



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN SUPERFICIAL, FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL
DEL PAVIMENTO FLEXIBLE, MEDIANTE PCI, IRI Y
DEFLECTOMETRÍA, EN LA VÍA PLATERÍA – ACORA**

TESIS

PRESENTADA POR:

ALEXANDER EDMUNDO HERMOZA SÁNCHEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN SUPERFICIAL, FUNCIONAL
Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLE
XIBLE, MEDIANTE PCI, IRI Y DEFLECTO
METRÍA, EN LA VÍA PLATERÍA - ACORA**

AUTOR

**ALEXANDER EDMUNDO HERMOZA SÁN
CHEZ**

RECuento DE PALABRAS

37029 Words

RECuento DE CARACTERES

191347 Characters

RECuento DE PÁGINAS

187 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

4.0MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 4, 2024 11:27 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 4, 2024 11:29 AM GMT-5

● 15% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 12% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

Vog^o

04/10/2024

Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910515
SUPERVISOR DE INVESTIGACION
EPL


EMILIO CASTILLO ARONI
INGENIERO CIVIL
CIP. 37174

Resumen



DEDICATORIA

A mis padres, quienes son una motivación constante, su apoyo incondicional y sacrificio son la base de mis logros. Gracias por todas sus enseñanzas, paciencia, esfuerzo, y por creer en mí en todo momento.

A mi hermano, quien me apoya cuando lo requiero, su compañía es fundamental en mi vida.

A mis docentes del colegio Prescott y de la universidad, quienes con su conocimiento, paciencia y dedicación han guiado mi camino académico. A cada uno de ustedes, mi gratitud por compartir su sabiduría y por ser inspiración en este viaje.

Alexander Edmundo Hermoza Sánchez



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar un profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a lo largo de mi desarrollo personal y profesional, de todos he aprendido valiosas lecciones.

En primer lugar, a la Universidad Nacional del altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Civil por su formación profesional.

También quiero agradecer a mi asesor de tesis, Ing. Emilio Castillo Aroni, por su orientación, paciencia y apoyo constante a lo largo de todo el proceso de investigación. Sus enseñanzas fueron mi fuente de motivación al elegir el área del presente proyecto de investigación

También quiero agradecer a mi papá Alexis, mamá Ysela, hermano Diego y abuelo Dario, por su colaboración y apoyo durante la realización de los ensayos de campo, lo que ha permitido obtener datos valiosos para el desarrollo de esta investigación.

Alexander Edmundo Hermoza Sánchez



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	18
ABSTRACT.....	19
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.1. Pregunta General	22
1.2.2. Preguntas Específicas	22
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.3.1. Hipótesis General	23
1.3.2. Hipótesis Específicas	23
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.4.1. Teórica.....	24
1.4.2. Práctica.....	24
1.4.3. Metodológica.....	25
1.4.4. Económica.....	25
1.4.5. Social.....	25



1.4.6. Medioambiental.....	25
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
1.5.1. Objetivo General	26
1.5.2. Objetivos Específicos.....	26
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES.....	27
2.1.1. Antecedentes locales	27
2.1.2. Antecedentes nacionales	29
2.1.3. Antecedentes internacionales	31
2.2. MARCO TEÓRICO	32
2.2.1. Pavimentos	32
2.2.2. Clasificación de los pavimentos.....	32
2.2.2.1. Pavimentos flexibles	32
2.2.2.2. Pavimentos semi – rígidos	33
2.2.2.3. Pavimentos rígidos.....	33
2.2.2.4. Pavimentos articulados	34
2.2.3. Estudios de tráfico.....	35
2.2.3.1. Índice Medio Diario Anual (IMDA).....	35
2.2.3.2. Factor Direccional y Factor Carril	35
2.2.3.3. Crecimiento del tránsito	36
2.2.3.4. Ejes Equivalentes (EE).....	37
2.2.3.5. Factor Vehículo Pesado (F_{VP}).....	39
2.2.3.6. Número de repeticiones de Ejes Equivalentes (EE).....	39
2.2.4. Evaluación superficial de pavimentos.....	40



2.2.4.1. Índice de Condición del Pavimento (PCI)	41
2.2.4.2. Escala de calificación PCI.....	42
2.2.4.3. Fallas en pavimentos asfálticos.....	43
2.2.4.4. Formato de hoja de campo PCI.....	51
2.2.4.5. Cálculo del PCI	53
2.2.5. Evaluación funcional de pavimentos	62
2.2.5.1. Factores funcionales de los pavimentos.....	62
2.2.5.2. Índice de Regularidad Internacional (IRI)	65
2.2.5.3. Escala de regularidad IRI.....	66
2.2.5.4. Rugosímetro MERLIN.....	67
2.2.5.5. Formato de hoja de campo IRI.....	71
2.2.5.6. Cálculo del IRI.....	72
2.2.5.7. IRI característico para el control de calidad de pavimentos	77
2.2.5.8. Índice de Serviciabilidad Presente del Pavimento (PSI).....	79
2.2.5.9. Estimación del IRI y del PSI en vías rehabilitadas	80
2.2.6. Evaluación estructural de pavimentos.....	81
2.2.6.1. Métodos de evaluación estructural.....	81
2.2.6.2. Deflexiones en pavimentos	82
2.2.6.3. Viga Benkelman.....	85
2.2.6.4. Formato de hoja de campo deflectometría.....	88
2.2.6.5. Consideraciones en campo.....	89
2.2.6.6. Cálculo de la deflectometría	92
2.2.6.7. Deflexión característica.....	101
2.2.6.8. Deflexión admisible	102



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	103
3.1.1. Enfoque de investigación	103
3.1.2. Diseño de investigación	103
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	104
3.2.1. Población.....	104
3.2.2. Muestra.....	104
3.2.2.1. Muestreo del PCI	105
3.2.2.2. Muestreo del IRI	106
3.2.2.3. Muestreo de la deflectometría.....	106
3.2.3. Lugar de estudio	107
3.3. VARIABLES	109
3.3.1. Definición conceptual de las variables.....	109
3.3.2. Definición operacional de las variables	109
3.4. PRUEBA ESTADÍSTICA	110
3.4.1. Prueba de normalidad.....	110
3.4.1.1. Prueba de Kolmogorov - Smirnov	110
3.4.1.2. Prueba de Shapiro – Wilk	111
3.4.1.3. Hipótesis y nivel de significancia	111
3.4.2. Análisis Inferencial	112
3.4.2.1. Pruebas paramétricas.....	112
3.4.2.2. Pruebas no paramétricas.....	112
3.5. MATERIALES E INSTRUMENTOS.....	113
3.5.1. Metodología PCI	113



3.5.2.	Parámetro IRI	114
3.5.3.	Deflectometría.....	114
3.6.	RECOLECCIÓN DE DATOS	115
3.6.1.	Metodología PCI	115
3.6.2.	Parámetro IRI	118
3.6.3.	Deflectometría.....	121
3.7.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	125
3.7.1.	Metodología PCI	125
3.7.2.	Parámetro IRI	127
3.7.3.	Deflectometría.....	130

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO	131
4.2.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL	137
4.2.1.	Resumen de resultados PCI.....	137
4.2.2.	Cálculo del PCI de la sección del pavimento.....	138
4.2.3.	Análisis, interpretación y contrastación de resultados PCI.....	139
4.3.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN FUNCIONAL.....	140
4.3.1.	Resumen de resultados IRI.....	140
4.3.2.	Cálculo del IRI característico.....	142
4.3.3.	Cálculo del PSI del pavimento	143
4.3.4.	Análisis, interpretación y contrastación de resultados IRI.....	143
4.4.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.....	145
4.4.1.	Definición de secciones homogéneas.....	145
4.4.2.	Resumen de resultados de deflectometría	149



4.4.3.	Determinación de cuencos característicos	152
4.4.4.	Cálculo de la deflexión característica	153
4.4.5.	Cálculo de la deflexión admisible	153
4.4.6.	Análisis, interpretación y contrastación de resultados deflectometría ..	154
4.5.	IDENTIFICACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO A REALIZAR.....	155
4.6.	PLAN DE MANTENIMIENTO VIAL	157
4.6.1.	Antecedentes e introducción	157
4.6.2.	Objetivos generales y específicos	157
4.6.2.1.	Objetivos generales	157
4.6.2.2.	Objetivos específicos	158
4.6.3.	Estudio de mantenimiento rutinario y periódico:	159
4.6.3.1.	Mantenimiento vial	159
4.6.3.2.	Mantenimiento rutinario	160
4.6.3.3.	Mantenimiento periódico	160
4.6.4.	Actividades de emergencia	161
4.6.5.	Evaluación de medio ambiente	161
4.6.6.	Programa de mantenimiento rutinario, periódico y actividades de emergencia	162
4.6.6.1.	Actividades de mantenimiento rutinario	162
4.6.6.2.	Actividades de mantenimiento periódico.....	163
4.6.7.	Presupuesto de las actividades de mantenimiento vial	164
4.6.7.1.	Actividades de mantenimiento rutinario	164
4.6.7.2.	Actividades de mantenimiento periódico.....	165



4.6.7.3. Resumen de presupuesto de las actividades de mantenimiento vial.....	168
4.7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO VIAL ..	168
4.8. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICA	169
4.8.1. Prueba de normalidad.....	169
4.8.2. Pruebas no paramétricas.....	170
4.8.2.1. Comparación de la deflexión máxima con el PCI.....	170
4.8.2.2. Comparación de la deflexión máxima con el IRI	171
4.9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	172
4.9.1. Evaluación superficial	172
4.9.2. Evaluación funcional.....	173
4.9.3. Evaluación estructural	174
V. CONCLUSIONES.....	176
VI. RECOMENDACIONES	178
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	180
ANEXOS.....	185

TEMA: Evaluación De Pavimentos

ÁREA: Transportes

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 10 de octubre de 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factores de distribución Direccional y de Carril	36
Tabla 2 Configuración de ejes	37
Tabla 3 Relación de cargas por eje y Ejes Equivalentes (EE) en pavimentos flexibles	38
Tabla 4 Rango de Clasificación del PCI	42
Tabla 5 Longitudes de unidades de muestreo en pavimentos asfálticos	53
Tabla 6 Calificación según el ahuellamiento	64
Tabla 7 Rugosidad Característica según el tipo de carretera. Pavimentos asfálticos	78
Tabla 8 Distancia de ensayo desde el borde del pavimento.....	89
Tabla 9 Coeficientes de correlación para el cálculo de R5	94
Tabla 10 Coeficientes de correlación para el cálculo de L0	95
Tabla 11 Deflexión Característica según el tipo de carretera	101
Tabla 12 Tipo y cantidad de ensayos a realizar	107
Tabla 13 Coordenadas de inicio y fin de la vía.....	108
Tabla 14 Definición conceptual de las variables	109
Tabla 15 Definición operacional de la variable 1	109
Tabla 16 Definición operacional de la variable 2	110
Tabla 17 Hoja de campo PCI. Unidad de muestreo aleatoria 1	116
Tabla 18 Hoja de campo IRI. Tramo 1 del carril derecho	120
Tabla 19 Hoja de campo deflectometría. Primeras mediciones del Tramo 1	124
Tabla 20 Cálculo de Valores Deducidos (VD). Unidad de muestreo 1	126
Tabla 21 Cálculo de Valores Deducidos Corregidos (VDC). Unidad de muestreo 1	126



Tabla 22	Histograma de frecuencias. Tramo 1 del carril derecho	127
Tabla 23	Mediciones del espesor de la pastilla de calibración	129
Tabla 24	Cálculo del Índice Medio Diario Anual (IMDA)	133
Tabla 25	Cálculo de los ejes equivalentes (EE). Parte 1	134
Tabla 26	Cálculo de los ejes equivalentes (EE). Parte 2.....	135
Tabla 27	Resumen de resultados PCI. Unidades de muestreo aleatorias.....	137
Tabla 28	Resumen de resultados PCI. Unidad de muestreo adicional.....	137
Tabla 29	Resumen de resultados IRI	140
Tabla 30	Definición de secciones homogéneas. Método de Diferencias Acumuladas. Tramo 1	145
Tabla 31	Definición de secciones homogéneas. Método de Diferencias Acumuladas. Tramo 2	146
Tabla 32	Definición de secciones homogéneas. Método de Diferencias Acumuladas. Tramo 3	147
Tabla 33	Resumen de resultados deflectometría. Parte 1	149
Tabla 34	Resumen de resultados deflectometría. Parte 2	150
Tabla 35	Zonas de mantenimiento y rehabilitación, y metodología PCI.....	155
Tabla 36	Prueba de normalidad de Kolmogorov - Smirnov	169
Tabla 37	Prueba de Kruskal – Wallis entre la deflexión máxima y PCI	170
Tabla 38	Prueba de Kruskal – Wallis entre la deflexión máxima e IRI.....	171



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Sección típica de un pavimento flexible.....	33
Figura 2 Sección típica de un pavimento rígido	34
Figura 3 Sección típica de un pavimento articulado.....	34
Figura 4 Escala de condición del pavimento	42
Figura 5 Formato de hoja de campo PCI	52
Figura 6 Unidades de muestreo en una sección del pavimento	54
Figura 7 Número mínimo de unidades de muestreo por evaluar	55
Figura 8 Intervalo de las unidades de muestreo.....	56
Figura 9 Escala de regularidad IRI	66
Figura 10 Esquema del rugosímetro MERLIN.....	68
Figura 11 Medición de las desviaciones respecto de la cuerda promedio	69
Figura 12 Escala gráfica de desplazamientos	70
Figura 13 Formato de hoja de campo IRI	71
Figura 14 Histograma de distribución de frecuencias.....	72
Figura 15 Escala de Índice de Serviciabilidad.....	80
Figura 16 Significado cualitativo de diferentes cuencos de deflexiones	83
Figura 17 Esquema del Modelo de Hogg	84
Figura 18 Viga Benkelman	86
Figura 19 Formato de hoja de campo deflectometría	88
Figura 20 Configuración geométrica del sistema de carga con Viga Benkelman	89
Figura 21 Posición inicial de medición con la viga Benkelman.....	90
Figura 22 Proceso de medición con la Viga Benkelman	91
Figura 23 Unidades de muestreo evaluadas PCI.....	106



Figura 24	Vista satelital de la vía evaluada	108
Figura 25	Medición con el odómetro manual	117
Figura 26	Medición de fallas presentes en el pavimento	117
Figura 27	Proceso de medición con el rugosímetro MERLIN	119
Figura 28	Medición de regularidades en el pavimento	121
Figura 29	Ubicación del punto de medición	122
Figura 30	Medición de deflexiones con la Viga Benkelman	123
Figura 31	Cálculo del Valor Deducido (VD). Falla piel de cocodrilo - UM 1	125
Figura 32	Histograma de frecuencias. Tramo 1 del carril derecho	128
Figura 33	Resumen de valores PCI	138
Figura 34	Resumen de valores IRI. Carril derecho	141
Figura 35	Resumen de valores IRI. Carril izquierdo	141
Figura 36	Secciones homogéneas del pavimento	148
Figura 37	Resumen de valores deflectometría. Carril derecho	151
Figura 38	Resumen de valores deflectometría. Carril izquierdo	151
Figura 39	Cuenco característico del carril derecho	152
Figura 40	Cuenco característico del carril izquierdo	152
Figura 41	ACU de la partida limpieza de calzada y bermas	164
Figura 42	ACU de la partida nivelación de bermas con material granular	165
Figura 43	ACU de la partida recapeo asfáltico	166
Figura 44	ACU de la partida fresado asfáltico	166
Figura 45	ACU de la partida reciclado asfáltico	167
Figura 46	Presupuesto de mantenimiento vial	168
Figura 47	Cronograma de mantenimiento vial	168



ACRÓNIMOS

AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte.
ASF.:	Asfalto.
ASTM:	American Society for Testing and Materials o Sociedad Americana para Ensayos y Materiales.
Av.:	Avenida.
CDV:	Corrected Deducted Value o Valor Deducido Corregido.
CONREVIAl:	Consortio de Rehabilitación Vial.
DT:	Destructive Testing o Evaluación Estructural Destructiva.
EE:	Ejes Equivalentes.
ESAL:	Equivalent Single Axle Load of 18-kip o 80-kN o 8.2 t o Eje Equivalente de Carga Simple de 18-kip o 80-kN o 8.2 t.
F.C.:	Factor de Corrección.
Fc:	Factor Carril.
Fca:	Factor de Crecimiento Acumulado.
Fd:	Factor Direccional.
Fp:	Factor de ajuste por Presión de neumáticos.
FREC.:	Frecuencia.
Fvp:	Factor Vehículo Pesado.
FWD:	Falling Weight Deflectometer o Deflectómetro de Impacto.
H:	High o alto, en referencia a un nivel de severidad de fallas.
HDV:	Higher Deducted Value o Mayor Valor Deducido.
ICB:	Índice de Curvatura de la Base
ICS:	Índice de Curvatura Superficial.
IDB:	Índice de Daño de la Base.
IMDA:	Índice Medio Diario Anual.
INTERV.:	Intervalo.
IRI:	International Roughness Index o Índice de Regularidad Internacional.
L:	Low o bajo, en referencia a un nivel de severidad de fallas.



M:	Medium o medio, en referencia a un nivel de severidad de fallas.
MERLIN:	Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation o Máquina para Evaluar la Rugosidad con Instrumentos de Bajo Coste.
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.
N.S.:	Nivel de Severidad.
NDT:	Nondestructive Testing o Evaluación Estructural No Destructiva.
OCDE:	Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos.
PCI:	Pavement Condition Index o Índice de Condición de Pavimento.
PBI:	Producto Bruto Interno.
PSI:	Present Serviciability Index o Índice de Serviciabilidad Presente.
RC:	Radio de Curvatura.
RD:	Rueda Doble.
RS:	Rueda Simple.
SUP.:	Superficie.
UM:	Unidad de Muestreo.
URCI:	Unsurfaced Roads Condition Index o Índice de Condición de Carreteras No Pavimentadas.
UTM:	Universal Transverse Mercator.
VD:	Valores Deducidos.
VDT:	Valor Deducido Total.



RESUMEN

La infraestructura vial es muy importante para el desarrollo de las ciudades y es indispensable en el desarrollo económico y social. Sin embargo; muchas vías están en mal estado debido a la falta de mantenimiento. Focalizándonos en el ámbito local, la vía Platería – Acora, ha mostrado signos significativos de deterioro. Por tal motivo, el propósito de esta investigación fue evaluar el estado superficial, funcional y estructural del pavimento flexible de dicha vía. Se realizó una evaluación superficial del pavimento según la metodología del Índice de Condición de Pavimento (PCI), una evaluación funcional según el parámetro del Índice de Regularidad Internacional (IRI) empleando el rugosímetro Merlín y una evaluación estructural mediante el ensayo de deflectometría empleando la viga Benkelman. Metodológicamente, se planteó un enfoque de investigación cuantitativo, con un diseño de investigación no experimental. Se obtuvo, respecto a la metodología PCI que el pavimento se encuentra “GRAVE”, con un valor de 10.44; además, se obtuvo un IRI característico de 8.36 m/km en el carril derecho y 9.19 m/km en el carril izquierdo, valores que son superiores al IRI durante el periodo de servicio para una “carretera de primera clase”, el cual es de 4 m/km; y se obtuvo una deflexión característica de 78.81×10^{-2} mm en el carril derecho y 92.16×10^{-2} mm en el carril izquierdo, dichos valores son superiores a la deflexión admisible, 55×10^{-2} mm. Finalmente, se propusieron actividades de mantenimiento vial: limpieza de calzada y bermas, y nivelación de bermas con material granular, respecto al mantenimiento rutinario; recapeo, fresado y reciclado asfáltico, respecto al mantenimiento periódico.

Palabras clave: Deflectometría, Deterioro, Evaluación de pavimentos, Índice de Condición del Pavimento, Índice de Regularidad Internacional, Mantenimiento, Pavimento flexible.



ABSTRACT

Road infrastructure is very important for the development of cities and is indispensable for economic and social development. However, many roads are in poor condition due to lack of maintenance. Focusing on the local level, the Platería - Acora road has shown significant signs of deterioration. Therefore, the purpose of this research was to evaluate the surface, functional and structural condition of the flexible pavement of this road. A surface evaluation of the pavement was performed according to the Pavement Condition Index (PCI) methodology, a functional evaluation according to the International Roughness Index (IRI) parameter using the Merlin roughness tester and a structural evaluation by means of the deflectometry test using the Benkelman beam. Methodologically, a quantitative research approach was used, with a non-experimental research design. It was obtained, with respect to the PCI methodology that the pavement is "SEVERE", with a value of 10.44; in addition, a characteristic IRI of 8.36 m/km was obtained in the right lane and 9.19 m/km in the left lane, values that are higher than the IRI during the service period for a "first class road", which is 4 m/km; and a characteristic deflection of 78.81×10^{-2} mm in the right lane and 92.16×10^{-2} mm in the left lane were obtained, these values are higher than the admissible deflection, 55×10^{-2} mm. Finally, road maintenance activities were proposed: cleaning of the roadway and berms, and leveling of berms with granular material, for routine maintenance; and re-striping, milling and asphalt recycling, for periodic maintenance.

Keywords: Deflectometry, Deterioration, Pavement Evaluation, Pavement Condition Index, International Roughness Index, Maintenance, Flexible pavement.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La infraestructura de carreteras es fundamental para el progreso tanto regional como nacional, ya que ofrece múltiples ventajas tanto económicas como sociales.

Las vías conectan pueblos y regiones permitiendo a las personas desplazarse a sus centros de trabajo, visitar familiares y/o amigos, participar en actividades sociales, acceder a servicios de emergencia y educación, entre otros. Además, las vías mediante el transporte de diversos productos facilitan el comercio. Todo ello impulsa el crecimiento económico de la región y el país. Según un informe del Banco Mundial, cada dólar invertido en infraestructura vial puede generar hasta 2,5 dólares en beneficios económicos indirectos. (Queiroz & Gautam, 1992). Sin embargo, el estado de las vías es crucial para maximizar estos beneficios.

A nivel mundial, el deterioro de la infraestructura vial es un desafío significativo. La Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) estima que el costo del mantenimiento deficiente de las carreteras asciende a miles de millones de dólares cada año, afectando negativamente a la economía global y a la calidad de vida de las personas. Además, las malas condiciones de las carreteras son responsables de aproximadamente 1,35 millones de muertes por accidentes de tráfico anualmente. (OMS, 2018).

En el contexto nacional, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ha señalado que el 60% de las carreteras se encuentran en estado regular o malo, lo que impacta negativamente en el comercio y el turismo. (MTC, 2021). Las deficiencias en la



infraestructura vial también limitan el acceso a servicios esenciales como la educación y la salud, especialmente en zonas rurales.

A nivel regional, la situación no es diferente. En la región sur del Perú, la infraestructura vial es fundamental para conectar pueblos y facilitar el comercio. Sin embargo, muchas vías están en mal estado debido a la falta de mantenimiento adecuado. Un estudio realizado por el Instituto Peruano de Economía (IPE) indica que las regiones del sur del país pierden aproximadamente 200 millones de soles anuales debido a la mala calidad de sus carreteras. Esto no solo afecta el crecimiento económico, sino que también limita el acceso a oportunidades laborales y servicios básicos.

Focalizándonos en el ámbito local, la vía Platería – Acora es una de las vías más importantes del sur del Perú, conectando diversas comunidades y facilitando el comercio regional. No obstante, esta vía ha mostrado signos significativos de deterioro. La falta de mantenimiento periódico y/o rutinario ha resultado en fallas estructurales, funcionales y superficiales que no solo afectan la seguridad y comodidad de los usuarios, sino que también incrementan los costos de transporte debido a mayores tiempos de viaje y consumo de combustible. Según un informe del Gobierno Regional de Puno, el mal estado de esta vía ha reducido el flujo de turistas en un 15% en los últimos cinco años. Se puede deducir que una adecuada gestión y mantenimiento de las vías es crucial para el desarrollo sostenible.

Es por ello que, es importante y necesario realizar mantenimiento periódico y/o rutinario en las diversas vías, para prevenir o corregir algunas fallas y así prolongar la vía útil de dichas vías. Una vía en buen estado permite un flujo de tránsito más rápido, ahorrando tiempo y combustible, también impulsa el turismo y promueve el comercio. Una vía en buenas condiciones brinda comodidad y seguridad a la población.



Pero antes de determinar las actividades necesarias de mantenimiento vial, es necesario determinar la condición actual de la vía. Por esta razón, en el proyecto actual se evaluó la condición del pavimento en la carretera Platería – Acora, una de las más relevantes en el sur del país. Se analizaron el estado superficial, funcional y estructural del pavimento flexible utilizando las metodologías PCI, IRI y el ensayo de deflectometría, respectivamente.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Pregunta General

- ¿Cuál es el estado superficial, funcional y estructural del pavimento flexible en la vía Platería – Acora, según la metodología PCI, IRI y el ensayo de deflectometría, respectivamente; y cuáles serán las actividades necesarias de mantenimiento vial?

1.2.2. Preguntas Específicas

- ¿Cuál es el estado superficial del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI)?
- ¿Cuál es el estado funcional del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el parámetro del Índice de Regularidad Internacional (IRI)?
- ¿Cuál es el estado estructural del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el ensayo de deflectometría, empleando la viga Benkelman?
- ¿Cuáles serán las actividades necesarias de mantenimiento vial del pavimento flexible en la vía Platería – Acora?



1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis General

- El estado superficial, funcional y estructural del pavimento flexible en la vía Platería – Acora, según la metodología PCI, IRI y el ensayo de deflectometría, respectivamente, no cumplirá con los parámetros establecidos para dicha vía; y se establecerán las actividades necesarias de mantenimiento vial.

1.3.2. Hipótesis Específicas

- El estado superficial del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI) será “REGULAR”.
- El estado funcional del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el parámetro del Índice de Regularidad Internacional (IRI), presentará rugosidades promedio mayores a la rugosidad característica, que para una “carretera de primera clase” es 4 m/km, durante el periodo de servicio.
- El estado estructural del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el ensayo de deflectometría, empleando la viga Benkelman, presentará deflexiones características menores a las deflexiones admisibles, que se estima que será un valor próximo a 50×10^{-2} mm.
- Las actividades necesarias de mantenimiento vial del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, serán: reparaciones por carpeta asfáltica con mezcla en caliente y rehabilitación parcial.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La realidad problemática actual de la vía Platería – Acora es que se encuentra en mal estado, lo que ocasiona accidentes de tránsito, incremento de la congestión vehicular, daños a los vehículos, pérdidas económicas, entre otros. Estas dificultades subrayan la necesidad de una evaluación integral del pavimento flexible, considerando su estado superficial, funcional y estructural del pavimento flexible en la vía Platería - Acora; lo que se realizó en la presente investigación.

1.4.1. Teórica

Desde un punto de vista teórico, el presente proyecto llena un vacío de conocimiento; puesto que, el estudio se fundamenta en principios de la ingeniería civil y del transporte, aplicando técnicas de evaluación de pavimentos que permiten determinar con precisión las necesidades de mantenimiento en un lugar (vía Platería – Acora) y tiempo (año 2024) determinados.

1.4.2. Práctica

Desde un punto de vista práctico, el estudio se centra en la aplicación de metodologías específicas para la evaluación de pavimentos flexibles. Las diversas fallas localizadas en la vía evaluada, se clasifican según su nivel de severidad. Esta información, junto con el valor de las regularidades y las deflexiones son esenciales para la elaboración de un plan de mantenimiento.

La importancia de esta tesis incluye que se ejecute el plan de mantenimiento vial, para prevenir daños mayores en la vía Platería – Acora.



1.4.3. Metodológica

Metodológicamente, se emplearon herramientas y procedimientos estandarizados, como inspecciones visuales, ensayos de campo y análisis de datos, garantizando la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos.

1.4.4. Económica

Económicamente, este proyecto tiene una relevancia significativa, ya que una vía en buen estado contribuye a reducir los costos operativos de los vehículos, disminuye el gasto en reparaciones y mejora la eficiencia del transporte de bienes y personas. Además, un mantenimiento adecuado de la vía puede prevenir costosos proyectos de rehabilitación futura, optimizando así el uso de los recursos públicos.

1.4.5. Social

Desde una perspectiva social, mejorar la vía Platería – Acora incrementará la seguridad vial, reduciendo el riesgo de accidentes y mejorando la calidad de vida de los habitantes de la región. Esto también facilitará el acceso a servicios básicos y fomentará la cohesión social, al permitir una movilidad más segura y eficiente.

1.4.6. Medioambiental

Medioambientalmente, un pavimento bien mantenido reduce el impacto negativo sobre el entorno, ya que se minimiza el desgaste de los vehículos y la emisión de contaminantes. Además, al optimizar las rutas de transporte, se contribuye a una disminución de la huella de carbono asociada al tráfico vehicular.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo General

- Determinar el estado superficial, funcional y estructural del pavimento flexible en la vía Platería – Acora, según la metodología PCI, IRI y el ensayo de deflectometría, respectivamente; y establecer las actividades necesarias de mantenimiento vial.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar el estado superficial del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI).
- Determinar el estado funcional del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el parámetro del Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- Determinar el estado estructural del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el ensayo de deflectometría, empleando la viga Benkelman.
- Establecer las actividades necesarias de mantenimiento vial del pavimento flexible en la vía Platería – Acora, mediante la elaboración de un plan de mantenimiento vial que incluirá el presupuesto necesario.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Antecedentes locales

Mamani Nina & Torres Salas (2021) en su investigación, se propusieron evaluar el pavimento flexible de la carretera Puno - Mañazo en el año 2021. Para analizar las condiciones de los 2 km más críticos de la vía, utilizaron las metodologías PCI, IRI y deflectometría. El diseño de investigación fue no experimental, con un alcance descriptivo y explicativo, y de tipo aplicada. Los resultados obtenidos fueron: un PCI promedio de 34, clasificado como "malo"; un IRI de 4.93 m/km en el carril derecho y 4.67 m/km en el izquierdo, ambos valores superiores a la rugosidad estándar de 4.00 m/km; y una deflexión promedio de 77.20×10^{-2} mm en el carril derecho y 83.33×10^{-2} mm en el izquierdo, los cuales no excedieron la deflexión admisible (127.5×10^{-2} mm). En conclusión, el pavimento no cumplió con los valores mínimos de IRI, pero sí con los de deflectometría, por lo que se recomendó realizar una restauración parcial o reconstrucción del tramo crítico.

Mamani Arcata & Pilco Chura (2021) realizaron su investigación con el objetivo de determinar la vida útil remanente del pavimento flexible de la avenida Circunvalación en 2021, utilizando las metodologías IRI y deflectometría. La investigación fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño cuasi experimental. Los resultados obtenidos fueron: un IRI de 4.14 m/km, lo que indica que el pavimento estaba envejecido, y una deflexión de 130



$x 10^{-2}$ mm en el carril derecho y $129 x 10^{-2}$ mm en el izquierdo, valores superiores a la deflexión admisible de $80 x 10^{-2}$ mm, lo que sugiere que el pavimento estaba en condiciones de fatiga. Concluyeron que el pavimento había superado su vida útil, requiriendo un mejoramiento estructural.

