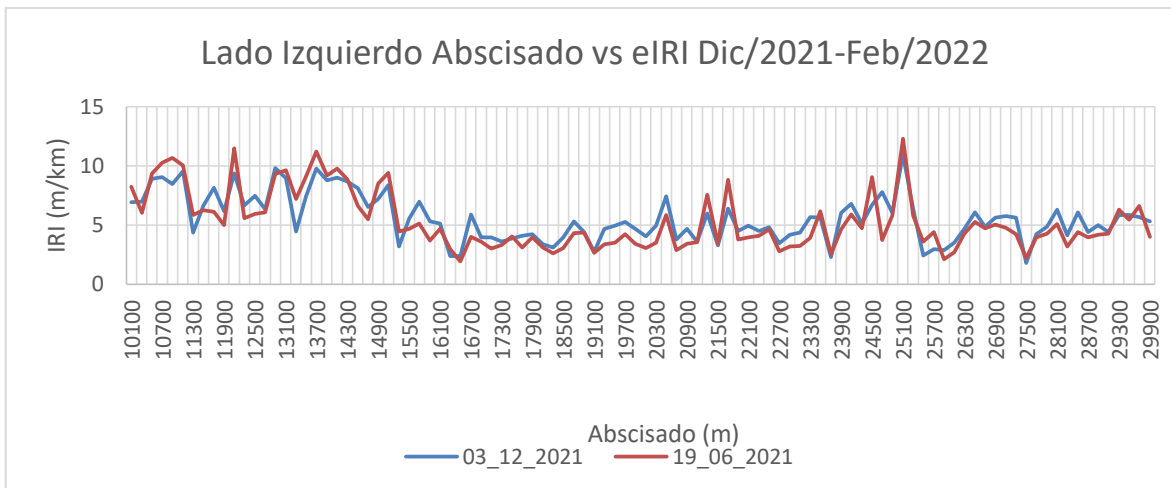
- Ventura Espinal, J. A., & Alvarenga, E. R. (2005). Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). *Ministerio de Obras Públicas, Transporte, y de Vivienda y Desarrollo Urbano*.
- Volkswagen. (2022). *Ficha Técnica T-Cross*. Quito. Obtenido de <https://www.volkswagen.com.ec/es/modelos/t-cross-suv.html>
- Walpole, R., Myres, R., Myers, S., & Le, K. (2012). Correlacion y regresión. En W. Ronald, R. Myres, S. Myers, & K. Le, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (págs. 389-442). Ciudad de México: Pearson.
- Weather-Atlas. (2021, Noviembre 16). *Weather Atlas* . Obtenido de <https://www.weather-atlas.com/es/ecuador/sinincay>
- Xiaomi Global Inc. (2021, Diciembre). *Xiaomi Global*. Obtenido de <https://www.mi.com/global/redmi-note-9-pro>
- Zhañay, W. (2021). *Factor de Corrección de Carga para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos mediante deflectómetro de impacto FWD en la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