Vilca Callata & Cuba Asillo (2020) en su investigación, se propusieron determinar el estado del pavimento flexible en las avenidas Floral y El Sol de la ciudad de Puno en el año 2019. Para ello, evaluaron el pavimento utilizando las metodologías PCI, IRI y deflectometría. La investigación fue de tipo mixta (cuantitativa y cualitativa), con un enfoque descriptivo basado en la observación directa, y el diseño de investigación fue no experimental. Los resultados obtenidos mostraron que el PCI fue inferior a 40, con una clasificación de "malo y muy malo"; los valores de IRI superaron el límite recomendado de 3.5 m/km, y las deflexiones características también excedieron los valores de deflexión admisible. En conclusión, determinaron que el pavimento en ambas avenidas presenta una condición deficiente y requiere rehabilitación.

Ramos Vilca (2017) realizó su investigación con el objetivo de evaluar el estado del pavimento de la carretera Puno – Vilque – Mañazo en el año 2015, utilizando el cálculo del PCI, IRI y las deflexiones. Los resultados obtenidos fueron: una deflexión característica promedio de $69.22 x 10^{-2}$ mm en el carril derecho y $65.53 x 10^{-2}$ mm en el carril izquierdo, ambos por debajo de la deflexión admisible de $127.5 x 10^{-2}$ mm. Los valores de IRI fueron de 4.78 m/km en el carril derecho y 4.63 m/km en el izquierdo. En conclusión, el pavimento no cumplió con las especificaciones técnicas ni con los requerimientos establecidos.



2.1.2. Antecedentes nacionales

Lizarbe Palacios & Longa Solon (2022) en su tesis de investigación tuvieron como objetivo la evaluación superficial y estructural del pavimento flexible de la av. Alameda del Premio Real, distrito de Chorrillos, Lima, en el año 2022; para ello realizaron una evaluación de la superficie asfáltica con PCI, así como una evaluación estructural. La metodología utilizada fue la aplicada, con un enfoque cuantitativo, un diseño no experimental y un nivel descriptivo. Presentaron los siguientes resultados: valor de PCI de 43.71, correspondiente a una clasificación de “regular”, deflexión característica de 47.7×10^{-2} mm, y deflexión admisible de 107.26×10^{-2} mm. En conclusión, se debe realizar un mantenimiento rutinario y periódico antes de que el estado de desgaste se deteriore y por tanto implique mayores costes.

Sigueñas Medina (2021) en el transcurso de su investigación tuvo el objetivo de analizar el estado estructural y funcional del pavimento flexible de la av. Coronel Portillo, distrito de Huaura, Lima, en el año 2022; empleó las metodologías PCI, IRI y deflectometría; el tipo de investigación fue aplicada, el nivel de investigación fue descriptivo - aplicativo, el diseño de investigación fue no experimental con un enfoque cuantitativo. Los resultados obtenidos fueron: Presencia de 6 diferentes tipos de fallas estructurales, resaltando la falla piel de cocodrilo y ahuellamiento, las cuales representan cerca del 50% del total de las fallas. Llegó a la conclusión de que la presencia de fallas afecta directamente al estado funcional del pavimento, el cual necesita de un mantenimiento rutinario.

Ramos Libandro (2021) llevó a cabo su tesis de investigación, en la cual se propuso conocer la condición actual del pavimento existente de la av.



Lambramani, distrito de José Luis Bustamante y Rivero, Arequipa; para ello, evaluó el pavimento utilizando el método de inspección visual PCI, IRI y el ensayo de deflectometría. Obtuvo los siguientes resultados: valor del PCI de 52, que corresponde a una calificación de “regular”; valor del IRI promedio de 4.7 m/km, que supera el valor máximo para la vía en estudio; valor de deflexión característica de 73.06×10^{-2} mm, el cual fue menor a la deflexión admisible la cual resultó ser 82.63×10^{-2} mm.

Cajo Gomez (2021) en su tesis de investigación, evaluó superficial y estructuralmente el pavimento flexible de la carretera Ferreñafe – Mesones Muro; por lo cual calculó el PCI, y la evaluación estructural mediante ensayos destructivos (calicatas). Su investigación fue cuasi experimental, debido a que realizó ensayos de laboratorio y ensayos de campo, el nivel de estudio fue descriptivo y el diseño de investigación fue transeccional. Obtuvo los siguientes resultados: valor de PCI de 54.48, correspondiente a un estado “regular”; respecto a las calicatas, determinó que el valor CBR es menor al 6% indicado. Concluyendo que la subrasante es inadecuada, por lo que recomienda aislar el pavimento mediante un subdren lateral o mejorar la base y subbase mediante un estabilizador, como cal o cemento.

Diaz Montoya (2021) en el transcurso de su investigación tuvo el propósito de evaluar superficial y estructuralmente el pavimento flexible del Cercado del distrito de Pimentel, Chiclayo, Lambayeque, en el año 2020; empleó la metodología de inspección visual PCI y el ensayo de deflectometría mediante ensayos no destructivos; el tipo de investigación fue descriptiva no experimental. El investigador obtuvo los siguientes resultados: 4 tramos evaluados estaban en condiciones superficiales satisfactorias, 3 en condiciones regulares y 4 en



condiciones pobres; respecto a la deflectometría, 7 tramos no superaron la deflexión máxima (108×10^{-2} mm) y 8 si superaron dicha deflexión máxima. Concluyendo que generalmente los tramos deteriorados superficialmente, también presentan fallas estructurales, lo que significa que el pavimento ha superado su vida útil.

Fernandez Ruiz (2020) llevó a cabo su tesis de investigación con el objetivo de evaluar estructuralmente el pavimento flexible de la carretera Cajamarca - Celendín - Balsas, en el año 2020; por lo cual realizó un análisis deflectométrico mediante la Viga Benkelman. Se obtuvo los siguientes resultados: deflexión característica de 67×10^{-2} mm, la cual es menor a la deflexión admisible (71×10^{-2} mm) y un radio de curvatura promedio de 333.28 m, la cual es mayor al mínimo establecido por el método CONREVIAL (100 m). Se encontró que el pavimento evaluado presenta un buen comportamiento estructural.

2.1.3. Antecedentes internacionales

Salinas Villegas (2019) en su investigación, el objetivo fue evaluar funcional y estructuralmente el pavimento de la vía Manuelita Sáenz, desde la intersección con la Av. Quiz Quiz hasta la intersección con la Av. José Peralta, en Ambato, Ecuador. Para ello, utilizó el método PCI, midió las deflexiones y extrajo núcleos de asfalto. Los resultados obtenidos fueron: un PCI de 47.83% en la sección 1 y 61.50% en la sección 2, clasificándolas como "regular" y "buena" respectivamente. La deflexión característica fue inferior a la permitida. El análisis de las pruebas de asfalto reveló que el tramo 1 no cumplió con el porcentaje requerido de asfalto, por lo que se recomendó mantenimiento con retratamiento;



Por otro lado, el tramo 2 cumplió con los correctos parámetros de asfalto y calidad..

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Pavimentos

De acuerdo con Montejo Fonseca (2006) un pavimento es un conjunto de capas apoyadas sobre una subrasante, las cuales deben ser capaces de soportar las cargas de tránsito transmitidas durante el periodo de diseño del pavimento. Cada capa debe ser construida con los materiales adecuadas, además debe estar compactada. Entre las características que debe cumplir un pavimento se tiene: resistencia a la acción de las cargas de tráfico; resistencia a la acción de condiciones climáticas adversas; textura superficial adecuada al tránsito vehicular; adecuada regularidad superficial, transversal y longitudinal; durabilidad; drenaje adecuado; ruido de rodadura tolerante; económico; colores adecuados, evitando reflejos y deslumbramientos.

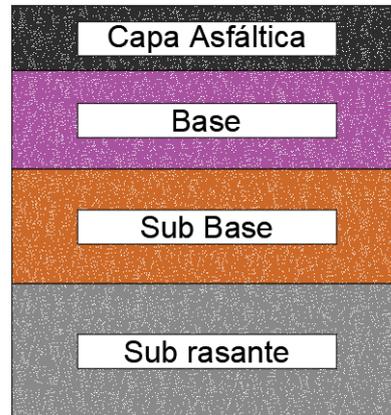
2.2.2. Clasificación de los pavimentos

2.2.2.1. Pavimentos flexibles

La sección típica de un pavimento flexible se aprecia en la Figura 1, que se compone de una capa bituminosa colocada sobre dos capas flexibles: base y subbase. Aunque, dependiendo de la obra, el pavimento puede no tener estas capas. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Figura 1

Sección típica de un pavimento flexible



Nota: Adaptado a partir de (Morales Cárdenas et al., 2009)

2.2.2.2. Pavimentos semi – rígidos

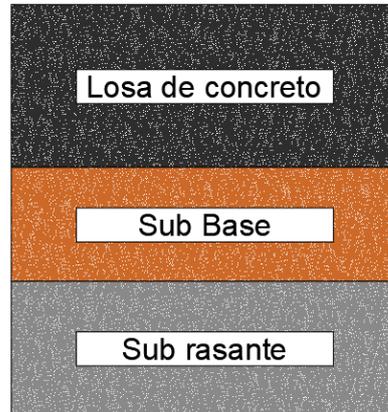
Un pavimento semi – rígido tiene la misma estructura de un pavimento flexible, pero una de sus capas está rigidizada artificialmente con un aditivo como: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. (Montejo Fonseca, 2006). El objetivo de utilizar estos aditivos es mejorar las propiedades mecánicas de los materiales locales, ya que no son aptos por sí solos para su uso en la creación de pavimentos.

2.2.2.3. Pavimentos rígidos

La sección un pavimento rígido típico se aprecia en la Figura 2, se observa una losa de concreto hidráulico apoyada sobre la subrasante, aunque también puede incluirse una capa de subbase con material seleccionado. El concreto hidráulico se caracteriza por su elevada rigidez y elasticidad, facilitando la distribución de los esfuerzos sobre una gran superficie. Su capacidad estructural depende de la resistencia de las losas. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

Figura 2

Sección típica de un pavimento rígido



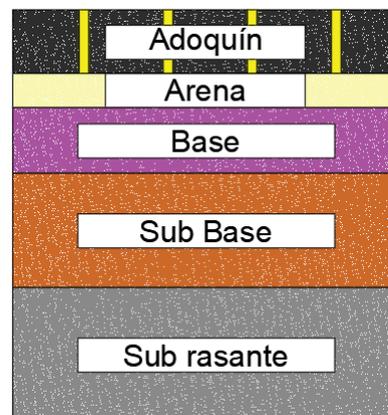
Nota: Adaptado a partir de (Morales Cárdenas et al., 2009)

2.2.2.4. Pavimentos articulados

El esquema de un pavimento rígido se aprecia en la Figura 3, este tipo de pavimento consiste en una capa de rodadura hecha de adoquines o bloques de concreto prefabricados, todos con el mismo espesor. Esta capa de rodadura puede colocarse sobre una fina capa de arena, que a su vez se apoya sobre una base granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de las condiciones del tráfico y la calidad de la subrasante. (Montejo Fonseca, 2006).

Figura 3

Sección típica de un pavimento articulado



Nota: Adaptado a partir de (Morales Cárdenas et al., 2009)



2.2.3. Estudios de tráfico

2.2.3.1. Índice Medio Diario Anual (IMDA)

Una vía se diseña tomando en cuenta el volumen de tránsito correspondiente a la demanda diaria promedio de vehículos, el cual aumenta anualmente a una tasa de crecimiento hasta el final del periodo de diseño. Los valores de IMDA brindan suficiente información para establecer las características de diseño de la vía, así como su clasificación. (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2018a).

2.2.3.2. Factor Direccional y Factor Carril

El factor de distribución direccional se refiere a la cantidad de vehículos pesados que circulan en un sentido específico del flujo vehicular. Por otro lado, el factor de distribución por carril se refiere al carril que soporta la mayor proporción de carga en términos de Ejes Equivalentes (EE). (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014).

Se considera tanto la cantidad de direcciones o sentidos del tráfico como el número de carriles en cada calzada. La Tabla 1, presenta los factores de distribución direccional y de carril utilizados para calcular el volumen de tráfico en el carril de diseño. Respecto a la cantidad de calzadas, para 1 calzada se considera un IMD_a total de la calzada y para 2 calzadas se considera un IMD_a total de las 2 calzadas.

Tabla 1*Factores de distribución Direccional y de Carril*

N° calzadas	N° sentidos	N° carriles por sentido	Factor direccional (F_d)	Factor carril (F_c)	Factor ponderado $F_d * F_c$ para carril de diseño
1 calzada	1 sentido	1	1.00	1.00	1.00
	1 sentido	2	1.00	0.80	0.80
	1 sentido	3	1.00	0.60	0.60
	1 sentido	4	1.00	0.50	0.50
	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
2 calzadas con separador central	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
	2 sentidos	3	0.50	0.60	0.30
	2 sentidos	4	0.50	0.50	0.25

Nota: Adaptado a partir de (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014).

2.2.3.3. Crecimiento del tránsito

El crecimiento del tránsito se calcula mediante la siguiente ecuación de progresión geométrica, por separado para el tránsito de vehículos de pasajeros y para el tránsito de vehículos de carga. (Corros B. et al., 2009)

$$T_n = T_0 * (1 + r)^{n-1} \quad (1)$$

Donde:

 T_n : Tránsito proyectado al año “n”, en veh/día. T_0 : Tránsito actual (referido al año base), en veh/día. n : Cantidad de años del periodo de diseño. r : Tasa anual de crecimiento del tránsito.

El Factor de Crecimiento Acumulado (F_{ca}) se calcula mediante la siguiente ecuación, donde generalmente el valor “r” varía entre 2% y 6%.

$$F_{ca} = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (2)$$

Donde:

F_{ca} : Factor de Crecimiento Acumulado

n : Periodo de diseño.

r : Tasa anual de crecimiento del tránsito.

2.2.3.4. Ejes Equivalentes (EE)

Según la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2014), El impacto del tránsito se evalúa utilizando los ejes equivalentes (EE) acumulados a lo largo del periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) representa el daño causado en el pavimento por un eje simple con dos ruedas convencionales y un peso de 8.2 toneladas, con una presión de inflado de 80 lb/in². En la Tabla 2 se muestra la configuración de ejes.

Tabla 2

Configuración de ejes

Conjunto de eje(s)	Nomenclatura	Nº de neumáticos	Gráfico
EJE SIMPLE	1RS	02	
EJE SIMPLE	1RD	04	
EJE TANDEM	1RS + 1RD	06	

Conjunto de eje(s)	Nomenclatura	N° de neumáticos	Gráfico
EJE TANDEM	2RD	08	
EJE TRIDEM	1RS + 2RD	10	
EJE TRIDEM	3RD	12	

Nota: Adaptado a partir de (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014). Donde “RS” es eje con rueda simple y “RD” es eje con rueda doble.

Los Ejes Equivalentes (EE) se calculan mediante relaciones simplificadas indicadas en la Tabla 3:

Tabla 3

Relación de cargas por eje y Ejes Equivalentes (EE) en pavimentos flexibles

TIPO DE EJE	EJE EQUIVALENTE
Eje Simple (1RS)	$EE_{S1} = [P/6.6]^{4.0}$
Eje Simple (1RD)	$EE_{S2} = [P/8.2]^{4.0}$
Eje Tandem (1RS + 1RD)	$EE_{TA1} = [P/14.8]^{4.0}$
Eje Tandem (2RD)	$EE_{TA2} = [P/15.1]^{4.0}$
Eje Tridem (1RS + 2RD)	$EE_{TR1} = [P/20.7]^{3.9}$
Eje Tridem (3RD)	$EE_{TR2} = [P/21.8]^{3.9}$

Nota: Adaptado a partir de (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014).

Donde “RS” es eje con rueda simple, “RD” es eje con rueda doble y “P” es el peso real por eje en toneladas.



2.2.3.5. Factor Vehículo Pesado (F_{VP})

El Factor Vehículo Pesado (F_{VP}) es el número de ejes equivalentes promedio por tipo de vehículo pesado (bus o camión), el promedio se calcula dividiendo la suma de ejes equivalentes (EE) de un determinado tipo de vehículo pesado entre el número total del tipo de vehículo pesado seleccionado. (Menéndez Acurio, 2009)

2.2.3.6. Número de repeticiones de Ejes Equivalentes (EE)

El número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 t, en el periodo de diseño se calcula por tipo de vehículo; de tal modo que el resultado final será la sumatoria de EE de los diversos tipos de vehículos pesados considerados. (Menéndez Acurio, 2009)

$$N.r. EE_{8.2 Ton} = \sum [EE_{día - carril} * F_{ca} * 365] \quad (3)$$

Donde:

$N.r. EE_{8.2 t}$: Número de repeticiones ejes equivalentes de 8.2 t.

$EE_{día - carril}$: Ejes equivalentes por cada tipo de vehículo pesado por día, para el carril de diseño.

F_{ca} : Factor de Crecimiento Acumulado, según el tipo de vehículo pesado.

365 : Cantidad de días del año.

Para los vehículos pesados se aplica la siguiente fórmula:



$$EE_{día - carril} = IMD_{pi} * F_d * F_c * F_{vpi} * F_p \quad (4)$$

Donde:

$EE_{día - carril}$: Ejes equivalentes por cada tipo de vehículo pesado, para el carril de diseño.

IMD_{pi} : Índice Medio Diario, según tipo de vehículo pesado seleccionado (i).

F_d : Factor Direccional.

F_c : Factor Carril de diseño.

F_{vpi} : Factor Vehículo Pesado del tipo seleccionado (i).

F_p : Factor de Presión de neumáticos.

2.2.4. Evaluación superficial de pavimentos

Evaluar el deterioro superficial de los pavimentos es crucial para su gestión. Identificar y clasificar las fallas ayuda a crear modelos que predicen cómo se deteriorarán bajo factores como el tránsito, el clima, la subrasante y la calidad de la construcción. Esta predicción permite optimizar los recursos para el mantenimiento y reparación de los pavimentos.

El PCI es la metodología para evaluar los diferentes tipos de pavimentos: asfálticos, de concreto de cemento Pórtland, de adoquines de concreto; de las diversas vías: carreteras, calles, estacionamientos y aeropuertos. También existe una metodología para evaluar y calificar las vías afirmadas, llamada: Unsurfaced Roads Condition Index o índice de Condición de Carreteras No Pavimentadas (URCI). (Vásquez Varela, 2023)



2.2.4.1. Índice de Condición del Pavimento (PCI)

La metodología PCI fue desarrollada en 1978. Esta metodología fue creada para gestionar el mantenimiento y reparación de los pavimentos de las instalaciones del ejército norteamericano. La metodología para la evaluación de vías en afirmado es el Índice de Condición de Carreteras no Pavimentadas (URCI) y fue desarrollada por el Departamento del Ejército de los Estados Unidos, bajo el manual técnico TM 5-626. (Vásquez Varela, 2023)

El PCI expresa numéricamente el estado superficial del pavimento con una variación de 0 a 100, el “0” es condición más adversa posible y “100” es la mejor. El PCI se obtiene de acuerdo a las fallas observadas en la superficie del pavimento. (ASTM D6433, 2018). Según Corros B. et al. (2009) el PCI es una metodología muy amplia para examinar los pavimentos flexibles y rígidos. Este es un proceso simple y manual que proporciona información sobre los daños detectados en el pavimento, su grado de severidad y el área perjudicada.

El PCI tiene en cuenta 3 factores del deterioro de los pavimentos: clase de daño, severidad, cantidad o densidad del daño, existiendo un gran número de posibles condiciones. Por lo que es importante el cálculo de los “Valores Deducidos” (VD) para señalar el grado de afectación de la combinación de estos 3 factores sobre un pavimento. (Vásquez Varela, 2002)

2.2.4.2. Escala de calificación PCI

En la Figura 4 se muestra la escala de condición o graduación del PCI según su valoración, con los colores sugeridos según la escala.

Figura 4

Escala de condición del pavimento

ESCALA DE CALIFICACIÓN		COLORES SUGERIDOS
100	Bueno / Good	Verde oscuro
85	Satisfactorio / Satisfactory	Verde claro
70	Regular / Fair	Amarillo
55	Malo / Poor	Rojo claro
40	Muy malo / Very poor	Rojo medio
25	Grave / Serious	Rojo oscuro
10	Fallado / Failed	Gris oscuro
0		

Nota: Adaptado a partir de (Vásquez Varela, 2023)

De acuerdo con Vásquez Varela (2023) esta escala de calificación estándar cualitativa, es aplicable tanto para la metodología PCI como para el URCI. El nombre de las etiquetas de la escala de calificación ha variado con el paso del tiempo. El ASTM D-6433 en el año 2002 consideraba etiquetas muy diferentes a las indicadas en la Tabla 4.

Tabla 4

Rango de Clasificación del PCI

Rango		Clasificación
100	- 85	Bueno
85	- 70	Satisfactorio
70	- 55	Regular
55	- 40	Malo
40	- 25	Muy malo
25	- 10	Grave
10	- 0	Fallado

Nota: Adaptado a partir de (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.3. Fallas en pavimentos asfálticos

De acuerdo con el ASTM D6433 (2018) las fallas del pavimento son señales del deterioro de los pavimentos, provocado por distintos factores como carga, factores ambientales, deficiencias constructivas, o una combinación de estas. Según Vásquez Varela (2023) el deterioro de los pavimentos, está relacionado con la clase, severidad y densidad de los daños presentes:

- Clase de daño: O tipo de falla, son las características del deterioro y su vínculo con diversos factores como: clima, tráfico, calidad de construcción.
- Severidad del daño: Es la intensidad con la que aparece en la vía. Se definen 3 niveles de severidad: alto o High (H), medio o Medium (M), y bajo o Low (L).
- Densidad del daño: Es una medida de la cantidad de un mismo daño presente.

Seguidamente, se indicarán las 20 clases de fallas que se pueden presentar en los pavimentos asfálticos.

2.2.4.3.1. Piel de Cocodrilo

La falla piel de cocodrilo o agrietamiento por fatiga son un conjunto de fisuras conectadas entre sí. Inicialmente, se da como fisuras longitudinales paralelas. Posteriormente, luego de la acción de repetidas cargas de tráfico, dichas fisuras o grietas se conectan formando polígonos con ángulos agudos, dando la apariencia de la piel de un cocodrilo.

Normalmente, el lado más grande los fragmentos no supera los 50.0 cm. (ASTM D6433, 2018)

A diferencia de la falla denominada “agrietamiento en bloque” que se presenta en áreas no sujetas a las cargas de tránsito. Esta falla estructural en su máximo nivel de severidad generalmente se encuentra acompañada por ahuellamiento. (Corros B. et al., 2009). Además, según la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2018b) esta falla es un indicador de la insuficiencia estructural del pavimento.

2.2.4.3.2. Exudación

La falla exudación o mancha en pavimentos es una lámina de material bituminoso superficial presente en el pavimento, creando una apariencia brillante y reflectante, que suele pegarse con facilidad. Esta falla puede ser ocasionada por exceso de asfalto en la mezcla, exceso de aplicación de sellante asfáltico, o por un bajo contenido de vacíos de aire en la mezcla, o por una combinación de estas causas mencionadas. (ASTM D6433, 2018). El proceso de exudación no es reversible durante la temporada de frío; por tal motivo, el asfalto se acumulará sobre la superficie. (Corros B. et al., 2009)

2.2.4.3.3. Agrietamiento en bloque

La falla agrietamiento en bloque o grietas de contracción, son fisuras conectadas entre sí que fragmentan el pavimento en bloques de forma rectangular (con un tamaño variable de entre 30.0 x 30.0 cm hasta 3.0 x 3.0 m). Esta falla es ocasionada por la contracción del concreto asfáltico y la diaria variación de la temperatura, dando ciclos diarios de

esfuerzo / deformación unitaria. (ASTM D6433, 2018). Este daño no está relacionado con los efectos del tráfico (a diferencia de la falla “piel de cocodrilo”) e indica que el pavimento ha endurecido significativamente.

2.2.4.3.4. Abultamiento y hundimiento

La falla abultamiento o protuberancias o elevaciones, son ligeros desplazamientos puntuales hacia arriba de la superficie del pavimento. Pueden ser ocasionados por el pandeo de losas de concreto de cemento Pórtland situadas debajo de la capa asfáltica, expansión por congelación de la subrasante, o por infiltración y acumulación de material en una grieta combinado con la acción de cargas de tránsito. (ASTM D6433, 2018)

Los abultamientos se diferencian de la falla “desplazamiento”, porque ésta última falla es ocasionada por pavimentos inestables (mezclas asfálticas de baja resistencia). Mientras que, los hundimientos son ligeros desplazamientos abruptos hacia abajo de la superficie del pavimento (a diferencia de la falla “depressiones”). Si hundimientos se dan en un patrón perpendicular al tránsito y espaciados a una distancia menor a 3.0 m, se trata de la falla “corrugación”. (Corros B. et al., 2009)

2.2.4.3.5. Corrugación

La falla corrugación, es también denominada ondulación. Son una serie de desplazamientos hacia arriba (crestas) y abajo (valles), que se encuentran a distancias relativamente similares, generalmente a menos de 3.0 m. Las elevaciones (crestas) son transversales al sentido del tráfico. Esta falla es ocasionada normalmente por una combinación de la acción



del tránsito, y la inestabilidad de la superficie de rodadura o base del pavimento. (ASTM D6433, 2018)

2.2.4.3.6. Depresión

Las depresiones son áreas superficiales del pavimento que se encuentran a un nivel levemente más bajo que el pavimento circundante. A menudo, esta falla solo se hace evidente después de una lluvia, cuando el agua se acumula en dichas zonas; sin embargo, en pavimento seco, las depresiones pueden identificarse por las manchas dejadas por el agua contenida en ellas. Esta falla puede ser ocasionada por el asentamiento de la subrasante, o por una construcción inadecuada del pavimento. (ASTM D6433, 2018). La falla “hundimientos”, a diferencia de las depresiones, son caídas bruscas de nivel.

2.2.4.3.7. Grieta de borde

Las fallas conocidas como grietas de borde son fisuras que se forman de forma paralela al eje de la vía, normalmente situadas a una distancia de entre 0.30 m y 0.60 m del borde exterior del pavimento. Este daño puede ser originado por el debilitamiento de la base o de la subrasante cerca del borde, lo cual puede ser resultado de las condiciones climáticas. Esta falla se acelera debido a la carga de tránsito. En algunas ocasiones puede haber pérdida de material por disgregación (área entre la grieta y el borde del pavimento). (Corros B. et al., 2009).



2.2.4.3.8. Grieta de reflexión de juntas

La falla conocida como grietas de reflexión de juntas de losas de concreto ocurre únicamente en pavimentos asfálticos que se construyen sobre losas de concreto de cemento Portland (pavimentos rígidos). Esta falla es provocada principalmente por el desplazamiento de la losa de concreto, que puede ser causado por factores como la temperatura o la humedad. Aunque esta falla no es consecuencia de las cargas de tránsito, dichas cargas pueden provocar la rotura del concreto asfáltico cercano a la fisura. Se dice que la grieta está “descascarada” cuando el pavimento está fragmentado a lo largo de dicha grieta. (Corros B. et al., 2009)

2.2.4.3.9. Desnivel carril / berma

La falla desnivel carril / berma o desnivel calzada / hombrillo, es el desnivel entre la orilla del pavimento y la superficie de la berma. Esta falla es ocasionada por la erosión o asentamiento de la berma, o por la construcción de sobrecarpetas en la calzada sin ajustar el nivel de la berma. (ASTM D6433, 2018)

2.2.4.3.10. Grieta longitudinal y transversal

La falla grietas longitudinales se extienden paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción, generalmente pueden ser ocasionados por: junta de construcción entre carriles mal hecha, contracción de la superficie de concreto asfáltico ocasionada por bajas temperaturas, o por una grieta de reflexión causada por agrietamiento bajo la capa de base. (ASTM D6433, 2018). Las grietas transversales se



extienden transversalmente al eje del pavimento o a la dirección de construcción. Usualmente, este daño no se produce por el flujo vehicular.

2.2.4.3.11. Parcheo

La falla de parcheo se refiere a las áreas del pavimento que han sido sustituidas por material nuevo con el fin de reparar el pavimento actual. Un parche siempre se considera un defecto, ya que nunca tendrá el mismo rendimiento que la sección original. Reiteradamente se encuentra alguna rugosidad asociada con esta falla, lo que ocasiona incomodidad al tránsito. (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.3.12. Pulimiento de agregados

La falla pulimiento de agregados o agregado pulido, se da cuando el agregado superficial no tiene aspereza (se vuelve suave al tacto) debido a una baja porción de agregado superficial; de manera que, no presentan buena resistencia al deslizamiento. Ocasionando que, la adherencia entre los neumáticos de los vehículos y el pavimento se reduzca considerablemente. Esta falla se señala cuando un ensayo de resistencia al deslizamiento muestra valores bajos o ha disminuido considerablemente en comparación con una prueba anterior. Es provocada por la acción de las cargas de tránsito. Si el agregado superficial es degradable y la superficie resulta suave al tacto, se debe considerar el pulido de agregados. (Vásquez Varela, 2023).



2.2.4.3.13. Hueco

La falla huecos o baches, son depresiones superficiales del pavimento, con forma de tazón. Normalmente se caracterizan por tener bordes agudos con lados verticales cercanos a la superficie de la falla. Si estos huecos son creados debido a la falla “piel de cocodrilo” de severidad alta, deben ser clasificados como huecos y no como “desprendimiento de agregados”. (ASTM D6433, 2018)

2.2.4.3.14. Cruce de vía férrea

La falla cruce de vía férrea o cruce de rieles, son depresiones, abultamientos o ambos; que ocurren alrededor de los rieles o entre ellos. (ASTM D6433, 2018)

2.2.4.3.15. Ahuellamiento

La falla ahuellamientos, son depresiones superficiales bajo la trayectoria de los neumáticos de los vehículos. Puede generarse levantamiento del pavimento a lo largo de los contornos de esta falla. Usualmente esta falla sólo es visible con la presencia de agua. Esta falla es originada por una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la subrasante; lo cual es causado principalmente por consolidación o movimiento lateral de los materiales a causa de la carga de tránsito. (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.3.16. Desplazamiento

La falla desplazamientos o deformaciones por empuje, son deslizamientos longitudinales permanentes de un área superficial del



pavimento. Esta falla es ocasionada por la carga de tránsito. Se da en pavimentos con mezclas de asfalto líquido inestables. También se puede originar cuando los pavimentos asfálticos limitan con los pavimentos rígidos, ya que estos últimos incrementan su longitud empujando a los primeros. (ASTM D6433, 2018)

2.2.4.3.17. Grieta parabólica

Las fallas conocidas como grietas parabólicas o por deslizamiento son fisuras con forma de media luna creciente (es decir, con una forma parabólica) que tienen sus extremos orientados en la dirección del tránsito. Estas fallas mayormente se encuentran perpendicularmente a la dirección del tránsito. Esta falla es ocasionada debido al frenado de las ruedas o cambio de dirección. (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.3.18. Hinchamiento

La falla de hinchamiento se manifiesta como un levantamiento de la superficie del pavimento; visualmente, se presenta como una onda larga y gradual con un tamaño superior a 3.0 m. Este daño puede coexistir con agrietamiento superficial. Esta falla generalmente es ocasionada por el congelamiento del material de la subrasante. (ASTM D6433, 2018)

2.2.4.3.19. Desprendimiento de agregados

La falla de desprendimiento de agregado grueso se refiere a la pérdida de la superficie del pavimento. Esta situación puede ser causada por una baja proporción de ligante asfáltico, la mala calidad de la mezcla, una compactación insuficiente o la segregación. El daño ocasionado por



ganchos de arrastre, rines de llantas, orugas de tractores o barredoras de nieve; deben ser registrados dentro de este tipo de falla. Al igual que el ablandamiento superficial y la pérdida de agregados ocasionado por el derramamiento de solventes del ligante asfáltico. (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.3.20. Meteorización

La falla meteorización (desgaste superficial) es ocasionada por el desgaste del ligante asfáltico y la matriz de agregado fino de la mezcla asfáltica. La oxidación del ligante, una compactación inadecuada, bajo contenido de asfalto, exceso de arena natural, erosión hídrica de la superficie y el tránsito vehicular; son causantes de esta falla. (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.4. Formato de hoja de campo PCI

La Figura 5 es el formato usado para anotar las fallas en una UM.

Figura 5

Formato de hoja de campo PCI

		ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI)													
		HOJA DE CAMPO – PAVIMENTOS FLEXIBLES													
Vía:			Progresiva Inicial:				Fecha:								
Unidad de muestreo:			Progresiva Final:				Realizado por:								
Número de unidad:			Área de la muestra (m ²):												
TIPOS DE FALLAS										UNIDAD DE MUESTREO					
TIPO		UND	TIPO		UND	DIMENSIONES									
1. Piel de cocodrilo.		m ²	11. Parcheo.		m ²	A (m) = L (m)									
2. Exudación.		m ²	12. Pulimiento de agregados.		m ²										
3. Agrietamiento en bloque.		m ²	13. Hueco.		und.										
4. Abultamiento y hundimiento.		m	14. Cruce de vía férrea.		m ²										
5. Corrugación.		m ²	15. Ahuellamiento.		m ²										
6. Depresión.		m ²	16. Desplazamiento.		m ²										
7. Grieta de borde.		m	17. Grieta parabólica.		m ²										
8. Grieta de reflexión de juntas.		m	18. Hinchamiento.		m ²										
9. Desnivel carril / berma.		m	19. Desprend. de agregados.		m ²										
10. Grieta long. y transversal.		m	20. Meteorización		m ²										
FALLAS EXISTENTES: TIPO, SEVERIDAD, CANTIDAD															
TOTAL	1			2			3			4			5		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)		N.S.	L (m)	A (m)
	-----			-----			-----			-----			-----		
L															
M															
H															
	6			7			8			9			10		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)		N.S.	L (m)		N.S.	L (m)		N.S.	L (m)	
	-----			-----			-----			-----			-----		
L															
M															
H															
	11			12			13			14			15		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	und.		N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)
	-----			-----			-----			-----			-----		
L															
M															
H															
	16			17			18			19			20		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)
	-----			-----			-----			-----			-----		
L															
M															
H															

Nota: Elaboración Propia. Donde “N.S.” es el nivel de severidad; “L”, “A” y “und.” son medidas.

2.2.4.5. Cálculo del PCI

2.2.4.5.1. Unidades de Muestreo

La unidad de muestreo (UM) o unidad de inspección es el componente más pequeño de las vías. Esta es un área de una sección del pavimento que se puede identificar con facilidad, y sobre la cual se realizará el proceso de inspección de daños y calificación de la condición del pavimento. (Vásquez Varela, 2023)

Entonces, al saber el ancho de la vía y el rango de variación del área podemos determinar cuál será la longitud de la unidad de muestreo. O puede emplearse la Tabla 5, que recomienda las longitudes de las unidades de muestreo según el ancho del área pavimentada.

Tabla 5

Longitudes de unidades de muestreo en pavimentos asfálticos

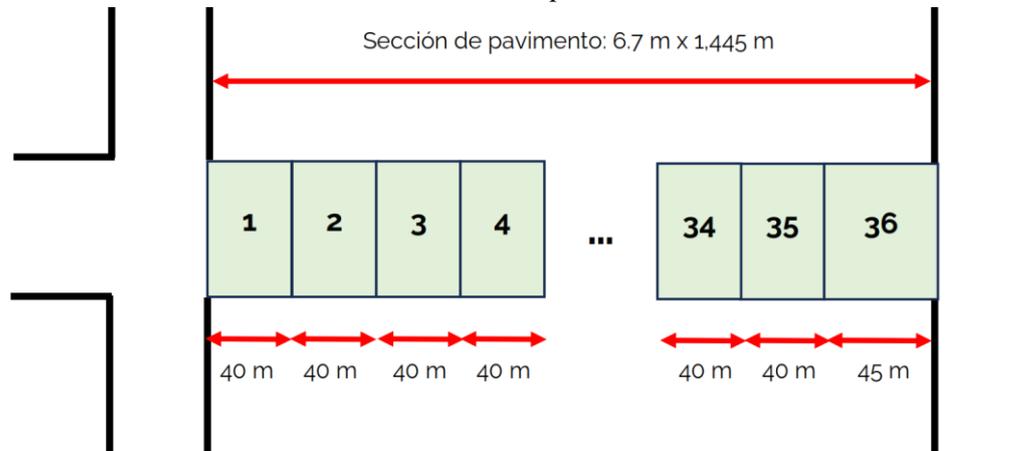
Ancho del área pavimentada (m)	Longitud de la “UM” para un área de 230 m ² (m)	Longitud sugerida de la “UM” (m)	Área de la “UM” (m ²)
5.7	40.3	40.0	228.0
6.0	38.3	40.0	240.0
6.3	36.5	40.0	252.0
6.6	34.8	30.0	198.0
6.9	33.3	30.0	207.0
7.2	31.9	30.0	216.0

Nota: Adaptado a partir de (Vásquez Varela, 2023). Donde “UM” es Unidad de Muestreo o unidad de inspección.

Según el ASTM D6433 (2018) el rango de la unidad de muestreo para pavimentos asfálticos es $225.0 \pm 90.0 \text{ m}^2$ ($2500 \pm 1000 \text{ ft}^2$). No necesariamente todas las unidades de muestreo deben ser del mismo tamaño. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la división en unidades de muestreo.

Figura 6

Unidades de muestreo en una sección del pavimento



Fuente: (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.5.2. Número mínimo de Unidades de Muestreo a evaluar

De acuerdo con el ASTM D6433 (2018) con el número mínimo de “unidades de muestreo” a evaluar” (n) se puede obtener un valor del PCI ± 5 unidades del promedio real (confiabilidad del 95%).

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\left(\frac{e^2}{4}\right) * (N - 1) + \sigma^2} \quad (5)$$

Donde:

n : Mínimo número de unidades de muestreo por evaluar.

N : Cantidad total de unidades de muestreo en la sección.

e : Error aceptable / admisible en la estimación del PCI de la sección; comúnmente, $e = \pm 5$ PCI puntos (5%).

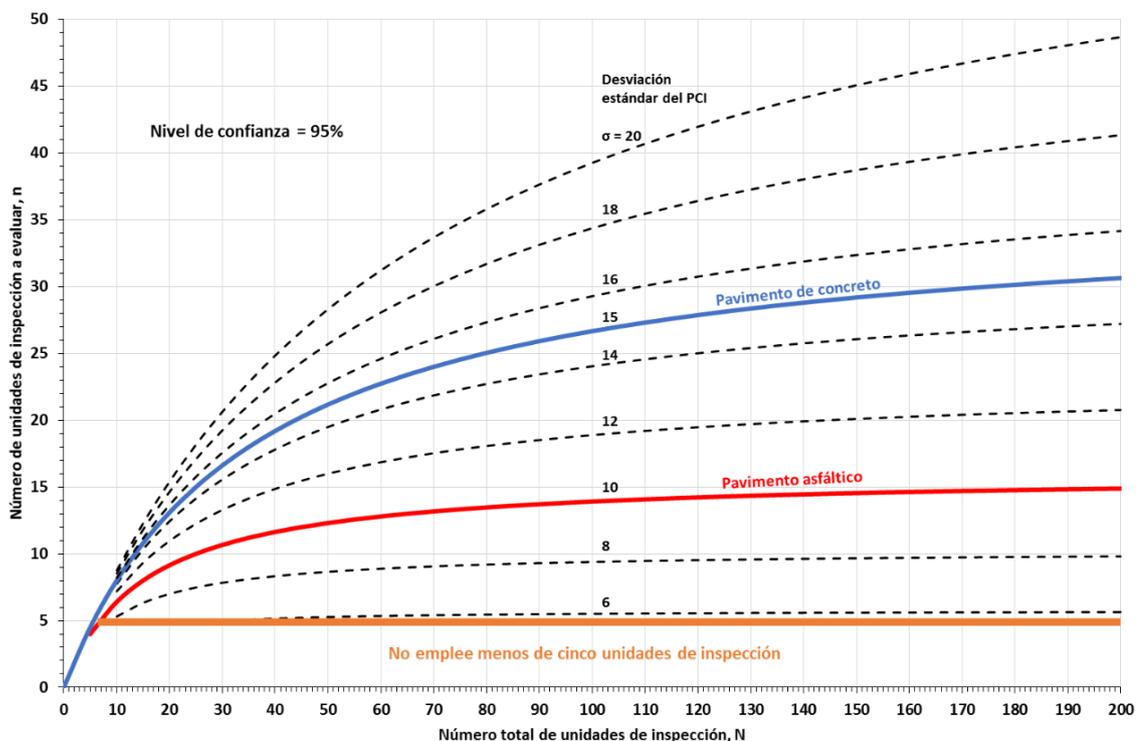
σ : Desviación estándar del PCI entre las unidades de inspección.

Cuando se evalúa, inicialmente la desviación estándar (σ) es 10 para los pavimentos asfálticos y 15 para los pavimentos rígidos. Cuando el valor del número mínimo de unidades de muestreo por evaluar es menor que 5 ($n < 5$) todas las unidades deben ser evaluadas. (Corros B. et al., 2009)

La Figura 7 es la solución gráfica de la ecuación (5), ya que indica el valor de “n” según la desviación estándar del PCI (σ), que varía según el tipo de pavimento, y según total de unidades de muestreo o inspección en la sección; para un nivel de confianza del 95% (valor del PCI ± 5 unidades del promedio real).

Figura 7

Número mínimo de unidades de muestreo por evaluar



Fuente: (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.5.3. Intervalo de Unidades de Muestreo

Según el ASTM D6433 (2018) el intervalo de las unidades de muestreo (i) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{N}{n} \quad (6)$$

Donde:

i : Intervalo de unidades de muestreo.

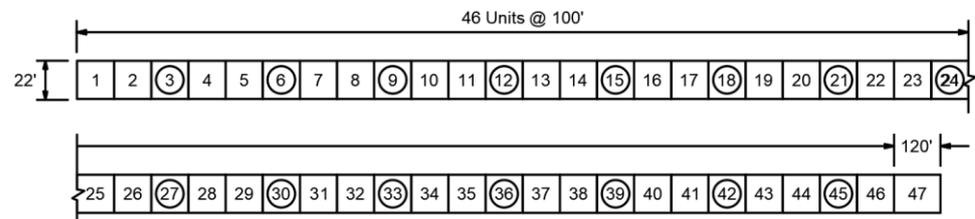
N : Cantidad total de unidades de muestreo en la sección.

n : Mínimo número de unidades de muestreo por evaluar.

Según (Vásquez Varela, 2002) las unidades de muestreo a inspeccionar deben estar espaciadas a una misma distancia a lo largo de la vía. Es por ello que se debe calcular el intervalo de las unidades de muestreo (i). En la Figura 8 se presenta un ejemplo de la selección aleatoria sistemática de unidades de muestreo.

Figura 8

Intervalo de las unidades de muestreo



Nota: Adaptado de (Vásquez Varela, 2023)

El ejemplo mostrado es para un “ i ” igual a 3. Entonces, se debe definir aleatoriamente la unidad de inicio entre el intervalo 1 de la sección y el valor “ i ”. Así, para el ejemplo dado, la unidad inicial de muestreo pudo



haber sido la 1, la 2 o la 3. Las siguientes unidades de muestreo corresponde a incrementos sucesivos de la unidad de muestreo anterior más el valor “i”.

2.2.4.5.4. Unidades de Muestreo adicionales

Al evaluar solo algunas de las unidades de muestreo (método aleatorio) se pueden generar 2 tipos de errores: exclusión de “unidades de muestreo” en muy mal estado o inclusión de “unidades de muestreo” poco representativas (con fallas que se presentan una sola vez). Se pueden corregir estos errores incluyendo cualquier “unidad de muestreo” inusual (pueden ser unidades en condiciones extremas “buenas o falladas” que no son típicas de las unidades de muestreo). Para luego, evaluarla como una “unidad adicional” y no como una “unidad representativa” o aleatoria. (Vásquez Varela, 2023)

2.2.4.5.5. Valores Deducidos (VD)

El valor deducido o deducible de una falla (VD) es un índice que incluye la combinación de la clase, severidad y densidad de los daños, que tienen una influencia directa en los pavimentos. Estos valores fueron hallados mediante pruebas de campo, con ensayos de prueba y error; Por lo tanto, pueden ser mejorados para representar de forma objetiva la condición de la vía evaluada. (Vásquez Varela, 2023).

Corros B. et al. (2009) indica el siguiente procedimiento para el cálculo de los valores deducidos (VD) en un pavimento asfáltico:



- Determinar la cantidad de cada tipo de daño, clasificándolo conforme a su categoría y nivel de severidad (de acuerdo con la unidad correspondiente para cada falla).
- Calcular la densidad de cada tipo de falla dividiendo la cantidad de cada una (según el paso anterior) entre el área total de la unidad de muestreo. Este valor se multiplica por 100 para obtener el porcentaje. La densidad representa el porcentaje del área de la unidad de muestreo evaluada que está ocupada por cada tipo de daño.
- Calcular el valor deducido (VD) para cada tipo de falla, mediante las “Curvas de Valores Deducidos” para pavimentos asfálticos. Existe una curva para cada tipo de falla, cuyos datos de entrada necesarios son la densidad de cada tipo de falla y su nivel de severidad. El valor deducido es el grado de importancia que el daño aporta dentro del área evaluada.

2.2.4.5.6. Número Máximo Admisible de Valores Deducidos (m)

Según Vásquez Varela (2023) el número máximo admisible de valores deducidos (m) puede ser calculado según:

Si ninguno o sólo uno de los “valores deducidos” individuales es mayor a 2: Calcular el Valor Deducido Total (VDT), que es la suma de los valores individuales, en lugar del Máximo Valor Deducido Corregido (CDV). Claramente, con este valor total proceder a calcular directamente el PCI.



Si más de uno de los “valores deducidos” individuales son mayores a 2: Calcular “m” mediante la siguiente ecuación:

$$m_i = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - HDV_i) \leq 10 \quad (7)$$

Donde:

m_i : Máximo número admisible de valores deducidos, incluyendo su parte fraccionaria, para la unidad de muestreo “i” (debe ser menor a 10).

HDV_i : Mayor Valor Deducido individual, para la “unidad de muestreo i”.

Si existen menos valores deducidos que el valor “m” se emplean todos los valores. El valor “m” indica la cantidad de valores a corregir (número permitido de deducciones).

2.2.4.5.7. Máximo Valor Deducido Corregido ($CDV_{máx}$)

Según Corros B. et al. (2009) el valor “ $CDV_{máx}$ ” para pavimentos asfálticos se calcula empleando las curvas correspondientes al tipo de pavimento. El $CDV_{máx}$ se calcula mediante un proceso iterativo:

- Calcular la cantidad de valores deducidos individuales superiores a 2.0 (q).
- Calcular el Valor Deducido Total (VDT), suma de valores individuales.



- Calcular el Valor Deducido Corregido (CDV) empleando la “curva de corrección” para pavimentos asfálticos, cuyos datos de entrada son “q” y el Valor Deducido Total (VDT).
- Convertir a 2.0 el menor de los valores deducidos individuales mayor a 2.0.

Repetir la iteración, y detenernos cuando “q” sea igual a 1. El “Máximo Valor Deducido Corregido” ($CDV_{m\acute{a}x}$) es el mayor de los Valores Deducidos Corregidos (CDV) hallados durante este procedimiento.

2.2.4.5.8. Cálculo del PCI de una unidad de muestreo

Según el ASTM D6433 (2018) el cálculo del Índice de Condición de Pavimento (PCI) de cada unidad de muestreo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$PCI = 100 - CDV_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

Donde:

PCI : Índice de Condición de Pavimento.

$CDV_{m\acute{a}x}$: Máximo Valor Deducido Corregido.

2.2.4.5.9. Cálculo del PCI de una sección del pavimento

De acuerdo con Vásquez Varela (2023) cuando todas las unidades fueron seleccionadas aleatoriamente, el PCI de la sección del pavimento (PCI_S) es el promedio ponderado por área de las unidades de muestreo evaluadas (PCI_{r_i}) bajo la siguiente ecuación:



$$PCI_S = \overline{PCI}_r = \frac{\sum_{i=1}^n (PCI_{ri} * A_{ri})}{\sum_{i=1}^n A_{ri}} \quad (9)$$

Donde:

PCI_S : PCI de la sección del pavimento.

PCI_r : PCI ponderado por área de las unidades de muestreo evaluadas aleatoriamente.

PCI_{ri} : PCI de la unidad de muestreo aleatoria “i”.

A_{ri} : Área de la unidad de muestreo aleatoria “i”.

n : Número de unidades de muestreo aleatorias evaluadas.

Sin embargo, si se consideran unidades de muestreo adicionales, es necesario calcular el PCI ponderado por el área de estas unidades.

$$\overline{PCI}_a = \frac{\sum_{i=1}^m (PCI_{ai} * A_{ai})}{\sum_{i=1}^m A_{ai}} \quad (10)$$

Donde:

PCI_a : PCI ponderado por área de las unidades de muestreo adicionales.

PCI_{ai} : PCI de la unidad de muestreo adicional “i”.

A_{ai} : Área de la unidad de muestreo adicional “i”.

m : Número de unidades de muestreo adicionales evaluadas.

Por lo tanto, el PCI del pavimento como sección, considerando tanto las unidades de muestreo aleatorias como las adicionales, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PCI_S = \frac{\overline{PCI}_r * (A - \sum_{i=1}^m A_{ai}) + \overline{PCI}_a * (\sum_{i=1}^m A_{ai})}{A} \quad (11)$$

Donde:

PCI_S : PCI ponderado por área de la sección del pavimento.

A : Área de la sección.

2.2.5. Evaluación funcional de pavimentos

De acuerdo con Corros B. et al. (2009) los principales factores funcionales que deben ser controlados en los pavimentos son los siguientes:

- Seguridad: Controlar la resistencia al deslizamiento, la textura superficial es el único factor que puede ser controlado.
- Comodidad: Controlar la regularidad superficial.
- Economía: Controlar el costo usuario.
- Impacto ambiental: Controlar la contaminación sonora, producida por el ruido del contacto neumático-pavimento.

2.2.5.1. Factores funcionales de los pavimentos

2.2.5.1.1. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento del pavimento es la fuerza en dirección opuesta al movimiento del vehículo, esta fuerza resiste el movimiento relativo entre el contacto del neumático y la superficie del



pavimento. Esta fricción se encuentra en función de las características del pavimento (microtextura y macrotextura); así como de las propiedades del neumático, la velocidad del vehículo y de las condiciones meteorológicas. La frecuencia de accidentes y su severidad o gravedad disminuyen a la vez que la resistencia al deslizamiento incrementa; en presencia o ausencia de agua. (Hall et al., 2009). De acuerdo con Corros B. et al. (2009) la resistencia al deslizamiento de los vehículos se puede dar en 2 direcciones: resistencia al deslizamiento longitudinal al eje de la vía, que ocurre cuando el vehículo aplica una fuerza de frenado (existe rozamiento por la adherencia neumático – pavimento); y resistencia al deslizamiento transversal al eje de la vía, que ocurre cuando el vehículo gira en los tramos curvos de la vía (se producen esfuerzos tangenciales).

2.2.5.1.2. Regularidad superficial

Según el ASTM E867 (2004) la regularidad, se refiere a las desviaciones superficiales de pavimento respecto a una superficie de referencia plana; estas desviaciones tienen una incidencia directa con la calidad del viaje. Las fallas superficiales presentes en los pavimentos ocasionan deformaciones del perfil transversal, lo que afecta la calidad de rodaje (relacionada directamente con la comodidad de los usuarios). (Corros B. et al., 2009)

La Tabla 6 indica la calificación de los pavimentos en función de la profundidad de la falla tipo ahuellamiento.

Tabla 6

Calificación según el ahuellamiento

Profundidad ahuellamiento (mm)	Calificación
< 10	Bueno
10 -15	Aceptable
> 15	No deseable

Fuente: (Corros B. et al., 2009)

Se puede medir la serviciabilidad (grado de comodidad de los usuarios) mediante el Índice de Regularidad Internacional (IRI), el cual es un único índice de irregularidad o rugosidad adoptado mundialmente.

2.2.5.1.3. Costo usuario

El costo usuario depende principalmente de 2 factores: costos operativos de los vehículos, relacionado con el consumo de combustible, lubricantes, neumáticos, mantenimiento, costos de posesión (depreciación y costos de inversión); y costos de tiempo de viaje del usuario, que dependen de la condición de la vía y de la topografía del terreno. (Corros B. et al., 2009)

Una vía en malas condiciones involucra mayores tiempos de viaje (puede haber retrasos en el tránsito vehicular debido a la ejecución de acciones de mantenimiento vial), lo que significa que el usuario asumirá mayores costos. Este gasto se incrementa si el terreno presenta mayores irregularidades.

2.2.5.1.4. Contaminación sonora

Las superficies de pavimento muy rugosas pueden generar altos niveles de ruido debido al contacto entre las llantas y el pavimento, lo que



afecta tanto a los usuarios de la vía como a los pobladores locales. Por lo tanto, es crucial encontrar un balance entre la seguridad y el nivel sonoro. El ruido se mide en decibeles (dB) y varía según la velocidad de los vehículos y el tipo de capa de rodadura. En general, los pavimentos asfálticos producen menos ruido que los pavimentos rígidos para cualquier tipo de vehículo. Los elementos relacionados con la mezcla de la capa de rodadura que influyen en la generación del ruido durante el desplazamiento de los vehículos son: textura superficial, porosidad, rigidez de la mezcla. (Corros B. et al., 2009)

2.2.5.2. Índice de Regularidad Internacional (IRI)

El IRI es un acrónimo (palabra formada por otras palabras) que proviene de las palabras en inglés International Roughness Index, que traducido al español significa Índice de Regularidad Internacional. El Índice de Regularidad Internacional (IRI) es una medida estándar establecida por el Banco Mundial, que mide la regularidad de un pavimento (está relacionada a la serviciabilidad, que es el grado de comodidad de los usuarios). (Corros B. et al., 2009)

El IRI es un modelo matemático que mide el movimiento acumulado en la suspensión de un vehículo de pasajeros estándar al circular por una superficie de carretera a una velocidad de 80 km/h. El IRI se mide en mm/m o m/km. (Badilla Vargas, 2009)

De acuerdo con el ASTM E867 (2004), el término “roughness” se refiere a la “desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del

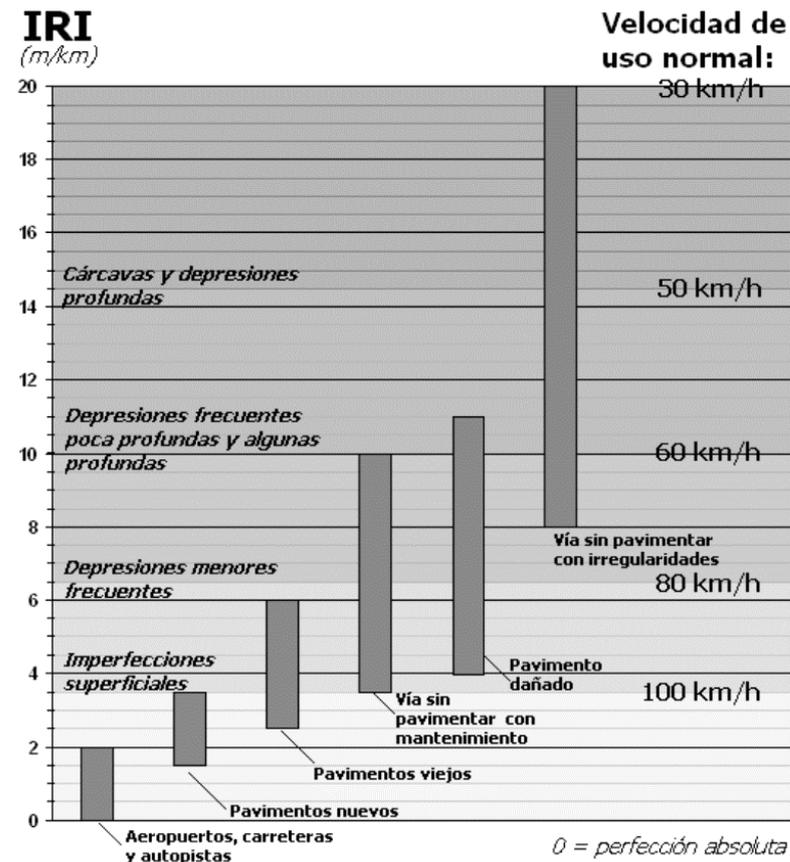
vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal”. Es por esa razón, que muchos autores emplean el término “regularidad”, puesto que se relaciona más con el término “roughness”, que con la definición de “rugosidad”.

2.2.5.3. Escala de regularidad IRI

La Figura 9 muestra la escala estándar de clasificación de la regularidad IRI, que depende del tipo de vía, su edad y condición superficial. Tener en cuenta que 1 m/km es igual a 1 mm/m.

Figura 9

Escala de regularidad IRI



Nota: Adaptado a partir de (Badilla Vargas, 2009).



2.2.5.4. Rugosímetro MERLIN

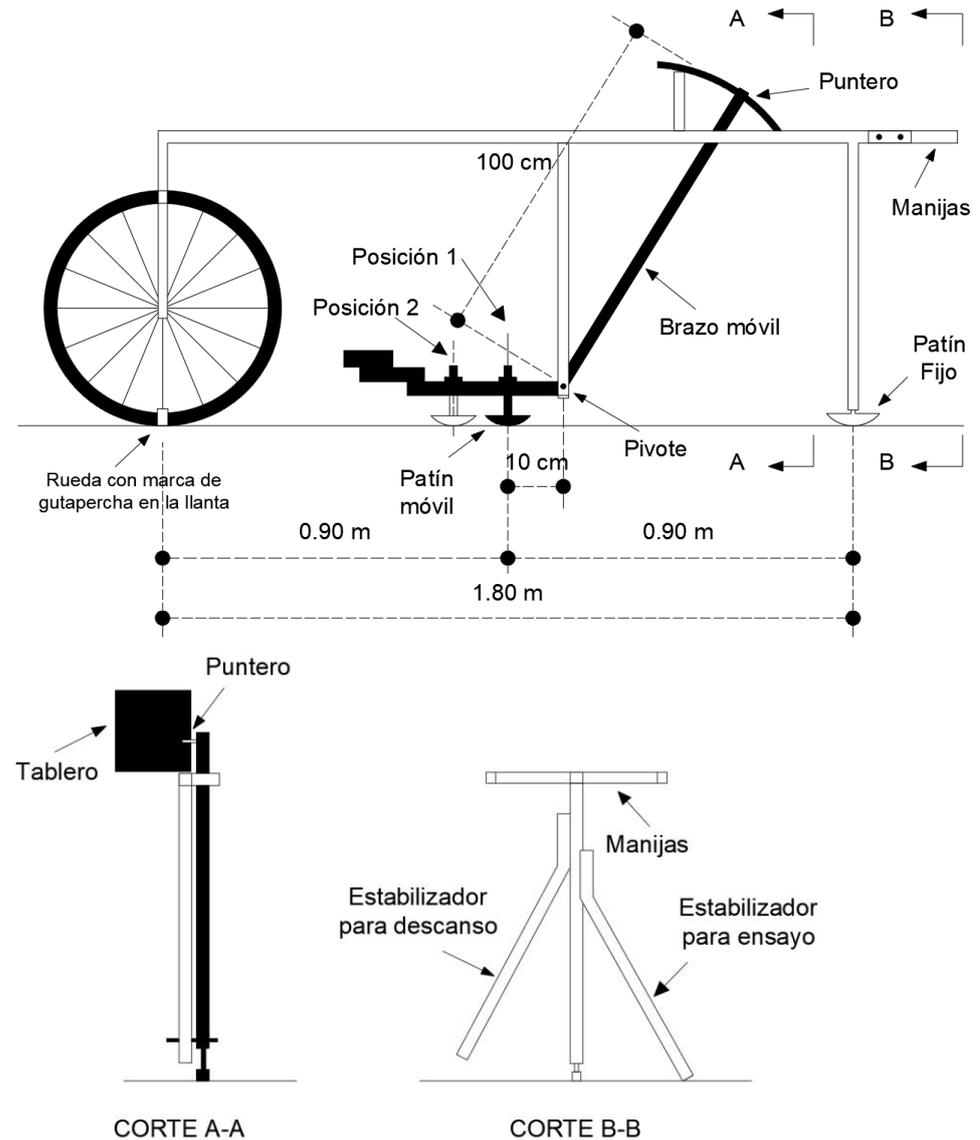
El rugosímetro MERLIN es un equipo utilizado para medir la rugosidad en pavimentos de asfalto, hormigón y tierra. MERLIN es un acrónimo (palabras formadas por otras palabras) que proviene de las palabras en inglés Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation, que traducido al español es: Máquina para Evaluar la Rugosidad con Instrumentos de Bajo Coste. Su funcionamiento se basa en el principio de medir las desviaciones de la superficie con respecto a una línea o cuerda promedio. Es necesario la medición de 200 desviaciones en forma consecutiva, a lo largo de la vía; además, debe existir un intervalo constante entre cada medición. (Corros B. et al., 2009)

De acuerdo con Del Águila Rodríguez (1999a) el rugosímetro MERLIN fue elaborado en 1990 por el Transportation Road Research Laboratory (TRRL), que es un Laboratorio británico de Investigación de Transportes y Caminos, dicho laboratorio se basó en el principio del perfilómetro estático, tenían el objetivo de crear un equipo de bajo costo, que sea práctico, con análisis simple, pero con resultados muy confiables (su exactitud es solo vencida por el método topográfico). El rugosímetro MERLIN es un aparato fácilmente adaptable, de uso simple y económico, que fue empleado en el Perú a partir del año 1993. Se recomienda la utilización del rugosímetro MERLIN cuando la longitud de las vías a evaluar no es muy extensa; puesto que, en vías con gran extensión (100 km o más) se nota el bajo rendimiento de este equipo al compararse con equipos dinámicos automatizados, por ejemplo: Bump Integrator, Mays Meter, Perfilómetro Laser, entre otros. Este bajo rendimiento se evidencia

aún más si se dispone de poco tiempo. La Figura 10 es un esquema del rugosímetro MERLIN, que indica las partes del equipo y algunas medidas. Además, se muestran vistas desde distintos cortes.