ANEXOS

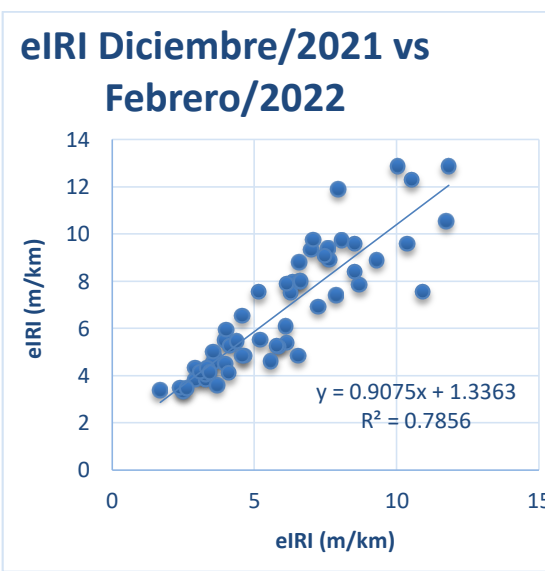
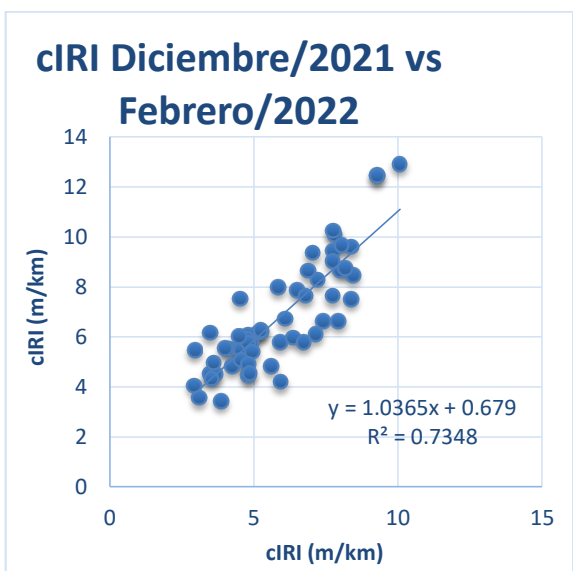
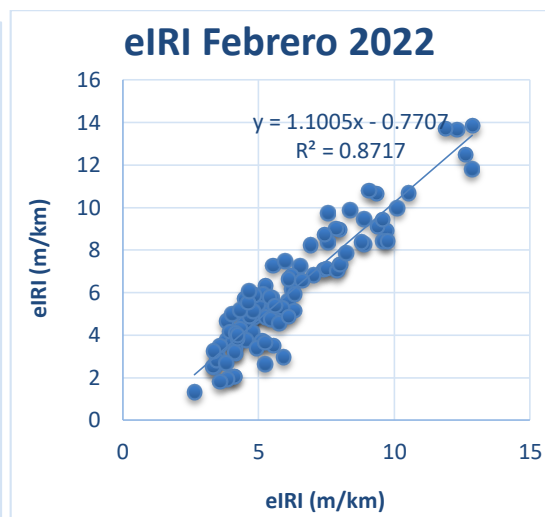
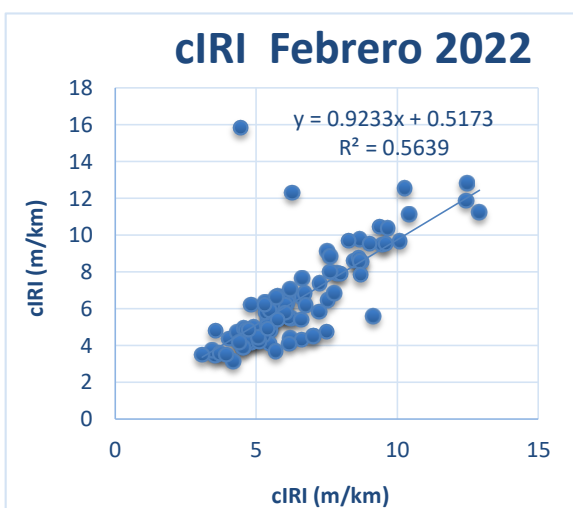
Anexo 1. Perfiles cIRI y eIRI, lado derecho e izquierdo (Roadroid).





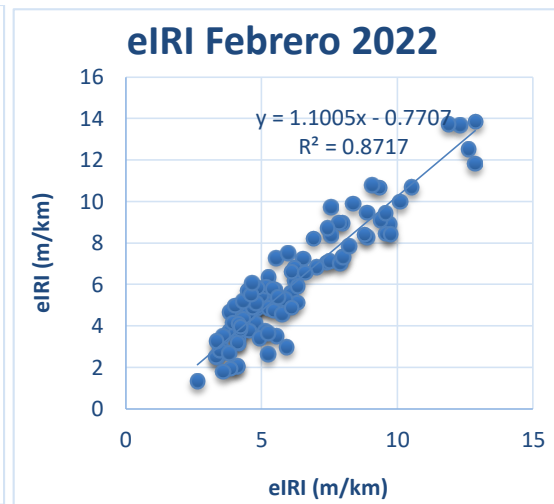
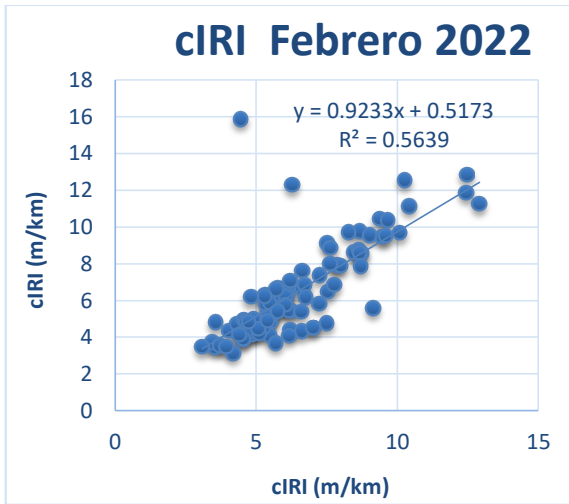


Anexo 2. Graficas punto a punto de la correlación entre cIRIS y eIRIs.

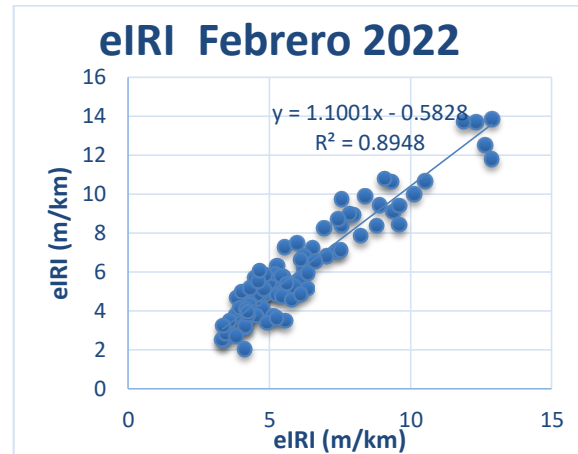
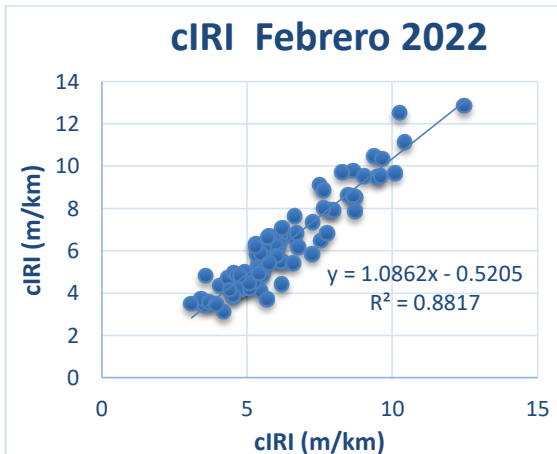


Anexo 3. Gráficas de correlación con cada filtro.

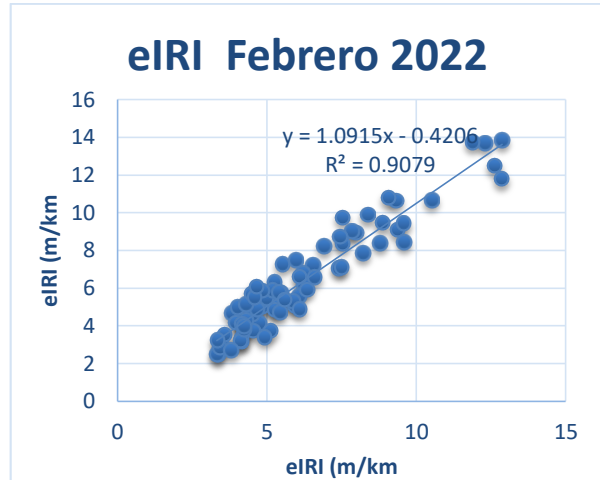
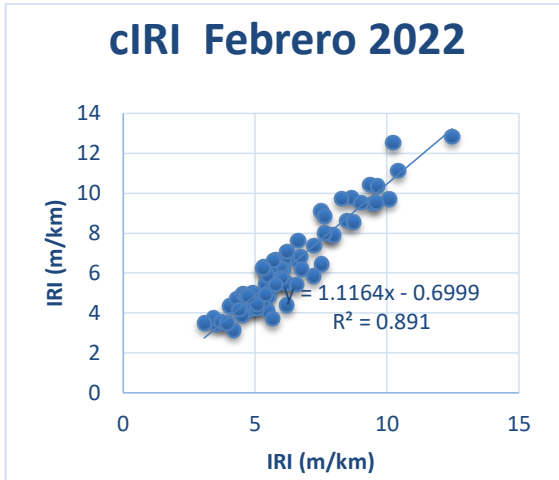
Sin Filtrar



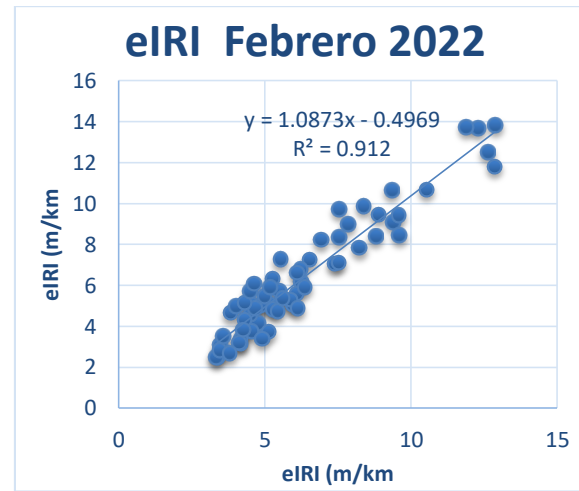
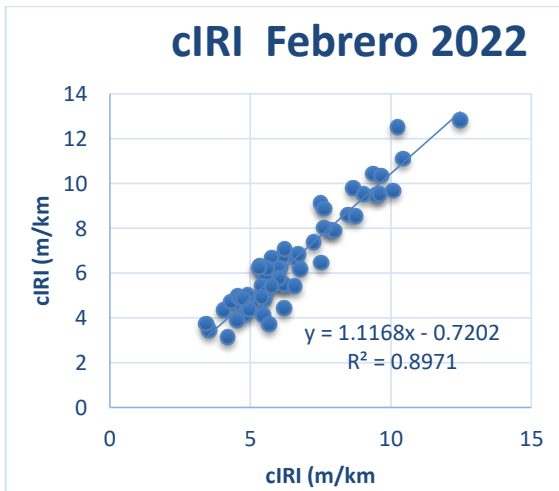
Filtro Puntos Singulares