Figura 10

Esquema del rugosímetro MERLIN



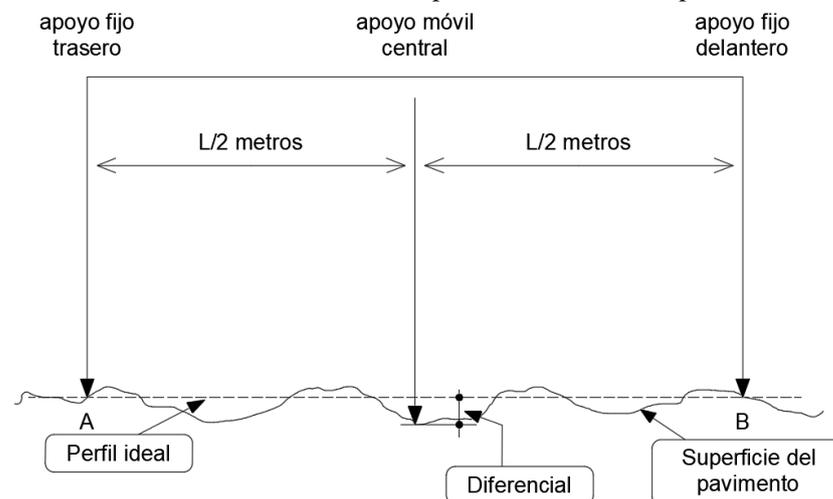
Nota: Adaptado a partir de (Del Águila Rodríguez, 1999b)

El rugosímetro MERLIN es un dispositivo que consiste en un marco con dos elementos verticales y uno horizontal. El elemento vertical situado en la parte de adelante cuenta con una rueda, mientras que el

trasero tiene dos soportes inclinados que permiten colocar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y descansar el dispositivo. En la parte posterior hay dos manijas que facilitan levantar y mover el equipo, haciéndolo rodar. En el centro del elemento horizontal se encuentra una barra vertical que no toca el suelo, y en su extremo pivota un brazo móvil. Este brazo móvil tiene su extremo inferior en contacto con el suelo gracias a un patín ajustable que se adapta a las irregularidades del terreno. En la parte superior del brazo móvil hay un puntero o indicador que se desliza sobre el borde de un tablero. (Del Águila Rodríguez, 1999b). La Figura 11 es la visualización del funcionamiento del rugosímetro MERLIN (mide la variación vertical entre la superficie del pavimento y el punto medio de una línea ficticia, conocida como “cuerda promedio” o perfil ideal).

Figura 11

Medición de las desviaciones respecto de la cuerda promedio



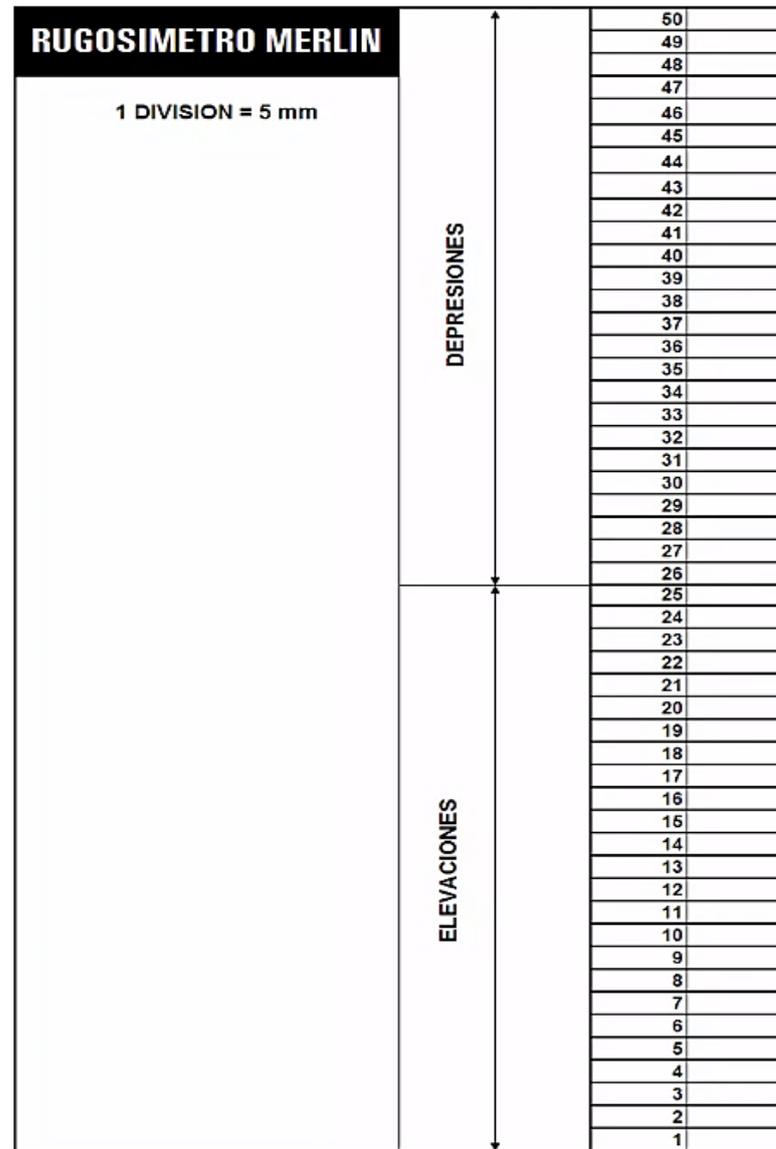
Nota: Adaptado a partir de (Corros B. et al., 2009)

La longitud de la “cuerda promedio” es 1.80 m, ya que ofrece las mejores correlaciones. La relación de brazos entre los extremos inferior (patín móvil – pivote) y superior (pivote – puntero) es de 1 a 10, lo que

significa que un desplazamiento vertical de 1 mm en el extremo inferior (patín móvil) produce un desplazamiento de 10 mm (1 cm) en el puntero superior. Los movimientos del puntero se registran en una escala de 50 divisiones, cada una de 5 mm de grosor, que se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Escala gráfica de desplazamientos



Fuente: (Del Águila Rodríguez, 1999b)

2.2.5.5. Formato de hoja de campo IRI

El formato de campo, como se aprecia en la Figura 13, formado por cuadrículas de 20 filas y 10 columnas.

Figura 13

Formato de hoja de campo IRI

	ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)											
	HOJA DE CAMPO - RUGOSÍMETRO MERLIN											
Vía:	Progresiva Inicial:					Fecha:						
Tramo:	Progresiva Final:					Realizado por:						
Carril:												
REGISTRO DE LAS LECTURAS										TIPO DE PAVIMENTO		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1											Afirmado	<input type="checkbox"/>
2												
3											Base Granular	<input type="checkbox"/>
4												
5											Base Imprimida	<input type="checkbox"/>
6												
7											Tratamiento Bicapa	<input type="checkbox"/>
8												
9											Carpeta en Frio	<input type="checkbox"/>
10												
11											Carpeta en Caliente	<input type="checkbox"/>
12												
13											Recapeo Asfáltico	<input type="checkbox"/>
14												
15											Sello	<input type="checkbox"/>
16												
17											Otros	<input type="checkbox"/>
18												
19												
20												
Observaciones:												

Nota: Elaboración propia.

2.2.5.6. Cálculo del IRI

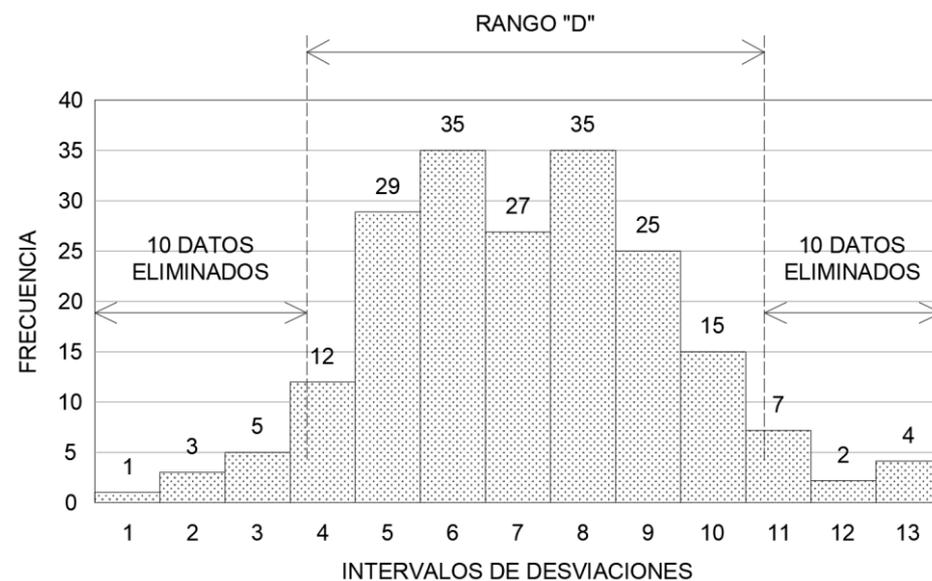
En la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), el proceso de medición con el rugosímetro MERLIN es continuo a una velocidad promedio de 2 km/h. El espaciamiento entre lecturas no es un factor crítico, pero es recomendable que sea un valor constante. (normalmente es 2m, porque es una vuelta de rueda). (Del Águila Rodríguez, 1999a)

2.2.5.6.1. Rango “D”

Las 200 mediciones de las irregularidades, desviaciones respecto de la “cuerda promedio”, pueden variar entre 1 a 50. La dispersión de los datos obtenidos se debe agrupar en intervalos de frecuencia, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Histograma de distribución de frecuencias



Nota: Adaptado a partir de (Del Águila Rodríguez, 1999b)



Si se presentan mayormente valores cercanos a 25 significa que el pavimento no presenta muchas variaciones; es decir, es de baja rugosidad (dispersión baja). Sin embargo, varios valores alejados de 25 indican que el pavimento es de rugosidad elevada (dispersión alta). A mayor rugosidad superficial, mayor será la variación de los desplazamientos.

Después de elaborar el histograma se debe eliminar el 10% de los 200 datos, 5% (10 datos del extremo inferior) y 5% (10 datos del extremo superior), ya que corresponden a posiciones poco representativas o lecturas erróneas. Luego se calcula el “ancho del histograma” en unidades de la escala, que es la cantidad de intervalos que no se han eliminado, de ser necesario considerar las fracciones que pueden resultar del descarte del 10% de los datos (unidades fraccionadas).

Posteriormente, se calcula el “ancho del histograma” en milímetros (mm); es decir, se multiplica la cantidad de intervalos no descartados por 5 (que es el valor del espesor en mm, que tiene cada unidad o división de la escala gráfica del tablero). De forma general, se emplea la siguiente ecuación:

$$D = N^{\circ} INE * 5 \quad (12)$$

Donde:

D : Parámetro estadístico que simboliza la variación de los datos obtenidos con el rugosímetro MERLIN (Valor Merlín).

$N^{\circ} INE$: Número de intervalos no eliminados



2.2.5.6.2. Factor de Corrección (F.C.)

La relación de brazos entre los extremos inferior (patín móvil – pivote) y superior (pivote – puntero) es de 1 a 10, pero esta relación puede variar debido al desgaste del patín del brazo móvil del rugosímetro MERLIN. Para corregir los resultados, se debe verificar la relación actual de brazos del equipo; y de ser necesario, se calculará un factor de corrección (F.C.) para trasladar los valores a condiciones estándar. (Del Águila Rodríguez, 1999a)

Para realizar esta verificación se debe emplear un elemento circular de bronce (pastilla) de 5 cm de diámetro y 6 mm de espesor aproximadamente. El procedimiento es el siguiente:

- Calcular el promedio de 4 medidas, diametralmente opuestas, del espesor de la pastilla en milímetros (con una aproximación al décimo de mm).
- Ubicar el rugosímetro MERLIN en una superficie plana y registrar la lectura correspondiente a la posición del puntero en el tablero, asegurándose de que el patín móvil esté en contacto con el suelo.
- Levantar el patín móvil y colocar la pastilla de calibración debajo. Si asumimos que la relación de brazos continúa siendo de 1 a 10, el puntero se desplazará un espacio igual al espesor de la pastilla de calibración multiplicado por 10 (porque cada casillero mide 5 mm).



- Si la multiplicación no da el valor esperado, se debe calcular un factor de corrección (F.C.) mediante la siguiente ecuación:

$$F.C. = \frac{EP * 10}{[(LI - LF) * 5]} \quad (13)$$

Donde:

EP : Espesor de la pastilla.

LI : Posición inicial del puntero.

LF : Posición final del puntero.

2.2.5.6.3. Variación de la relación de brazos

El patín móvil del rugosímetro MERLIN se puede poner en 2 posiciones:

- Posición a 10 cm del punto de pivote (posición standard). Se utiliza para nuevos pavimentos o zonas muy lisas (con baja rugosidad). La relación de brazos a emplear será de 1 a 10; entonces, para el cálculo del valor “D” corregido se debe multiplicar por un factor de 1.
- Posición a 20 cm del punto de pivote (posición alterna). Aplicada para pavimentos afirmados deformados o pavimentos bastante dañados (alta rugosidad). La relación de brazos a usar será de 1 a 5; entonces, para el cálculo del valor “D” corregido se debe multiplicar por un factor de 2.

2.2.5.6.4. Rango “D” corregido

El valor del rango “D” o “ancho del histograma” en milímetros, debe modificarse multiplicándolo por el factor de corrección (F.C.) y el factor de la relación de brazos empleada en los ensayos. Este nuevo valor representa a la rugosidad en milímetros (mm), el cual previamente estaba en “unidades MERLIN”. (Del Águila Rodríguez, 1999a)

2.2.5.6.5. Rugosidad en la escala IRI

El IRI es un parámetro utilizado para uniformizar los resultados obtenidos con los diversos equipos. Así, por ejemplo, existen ecuaciones para transformar la rugosidad hallada con el equipo rugosímetro MERLIN (rugosidad en “unidades MERLIN”) a la escala del Índice de Regularidad Internacional (IRI). (Del Águila Rodríguez, 1999a)

Cuando $2.4 < IRI < 15.9$ m/km:

$$IRI = 0.593 + 0.0471 * D \quad (14)$$

Cuando $IRI \leq 2.4$ m/km:

$$IRI = 0.0485 * D \quad (15)$$

Donde:

IRI : Índice de Regularidad Internacional.

D : Parámetro estadístico que establece la magnitud de la variación de los valores hallados con el rugosímetro MERLIN (Valor Merlín).



Después de calcular la ecuación correspondiente, tendremos un valor en m/km. La primera ecuación mencionada es adecuada para examinar pavimentos en servicio que tengan una superficie de rodadura asfáltica, granular o de tierra, únicamente dentro del intervalo especificado. De acuerdo con la experiencia de ensayos realizados en Perú, se llegó a la conclusión que la primera ecuación no es aplicable en pavimentos asfálticos nuevos (con poca deformación); es decir, vías recién pavimentadas o rehabilitadas parcialmente. Entonces, se desarrolló una nueva ecuación para valores de IRI menores o iguales a 2.4 m/km.

2.2.5.7. IRI característico para el control de calidad de pavimentos

Según (Del Águila Rodríguez, 1999b) existe un parámetro denominado IRI característico, que es empleado para aceptar o rechazar un pavimento asfáltico nuevo o rehabilitado. Se tiene:

$$IRI_C = IRI_P + 1.645 * \sigma \quad (16)$$

Donde:

IRI_C : IRI característico.

IRI_P : IRI promedio.

σ : Desviación estándar.

De acuerdo a la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014) se deben cumplir ciertos valores de la rugosidad inicial de un pavimento nuevo, pavimentos existentes que han sido reforzados, y la rugosidad durante el periodo de servicio, dependiendo del tipo de

carretera. La Tabla 7 indica los valores de la rugosidad característica según el tipo de carretera; además, se considera si el pavimento es nuevo, existente reforzado o si el pavimento ya está en periodo de servicio. Según el tipo de carretera, se consideran diversos valores de confiabilidad.

Tabla 7

Rugosidad Característica según el tipo de carretera. Pavimentos asfálticos

Tipo de carretera	Rugosidad inicial. Pavimento nuevo IRI (m/km)	Rugosidad inicial. Pavimento reforzado IRI (m/km)	Rugosidad durante el periodo de servicio IRI (m/km)	Observación
Autopistas: Carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	2.00	2.50	3.50	Confiabilidad de 95%.
Carreteras Duales o Multicarril: Carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	2.00	2.50	3.50	Confiabilidad de 95%.
Carreteras de Primera Clase: Carreteras con un IMDA entre 4000 y 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Confiabilidad de 95%.
Carreteras de Segunda Clase: Carreteras con un IMDA entre 2000 y 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Confiabilidad de 90%.
Carreteras de Tercera Clase: Carreteras con un IMDA entre 400 y 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	3.00	3.50	4.50	Confiabilidad de 90%.
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: Carreteras con un IMDA menor o igual de 200 veh/día, de una calzada.	3.00	3.50	4.50	Confiabilidad de 85%.

Nota: Adaptado a partir de (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014)

De la tabla mostrada, todos los valores numéricos corresponden a “rugosidades características”. Además, todas las observaciones indican “rugosidades características” para una confiabilidad de distintos porcentajes.

2.2.5.8. Índice de Serviciabilidad Presente del Pavimento (PSI)

De acuerdo a (Corros B. et al., 2009) Present Serviciability Index (PSI) traducido al español significa Índice de Serviciabilidad Presente. El PSI es un parámetro que evalúa la situación del pavimento, mediante la correlación de la opinión de expertos en la calidad del rodaje, la rugosidad del pavimento, y evaluaciones visuales de las fallas presentes en el pavimento. La escala del PSI puede variar de 0 (pavimento fallado, camino intransitable) a 5 (pavimento nuevo y bien construido, situación ideal). Este índice fue incorporado por la AASHTO, para tener en cuenta la variación de la serviciabilidad de un pavimento desde el momento de su construcción (inicio de su vida de servicio) hasta que falle el pavimento (dependiendo de la importancia de la vía). El parámetro que más afecta al cálculo del PSI, es la rugosidad o deformación longitudinal. De acuerdo a la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014) el parámetro PSI es empleado en la fórmula del diseño de la estructura de un pavimento flexible. Cuando la condición de la vía empeora por las fallas presentes, el valor del PSI también se reduce.

Según la AASHTO, citado en la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014) la condición funcional del pavimento se relaciona con la estructural, para establecer el nivel de deterioro de los pavimentos. El

El PSI mide la capacidad de un pavimento para soportar el tránsito para el que fue diseñado, evaluando la comodidad de circulación que brinda al usuario en función de la calidad de la superficie de rodadura y los aspectos relacionados con la seguridad vial. La calificación del estado de un pavimento mediante el PSI se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Escala de Índice de Serviciabilidad

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD	CALIDAD
5	Muy Buena
4	
3	Buena
2	Regular
1	Mala
0	Pésima

Nota: Adaptado de la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014)

2.2.5.9. Estimación del IRI y del PSI en vías rehabilitadas

De acuerdo a (Corros B. et al., 2009) la ecuación que correlaciona el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y el Índice de Serviciabilidad Presente del Pavimento (PSI) es la siguiente:

$$PSI = \frac{5}{e^{\left(\frac{IRI}{5.5}\right)}} \quad (17)$$

Donde:

IRI : Índice de Regularidad Internacional.

e : Número épsilon. (es la base del logaritmo neperiano).



2.2.6. Evaluación estructural de pavimentos

De acuerdo a (Hoffman & Del Aguila, 1985) la evaluación estructural de pavimentos, radica en el cálculo de la capacidad portante de la estructura pavimento – subrasante en una vía existente, durante algún momento de su vida de servicio. Según (Corros B. et al., 2009) hay una gran disparidad entre el diseño de un nuevo pavimento y el diseño de la rehabilitación de uno ya existente. Los pavimentos existentes, pueden estar deteriorados por las cargas de tránsito, efectos climáticos y el tiempo. Este pavimento presenta un valor estructural remanente, el cual es considerado para el diseño de la rehabilitación. Por tal motivo, se debe realizar la evaluación del pavimento existente, para analizar y calcular el valor estructural remanente. Durante esta evaluación, también se debe hallar las causas que produjeron las fallas en el pavimento a rehabilitar; para determinar las acciones de mantenimiento y/o rehabilitación que deberán ser ejecutadas.

2.2.6.1. Métodos de evaluación estructural

2.2.6.1.1. Evaluación estructural destructiva

Según (Guzmán Suárez, 2023), la evaluación estructural destructiva o Destructive Testing (DT) consiste en la destrucción del pavimento, mediante excavaciones o sondeos. La extracción de muestras asfálticas, es útil para determinar el espesor de las capas que conforman en pavimento y para identificar la mezcla empleada en la construcción. La exploración geotécnica permite obtener las propiedades de la estructura del pavimento y de la subrasante, mediante ensayos de laboratorio. Esta metodología es costosa, lenta y destructiva.

2.2.6.1.2. Evaluación estructural no destructiva

Según (Guzmán Suárez, 2023), la evaluación estructural no destructiva o Nondestructive Testing (NDT) consiste en realizar mediciones en la superficie del pavimento, y vincular los resultados con las propiedades estructurales del pavimento.

De acuerdo con (Hoffman & Del Aguila, 1985) una alternativa “no destructiva” involucra el análisis e interpretación de las deflexiones en la superficie del pavimento, ya que muestran el funcionamiento del sistema pavimento - subrasante bajo una carga aplicada. Esta metodología es simple, económica y rápida. Por lo tanto, se puede afirmar que se trata de un procedimiento de diseño inverso, ya que se fundamenta en la respuesta del sistema pavimento-subrasante para establecer sus propiedades estructurales. Son "no destructivas" porque los ensayos pueden ser repetidos cuando sea necesario.

2.2.6.2. Deflexiones en pavimentos

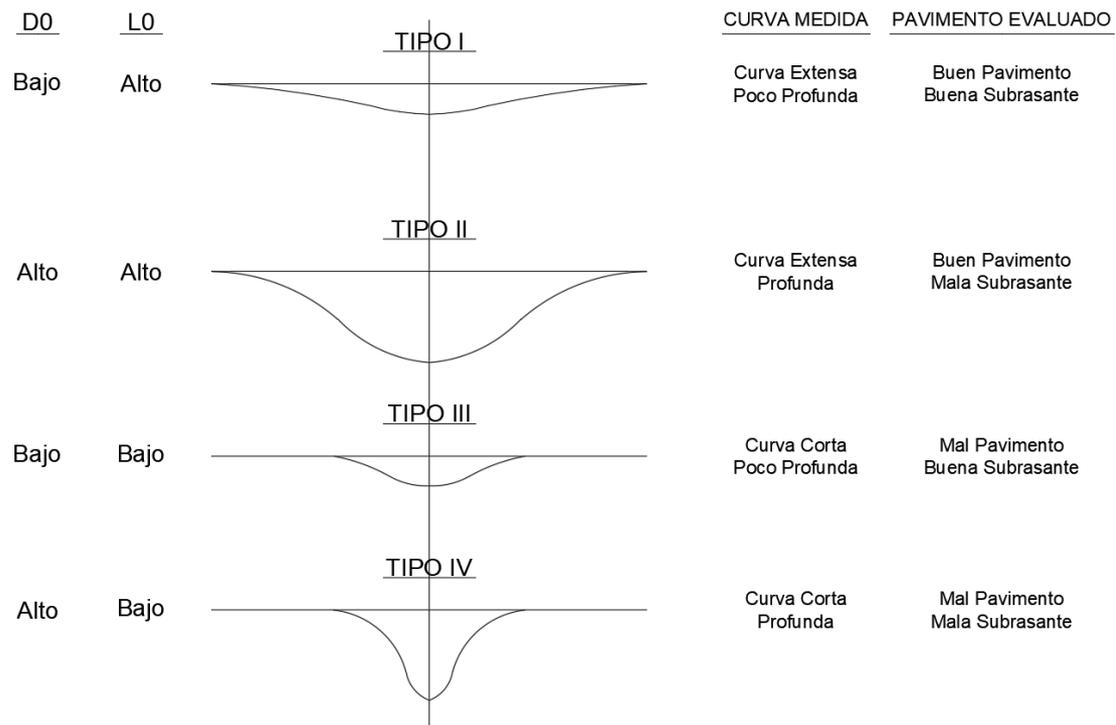
Según (Corros B. et al., 2009) la deflexión en los pavimentos es su respuesta ante un estímulo, es la medida de la deformación elástica vertical bajo la aplicación de una carga. Cuando los esfuerzos verticales en la subrasante disminuyen, la deflexión también se reduce. Por lo tanto, al incrementar el grosor de las capas del pavimento o aumentar su rigidez, la deflexión se reduce. En general, la subrasante contribuye entre el 70% y el 95% de la deflexión medida en la superficie del pavimento, lo que indica que la deflexión mayor resulta de la compresión elástica de la subrasante. El módulo resiliente es una de las propiedades elásticas más importantes

de la subrasante. La Figura 16 muestra cuencos característicos para diferentes relaciones de rigideces entre el pavimento y la subrasante.

Figura 16

Significado cualitativo de diferentes cuencos de deflexiones

Nota: Adaptado a partir de (Hoffman & Del Aguila, 1985). Donde: “ D_0 ” es la deflexión máxima y “ L_0 ”



es la longitud elástica; son conceptos aplicados en el Modelo de Hogg.

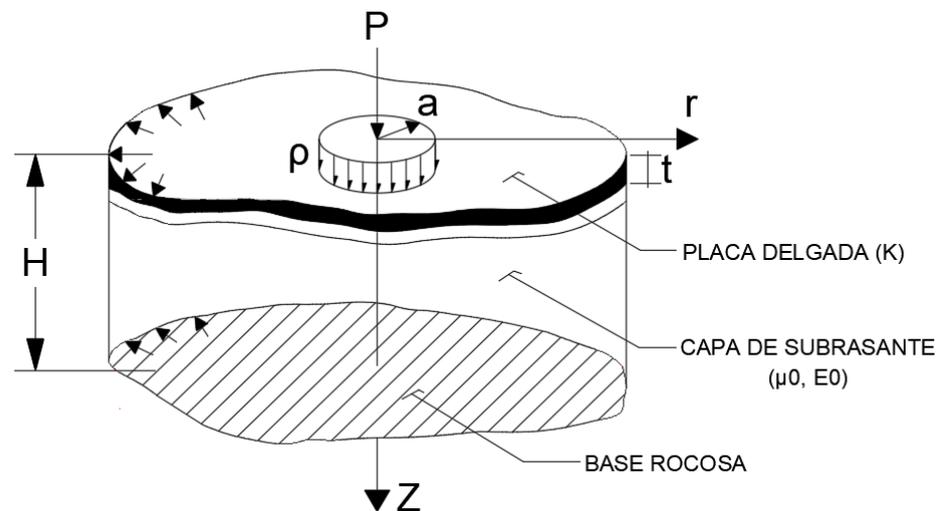
De acuerdo con (Guzmán Suárez, 2023), la forma y tamaño del cuenco de deflexiones brinda información sobre las características estructurales, del pavimento y de la subrasante. Metodología para el cálculo de las deflexiones. Según Hoffman & Del Aguila (1985), la metodología para calcular las deflexiones utilizando la Viga Benkelman implica medir las deflexiones que se producen en la superficie del pavimento con el fin de determinar los parámetros estructurales del sistema pavimento-subrasante, bajo la carga aplicada del eje trasero de un camión con un peso de 18,000 libras.

2.2.6.2.1. El modelo de Hogg

En 1945, Burmister formuló una teoría sobre modelos de capas elásticas para representar los pavimentos flexibles, mediante modelos teóricos, basados en los principios de Boussinesq. Posteriormente, se mejoró la teoría para obtener simulaciones más realistas. El “modelo de Hogg”, la base matemática de la metodología de evaluación estructural de pavimentos, representa al pavimento como “una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica, lineal, homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa.” (Hoffman & Del Aguila, 1985, p. 8). La Figura 17 es la representación de la geometría del Modelo de Hogg.

Figura 17

Esquema del Modelo de Hogg



Nota: Adaptado a partir de (Hoffman & Del Aguila, 1985)

Según Hoffman & Del Aguila (1985), la metodología consiste en comparar las curvas de deflexión obtenidas en campo con las curvas

teóricas generadas a partir del modelo de Hogg, utilizando la misma configuración y carga aplicadas en campo. Cuando las curvas experimentales coinciden con las teóricas, se puede determinar una combinación única de parámetros elásticos que describen el pavimento analizado. Estas curvas de deflexión ofrecen información valiosa a cerca de las propiedades estructurales del pavimento y también de la subrasante.

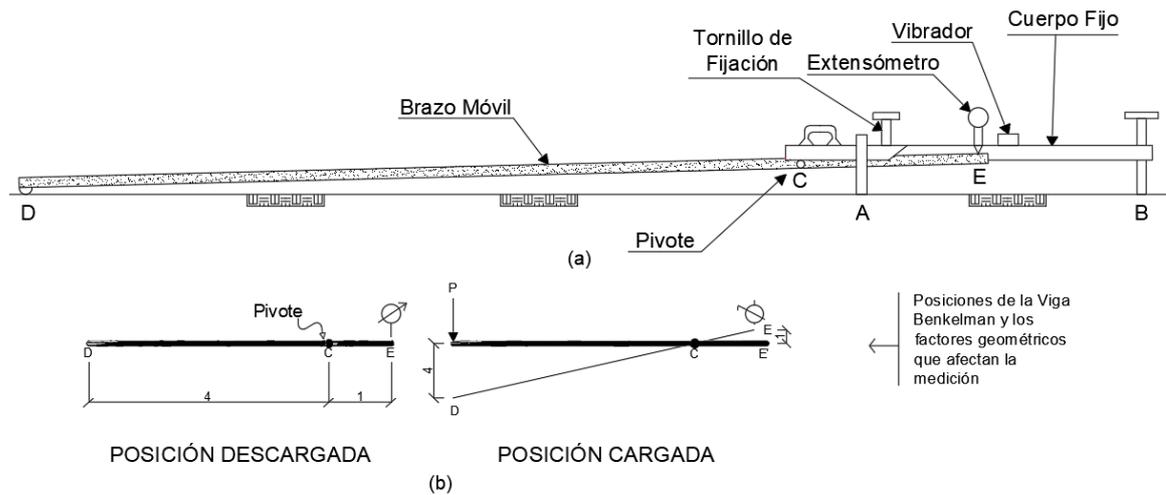
2.2.6.3. Viga Benkelman

Según Corros B. et al. (2009), la Viga Benkelman es un equipo deflectómetro que mide las deflexiones superficiales del pavimento. Mide la recuperación de la deflexión estática de un pavimento asfáltico bajo una carga aplicada. Funciona según el principio de la palanca: los dos brazos de este dispositivo giran alrededor de un eje horizontal fijo, lo que significa que cualquier movimiento en el extremo de la viga en contacto con el suelo genera un movimiento proporcional en el otro extremo, que es registrado por un contador extensómetro.