Filtro Umbral de Velocidad 50km/h – 95km/h



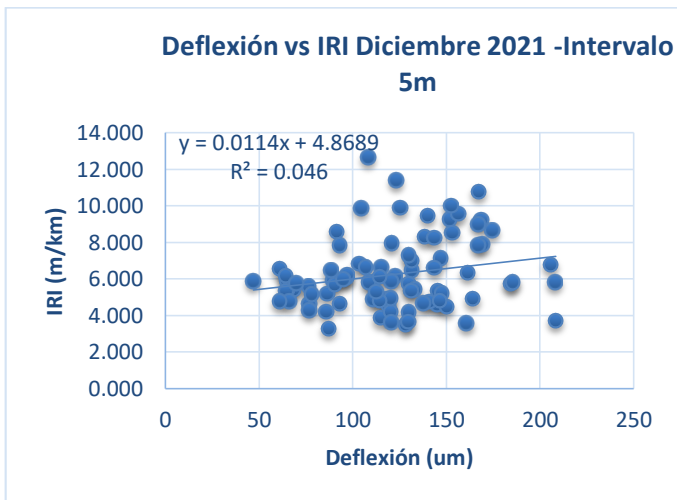
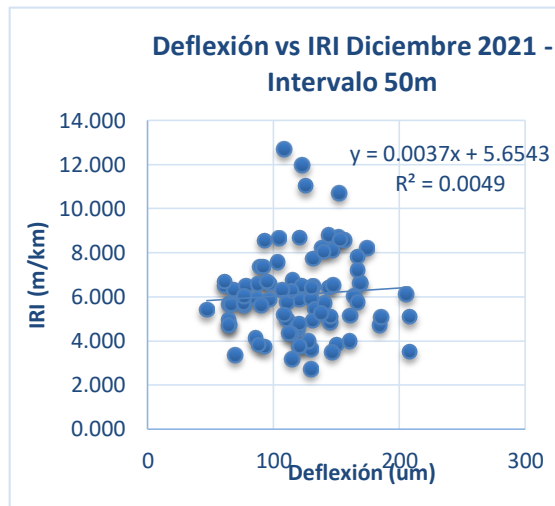
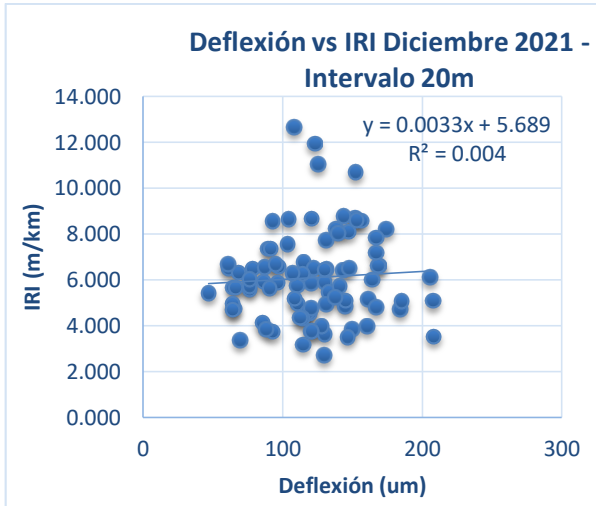
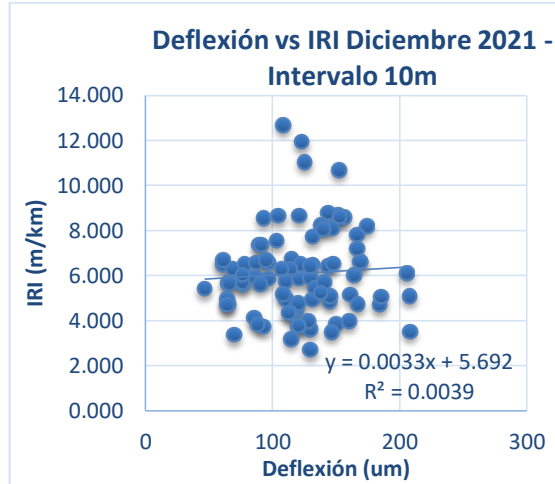
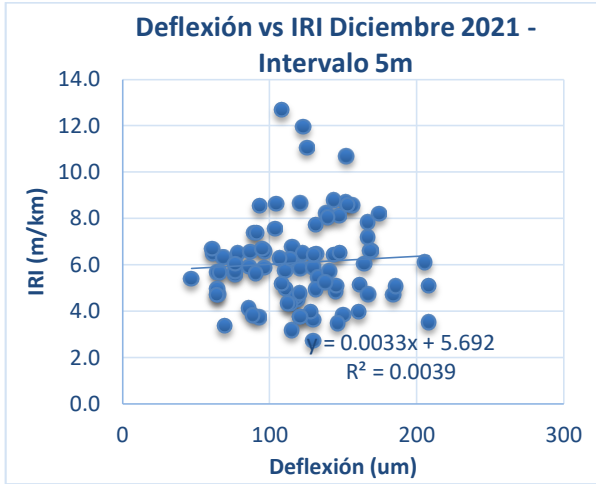
Filtro Umbral de Velocidad 65km/h – 95km/h



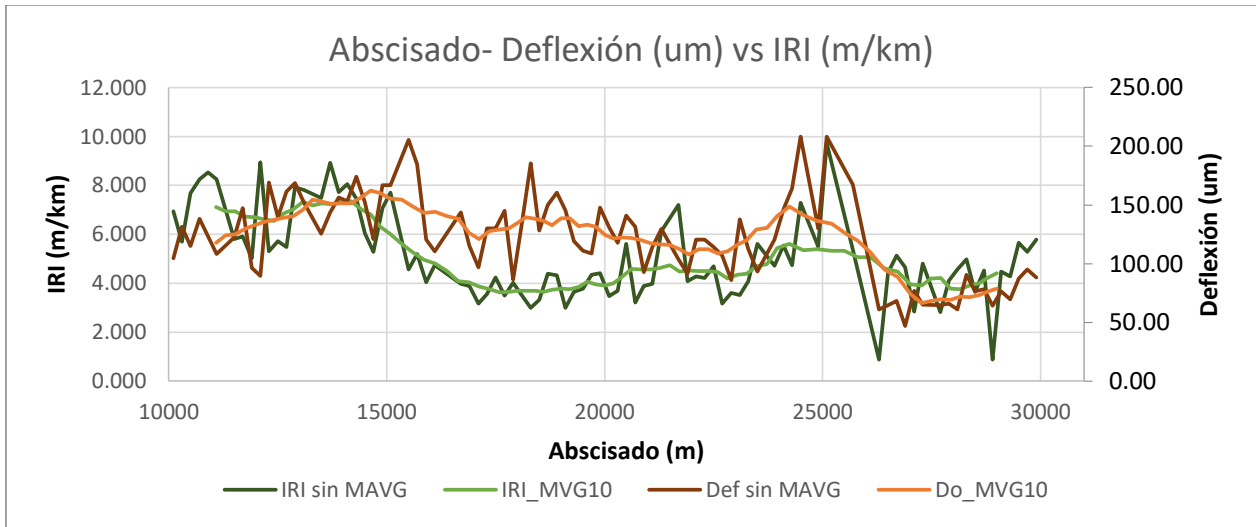
Anexo 4. Tabulación del Coeficiente R² de la correlación Deflexiones vs IRI, a diferentes ubicaciones del geófono.

Ubicación del Geófono (cm)	Coeficiente de correlación lineal R ²		
	Junio 2021	Diciembre 2021	Febrero 2022
0	0.155	0.119	0.046
20	0.153	0.115	0.046
30	0.152	0.113	0.046
60	0.144	0.102	0.044
90	0.135	0.091	0.040
120	0.126	0.076	0.036
150	0.118	0.065	0.030
180	0.107	0.052	0.022
210	0.080	0.034	0.012