De acuerdo con Hoffman & Del Aguila (1985), la Viga Benkelman fue desarrollada en 1953 por el ingeniero con el mismo nombre, debido al desarrollo de ensayos viales de la WASHO (WASHO Road Test). En la Figura 18 se muestra el esquema de la Viga Benkelman y su principio de operación.

Figura 18

Viga Benkelman



Nota: Adaptado de (Hoffman & Del Aguila, 1985)

Como se puede apreciar en la figura, la Viga Benkelman tiene 2 componentes:

- Un cuerpo de soporte; el cual se coloca directamente sobre el terreno mediante 3 apoyos: 2 apoyos delanteros fijos, representados por la letra “A” y 1 apoyo trasero regulable, representado por la letra “B”.
- Un brazo móvil; el cual se conecta al cuerpo fijo de soporte o sostén mediante una articulación de giro o pivote, representada por la letra “C”. Un extremo del brazo móvil se apoya sobre el terreno, está representado por la letra “D”; mientras que el otro extremo está en contacto con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical, representado por la letra “E”.

La Viga Benkelman está equipada con un vibrador integrado que se activa durante los ensayos, cuya función es prevenir que el indicador del dial se quede atascado y que cualquier factor externo interfiera con las lecturas. El



extremo del brazo móvil "D", también llamado "punta de la viga", tiene el grosor adecuado para colocarse entre una de las llantas traseras dobles de un camión cargado. Principio de medición:

- El peso del camión provoca una deformación en el pavimento, lo que causa que el extremo del brazo móvil "D" descienda una cierta distancia en comparación con el nivel original de la superficie. Esta acción hace que el brazo "DE" gire alrededor del punto fijo "C" en relación con el cuerpo "AB", lo que resulta en un movimiento vertical en el vástago del extensómetro.
- Al retirarse las llantas del camión, el punto "D" recupera la deformación elástica sufrida, lo que permite tomar una nueva lectura en el dial mediante el mismo mecanismo.

Luego, se realiza los cálculos respectivos, según los datos recogidos en campo. Con las 2 lecturas del dial del extensómetro es posible calcular cuánto deflectó el pavimento en el punto "D" del equipo. Entonces, cabe resaltar que lo que se mide es la recuperación del punto "D" al quitar la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar la carga. Según Corros B. et al. (2009), los tipos de Viga Benkelman son: Viga Simple, que tiene un solo palpador o brazo de medición y por lo tanto, también tiene un solo dial extensómetro que mide la máxima deflexión (D0); y Viga Múltiple, que tiene más de un brazo de medición, articulado en una misma base de referencia y por lo tanto, también tiene más de un dial extensómetro que mide la máxima deflexión (D0) y otras deflexiones a una distancia "R" del punto de carga máxima (0).

2.2.6.5. Consideraciones en campo

Los puntos de medición en el pavimento a evaluar, generalmente se ubican en la mitad exterior de un carril. La distancia desde el punto de evaluación al borde del pavimento está indicada en la Tabla 8.

Tabla 8

Distancia de ensayo desde el borde del pavimento

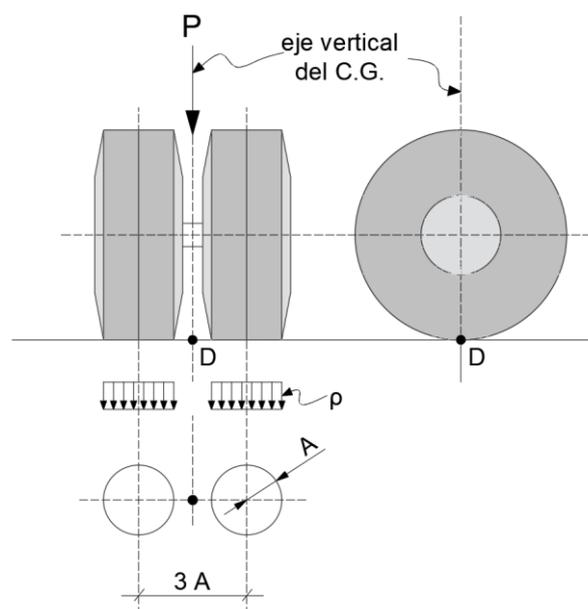
Ancho del carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento
2.70 m	0.45 m
3.00 m	0.60 m
3.30 m	0.75 m
3.60 m o más	0.90 m

Nota: Adaptado a partir de (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016).

La Figura 20 es la representación de la configuración del sistema de carga, desde un punto de vista geométrico. Se tiene un rango de tolerancia de 3 pulgadas (in) alrededor del punto.

Figura 20

Configuración geométrica del sistema de carga con Viga Benkelman

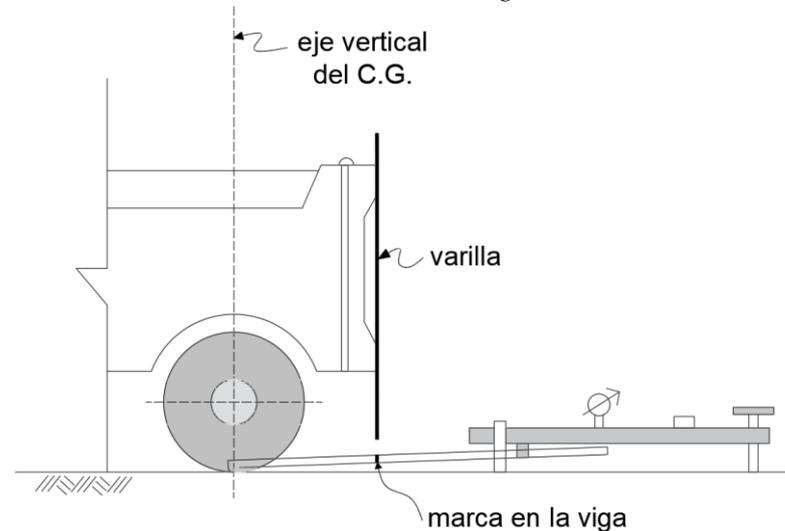


Nota: Adaptado de (Hoffman & Del Aguila, 1985)

En la Figura 21, se muestra la posición inicial de medición con la Viga Benkelman, sobre el punto de medición seleccionado.

Figura 21

Posición inicial de medición con la viga Benkelman



Nota: Adaptado a partir de (Hoffman & Del Aguila, 1985)

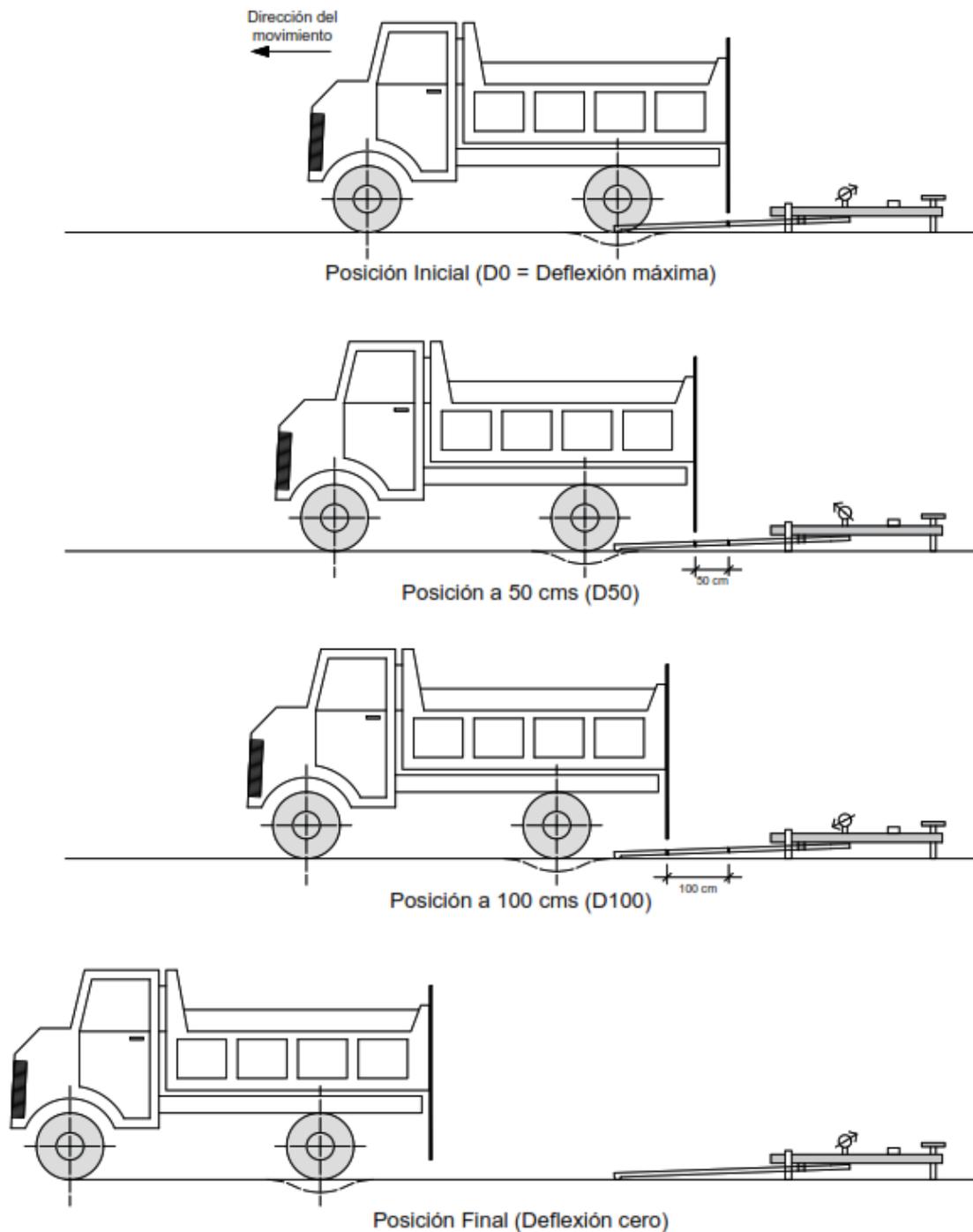
Según Hoffman & Del Aguila (1985), se necesitan por lo menos 3 lecturas para la evaluación estructural (a distancias previamente elegidas); pero se pueden realizar más mediciones para su verificación o para graficar las curvas de deflexiones producidas.

Por lo general, la primera marca adicional se coloca a una distancia considerando que la deflexión en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima registrada en la posición inicial. La segunda marca adicional se ubica a una distancia igual al doble de la anterior. Por esta razón, es necesario realizar estimaciones preliminares antes de recopilar datos en el tramo a evaluar. Aunque es común que se presenten variaciones durante los ensayos, no se deben realizar ajustes si las deflexiones medidas en la primera marca adicional se encuentran dentro del rango del 35% al 65% de la deflexión máxima.

La Figura 22 es un esquema del proceso de medición de deflexiones con la Viga Benkelman.

Figura 22

Proceso de medición con la Viga Benkelman



Nota: Adaptado a partir de (Hoffman & Del Aguila, 1985)



Tener en cuenta que la posición final se da a la distancia de cuando la deflexión es 0. Este trabajo en campo debe ser permanentemente supervisado por un ingeniero de campo, quien es el encargado de verificar los valores obtenidos y anotar los factores que pudieran alterar las mediciones en campo.

2.2.6.6. Cálculo de la deflectometría

2.2.6.6.1. Modelo de carga

La carga se origina por el eje trasero simple con llanta doble del camión. Dicha carga aplicada es de 18000 libras; además, Hoffman & Del Aguila (1985), indican que la presión de inflado puede variar entre 75 a 85 psi (lb/in²). Mientras que Corros B. et al. (2009) indican que la presión de inflado de las llantas del camión debe estar entre 80 y 90 psi (lb/in²).

De acuerdo con Hoffman & Del Aguila (1985), se asume que la presión de inflado es igual a la presión de contacto, la huella de contacto de cada llanta es circular, con radio "A", y que la distancia entre los centros de cada llanta es de "3A". Por lo que se establece la siguiente ecuación:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi * \rho}} \quad (18)$$

Donde:

A : Radio de la huella circular de contacto, en pulgadas.

P : Carga sobre una llanta, en libras.

ρ : Presión de inflado, en psi.

Tener en cuenta que se estableció una carga de 18000 libras en el eje trasero del camión; además, dicho eje trasero presenta llantas dobles (tiene 4 llantas en total). Por lo tanto, la carga sobre una llanta (P) es de 4500 libras.

2.2.6.6.2. Determinación de R₅

“R₅ es la distancia "R" del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación DR/D₀ = 0.5 en la curva de deflexiones” (Hoffman & Del Aguila, 1985, p. 23)

En el Modelo de Hogg, se tiene la siguiente ecuación, R₅ en centímetros:

$$R_5 = R * \frac{A^C - B}{\left(A * \left(\frac{D_0}{D_R} - 1 \right) \right)^C - B} \quad (19)$$

Donde:

R : Distancia a la que se mide la deflexión DR, en centímetros.

D₀ : Deflexión máxima.

D_R : Deflexión a la distancia R.

A, B, C: Coeficientes de correlación.

Es necesario el cálculo del valor R₅ para calcular la Longitud Elástica del Pavimento (L₀).

Los valores de los coeficientes de correlación A, B, C se dan en la Tabla 9.

Tabla 9*Coefficientes de correlación para el cálculo de R5*

H/L_0	μ	A	B	C
∞	Cualquier valor	3.115	0	0.584
$\frac{10}{D_R/D_0 > 0.7}$	0.5	2.460	0	0.592
$\frac{10}{D_R/D_0 < 0.7}$	0.5	371.1	2	0.219
$\frac{10}{D_R/D_0 > 0.426}$	0.4	2.629	0	0.548
$\frac{10}{D_R/D_0 < 0.426}$	0.4	2283.4	3	0.2004

Nota: Adaptado a partir de (Hoffman & Del Aguila, 1985)

La tabla mostrada nos da diversos valores de los coeficientes de correlación, según los valores de H/L_0 , necesarios para el cálculo de R5 en el modelo de Hogg.

2.2.6.6.3. Determinación de la Longitud Elástica (L_0)

Según Hoffman & Del Aguila (1985), la Longitud Elástica (L_0) del pavimento se calcula bajo la siguiente ecuación, L_0 en centímetros:

$$L_0 = \frac{Y * R_5 + \sqrt{(Y * R_5)^2 - 4 * A * X * R_5}}{2} \quad (20)$$

Donde:

A : Radio de la huella circular de contacto, en centímetros.

X, Y : Coeficientes de correlación.

La Longitud Elástica (L_0) es necesaria para luego calcular el Módulo de Elasticidad de la Subrasante (E_0). Los valores de los coeficientes de correlación X, Y se dan en la Tabla 10.

Tabla 10*Coefficientes de correlación para el cálculo de L_0*

H/L_0	μ	X	Y
10	0.5	0.183	0.62
10	0.4	0.192	0.602
∞	Cualquier valor	0.18	0.525

Nota: Adaptado a partir de (Hoffman & Del Aguila, 1985)

2.2.6.6.4. Determinación del Módulo de Elasticidad de la Subrasante**(E0)**

Según Hoffman & Del Aguila (1985), el primer paso para calcular este módulo es determinar la relación teórica entre la rigidez para una carga puntual y la rigidez para una carga distribuida sobre una superficie, utilizando como base el cociente A/L_0 . La rigidez se define como la relación entre la carga aplicada y la deflexión resultante ($S = P/D_0$).

$$\frac{S_0}{S} = 1 - M * \left(\frac{A}{L_0} - 1 \right) \quad (21)$$

Donde:

A : Radio de la huella circular de contacto, en centímetros.

 L_0 : Longitud elástica, en centímetros. S_0 : Rigidez para carga puntual.

S : Rigidez para carga de área.

M : Coeficiente numérico que puede tener los siguientes

valores:

Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.5$; $M = 0.52$



Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.4$; $M = 0.48$

Para $H/L_0 = \infty$; $\mu =$ cualquier valor; $M = 0.44$

El siguiente paso, consiste en calcular el Módulo de Elasticidad de la Subrasante (E_0), mediante la siguiente ecuación en kg/cm²:

$$E_0 = \left(\frac{K * I * P}{L_0 * D_0} \right) * \frac{S_0}{S} \quad (22)$$

Donde:

S_0 : Rigidez para carga puntual.

S : Rigidez para carga de área.

K : Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante, puede tener los siguientes valores:

Para: $\mu = 0.5$; $K = 1.5$

Para: $\mu = 0.4$; $K = 1.633$

I : Coeficiente numérico que puede tener los siguientes valores:

Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.4$; $I = 0.1689$

Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.5$; $I = 0.1614$

Para $H/L_0 = \infty$; $\mu =$ cualquier valor; $I = 0.1925$

P : Carga total en la llanta doble (9000 lb), en kilogramos.

L_0 : Longitud Elástica, en centímetros.

D_0 : Deflexión máxima, en centímetros.

Como se puede apreciar en la ecuación, el valor E_0 es inversamente proporcional a la Longitud Elástica (L_0) y a la Deflexión máxima (D_0). Lo que significa que cuanto menor sea el valor de E_0 , mayores serán los valores de L_0 y D_0 .

La conexión entre el Módulo de Elasticidad de la Subrasante (E_0) y el valor CBR de la subrasante se emplea para simplificar el diseño del refuerzo pedido o para validar diseños a través de métodos tradicionales. Esta relación fue determinada mediante experimentos al comparar los valores de E_0 obtenidos mediante evaluaciones estructurales (con la Viga Benkelman) con los valores de CBR medidos en el mismo sitio. A partir de varias pruebas, se obtuvo la siguiente fórmula que relaciona E_0 , expresado en kg/cm^2 , con el CBR, expresado en porcentaje.

$$E_0 = (100 \text{ a } 160) * CBR \quad (23)$$

El coeficiente "100 a 160" se denomina "factor de CBR"; es importante resaltar que se recomienda un coeficiente de "100 a 110" para ensayos rutinarios (a menos que ciertos factores obliguen un cambio).

2.2.6.6.5. Corrección de deflexiones por temperatura

Según (Guzmán Suárez, 2023), las mediciones de las deflexiones de los pavimentos se realizan a diferentes temperaturas, puesto que las condiciones ambientales varían a lo largo del día. Para poder realizar comparaciones entre diferentes tramos de la vía, las deflexiones medidas a diferentes temperaturas se debe normalizar a una temperatura referencial (usualmente es 20°C).

De acuerdo con (Guzmán Suárez, 2023), existen varios métodos para realizar la corrección por temperatura de las deflexiones medidas en el punto de aplicación de la carga. En la normativa argentina se indica que las deflexiones medidas con viga Benkelman y con equipos FWD se pueden normalizar a temperaturas de 20 °C, se tiene:

$$D_{ref} = \frac{D_{ca}}{1 + \frac{(T_{ca} - 20) * h}{1000}} \quad (24)$$

Donde:

D_{ref} : Deflexión corregida a la temperatura de referencia, mm/100.

D_{ca} : Deflexión medida a la temperatura de ensayo, mm/100.

T_{ca} : Temperatura a la profundidad media de la capa asfáltica al momento del ensayo, en °C.

h : Espesor de la capa de concreto asfáltico, en cm.

2.2.6.6.6. Definición de secciones homogéneas

Según (Guzmán Suárez, 2023), teniendo las deflexiones, se puede dividir a la vía evaluada en tramos de comportamiento o características similares, esto con el objetivo de facilitar el cálculo de los parámetros de diseño por sección.

Existen varios métodos, entre los cuales destacan: método de las diferencias absolutas, método LCPC, método de las sumas acumuladas,

método de las diferencias acumuladas, modelos autoregresivos y segmentación bayesiana. (Solminihac T. et al., 2019).

La guía de diseño AASHTO 1993, toma el método de análisis por diferencias acumuladas. En dicho método, los tramos homogéneos se diferencian por los cambios en el sentido de la pendiente. Se debe considerar los sectores homogéneos y no las deflexiones individuales, para planificar las actividades de mantenimiento necesarias.

2.2.6.6.7. Cuencos característicos

De acuerdo con (Guzmán Suárez, 2023), es necesario establecer en cada sección homogénea un cuenco de deflexiones, que represente a toda su sección. El cuenco característico se determina después de realizar las correcciones a las deflexiones por carga y por temperatura. Luego, se realiza el cálculo de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{D} = \frac{\sum D}{n} \quad (25)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(D - \bar{D})^2}{n - 1}} \quad (26)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{D}} \quad (27)$$

Donde:

D : Deflexión.

\bar{D} : Deflexión media.

n : Número de deflexiones.



σ : Desviación estándar.

C_V : Coeficiente de variación.

También se debe calcular una deflexión característica para cada sección, que corresponde a la deflexión que mejor representa a la sección:

$$D_C = \bar{D} + f * \sigma \quad (28)$$

Donde:

D_C : Deflexión característica.

\bar{D} : Deflexión media.

f : Número de desviaciones estándar.

σ : Desviación estándar.

2.2.6.6.8. Radio de curvatura (RC):

Según (PITRA, 2018), es el punto de inflexión del cuenco de deflexiones, en su punto más crítico. El radio de curvatura señala la capacidad estructural del pavimento flexible para distribuir los esfuerzos a las demás capas.

$$RC = \frac{3125}{D_0 - D_{25}} \quad (29)$$

Donde:

RC : Radio de curvatura, mm.

D_0 : Deflexión bajo el eje de carga.

D_{25} : Deflexión a 25 cm del eje de carga.

2.2.6.7. Deflexión característica

La (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014) indica las ecuaciones de las deflexiones características que se deben cumplir, indicadas en la Tabla 11.

Tabla 11

Deflexión Característica según el tipo de carretera

Tipo de carretera	Deflexión Característica (D_c)	Observación
Autopistas: Carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	$D_c = D_m + 2.000 * \sigma$	Confiabilidad de 98%.
Carreteras Duales o Multicarril: Carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles.	$D_c = D_m + 1.645 * \sigma$	Confiabilidad de 95%.
Carreteras de Primera Clase: Carreteras con un IMDA entre 4000 y 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1.645 * \sigma$	Confiabilidad de 95%.
Carreteras de Segunda Clase: Carreteras con un IMDA entre 2000 y 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1.282 * \sigma$	Confiabilidad de 90%.
Carreteras de Tercera Clase: Carreteras con un IMDA entre 400 y 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1.282 * \sigma$	Confiabilidad de 90%.
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: Carreteras con un IMDA menor o igual de 200 veh/día, de una calzada.	$D_c = D_m + 1.036 * \sigma$	Confiabilidad de 85%

Nota: Adaptado a partir de (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014). Donde: “ D_c ” es deflexión característica, “ D_m ” es deflexión media y “ σ ” es la desviación estándar. Además, todas las observaciones indican “deflexiones características” para una confiabilidad de distintos porcentajes.



2.2.6.8. Deflexión admisible

De acuerdo con la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014), las deflexiones características deben ser confrontadas con la deflexión límite permitida, la cual representa el valor aceptable que asegura un desempeño adecuado del pavimento en función del tráfico que debe soportar.

Según (CONREVIAl, 1982) la deflexión admisible para la estructura del pavimento viene dada por la siguiente ecuación:

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{N} \right)^{0.25} \quad (30)$$

Donde:

D_{adm} : Deflexión admisible, en mm.

N : Número de repeticiones de ejes equivalentes (ESAL), en millones.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Enfoque de investigación

El enfoque de la presente investigación fue cuantitativo, porque tanto la metodología PCI, como el parámetro IRI y el ensayo de deflectometría implican la recolección y análisis de datos numéricos.

Los métodos cuantitativos “representan un conjunto de procesos organizados de manera secuencial para comprobar ciertas suposiciones [...]. La ruta cuantitativa es apropiada cuando queremos estimar las magnitudes u ocurrencia de los fenómenos y probar hipótesis [...]” (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 6)

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue no experimental, porque no se realizaron experimentos ni se alteraron los datos obtenidos. Según el número de momentos en los cuales se recolectan datos, fue transversal y descriptivo, porque los datos fueron recolectados en un mismo periodo.

“Lo que efectúa en la investigación no experimental es observar o medir fenómenos y variables tal como se dan en su contexto natural para analizarlas”. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 174)



Los estudios transversales descriptivos “buscan indagar el nivel o estado de una o más variables en una población; en este caso, en un tiempo único”. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 177)

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población o universo es el “conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones”. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 199)

“Las poblaciones deben situarse de manera concreta por sus características de contenido, lugar y tiempo, así como accesibilidad”. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 199)

La población que se ha considerado en la presente investigación fue la vía Platería – Acora, con una longitud total de 3 km.

3.2.2. Muestra

La muestra es un “subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de esta, si se desean generalizar los resultados”. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 196)

En las muestras probabilísticas, cada unidad, caso o elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionado desde el principio. Para obtener este tipo de muestra, primero se definen las características de la población y el tamaño adecuado de la muestra, y luego se realiza una selección aleatoria de las unidades de muestreo. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018)



Por lo tanto, el tipo de muestreo escogido fue probabilístico, debido a que la primera unidad de muestreo en la metodología PCI se escogió aleatoriamente, al igual que el primer punto de medición de la deflectometría.

3.2.2.1. Muestreo del PCI

Se dividió la vía Platería – Acora, en unidades de muestreo o inspección. Al tratarse de un pavimento flexible el área de cada unidad debe estar en el rango de $230 \pm 90.0 \text{ m}^2$, como lo define la norma ASTM D6433 (2018). Por lo que la longitud de cada una de las unidades de muestreo fue de 30.00 m., con un ancho de 6.60 m. (correspondiente al ancho del área pavimentada).

La cantidad total de unidades de muestreo en la sección (N) fue calculado como la división de la longitud total de la vía, entre la longitud de cada unidad de muestreo. Sabiendo que la longitud total del pavimento evaluado es 3000 m. y que cada unidad de muestreo tiene una longitud de 30 m., tenemos un resultado de 100 (este valor debe ser redondeado al número entero anterior, de ser el caso).

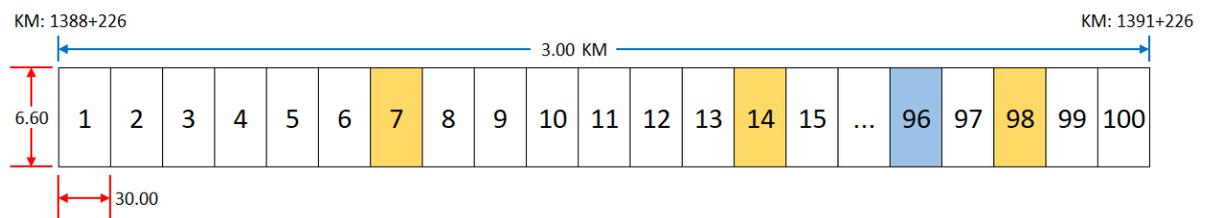
Posteriormente, se calculó el mínimo número de unidades de muestreo por evaluar (n) mediante la ecuación (5). Reemplazando los valores se obtuvo un valor de 13.91, el cual se redondeó al número entero siguiente, resultando 14.

Luego, fue realizado el cálculo del intervalo de las unidades de muestreo mediante la ecuación (6). Reemplazando los valores se obtuvo un valor de 7.14, que se redondeó al número entero anterior, resultando 7.

Finalmente, fue determinada la primera unidad de muestreo a evaluar (valor entre 1 e “i”), las demás unidades a evaluar fueron incrementos sucesivos de la unidad anterior más “i”. La Figura 23 es una representación gráfica de las unidades de muestreo evaluadas.

Figura 23

Unidades de muestreo evaluadas PCI



Fuente: Elaboración Propia.

Aunque, además, se consideró 1 unidad de muestreo adicional, correspondiente a una unidad atípica, que estaba en mejores condiciones que las unidades evaluadas aleatoriamente.

3.2.2.2. Muestreo del IRI

Se dividió la vía Platería – Acora, en tramos de 400 m. de longitud, en ambos carriles de dicha vía (derecho e izquierdo), que corresponde al procedimiento del cálculo de las regularidades superficiales con el rugosímetro MERLIN, tal como lo define Del Águila Rodríguez (1999a). Posteriormente, se efectuaron 200 mediciones de las irregularidades del pavimento en cada tramo seleccionado.

3.2.2.3. Muestreo de la deflectometría

Dado que se trata de la evaluación de deflexiones en la capa asfáltica de un pavimento, se llevaron a cabo mediciones de deflexión en ambos carriles del pavimento, cada 50 m de manera alternada, como lo

especifica la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2013b). Esto significa que, el intervalo de medición, considerando ambos carriles, fue de 25 m. En la Tabla 12 se muestra el resumen del tipo y cantidad de ensayos a realizar, correspondiente a la regularidad y a la deflectometría.

Tabla 12

Tipo y cantidad de ensayos a realizar

Ensayo	Ensayo/Metro (a)	Distancia (m) (b)	N° carriles (c)	N° total de muestras (b)/(a)*(c)
Rugosímetro MERLIN	2.00	3,000.00	2.00	3,000.00
Viga Benkelman	50.00	3,000.00	2.00	120.00

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3. Lugar de estudio

La vía Platería – Acora, se ubica políticamente entre los distritos de Platería y Acora, provincia de Puno, región Puno. Geográficamente, el tramo de la carretera a evaluar está ubicada al sureste del Perú, con una altitud superior a los 3800 m.s.n.m

El tramo de la carretera Platería – Acora evaluada pertenece a la Ruta Nacional PE – 03S, de acuerdo al Clasificador de Rutas del Sistema Nacional de Carreteras vigente del MTC. En la Figura 24 se muestra la vista satelital de la vía evaluada.

Figura 24

Vista satelital de la vía evaluada



Nota: Elaborado mediante Google Earth.

Las coordenadas del inicio y fin de la vía evaluada se indican en la Tabla 13:

Tabla 13

Coordenadas de inicio y fin de la vía

Lugar	Progresiva	Coordenadas UTM	
		Este	Norte
Platería	KM: 1388+226	411397.00	8236165.00
Acora	KM: 1391+226	413764.00	8234437.00

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

3.3. VARIABLES

3.3.1. Definición conceptual de las variables

Tabla 14

Definición conceptual de las variables

Variables		Definición conceptual
1	Evaluación superficial y funcional del pavimento flexible	La evaluación superficial consiste en desarrollar la metodología PCI; es decir, identificar las fallas presentes en el pavimento y valorarlas según su nivel de severidad y cantidad.
		La evaluación funcional consiste en calcular el parámetro IRI, el cual involucra la medición de las regularidades superficiales.
2	Evaluación estructural del pavimento flexible	La evaluación estructural consiste en evaluar el estado del pavimento a través del ensayo de deflectometría. Involucra la medición de deflexiones, que es la respuesta de la estructura frente a la aplicación de cargas.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2. Definición operacional de las variables

Tabla 15

Definición operacional de la variable 1

Variables	Dimensión	Indicadores	Valores / Unidades
Evaluación superficial y funcional del pavimento flexible	Fallas del pavimento asfáltico	Tipo de falla	-
		Nivel de severidad de la falla	1. Low (bajo)
			2. Medium (medio)
			3. High (alto)
	Cantidad de cada tipo de falla	m m ² und.	
	Dimensiones de la unidad de muestreo	Largo de la unidad	m
		Ancho de la unidad	m
	Calificación PCI	Índice numérico PCI	0 - 100
	Intervalo IRI	Escala numérica IRI	1 - 50
	Dimensión de la pastilla de calibración	Espesor de la pastilla de calibración	mm
Valores de la rugosidad	Rugosidad promedio	m/km	
	Rugosidad característica	m/km	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 16*Definición operacional de la variable 2*

Variables	Dimensión	Indicadores	Valores / Unidades
Evaluación estructural del pavimento flexible	Temperatura del pavimento y ambiental	Temperatura del asfalto (temperatura de las capas inferiores)	°C
		Temperatura de la superficie del asfalto	°C
		Temperatura ambiente (temperatura del aire)	°C
	Dimensiones de la carpeta asfáltica	Espesor de la carpeta asfáltica	cm
	Carga aplicada	Carga generada por el eje trasero de un camión	t
	Valores de las deflexiones	Deflexión característica	mm
Deflexión admisible		mm	

Fuente: Elaboración Propia.

3.4. PRUEBA ESTADÍSTICA

3.4.1. Prueba de normalidad

Es necesario realizar las pruebas de normalidad para decidir si los datos tienen una distribución normal (paramétrica) o no normal (sesgada o no paramétrica). El resultado de este procedimiento es importante para escoger el tipo de prueba estadística adecuado para realizar el procesamiento de datos. (Sánchez, 2023)

La distribución normal es fundamental en estadística y su gráfica en forma de campana describe muchos fenómenos naturales y de investigación. (Walpole et al., 2012)

3.4.1.1. Prueba de Kolmogorov - Smirnov

Esta prueba se basa en la comparación de una distribución normal teórica con la distribución real de los datos. Si la mayor diferencia entre ambas distribuciones es diminuta, entonces se puede afirmar que la

distribución observada es similar a una normal. Esta prueba se puede aplicar si se tiene más de 50 datos, independientes y aleatorios. (Sánchez, 2023)

3.4.1.2. Prueba de Shapiro – Wilk

La prueba usa un test de bondad de ajuste para verificar si los datos siguen una distribución normal. Se compara un estadístico de prueba con un valor crítico y, si el estadístico es mayor, se descarta la hipótesis de normalidad. Esta prueba se puede aplicar si la cantidad de datos es menor o igual a 50, independientes y aleatorios. (Sánchez, 2023)

3.4.1.3. Hipótesis y nivel de significancia

Se plantean las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): Los datos tienen una distribución normal.
- Hipótesis alterna (H_a): Los datos no tienen una distribución normal.

Según Devore (2012), el valor P o nivel de significancia observado, es el nivel más pequeño para el cual la hipótesis nula se rechaza o no. Se tiene:

- Si $P < 0.05$; entonces, rechazamos la H_0 y aceptamos la H_a .
- Si $P \geq 0.05$; entonces, aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a .

La probabilidad de que un evento ocurra varía entre cero (0) y uno (1), donde cero implica la imposibilidad de ocurrencia y uno la certeza de que el fenómeno ocurra. El nivel de significancia o nivel alfa (α), indica la



probabilidad de equivocarse al generalizar un resultado estadístico. Un nivel de significancia de 0.05, implica que se tiene un 95% (0.95) de confianza en los resultados y solo un 5% (0.05) de probabilidad de error, sumando ambos valores uno (1). (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

3.4.2. Análisis Inferencial

3.4.2.1. Pruebas paramétricas

Cuando la distribución es normal y los grupos de datos son independientes (grupos diferentes), se tiene la siguiente prueba:

3.4.2.1.1. ANOVA unidireccional o de un factor

Para comparar medias y/o varianzas de tres o más grupos, se utiliza el análisis de varianza unidireccional (ANOVA). Esta prueba estadística determina si existen discrepancias significativas entre las medias y varianzas de los grupos propuestos. El análisis de varianza unidireccional genera un valor llamado razón F, basado en la distribución muestral F. La razón F compara las variaciones entre los grupos y dentro de los grupos. Si el valor F es significativo, indica que los grupos difieren en sus promedios, lo que lleva a aceptar la hipótesis de investigación y rechazar la nula. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

3.4.2.2. Pruebas no paramétricas

Cuando la distribución es no normal o sesgada y los grupos de datos son independientes (grupos diferentes), se tiene la siguiente prueba:



3.4.2.2.1. Kruskal - Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis, o prueba H de Kruskal-Wallis, generaliza la prueba de suma de rangos para más de dos muestras. Se utiliza para verificar la hipótesis nula, de que el número de muestras independientes provienen de poblaciones idénticas. Es un método no paramétrico para probar la igualdad de medias en un análisis de varianza de un factor, útil cuando no se desea asumir que las muestras provienen de poblaciones normales. (Walpole et al., 2012)

3.5. MATERIALES E INSTRUMENTOS

3.5.1. Metodología PCI

Los materiales e instrumentos empleados fueron los siguientes:

- Odómetro manual, para medir distancias y dimensiones de los daños.
Con una precisión de 1 dm.
- Regla de 3.0 m, para tener una referencia para medir las profundidades de algunas fallas, para clasificar su nivel de severidad, cuando corresponda.
- Flexómetro, para medir las longitudes y anchos de las fallas o daños. Así como, para medir las profundidades y diámetros de las fallas correspondientes.
- Tiza, para realizar marcas en el pavimento para delimitar las unidades de muestreo a evaluar.
- Varilla, para tener una referencia y poder medir la profundidad de algunas fallas.



- Hojas de campo PCI, formatos para registrar los tipos de fallas, sus severidades y sus cantidades.
- Equipos de seguridad, que permitan un desplazamiento seguro a lo largo de la vía a evaluar.

3.5.2. Parámetro IRI

Los materiales e instrumentos empleados fueron los siguientes:

- Rugosímetro MERLIN, para medir la regularidad de la vía.
- Nivel de mano, para calibrar inicialmente el equipo.
- Llave francesa “pico de loro”, para ajustar las tuercas del equipo.
- Pastilla de calibración, para el cálculo del Factor de Corrección (F.C.).
- Vernier, para medir el espesor de la pastilla.
- Hojas de campo IRI, formatos para registrar las lecturas.
- Equipos de seguridad, que permitan un desplazamiento seguro a lo largo de la vía a evaluar.

3.5.3. Deflectometría

Los materiales e instrumentos empleados fueron los siguientes:

- Viga Benkelman, con relación de brazos de 1:4.
- Extensómetro con dial indicador.
- Camión cargado, con eje trasero de 8200 kg igualmente distribuidos en un par de llantas dobles, con presión de inflado de 80 psi (lb/in²).
- Odómetro, para medir distancias entre los puntos de medición.
- Tiza, para realizar marcas en el pavimento para señalar los puntos de medición.



- Varilla, para referenciar distancias.
- Plomada, termómetro, cincel, martillo, alambre de amarre.
- Hojas de campo deflectometría, formatos para registrar las deflexiones a diversas distancias.
- Equipos de seguridad, que permitan un desplazamiento seguro a lo largo de la vía a evaluar.

3.6. RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Metodología PCI

Fue necesario el apoyo del siguiente personal en campo, para calcular el Índice de Condición del Pavimento (PCI) empleando el odómetro manual:

- Operador: Manejó el equipo y realizó las mediciones.
- Auxiliar: Apoyó en las mediciones y las registró en la hoja de campo.
- Conductor: Transportó al personal y al equipo hasta la vía evaluada, brindó seguridad.

La normatividad empleada fue la siguiente: ASTM D6433. Standard practice for roads and parking lots Pavement Condition Index.

El procedimiento en campo realizado para determinar el Índice de Condición del Pavimento (PCI) fue el siguiente:

- Inicialmente, se ubicó la primera unidad de muestreo. Se empleó el odómetro manual a una velocidad de caminata (porque a velocidades mayores este equipo puede “saltar” por las irregularidades de la superficie, generando lecturas erróneas).

- Luego, se delimitó dicha unidad de muestreo con marcas de tiza. Estas marcas fueron realizadas en el borde de la vía y en el centro.
- Posteriormente, se inspeccionó dicha unidad de muestreo y se registraron en una hoja de campo todas las fallas existentes, indicando su tipo, nivel de severidad (N.S.) y su cantidad, como se puede apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17

Hoja de campo PCI. Unidad de muestreo aleatoria 1

TIPOS DE FALLAS										UNIDAD DE MUESTREO					
TIPO			UND	TIPO			UND	DIMENSIONES							
1. Piel de cocodrilo.			m ²	11. Parcheo.			m ²								
2. Exudación.			m ²	12. Pulimiento de agregados.			m ²								
3. Agrietamiento en bloque.			m ²	13. Hueco.			und.								
4. Abultamiento y hundimiento.			m	14. Cruce de vía férrea.			m ²								
5. Corrugación.			m ²	15. Ahuellamiento.			m ²								
6. Depresión.			m ²	16. Desplazamiento.			m ²								
7. Grieta de borde.			m	17. Grieta parabólica.			m ²								
8. Grieta de reflexión de juntas.			m	18. Hinchamiento.			m ²								
9. Desnivel carril / berma.			m	19. Desprend. de agregados.			m ²								
10. Grieta long. y transversal.			m	20. Meteorización			m ²								
FALLAS EXISTENTES: TIPO, SEVERIDAD, CANTIDAD															
TOT AL	1			2			3			4			5		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)		N.S.	L (m)	A (m)
	H	8.35	1.40	M	1.10	1.10				L	0.80				
	H	30.00	1.75	M	1.55	1.30									
	H	30.00	1.00												
	H	10.25	1.00												
L		-			-			-			0.80			-	
M		-			3.23			-			-			-	
H		104.44			-			-			-			-	
	6			7			8			9			10		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)		N.S.	L (m)		N.S.	L (m)		N.S.	L (m)	
										M	5.80				
										M	8.00				
L		-			-			-			-			-	
M		-			-			-			13.80			-	
H		-			-			-			-			-	
	11			12			13			14			15		
	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	und.		N.S.	L (m)	A (m)	N.S.	L (m)	A (m)
													L	30.00	0.70
													L	30.00	0.70
L		-			-			-			-			42.00	
M		-			-			-			-			-	
H		-			-			-			-			-	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25

Medición con el odómetro manual



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26

Medición de fallas presentes en el pavimento



Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de cada falla se determinó utilizando el flexómetro, se tuvo en cuenta que las fallas tienen diferentes unidades de medición. Para clasificar algunas fallas, se utilizó la regla y se marcó en una varilla su profundidad para medirla.



3.6.2. Parámetro IRI

Fue necesario el apoyo del siguiente personal en campo, para determinar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) empleando el rugosímetro MERLIN:

- Operador: Manejó el equipo y realizó las lecturas.
- Auxiliar: Anotó las lecturas.
- Conductor: Transportó al personal y al equipo hasta la vía evaluada, brindó seguridad.

La normatividad empleada fue la siguiente: ASTM E867. Standard terminology relating to vehicle - pavement systems, Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales para construcción.

El procedimiento en campo realizado para determinar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) fue el siguiente:

- Inicialmente, se realizó la calibración del rugosímetro MERLIN. Es decir, se ajustó las tuercas del equipo, de manera que sus 3 apoyos (rueda, patín móvil, patín fijo) estaban al mismo nivel. El patín móvil estuvo en una posición en la cual el puntero del tablero se encontraba a la mitad de la escala gráfica.
- Se seleccionó un tramo de 400 m. de longitud, sobre un determinado carril de la vía (derecho o izquierdo).
- Se efectuaron 200 mediciones de las irregularidades del pavimento en el tramo seleccionado; también conocidas como desviaciones o variaciones relativas a la “cuerda promedio”, que fueron halladas por el patín móvil

del rugosímetro MERLIN. Tener en cuenta que estas mediciones fueron efectuadas a lo largo de la huella exterior del tráfico:

- Primero se estacionó el equipo, el cual estuvo apoyado sobre 3 puntos: rueda, apoyo fijo trasero y estabilizador para ensayo.
- De acuerdo a la posición del puntero, se indicó un valor del 1 al 50, en la escala graduada del mismo; por lo cual, se esperó a que dicho puntero se estabilice para realizar la lectura de las mediciones.

Figura 27

Proceso de medición con el rugosímetro MERLIN



Fuente: Elaboración propia.

- El auxiliar anotó la lectura correspondiente en una hoja de campo. Tener en cuenta que el primer dato se colocó en el casillero situado en el extremo superior izquierdo (1,1) y los demás datos fueron anotados desde la primera casilla superior izquierda, hacia abajo y a la derecha.
- Luego, se movilizó el equipo mediante las manijas, una distancia constante seleccionada que generalmente es 2 m. Esta distancia corresponde a una vuelta de la rueda; es por ello que, se puso una marca o señal notoria sobre la rueda que indicó cuando la llanta completó una vuelta (cuando la marca quedó sobre el piso).

- En la nueva posición, se repitió el procedimiento descrito, hasta que se completaron las 200 mediciones en el tramo seleccionado.

Un ejemplo del registro de los datos / lecturas de las regularidades del pavimento obtenidas con el rugosímetro MERLIN se puede apreciar en la Tabla 18.

Tabla 18

Hoja de campo IRI. Tramo 1 del carril derecho

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	22	22	26	33	24	23	23	37	24
2	34	25	21	29	20	17	29	15	14	9
3	30	19	22	17	30	30	27	19	23	8
4	11	30	25	26	15	18	25	1	16	14
5	23	33	18	21	26	27	25	27	36	21
6	50	16	18	29	22	30	22	19	21	25
7	16	24	23	18	25	25	21	15	21	14
8	21	17	20	9	36	24	21	29	29	22
9	22	16	13	26	15	29	27	27	29	25
10	1	28	19	8	31	25	18	24	24	21
11	33	25	30	13	24	21	23	17	24	7
12	32	22	17	20	35	26	18	24	43	37
13	24	22	19	30	16	27	28	20	19	36
14	31	28	26	19	18	18	29	31	23	15
15	37	16	21	12	14	22	25	14	25	24
16	26	27	19	22	30	23	29	26	17	19
17	36	18	20	18	14	23	24	20	34	10
18	14	16	21	7	28	20	1	8	21	8
19	19	23	18	17	20	21	19	26	30	14
20	4	20	25	34	3	26	20	17	19	33

Nota: Elaboración propia.

- Posteriormente, se realizaron las mediciones en los tramos restantes de la vía seleccionada (en ambos carriles de dicha vía).

Figura 28

Medición de regularidades en el pavimento



Fuente: Elaboración propia.

3.6.3. Deflectometría

Fue necesario el apoyo del siguiente personal en campo, para determinar las deflexiones empleando la Viga Benkelman:

- Ingeniero de campo: Verificó los valores obtenidos.
- Operador: Manejó el equipo y anotó las lecturas.
- Auxiliar 1: Leyó y dictó las lecturas.
- Auxiliar 2: Coordinó el avance con el conductor del camión y dio aviso al auxiliar 1 para que realice las lecturas (cuando la varilla vertical del camión vaya coincidiendo con las marcas realizadas en la Viga Benkelman).
- Conductor: Transportó al personal y al equipo hasta la vía evaluada, brindó seguridad.

La normatividad empleada fue la siguiente: ASTM D4695. Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements, Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales para construcción.

El procedimiento en campo realizado para determinar la deflectometría fue el siguiente:

- Inicialmente, se verificó el peso del eje trasero del camión (8.2 t) y la presión de inflado de las llantas (80 psi).
- Luego, se realizó un trazo con tiza, correspondiente a una línea sobre la cual debe estar el punto de medición (como el ancho de la vía es de 6.60 m, la distancia entre el borde de la vía hasta dicha línea fue de 90 cm).

Figura 29

Ubicación del punto de medición



Fuente: Elaboración propia.

- Se marcó y señaló el primer punto de medición.
- Posteriormente, se consideró colocar el extremo del brazo móvil de la Viga Benkelman sobre el punto de medición seleccionado. Pero, como este punto es inicialmente difícil de localizarlo debido a la inaccesibilidad visual y manual, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se amarró una varilla vertical en la parte trasera del camión.
- Se colocó la Viga Benkelman en la parte exterior de las llantas del camión, simulando que estuviera entre las llantas; alineando el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad.
- Se marcó en la Viga Benkelman la posición en la que coincidió con la varilla vertical.
- Se realizaron marcas sucesivas sobre la Viga Benkelman, a estas distancias: 25, 50, 75 y 100 cm. para medir deflexiones adicionales. Este procedimiento se realizó según lo descrito anteriormente. Se necesitan mínimamente 3 lecturas para la evaluación estructural; pero se puede realizar más mediciones para su verificación y para graficar el tipo de curvas de deflexiones.
- El camión se desplazó, de manera que una de sus llantas dobles se ubicó sobre el punto de medición indicado. Se tuvo en cuenta que existe un rango de tolerancia de 3 pulgadas (in) alrededor del punto.

Figura 30

Medición de deflexiones con la Viga Benkelman



Fuente: Elaboración propia.

- Se instaló la Viga Benkelman en el punto de medición, entre las llantas del camión; haciendo coincidir la primera marca realizada previamente

(con el procedimiento realizado se tuvo la certeza de que el extremo de la viga esté coincidiendo con el centro de las llantas). Además, se verificó que el equipo esté alineado longitudinalmente con la dirección de movimiento del camión.

- El auxiliar 1 realizó la lectura de la deflexión inicial:
 - Se estableció el dial del extensómetro en 0, se activó el vibrador.
 - Se leyó, cada vez que la varilla vertical coincidía con las marcas adicionales realizadas.
- Durante el procedimiento de medición, el camión se desplazó lentamente, el auxiliar 2 se encargó de coordinar el avance y parada del camión.
- Se registró la temperatura ambiente y la del pavimento, empleando un termómetro calibrado, antes de realizar las mediciones.
- Se procedió con la medición de las deflexiones en los demás puntos de evaluación.

Tabla 19

Hoja de campo deflectometría. Primeras mediciones del Tramo 1

Prog. (km)	Carril	Temperatura (°C)		Lecturas de campo					
		Pavimento	Ambiente	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L _{MÁX}
1388+225.00	DER.	15.60	12.05	0.0	5.2	8.0	10.1	11.3	14.0
1388+250.00	IZQ.	17.49	12.45	0.0	8.8	14.3	15.9	17.5	19.5
1388+275.00	DER.	16.97	11.80	0.0	5.3	8.5	10.3	11.5	14.5
1388+300.00	IZQ.	16.98	15.28	0.0	9.0	14.5	16.7	17.8	20.0
1388+325.00	DER.	17.11	12.78	0.0	5.5	9.0	10.5	12.0	14.9
1388+350.00	IZQ.	17.09	11.56	0.0	8.6	13.0	15.3	17.1	19.1
1388+375.00	DER.	16.99	13.74	0.0	6.5	9.6	11.5	13.0	15.0
1388+400.00	IZQ.	16.88	11.52	0.0	8.1	12.6	14.2	16.2	18.6
1388+425.00	DER.	17.00	13.10	0.0	7.1	10.5	12.7	13.9	16.9
1388+450.00	IZQ.	17.08	11.53	0.0	7.5	11.0	13.9	16.0	18.0
1388+475.00	DER.	16.25	12.86	0.0	7.0	10.5	12.8	14.0	16.8
1388+500.00	IZQ.	16.35	15.31	0.0	6.9	10.8	13.5	15.2	17.5
1388+525.00	DER.	17.11	12.86	0.0	7.0	10.6	13.0	14.5	16.5
1388+550.00	IZQ.	17.21	11.36	0.0	7.5	11.2	14.8	15.6	17.9

Fuente: Elaboración propia.

3.7. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

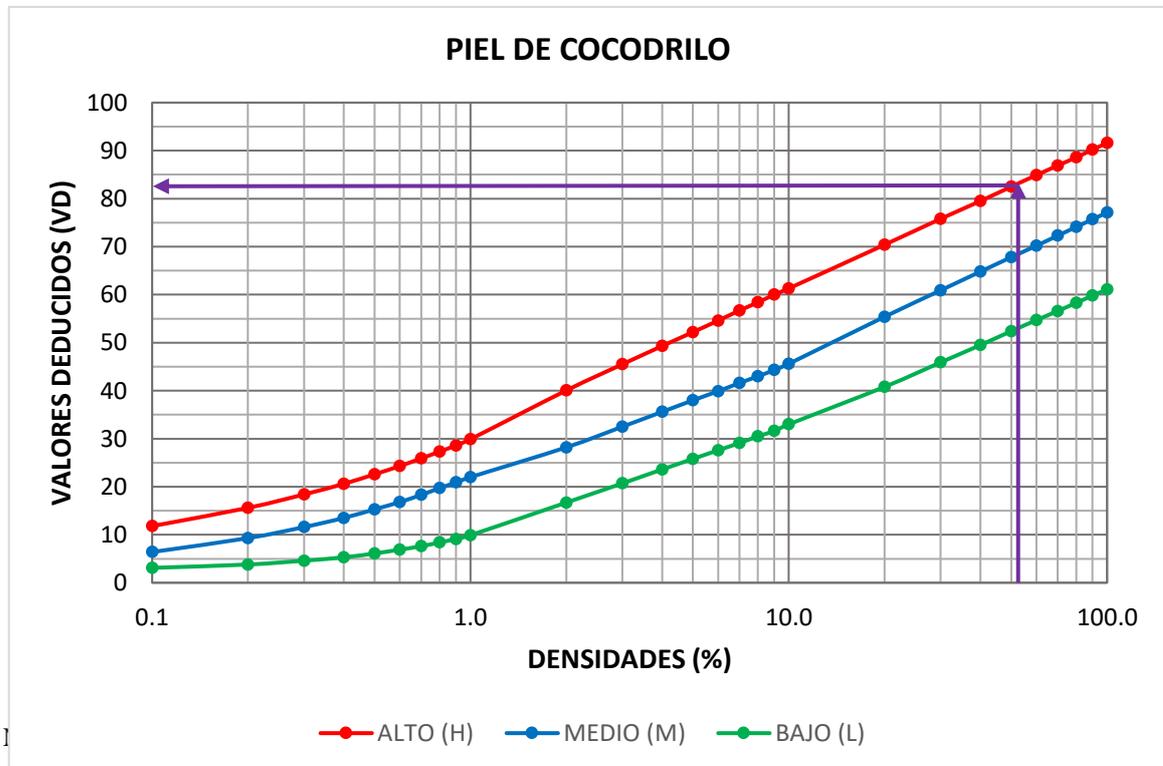
3.7.1. Metodología PCI

El proceso del cálculo del PCI se detalla a continuación. Para la automatización de este cálculo, se creó un programa mediante macros de Visual Basic en Microsoft Excel.

- Inicialmente, se calcularon los valores deducidos (VD) mediante las “curvas de valores deducidos” para pavimentos asfálticos. Estas curvas solicitan 2 datos de entrada: nivel de severidad de cada falla y densidad de dicha falla. Por ejemplo, para una severidad “H” y una densidad de 52.75, se tiene la Figura 31.

Figura 31

Cálculo del Valor Deducido (VD). Falla piel de cocodrilo - UM 1



Aunque, para una mayor precisión, se emplearon las tablas de valores deducidos. Se repitió el procedimiento para las demás fallas, en sus distintos niveles de severidad; como se puede apreciar en la Tabla 20.

Tabla 20

Cálculo de Valores Deducidos (VD). Unidad de muestreo 1

CÁLCULO DE VALORES DEDUCIDOS (VD)					
TIPO DE FALLA	N.S.	TOTAL	DENSIDAD (%)	VD	
1 Piel de cocodrilo	H	104.44	52.75	83.16	
2 Exudación	M	3.23	1.63	4.37	
4 Abult. y hund.	L	0.80	0.40	0.93	
9 Des. carril / berma	M	13.80	6.97	6.38	
15 Ahuellamiento	L	42.00	21.21	36.57	

Nota: Elaboración propia.

- Luego, se calculó el número máximo admisible de valores deducidos (m), mediante la ecuación (7). Para lo cual fue necesario saber el valor deducido más alto (HDV).
- Posteriormente, se procedió con el cálculo del máximo Valor Deducido Corregido (CDV_{máx}), el cual involucró un proceso iterativo, y el empleo de la “curva de corrección” para pavimentos asfálticos. En la Tabla 21 se puede apreciar un ejemplo de todo este procedimiento:

Tabla 21

Cálculo de Valores Deducidos Corregidos (VDC). Unidad de muestreo 1

CÁLCULO DE VALORES DEDUCIDOS CORREGIDOS (VDC)						
N°	VALORES DEDUCIDOS (VD)			VDT	q	CDV
1	83.16	36.57	3.49	123.22	3	74.77
2	83.16	36.57	2.00	121.73	2	81.86
3	83.16	2.00	2.00	87.16	1	87.16

Nota: Elaboración propia.

- Se realizó el cálculo del PCI de cada unidad de muestreo, mediante la ecuación (8); y el cálculo del PCI de la unidad de muestreo adicional, mediante la ecuación (10).
- Finalmente, se realizó el cálculo del PCI de la sección del pavimento mediante la ecuación (11).

3.7.2. Parámetro IRI

El proceso del cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) se detalla a continuación. Para la automatización de este cálculo, se creó un programa mediante macros de Visual Basic en Microsoft Excel.

- Inicialmente, se agruparon los 200 datos por cada tramo de las regularidades del pavimento, según su intervalo de desviación (correspondiente a los valores de la escala gráfica del tablero), como se puede apreciar en la Tabla 22.

Tabla 22

Histograma de frecuencias. Tramo 1 del carril derecho

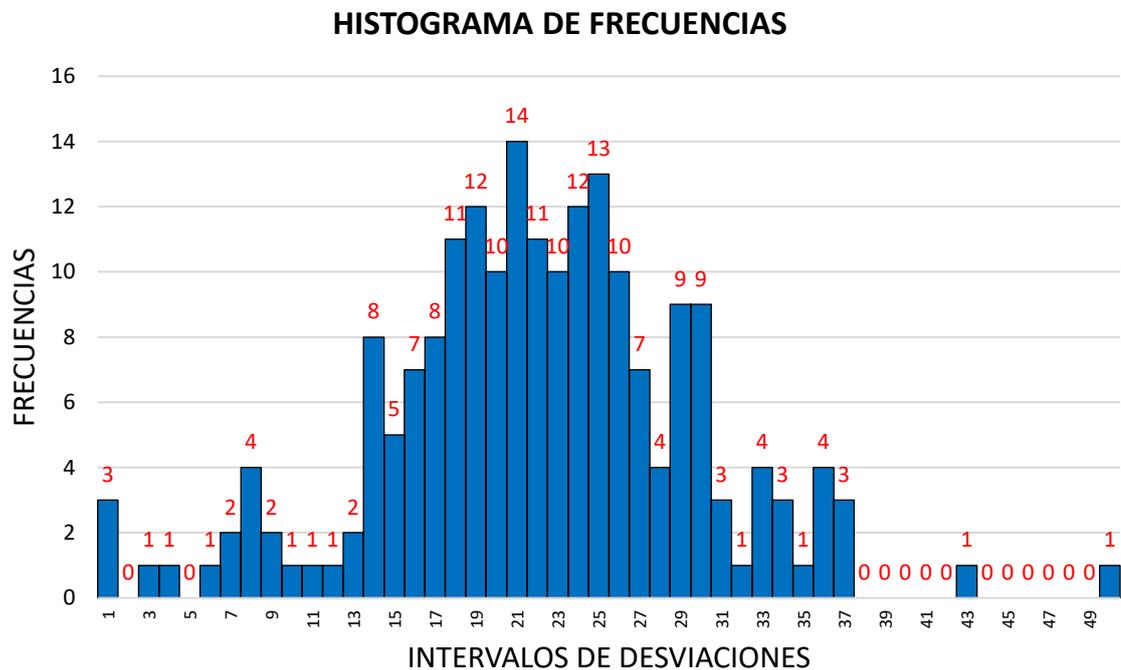
HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS									
INTER	FREC.	INTER	FREC.	INTER	FREC.	INTER	FREC.	INTER	FREC.
1	3	11	1	21	14	31	3	41	0
2	0	12	1	22	11	32	1	42	0
3	1	13	2	23	10	33	4	43	1
4	1	14	8	24	12	34	3	44	0
5	0	15	5	25	13	35	1	45	0
6	1	16	7	26	10	36	4	46	0
7	2	17	8	27	7	37	3	47	0
8	4	18	11	28	4	38	0	48	0
9	2	19	12	29	9	39	0	49	0
10	1	20	10	30	9	40	0	50	1

Nota: Elaboración propia. Donde: “inter.” Es “intervalo de desviación”; y “frec.”, “frecuencia”.

La Figura 32 muestra con mayor claridad el histograma de frecuencias.

Figura 32

Histograma de frecuencias. Tramo 1 del carril derecho



Nota: Elaboración propia.

- A continuación, se eliminó el 10% de los 200 datos, lo que equivale a 20 datos: 10 datos del extremo inferior y 10 del extremo superior. Esta decisión se tomó porque esos datos correspondían a posiciones poco representativas o eran lecturas incorrectas.
- Se procedió con el cálculo del rango “D” en unidades de la escala MERLIN. Este valor es también denominado como “ancho del histograma” porque es la cantidad de “intervalos de desviaciones” que no se han descartado.
- Se calculó el rango “D” en milímetros (mm); para lo cual se aplicó la ecuación (12).
- Posteriormente, se realizó el cálculo del Factor de Corrección (F.C.). Para lo cual, se usó un disco circular como pastilla de calibración, con un



diámetro aproximado de 8.5 cm. En la Tabla 23 se puede apreciar 4 mediciones diametralmente opuestas, que se realizó con un vernier, para determinar el espesor de dicha pastilla. Luego, se determinó el promedio del espesor de la pastilla.

Tabla 23

Mediciones del espesor de la pastilla de calibración

N°	Espesor pastilla (mm)
1	4.40
2	4.50
3	4.50
4	4.45

Nota: Elaboración propia.

La lectura inicial del puntero sobre el tablero del rugosímetro MERLIN marcó “26.1”. Posteriormente, colocando la pastilla de calibración debajo del patín móvil del equipo, se registró una lectura de “17.5”. Se aplicó la ecuación (13), y se obtuvo un factor de corrección de 1.038.