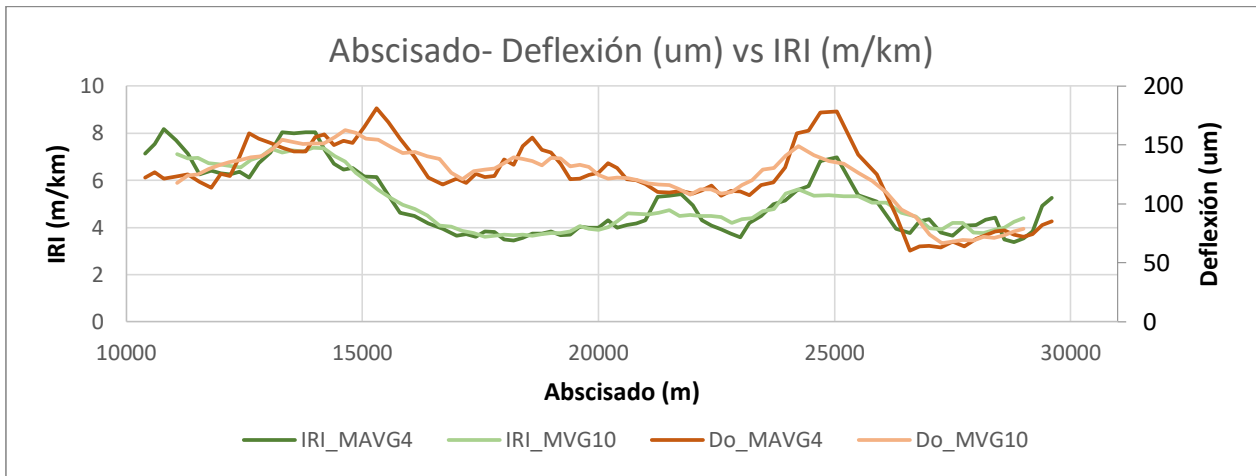
Anexo 5. Intervalo de discretización del IRI vs Coeficiente de Correlación D0 vs IRI.



Anexo 6. Graficas comparativas de la aplicación de distintas medias móviles.



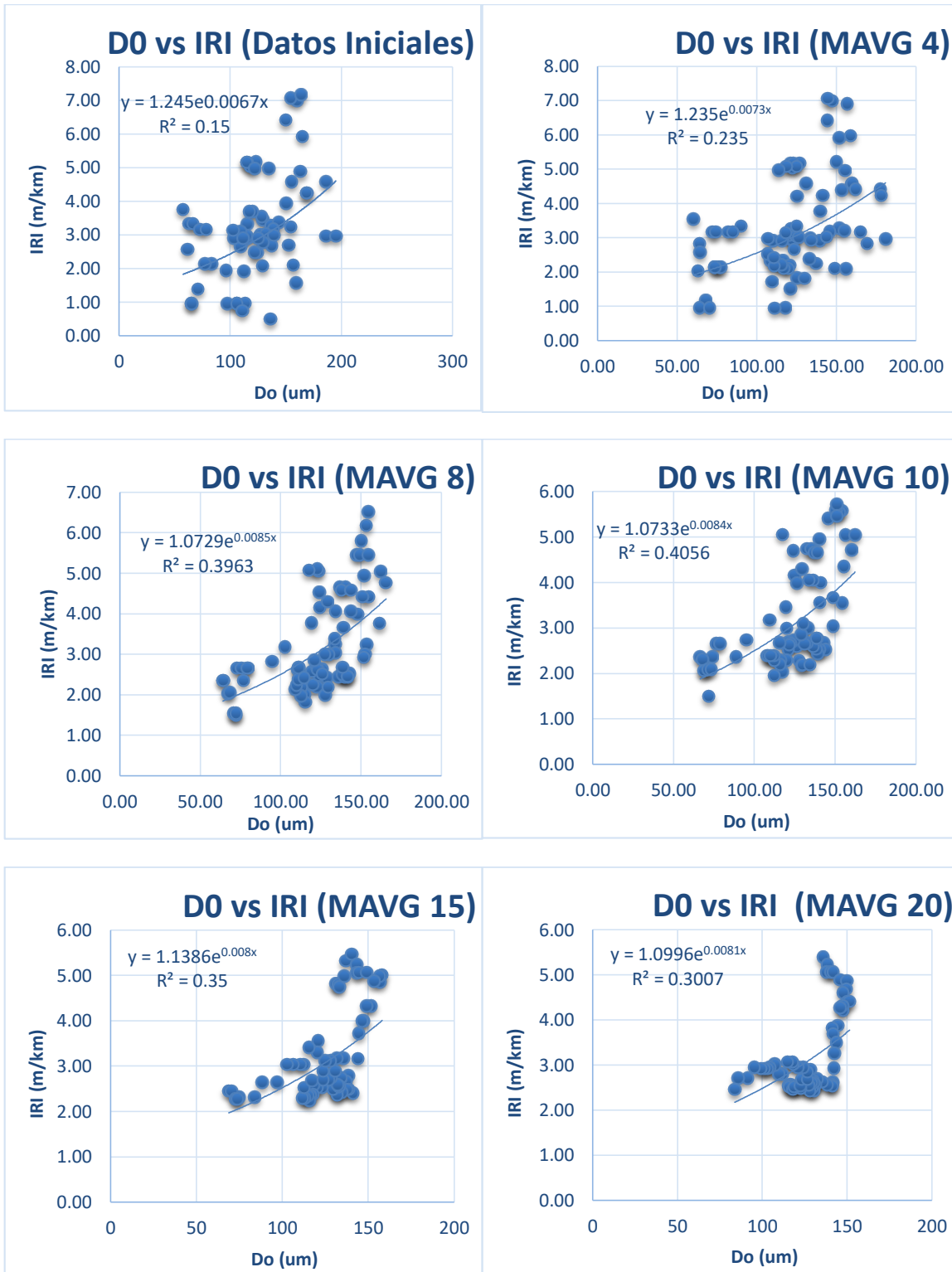
IRI y Deflexiones Centrales sin Moving Average y con Moving Average de orden 10.