- Se determinó la relación de brazos (RB) del rugosímetro MERLIN; el patín móvil estaba a una distancia de 10 cm del punto pivote, lo que indica que la relación de brazos usada fue de 1 a 10. Por lo tanto, el factor de la relación de brazos empleada fue de “1.00”.
- Luego, se calculó el rango “D” corregido, que resultó de la multiplicación del rango “D” en milímetros por el factor de corrección (F.C.) por la relación de brazos.
- Posteriormente, se calculó la rugosidad en la escala IRI, mediante la ecuación (14).
- Finalmente, se procedió con el cálculo de la rugosidad en la escala IRI para los demás tramos.

3.7.3. Deflectometría

El proceso del cálculo de la deflectometría se detalla a continuación. Para la realización de los cálculos, se utilizó el programa Microsoft Excel.

- Inicialmente, se definieron las secciones homogéneas mediante el método de las diferencias acumuladas. Una sección homogénea es un tramo de la vía con comportamiento o características similares. El método de las diferencias acumuladas involucra los siguientes conceptos:
- Para cada punto, la deflexión se calculó como la diferencia entre la lectura de campo máxima menos cada lectura a diversas distancias (25, 50, 75, 100 cm).
- Posteriormente, se corrigieron las lecturas multiplicándolas por la constante de la viga “K”, que tuvo un valor de 4 debido a que la relación de brazos de la viga fue de 1:4; y también multiplicándolas por el factor de estacionalidad, el cual tuvo un valor de 1.1.
- A continuación, se corrigieron las deflexiones por temperatura, mediante la ecuación (24), para uniformizar las deflexiones a una temperatura de 20 °C. El radio de curvatura se calculó mediante la ecuación (29).
- También se realizó el cálculo de R5, la longitud elástica (L0), el módulo de elasticidad de la subrasante y el CBR, mediante las ecuaciones (19), (20), (22) y (23), respectivamente.
- Los cuencos característicos fueron determinados calculando el promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación, mediante las ecuaciones (25), (26) y (27), respectivamente. Estas operaciones se realizaron tanto en el carril derecho como en el izquierdo.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO

Ubicación de la estación de conteo:

- Tramo de la carretera: Platería - Acora
- Red vial: Ruta Nacional PE - 03S
- Sentido o dirección del tránsito:
 - Entrada (←) : Platería
 - Salida (→) : Acora
- Estación: Ingreso Acora
- Código de la estación: E1

Toma de información:

El conteo vehicular se realizó 12 horas del día, durante 7 días consecutivos en la estación indicada. Se realizó el conteo considerando el sentido o dirección de tránsito de los vehículos (entrada y salida).

Los volúmenes de tráfico son variables según las diferentes épocas del año, existen tiempos de cosechas, lluvias, estaciones del año, festividades, vacaciones, entre otros; por lo cual es necesario aplicar un factor de corrección estacional.

Existe un Factor de Corrección (FC) estacional para vehículos ligeros (auto, station wagon, camionetas, micro) y otro para vehículos pesados (bus, camión, semi trailer, trailer). Estos factores son dados por el MTC, y varían según el mes de conteo y la estación de peaje más cercana. Para el mes de mayo y peaje Ilave, se tiene:



- FC vehículos ligeros : 1.1067
- FC vehículos pesados : 1.0245

Cálculo del IMDa proyectado:

Se empleó la ecuación (1) para calcular el tránsito proyectado.

La tasa anual de crecimiento está en función de variables macroeconómicas, como el Producto Bruto Interno (PBI), relacionado con el tráfico de vehículos ligeros y la tasa de crecimiento poblacional, relacionada con el tráfico de vehículos pesados.

Estos valores son dados por el MTC, y varían según la región donde se ubica el tramo de la carretera de estudio. Para la región Puno se tiene:

- TC vehículos ligeros : 2.47 %
- TC vehículos pesados: 2.58 %

Cálculo de los ejes equivalentes (EE):

Los ejes equivalentes (EE) son factores que representan el efecto destructivo de diversas cargas, dependiendo del tipo de eje de diferentes vehículos, en la estructura del pavimento.

Cada tipo de vehículo tiene su propia configuración de ejes; recordando que los tipos de ejes son: simple, tándem y trídem. Además, cada eje soporta una carga diferente, considerando el tipo de vehículo.

Existen ecuaciones para calcular los ejes equivalentes (EE) según el tipo de pavimento; y según el tipo de eje y el número de llantas.

El cálculo de los demás ejes equivalentes (EE) para los diferentes tipos de vehículos se muestra en la Tabla 25 y en la Tabla 26.

Tabla 24

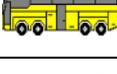
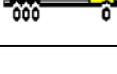
Cálculo del Índice Medio Diario Anual (IMDA)

Tipo De Vehículo		IMDs		IMDa		IMDa 2024	IMDa Proy.
		Entrada	Salida	Entrada	Salida		
AUTO		146	190	161.58	210.28	372	441.38
STATION WAGON		77	141	85.22	156.05	241	285.95
CAMIONETA S	PICK UP 	109	142	120.63	157.16	278	329.85
	PANEL 	34	66	37.63	73.04	111	131.70
	RURAL COMBI 	562	628	621.98	695.02	1317	1562.62
MICRO		22	36	24.35	39.84	64	75.94
BUS	2 E 	14	8	14.34	8.20	23	27.50
	3 E 	19	17	19.47	17.42	37	44.23
	4 E 	0	0	0.00	0.00	0	0.00
CAMIÓN	2 E 	67	86	68.64	88.11	157	187.70
	3 E 	6	8	6.15	8.20	14	16.74
	4 E 	2	0	2.05	0.00	2	2.39
SEMI TRAYLER	2S1 	1	0	1.02	0.00	1	1.20
	2S2 	0	1	0.00	1.02	1	1.20
	2S3 	12	16	12.29	16.39	29	34.67
	3S1 	9	8	9.22	8.20	17	20.32
	3S2 	9	7	9.22	7.17	16	19.13
	≥ 3S3 	65	71	66.59	72.74	139	166.18
TRAYLER	2T2 	0	2	0.00	2.05	2	2.39
	2T3 	1	1	1.02	1.02	2	2.39
	3T2 	1	1	1.02	1.02	2	2.39
	3T3 	4	4	4.10	4.10	8	9.56
SUBTOTAL		1160	1433	1266.53	1567.02	2833	3365
TOTAL		2593		2833.55			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25

Cálculo de los ejes equivalentes (EE). Parte 1

Tipo de vehículo		IMDa 2024	Tipo eje	Nº llantas	Carga eje (t)	EE	IMDa * EE	
AUTO		441.38	SIMPLE	2	1	0.000527	0.23	
		441.38	SIMPLE	2	1	0.000527	0.23	
STATION WAGON		285.95	SIMPLE	2	1	0.000527	0.15	
		285.95	SIMPLE	2	1	0.000527	0.15	
CAMIONETAS	PICK UP		329.85	SIMPLE	2	1	0.000527	0.17
			329.85	SIMPLE	2	1	0.000527	0.17
	PANEL		131.70	SIMPLE	2	1	0.000527	0.07
			131.70	SIMPLE	2	1	0.000527	0.07
RURAL COMBI		1562.62	SIMPLE	2	1	0.000527	0.82	
		1562.62	SIMPLE	2	1	0.000527	0.82	
MICRO		75.94	SIMPLE	2	1	0.000527	0.04	
		75.94	SIMPLE	2	1	0.000527	0.04	
BUS	2 E		27.50	SIMPLE	2	7	1.265367	34.79
			27.50	SIMPLE	4	11	3.238287	89.04
	3 E		44.23	SIMPLE	2	7	1.265367	55.97
			44.23	TANDEM	6	16	1.365945	60.42
	4 E		0.00	TANDEM	4	14	2.196447	0.00
			0.00	TANDEM	6	16	1.365945	0.00
CAMIÓN	2 E		187.70	SIMPLE	2	7	1.265367	237.51
			187.70	SIMPLE	4	11	3.238287	607.83
	3 E		16.74	SIMPLE	2	7	1.265367	21.18
			16.74	TANDEM	8	18	2.019213	33.80
	4 E		2.39	SIMPLE	2	7	1.265367	3.03
			2.39	TRIDEM	10	23	1.508184	3.61

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Cálculo de los ejes equivalentes (EE). Parte 2

Tipo de vehículo		IMDa 2024	Tipo eje	Nº llantas	Carga eje (t)	EE	IMDa * EE
2S1		1.20	SIMPLE	2	7	1.265367	1.51
		1.20	SIMPLE	4	11	3.238287	3.87
		1.20	SIMPLE	4	11	3.238287	3.87
2S2		1.20	SIMPLE	2	7	1.265367	1.51
		1.20	SIMPLE	4	11	3.238287	3.87
		1.20	TANDEM	8	18	2.019213	2.41
SEMI TRAYLER	2S3	34.67	SIMPLE	2	7	1.265367	43.87
		34.67	SIMPLE	4	11	3.238287	112.27
		34.67	TRIDEM	12	25	1.706026	59.15
3S1		20.32	SIMPLE	2	7	1.265367	25.72
		20.32	TANDEM	8	18	2.019213	41.04
		20.32	SIMPLE	4	11	3.238287	65.82
3S2		19.13	SIMPLE	2	7	1.265367	24.20
		19.13	TANDEM	8	18	2.019213	38.62
		19.13	TANDEM	8	18	2.019213	38.62
≥ 3S3		166.18	SIMPLE	2	7	1.265367	210.28
		166.18	TANDEM	8	18	2.019213	335.55
		166.18	TRIDEM	12	25	1.706026	283.51
TRAYLER	2T2	2.39	SIMPLE	2	7	1.265367	3.03
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
	2T3	2.39	SIMPLE	2	7	1.265367	3.03
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
		2.39	TANDEM	8	18	2.019213	4.83
	3T2	2.39	SIMPLE	2	7	1.265367	3.03
		2.39	TANDEM	8	18	2.019213	4.83
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
		2.39	SIMPLE	4	11	3.238287	7.74
3T3	9.56	SIMPLE	2	7	1.265367	12.10	
	9.56	TANDEM	8	18	2.019213	19.31	
	9.56	SIMPLE	4	11	3.238287	30.97	
	9.56	TANDEM	8	18	2.019213	19.31	
TOTAL						2600.51	

Fuente: Elaboración propia.



Cálculo del Factor de Crecimiento Acumulado (F_{ca}):

El Factor de Crecimiento Acumulado (F_{ca}) se calcula mediante la ecuación. Se desarrolló considerando un diseño futuro de 20 años.

Cálculo del Factor de distribución Direccional y de Carril:

El factor de distribución direccional se refiere a la cantidad de vehículos pesados que circulan en un sentido particular del tráfico, y generalmente representa la mitad del flujo vehicular en ambas direcciones, aunque esta no siempre es la situación. En cambio, el factor de distribución por carril se relaciona con el carril que soporta la mayor carga de Ejes Equivalentes (EE).

El tramo evaluado tiene las siguientes características: 1 calzada, 2 sentidos o direcciones de tránsito y 1 carril por sentido. Por lo que se tiene:

- Factor direccional (F_d) : 0.50
- Factor carril (F_c) : 1.00

Cálculo de EE por cada tipo de vehículo por día, para el carril de diseño: Se calculó mediante la ecuación (4)

Cálculo del ESAL:

Se calculó mediante la ecuación (3), por lo que se tiene:

$$\begin{aligned}ESAL &= EE_{\text{día} - \text{carril}} * F_{ca} * 365 \\ESAL &= 1300.25 * 25.76 * 365 \\ESAL &= 12,226,615.77 = 12.23 * 10^6\end{aligned}$$

4.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL

4.2.1. Resumen de resultados PCI

La Tabla 27 es el resumen de resultados de la metodología PCI de las unidades de muestreo aleatorias.

Tabla 27

Resumen de resultados PCI. Unidades de muestreo aleatorias

Unidad de muestreo aleatoria	Progresiva		PCI	
	Inicio	Final	PCI	Calificación
7	1388+406.00	1388+436.00	12.84	GRAVE
14	1388+616.00	1388+646.00	17.73	GRAVE
21	1388+826.00	1388+856.00	14.34	GRAVE
28	1389+036.00	1389+066.00	9.21	FALLADO
35	1389+246.00	1389+276.00	15.23	GRAVE
42	1389+456.00	1389+486.00	7.69	FALLADO
49	1389+666.00	1389+696.00	9.63	FALLADO
56	1389+876.00	1389+906.00	11.54	GRAVE
63	1390+086.00	1390+116.00	9.31	FALLADO
70	1390+296.00	1390+326.00	6.99	FALLADO
77	1390+506.00	1390+536.00	5.69	FALLADO
84	1390+716.00	1390+746.00	6.16	FALLADO
91	1390+926.00	1390+956.00	6.74	FALLADO
98	1391+136.00	1391+166.00	12.84	GRAVE

Fuente: Elaboración propia.

Mientras que la Tabla 28 es el resumen de los resultados de la metodología PCI de las unidades de muestreo adicionales.

Tabla 28

Resumen de resultados PCI. Unidad de muestreo adicional

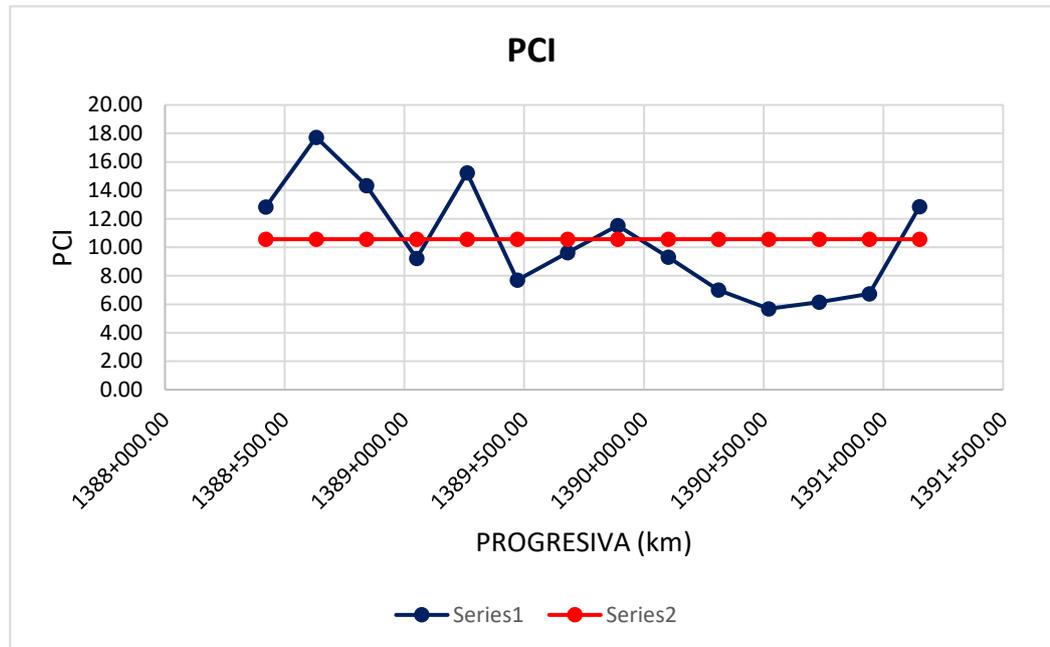
Unidad de muestreo aleatoria	Progresiva		PCI	
	Inicio	Final	PCI	Inicio
96	1391+076.00	1391+106.00	12.60	GRAVE

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 33 se puede observar la variación de los valores del PCI a lo largo de la progresiva.

Figura 33

Resumen de valores PCI



Nota: Elaboración propia.

4.2.2. Cálculo del PCI de la sección del pavimento

Dado que todas las unidades de muestreo tenían las mismas dimensiones (es decir, la misma área), el PCI se calculó como el promedio aritmético de los valores PCI de cada unidad de muestreo seleccionada aleatoriamente.

$$\overline{PCI}_r = \frac{\sum PCI_i}{n}$$

$$\overline{PCI}_r = \frac{145.94}{14} = 10.42$$

Este valor del PCI corresponde a una calificación de “GRAVE”.

Sabiendo que cada unidad de muestreo, tanto aleatoria como adicional, tiene un área de 198.0 m²; además, el ancho total de la sección fue 19800.0 m² (6.60 m. de ancho y 3000 m. de largo), se tiene la siguiente ecuación que considera la unidad de muestreo adicional:

$$PCI_S = \frac{10.42 * (19800 - 198) + 12.60 * (198)}{19800}$$

$$PCI_S = 10.44$$

Entonces, el PCI de la sección evaluada tuvo una calificación de "GRAVE".

4.2.3. Análisis, interpretación y contrastación de resultados PCI

Los valores del PCI se clasifican en rangos que indican el estado del pavimento: valores más altos indican mejor condición, mientras que valores bajos reflejan pavimentos en mal estado. Se observa que la mayoría de las unidades de muestreo tienen una calificación de "GRAVE" o "FALLADO", lo que indica un mal estado general del pavimento.

El cálculo del PCI promedio para las unidades de muestreo aleatorias da un valor de 10.42, lo que clasifica la condición del pavimento en un estado "GRAVE". Esto refleja que, en conjunto, el pavimento en esta sección está en condiciones deficientes y requeriría intervenciones significativas. Al agregar la unidad adicional con un PCI de 12.60, el PCI total de la sección evaluada cambia mínimamente, resultando en un PCI ajustado de 10.44, que sigue clasificando al pavimento como "GRAVE". Este ajuste demuestra que la incorporación de una unidad más con un valor similar al promedio general no altera sustancialmente el estado crítico del pavimento en la sección. La evaluación muestra que la mayoría

de las unidades de muestreo, tanto aleatorias como adicionales, exhiben una condición similar de deterioro, lo que sugiere que el problema es generalizado en toda la sección de pavimento analizada.

Al comparar estos resultados con lo esperado en una infraestructura vial en buen estado, el PCI promedio debería situarse entre 70 y 100 para considerarse "BUENO" o "EXCELENTE". Sin embargo, los valores obtenidos están lejos de esos estándares, indicando que el pavimento ha superado su vida útil o que ha sufrido un desgaste acelerado por factores como un mal diseño, falta de mantenimiento o sobrecarga en el tráfico.

4.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN FUNCIONAL

4.3.1. Resumen de resultados IRI

La Tabla 29 es el resumen de los resultados de la metodología Índice de Regularidad Internacional (IRI) de los tramos evaluados.

Tabla 29

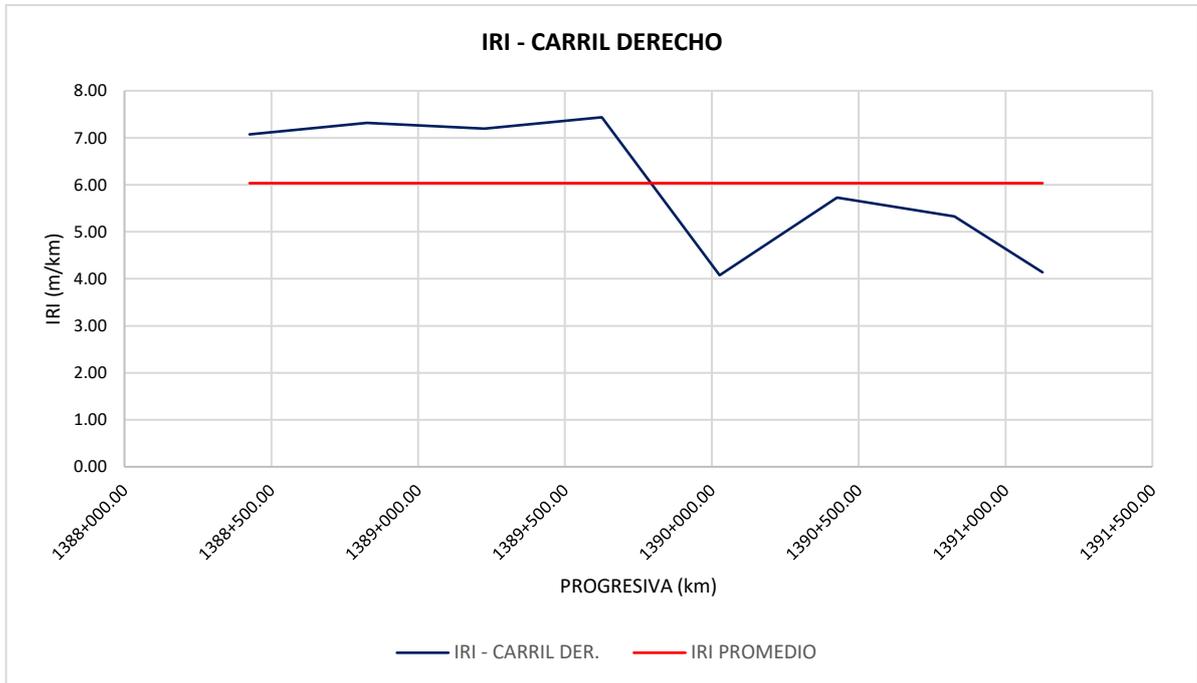
Resumen de resultados IRI

Tramo	Progresiva		Longitud (m)	IRI (m/km)	
	Inicial	Final		Carril Der.	Carril Izq.
1	1388+226.00	1388+626.00	400.00	7.07	7.25
2	1388+626.00	1389+026.00	400.00	7.31	9.47
3	1389+026.00	1389+426.00	400.00	7.19	7.80
4	1389+426.00	1389+826.00	400.00	7.44	4.71
5	1389+826.00	1390+226.00	400.00	4.08	5.33
6	1390+226.00	1390+626.00	400.00	5.73	5.89
7	1390+626.00	1391+026.00	400.00	5.32	5.91
8	1391+026.00	1391+226.00	200.00	4.14	4.26
PROMEDIO				6.03	6.33

Nota: Elaboración propia.

Figura 34

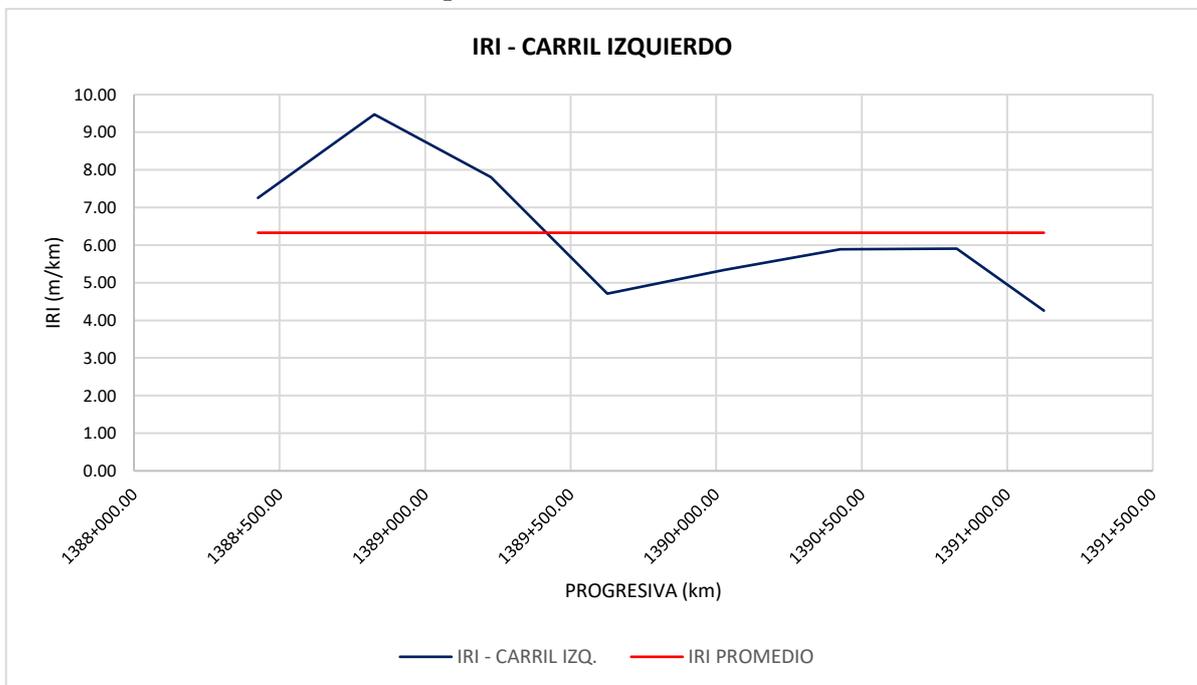
Resumen de valores IRI. Carril derecho



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35

Resumen de valores IRI. Carril izquierdo



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Cálculo del IRI característico

Para una confiabilidad del 95%, se calculó el IRI característico, mediante la siguiente ecuación dada por la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014).

Para el carril derecho se tiene:

- IRI promedio (IRI_P) = 6.03 m/km
- Desviación estándar (σ) = 1.42 m/km

$$IRI_C = 6.03 + 1.645 * 1.42 = 8.36$$

Para el carril izquierdo se tiene:

- IRI promedio (IRI_P) = 6.33 m/km
- Desviación estándar (σ) = 1.74 m/km

$$IRI_C = 6.33 + 1.645 * 1.74 = 9.19$$

Puesto que el valor del IMDA para el año 2024 es 3365, la vía evaluada es clasificada como una “CARRETERA DE PRIMERA CLASE”. Para dicha clasificación se debería cumplir los siguientes valores, para una confiabilidad del 95%:

- Rugosidad inicial. Pavimento nuevo (m/km): 2.50
- Rugosidad inicial. Pavimento reforzado (m/km): 3.00
- Rugosidad durante el periodo de servicio (m/km): 4.00

El IRI característico tanto del carril derecho como del izquierdo son inferiores al valor de la rugosidad durante el periodo de servicio. Según (Badilla

Vargas, 2009) los valores del IRI entre 4 a 11 m/km corresponden a un “PAVIMENTO DAÑADO”.

4.3.3. Cálculo del PSI del pavimento

Se calculó el PSI, que mide la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Para el carril derecho, con un IRI promedio de 6.03, se tiene:

$$PSI = \frac{5}{e^{\left(\frac{6.03}{5.5}\right)}}$$

$$PSI = 1.67$$

Por lo que la calidad es “MALA”.

Para el carril izquierdo, con un IRI promedio de 6.33, se tiene:

$$PSI = \frac{5}{e^{\left(\frac{6.33}{5.5}\right)}}$$

$$PSI = 1.58$$

Por lo que la calidad es “MALA”.

4.3.4. Análisis, interpretación y contrastación de resultados IRI

El Índice de Regularidad Internacional (IRI) mide la regularidad de la superficie del pavimento y se expresa en metros por kilómetro (m/km). Valores más bajos indican una superficie más suave y mejor calidad de rodadura, mientras que valores altos indican irregularidades que afectan la comodidad y seguridad de los usuarios.



Se evaluaron 8 tramos de 400 metros cada uno (contando ambos carriles), excepto el último tramo que tiene 200 metros de longitud. Los valores del IRI para el carril derecho varían entre 4.08 y 7.44 m/km, mientras que, para el carril izquierdo, varían entre 4.26 y 9.47 m/km. En el carril derecho, el IRI más bajo es de 4.08 m/km (tramo 5) y el más alto es de 7.44 m/km (tramo 4), indicando que este carril tiene variaciones moderadas en su regularidad. En el carril izquierdo, el valor más bajo es de 4.26 m/km (tramo 8) y el más alto es de 9.47 m/km (tramo 2), lo que indica una mayor variabilidad en la calidad del pavimento, con algunos tramos en condiciones significativamente peores.

El promedio del IRI para el carril derecho es de 6.03 m/km, mientras que para el carril izquierdo es de 6.33 m/km. Estos valores indican que, en términos generales, el pavimento está en mal estado de acuerdo con los estándares internacionales, donde un IRI entre 4 y 11 m/km corresponde a un "PAVIMENTO DAÑADO".

Los valores de PSI reflejan que el pavimento no brinda una conducción confortable para los usuarios.

En una carretera de primera clase, el pavimento debería tener un IRI inferior a 4.00 m/km durante su periodo de servicio para mantener un nivel adecuado de regularidad y comodidad. Sin embargo, los valores calculados tanto del IRI promedio como del IRI característico exceden ampliamente este valor, lo que sugiere que el pavimento ha sufrido un deterioro considerable.