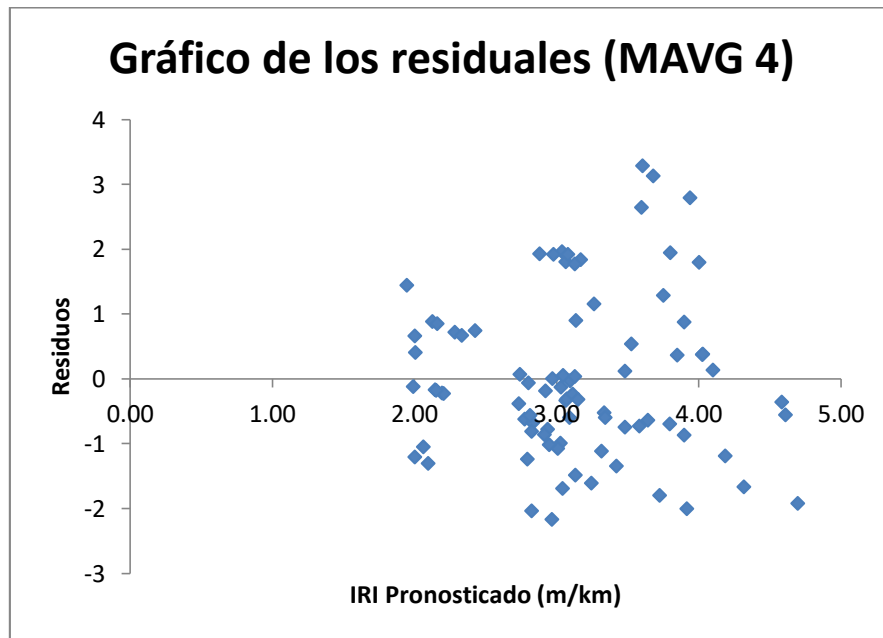
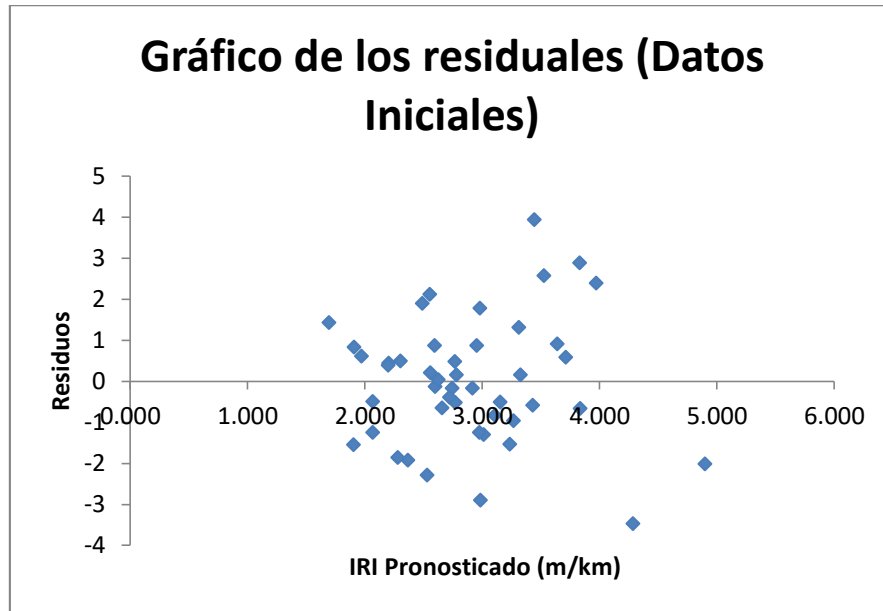
IRI y Deflexiones Centrales con Moving Average de orden 4 y 10.

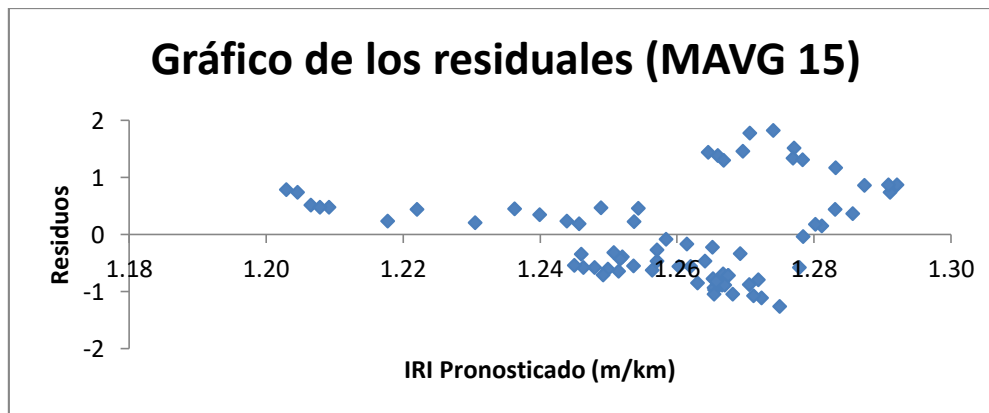
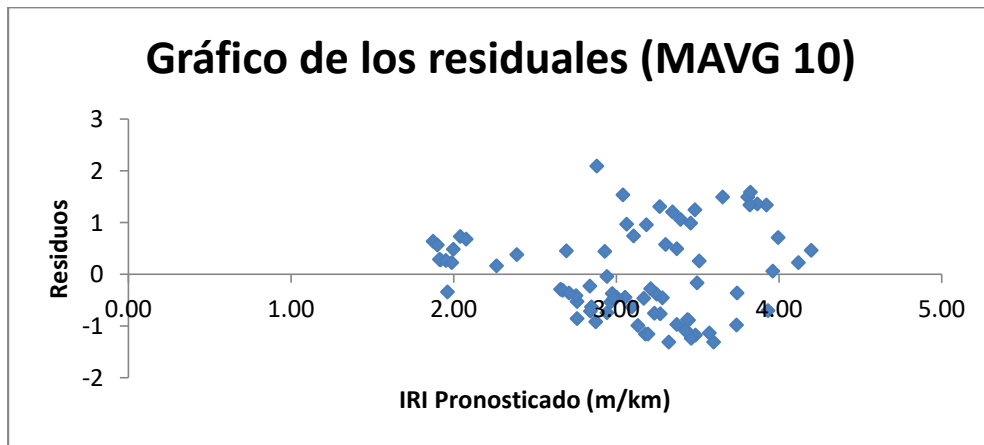
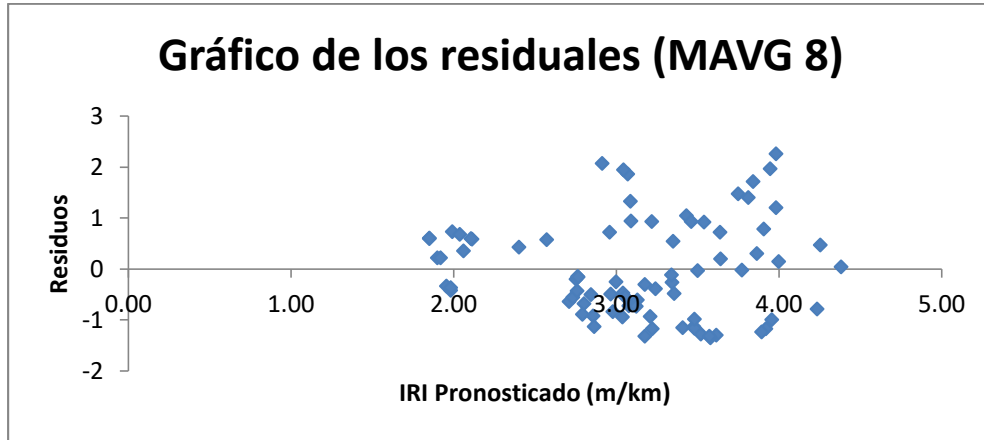


Anexo 7. Coeficientes de correlación Do vs IRI Estimado en Diciembre del 2020



Anexo 8. Gráficas de Residuales para cada Moving Average.







Anexo 9. Gráficos de la Probabilidad Normal del IRI estimado para Diciembre del 2020, con cada Moving Average