4.4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

4.4.1. Definición de secciones homogéneas

Tabla 30

Definición de secciones homogéneas. Método de Diferencias Acumuladas. Tramo 1

Progresiva	D ₀ (10 ⁻² mm)	Distancia acumulada (km)	Respuesta promedio	Área intervalo real	Área acumulada	Z _s
1388+225.00	63.27	0.03	63.27	1.58	1.58	-117.37
1388+250.00	87.11	0.05	75.19	1.88	3.46	-256.85
1388+275.00	64.98	0.08	76.05	1.90	5.36	-397.92
1388+300.00	89.62	0.10	77.30	1.93	7.30	-541.32
1388+325.00	66.72	0.13	78.17	1.95	9.25	-686.34
1388+350.00	85.53	0.15	76.13	1.90	11.15	-827.55
1388+375.00	67.21	0.18	76.37	1.91	13.06	-969.23
1388+400.00	83.40	0.20	75.31	1.88	14.94	-1108.93
1388+425.00	75.84	0.23	79.62	1.99	16.94	-1256.63
1388+450.00	80.73	0.25	78.29	1.96	18.89	-1401.86
1388+475.00	75.77	0.28	78.25	1.96	20.85	-1547.02
1388+500.00	79.02	0.30	77.39	1.93	22.78	-1690.59
1388+525.00	74.10	0.33	76.56	1.91	24.70	-1832.61
1388+550.00	80.33	0.35	77.21	1.93	26.63	-1975.85
1388+575.00	73.33	0.38	76.83	1.92	28.55	-2118.37
1388+600.00	83.28	0.40	78.31	1.96	30.51	-2263.64
1388+625.00	72.79	0.43	78.03	1.95	32.46	-2408.40
1388+650.00	87.24	0.45	80.01	2.00	34.46	-2556.83
1388+675.00	74.47	0.48	80.85	2.02	36.48	-2706.82
1388+700.00	90.55	0.50	82.51	2.06	38.54	-2859.88
1388+725.00	74.95	0.53	82.75	2.07	40.61	-3013.38
1388+750.00	88.88	0.55	81.91	2.05	42.66	-3165.34
1388+775.00	75.28	0.58	82.08	2.05	44.71	-3317.60
1388+800.00	88.39	0.60	81.83	2.05	46.76	-3469.41
1388+825.00	75.50	0.63	81.95	2.05	48.80	-3621.42
1388+850.00	87.67	0.65	81.59	2.04	50.84	-3772.77
1388+875.00	76.56	0.68	82.12	2.05	52.90	-3925.10
1388+900.00	87.88	0.70	82.22	2.06	54.95	-4077.63
1388+925.00	76.53	0.73	82.20	2.06	57.01	-4230.12
1388+950.00	84.15	0.75	80.34	2.01	59.02	-4379.15
1388+975.00	76.59	0.78	80.37	2.01	61.03	-4528.25
1389+000.00	68.93	0.80	72.76	1.82	62.84	-4663.22
1389+025.00	71.92	0.83	70.43	1.76	64.60	-4793.87
1389+050.00	63.10	0.85	67.51	1.69	66.29	-4919.10
1389+075.00	70.68	0.88	66.89	1.67	67.96	-5043.18
1389+100.00	61.41	0.90	66.04	1.65	69.62	-5165.69
1389+125.00	69.31	0.93	65.36	1.63	71.25	-5286.94
1389+150.00	62.41	0.95	65.86	1.65	72.90	-5409.11

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 31

Definición de secciones homogéneas. Método de Diferencias Acumuladas. Tramo 2

Progresiva	D ₀ (10 ⁻² mm)	Distancia acumulada (km)	Respuesta promedio	Área intervalo real	Área acumulada	Z _s
1389+225.00	65.67	1.03	65.85	1.65	77.82	-5774.38
1389+250.00	71.60	1.05	68.63	1.72	79.53	-5901.70
1389+275.00	63.45	1.08	67.53	1.69	81.22	-6026.96
1389+300.00	77.77	1.10	70.61	1.77	82.99	-6157.95
1389+325.00	62.82	1.13	70.29	1.76	84.75	-6288.35
1389+350.00	79.60	1.15	71.21	1.78	86.53	-6420.44
1389+375.00	62.73	1.18	71.17	1.78	88.31	-6552.46
1389+400.00	80.49	1.20	71.61	1.79	90.10	-6685.31
1389+425.00	61.73	1.23	71.11	1.78	91.87	-6817.22
1389+450.00	82.25	1.25	71.99	1.80	93.67	-6950.77
1389+475.00	62.94	1.28	72.59	1.81	95.49	-7085.44
1389+500.00	82.63	1.30	72.78	1.82	97.31	-7220.46
1389+525.00	65.33	1.33	73.98	1.85	99.16	-7357.70
1389+550.00	81.61	1.35	73.47	1.84	100.99	-7494.00
1389+575.00	67.62	1.38	74.62	1.87	102.86	-7632.41
1389+600.00	76.98	1.40	72.30	1.81	104.67	-7766.54
1389+625.00	69.95	1.43	73.47	1.84	106.50	-7902.82
1389+650.00	76.22	1.45	73.09	1.83	108.33	-8038.40
1389+675.00	68.30	1.48	72.26	1.81	110.14	-8172.45
1389+700.00	75.97	1.50	72.14	1.80	111.94	-8306.26
1389+725.00	66.08	1.53	71.03	1.78	113.72	-8438.02
1389+750.00	71.13	1.55	68.60	1.72	115.43	-8565.28
1389+775.00	66.15	1.58	68.64	1.72	117.15	-8692.61
1389+800.00	70.78	1.60	68.46	1.71	118.86	-8819.61
1389+825.00	64.32	1.63	67.55	1.69	120.55	-8944.92
1389+850.00	63.67	1.65	64.00	1.60	122.15	-9063.63
1389+875.00	66.50	1.68	65.08	1.63	123.77	-9184.37
1389+900.00	62.84	1.70	64.67	1.62	125.39	-9304.33
1389+925.00	74.75	1.73	68.79	1.72	127.11	-9431.94
1389+950.00	63.05	1.75	68.90	1.72	128.83	-9559.75
1389+975.00	77.39	1.78	70.22	1.76	130.59	-9690.01
1390+000.00	68.64	1.80	73.01	1.83	132.41	-9825.45
1390+025.00	83.79	1.83	76.21	1.91	134.32	-9966.83
1390+050.00	84.35	1.85	84.07	2.10	136.42	-10122.79
1390+075.00	80.30	1.88	82.32	2.06	138.48	-10275.50
1390+100.00	85.73	1.90	83.01	2.08	140.55	-10429.50
1390+125.00	77.87	1.93	81.80	2.05	142.60	-10581.24
1390+150.00	86.23	1.95	82.05	2.05	144.65	-10733.45
1390+175.00	75.12	1.98	80.67	2.02	146.67	-10883.11
1390+200.00	86.29	2.00	80.70	2.02	148.69	-11032.82

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 32

Definición de secciones homogéneas. Método de Diferencias Acumuladas. Tramo 3

Progresiva	D ₀ (10 ⁻² mm)	Distancia acumulada (km)	Respuesta promedio	Área intervalo real	Área acumulada	Z _s
1390+225.00	72.66	2.03	79.48	1.99	150.67	-11180.26
1390+250.00	86.83	2.05	79.75	1.99	152.67	-11328.20
1390+275.00	70.32	2.08	78.57	1.96	154.63	-11473.96
1390+300.00	87.62	2.10	78.97	1.97	156.60	-11620.45
1390+325.00	68.92	2.13	78.27	1.96	158.56	-11765.65
1390+350.00	86.40	2.15	77.66	1.94	160.50	-11909.72
1390+375.00	65.64	2.18	76.02	1.90	162.40	-12050.74
1390+400.00	85.01	2.20	75.32	1.88	164.29	-12190.46
1390+425.00	62.27	2.23	73.64	1.84	166.13	-12327.07
1390+450.00	84.89	2.25	73.58	1.84	167.97	-12463.57
1390+475.00	64.56	2.28	74.72	1.87	169.84	-12602.18
1390+500.00	84.81	2.30	74.68	1.87	171.70	-12740.73
1390+525.00	67.15	2.33	75.98	1.90	173.60	-12881.68
1390+550.00	83.05	2.35	75.10	1.88	175.48	-13021.00
1390+575.00	68.01	2.38	75.53	1.89	177.37	-13161.11
1390+600.00	81.70	2.40	74.85	1.87	179.24	-13299.96
1390+625.00	69.80	2.43	75.75	1.89	181.13	-13440.49
1390+650.00	79.94	2.45	74.87	1.87	183.00	-13579.38
1390+675.00	68.44	2.48	74.19	1.85	184.86	-13717.01
1390+700.00	78.21	2.50	73.33	1.83	186.69	-13853.03
1390+725.00	68.03	2.53	73.12	1.83	188.52	-13988.67
1390+750.00	77.85	2.55	72.94	1.82	190.34	-14123.98
1390+775.00	67.16	2.57	72.51	1.81	192.16	-14258.48
1390+800.00	77.54	2.60	72.35	1.81	193.97	-14392.69
1390+825.00	66.26	2.62	71.90	1.80	195.76	-14526.07
1390+850.00	75.96	2.65	71.11	1.78	197.54	-14657.98
1390+875.00	68.06	2.67	72.01	1.80	199.34	-14791.56
1390+900.00	75.25	2.70	71.65	1.79	201.13	-14924.48
1390+925.00	72.79	2.72	74.02	1.85	202.98	-15061.79
1390+950.00	73.56	2.75	73.17	1.83	204.81	-15197.53
1390+975.00	73.63	2.77	73.60	1.84	206.65	-15334.05
1391+000.00	71.14	2.80	72.39	1.81	208.46	-15468.34
1391+025.00	75.68	2.82	73.41	1.84	210.30	-15604.52
1391+050.00	68.82	2.85	72.25	1.81	212.10	-15738.55
1391+075.00	74.76	2.87	71.79	1.79	213.90	-15871.72
1391+100.00	68.54	2.90	71.65	1.79	215.69	-16004.62
1391+125.00	71.07	2.92	69.80	1.75	217.43	-16134.11
1391+150.00	64.19	2.95	67.63	1.69	219.12	-16259.56
1391+175.00	77.18	2.97	70.69	1.77	220.89	-16390.69
1391+200.00	63.26	3.00	70.22	1.76	222.65	-16520.95
1391+225.00	60.62					

Fuente: Elaboración propia.

El Factor F se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{At}{L}$$

$$F = \frac{222.65}{3.00} = 74.22$$

El Factor Z_s para el primer punto se calculó mediante la ecuación:

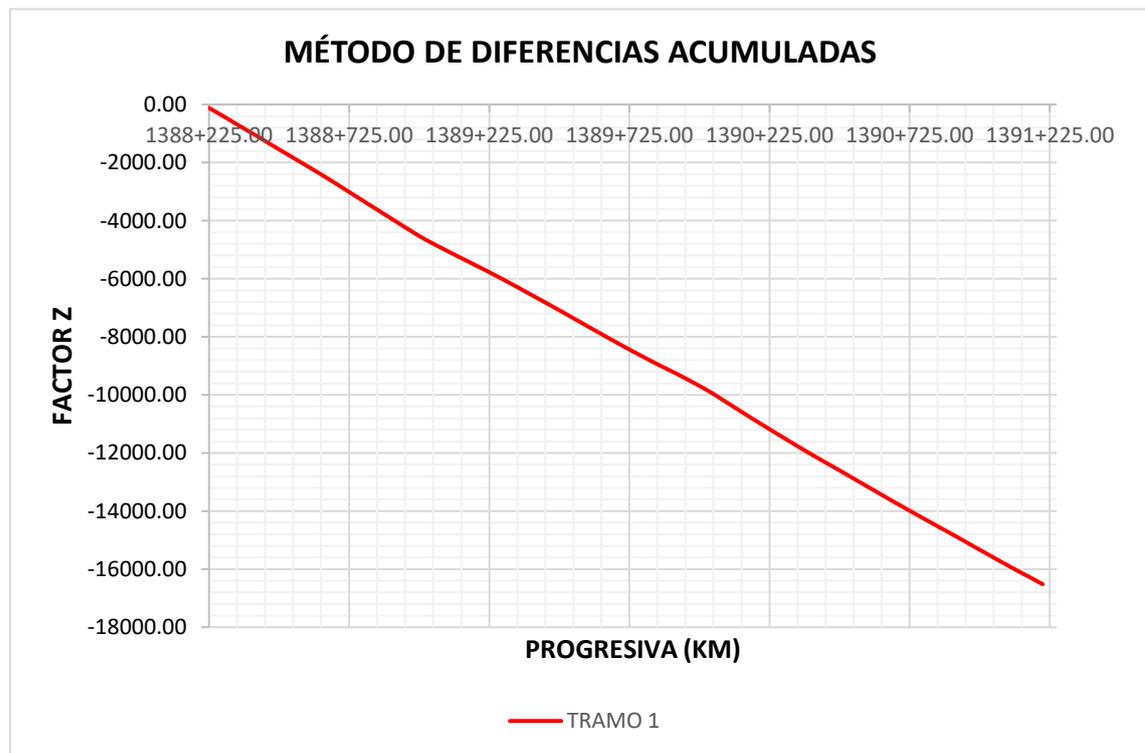
$$Z_s = \text{Distancia acumulada} - (\text{Área acumulada} * F)$$

$$Z_s = 0.03 - (1.58 * 74.22) = -117.37$$

La Figura 36 es la representación gráfica de las secciones o tramos de la vía evaluada, como no hay cambios de pendiente, se entiende que solo es 1 sección.

Figura 36

Secciones homogéneas del pavimento



Fuente: Elaboración propia.



4.4.2. Resumen de resultados de deflectometría

La Tabla 33 es el resumen de los resultados de la deflexión máxima corregida de los diversos puntos evaluados.

Tabla 33

Resumen de resultados deflectometría. Parte 1

Punto	Progresiva		Deflexión máxima (10^{-2} mm)	
	1	2	Carril Der.	Carril Izq.
1	1388+225.00	1388+250.00	63.27	87.11
2	1388+275.00	1388+300.00	64.98	89.62
3	1388+325.00	1388+350.00	66.72	85.53
4	1388+375.00	1388+400.00	67.21	83.40
5	1388+425.00	1388+450.00	75.84	80.73
6	1388+475.00	1388+500.00	75.77	79.02
7	1388+525.00	1388+550.00	74.10	80.33
8	1388+575.00	1388+600.00	73.33	83.28
9	1388+625.00	1388+650.00	72.79	87.24
10	1388+675.00	1388+700.00	74.47	90.55
11	1388+725.00	1388+750.00	74.95	88.88
12	1388+775.00	1388+800.00	75.28	88.39
13	1388+825.00	1388+850.00	75.50	87.67
14	1388+875.00	1388+900.00	76.56	87.88
15	1388+925.00	1388+950.00	76.53	84.15
16	1388+975.00	1389+000.00	76.59	68.93
17	1389+025.00	1389+050.00	71.92	63.10
18	1389+075.00	1389+100.00	70.68	61.41
19	1389+125.00	1389+150.00	69.31	62.41
20	1389+175.00	1389+200.00	66.83	66.04
21	1389+225.00	1389+250.00	65.67	71.60
22	1389+275.00	1389+300.00	63.45	77.77
23	1389+325.00	1389+350.00	62.82	79.60
24	1389+375.00	1389+400.00	62.73	80.49
25	1389+425.00	1389+450.00	61.73	82.25
26	1389+475.00	1389+500.00	62.94	82.63
27	1389+525.00	1389+550.00	65.33	81.61
28	1389+575.00	1389+600.00	67.62	76.98
29	1389+625.00	1389+650.00	69.95	76.22
30	1389+675.00	1389+700.00	68.30	75.97

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 34

Resumen de resultados deflectometría. Parte 2

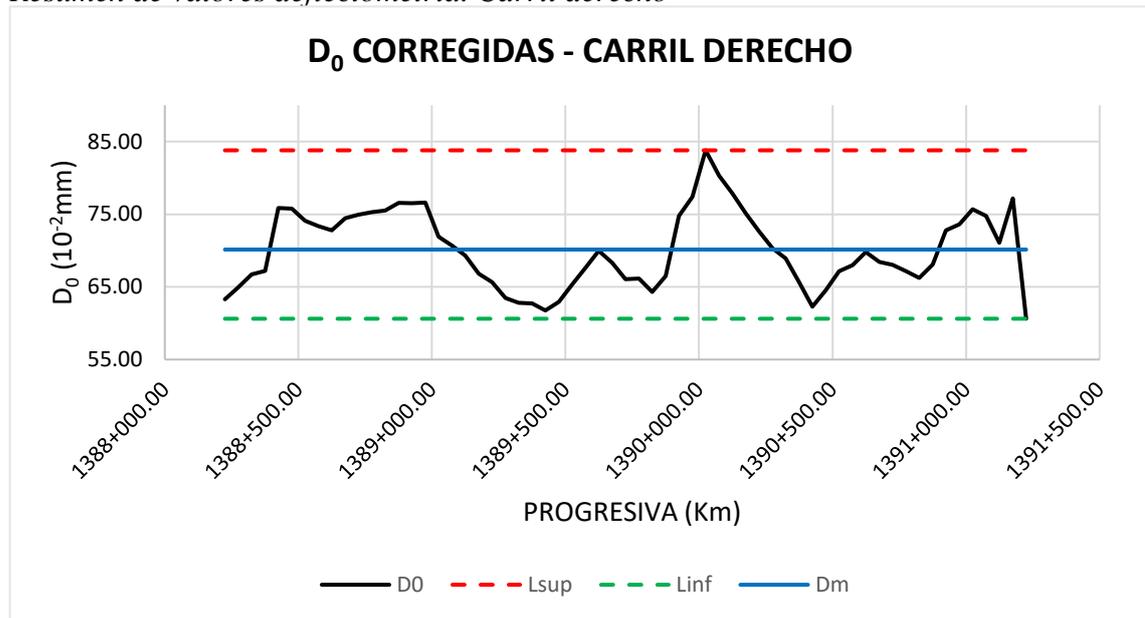
Punto	Progresiva		Deflexión máxima (10^{-2} mm)	
	1	2	Carril Der.	Carril Izq.
31	1389+725.00	1389+750.00	66.08	71.13
32	1389+775.00	1389+800.00	66.15	70.78
33	1389+825.00	1389+850.00	64.32	63.67
34	1389+875.00	1389+900.00	66.50	62.84
35	1389+925.00	1389+950.00	74.75	63.05
36	1389+975.00	1390+000.00	77.39	68.64
37	1390+025.00	1390+050.00	83.79	84.35
38	1390+075.00	1390+100.00	80.30	85.73
39	1390+125.00	1390+150.00	77.87	86.23
40	1390+175.00	1390+200.00	75.12	86.29
41	1390+225.00	1390+250.00	72.66	86.83
42	1390+275.00	1390+300.00	70.32	87.62
43	1390+325.00	1390+350.00	68.92	86.40
44	1390+375.00	1390+400.00	65.64	85.01
45	1390+425.00	1390+450.00	62.27	84.89
46	1390+475.00	1390+500.00	64.56	84.81
47	1390+525.00	1390+550.00	67.15	83.05
48	1390+575.00	1390+600.00	68.01	81.70
49	1390+625.00	1390+650.00	69.80	79.94
50	1390+675.00	1390+700.00	68.44	78.21
51	1390+725.00	1390+750.00	68.03	77.85
52	1390+775.00	1390+800.00	67.16	77.54
53	1390+825.00	1390+850.00	66.26	75.96
54	1390+875.00	1390+900.00	68.06	75.25
55	1390+925.00	1390+950.00	72.79	73.56
56	1390+975.00	1391+000.00	73.63	71.14
57	1391+025.00	1391+050.00	75.68	68.82
58	1391+075.00	1391+100.00	74.76	68.54
59	1391+125.00	1391+150.00	71.07	64.19
60	1391+175.00	1391+200.00	77.18	63.26
61	1391+225.00		60.62	

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 37 se puede observar la variación de los valores de las deflexiones máximas corregidas a lo largo de las progresivas del carril derecho.

Figura 37

Resumen de valores deflectometría. Carril derecho

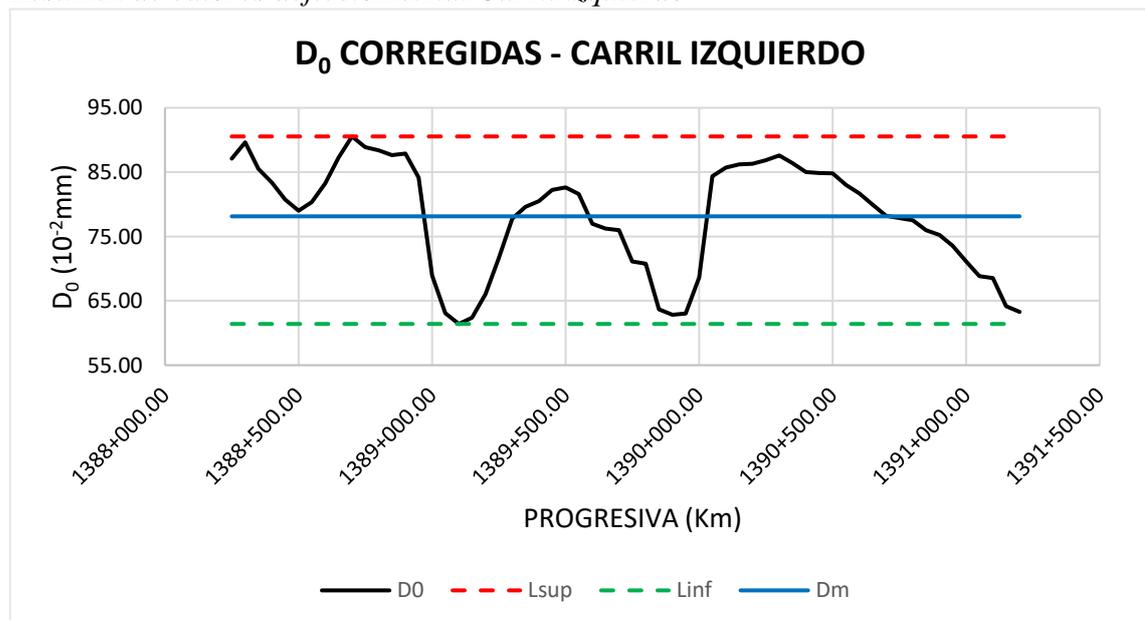


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38 se puede observar la variación de los valores de las deflexiones máximas corregidas a lo largo de las progresivas del carril izquierdo.

Figura 38

Resumen de valores deflectometría. Carril izquierdo



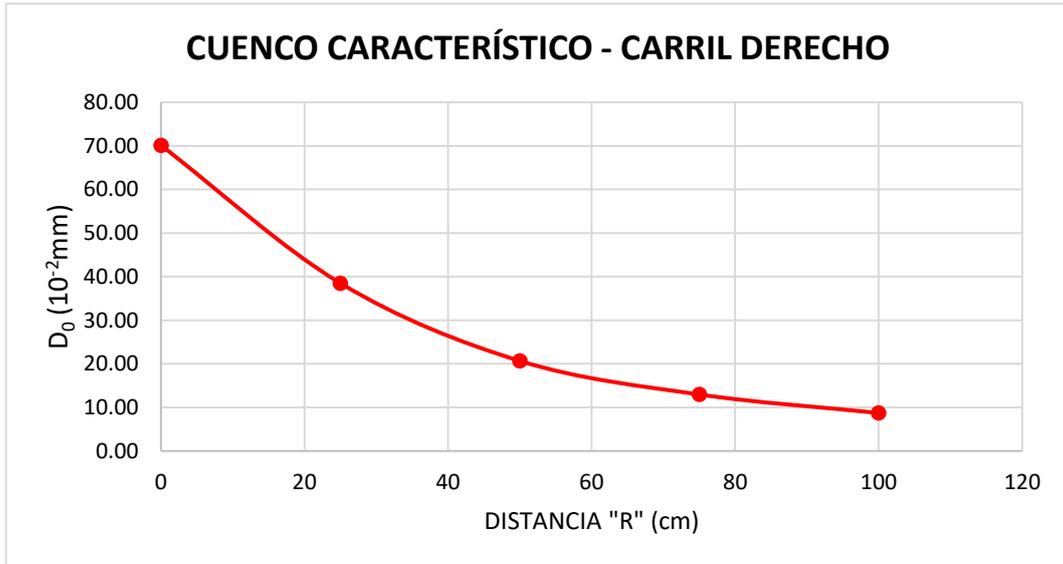
Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Determinación de cuencos característicos

En la Figura 39 y en la Figura 40, se muestra el cuenco característico de las deflexiones promedio corregidas a distancias “R” a lo largo de los carriles.

Figura 39

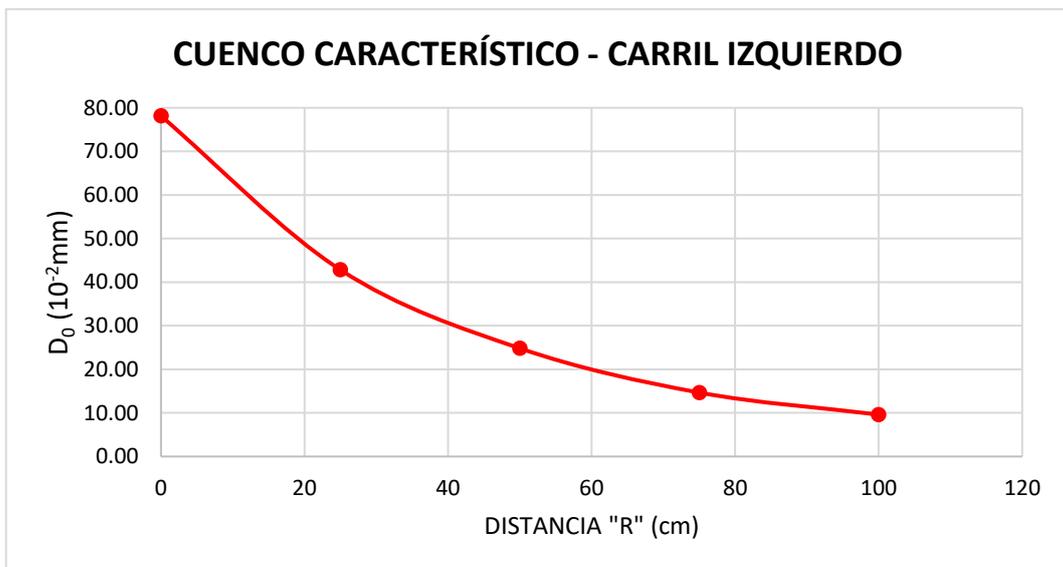
Cuenca característico del carril derecho



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40

Cuenca característico del carril izquierdo



Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. Cálculo de la deflexión característica

Se calculó la deflexión característica, mediante la ecuación dada por la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014), para una “CARRETERA DE PRIMERA CLASE”, con una confiabilidad del 95%. Para el carril derecho se tiene:

- Deflexión promedio (D_m) = 70.14×10^{-2} mm
- Desviación estándar (σ) = 5.27×10^{-2} mm

$$D_C = 70.14 + 1.645 * 5.27$$

$$D_C = 78.81 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Para el carril izquierdo se tiene:

- Deflexión promedio (D_m) = 78.13×10^{-2} mm
- Desviación estándar (σ) = 8.53×10^{-2} mm

$$D_C = 78.13 + 1.645 * 8.53$$

$$D_C = 92.16 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

4.4.5. Cálculo de la deflexión admisible

Previamente, calculé el valor del Equivalent Single Axle Load of 18-kip o 80-kN o 8.2 t o Eje Equivalente de Carga Simple de 18-kip o 80-kN o 8.2 t (ESAL), el cual fue 12.23×10^6 .

Con dicho valor, procedí a calcular la deflexión admisible, mediante la siguiente ecuación dada por la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2014):



$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{N}\right)^{0.25}$$

Por lo que se tiene:

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{12.23}\right)^{0.25}$$

$$D_{adm} = 0.55 \text{ mm} = 55 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Entonces, podemos observar que las deflexiones características, tanto del carril derecho como del izquierdo, son superiores a la deflexión admisible.

4.4.6. Análisis, interpretación y contrastación de resultados deflectometría

La deflexión máxima es una medida de la deformación que experimenta el pavimento bajo la carga de tránsito, y su magnitud refleja la capacidad estructural del pavimento para soportar cargas. Las deflexiones máximas para el carril derecho varían entre 60.62×10^{-2} mm y 83.79×10^{-2} mm, mientras que en el carril izquierdo varían entre 61.41×10^{-2} mm y 90.55×10^{-2} mm. Estos valores reflejan variaciones en la capacidad estructural del pavimento, especialmente en el carril izquierdo, lo que indica una menor resistencia a las cargas.

En el carril derecho, la deflexión característica es de 78.81×10^{-2} mm, mientras que en el carril izquierdo es de 92.16×10^{-2} mm. Estos valores son significativamente mayores que el valor de 55×10^{-2} mm de deflexión admisible. Esto indica que la estructura del pavimento no está cumpliendo con los requisitos estructurales para una carretera de primera clase, lo que podría resultar en una vida útil reducida del pavimento y un mayor desgaste ante cargas de tránsito pesadas. El carril izquierdo presenta deflexiones características más altas, lo que sugiere que está en peor estado estructural que el carril derecho. Esto podría deberse a un

mayor nivel de tránsito pesado en ese carril o a diferencias en la construcción o mantenimiento de la superficie. Los altos valores de deflexión característica sugieren que el pavimento tiene una capacidad estructural insuficiente para soportar el tránsito pesado, lo que podría resultar en un deterioro prematuro. Se requieren intervenciones estructurales para mejorar la capacidad del pavimento, como el refuerzo o la rehabilitación del mismo.

Para la presente carretera de primera clase, la deflexión máxima no debe superar los 55×10^{-2} mm (deflexión admisible) para mantener un buen rendimiento estructural. Dado que tanto el carril derecho como el izquierdo tienen deflexiones características superiores a este valor, se concluye que el pavimento actual no cumple con los requisitos de resistencia estructural necesarios.

4.5. IDENTIFICACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO A REALIZAR

Los pavimentos tienen una gran cantidad de relaciones deterioro – tiempo, debido a la diversidad de los factores que inciden en el deterioro de los mismos. La Tabla 35 muestra una correlación entre las zonas de mantenimiento y rehabilitación con el PCI.

Tabla 35

Zonas de mantenimiento y rehabilitación, y metodología PCI

Zonas de mantenimiento y rehabilitación	PCI
Menor	100
	85
Menor (rutinario)	70
Mayor (efectivo)	55
Mayor (correctivo)	40
Mayor (correctivo)	25
Reconstrucción	10

Nota: Elaboración propia.



Un mantenimiento menor, involucra actividades de corrección en áreas pequeñas del pavimento. Este tipo de mantenimiento puede ser preventivo (actividades de protección del pavimento y corrección de fallas en su estado inicial) o correctivo (actividades de corrección o reparación de fallas que representan un peligro para los usuarios). Se tiene:

- Sellado de grietas.
- Bacheo (de emergencia, superficial, de carpeta, profundo).
- Sello asfáltico localizado.
- Nivelación localizada.
- Fresado y/o texturización localizada.

Un mantenimiento mayor, involucra actividades de reparación en toda el área de un tramo. Este tipo de mantenimiento puede ser efectivo o correctivo. Se tiene:

- Tratamientos superficiales.
- Capas asfálticas (de nivelación, de fricción y/o sello, estructurales).
- Remoción por fresado.
- Reciclado (en frío, en caliente).

En la vía Platería – Acora se deben realizar actividades de mantenimiento mayor correctivo; puesto que, el pavimento se encuentra en un estado crítico, presenta un valor PCI inferior a 25, además respecto al IRI, éste se encuentra debajo del valor mínimo aceptable y presenta un importante debilitamiento estructural.



4.6. PLAN DE MANTENIMIENTO VIAL

4.6.1. Antecedentes e introducción

El mantenimiento vial es un elemento esencial de la gestión de la vía pública, que tiene como objetivo garantizar que el Estado, en los distintos niveles de gobierno, logre proteger las vías durante toda su vida útil, evitando su deterioro prematuro en beneficio de la comunidad. Este proceso general tiene como objetivo optimizar el uso del dinero y preservar el valor del patrimonio vial del país, particularmente importante en el Perú, debido a los altos costos de construcción de carreteras debido a su geografía. Desde el inicio del desarrollo vial en Perú, las autoridades han destacado la importancia de la integración entre pueblos y ciudades. Sin embargo, siempre ha existido un déficit en acciones frente a la gran demanda de carreteras y su mejora. Ante esta necesidad, se busca promover y optimizar el uso de los recursos nacionales en inversiones viales, tanto en carreteras principales como en aquellas de menor envergadura. Especialmente, se deben impulsar las tareas de conservación vial.

4.6.2. Objetivos generales y específicos

El objetivo general de la conservación vial es proporcionar a los usuarios condiciones óptimas de transitabilidad y de seguridad vial, asegurando un funcionamiento continuo de la red de carreteras.

4.6.2.1. Objetivos generales

La conservación vial tiene dos objetivos generales:

- Mantener la infraestructura vial mediante actividades rutinarias y periódicas.



- Responder de manera inmediata a fenómenos naturales o eventos extraordinarios mediante acciones de emergencia para asegurar la transitabilidad de las vías.

La conservación vial es de naturaleza preventiva, buscando mantener la infraestructura en condiciones lo más similares posibles a las originales. Estas acciones preventivas reducen los costos de mantenimiento, evitando que los elementos viales lleguen a un estado de deterioro grave, lo que además de encarecer las reparaciones, afecta el funcionamiento óptimo de la red y la seguridad vial.

La conservación de carreteras abarca diversas actividades de mantenimiento de los componentes de la infraestructura, tales como la plataforma, taludes, calzada, bermas, drenaje superficial y subterráneo, muros, puentes, señalización, elementos de seguridad vial, obras complementarias y derechos de vía.

4.6.2.2. Objetivos específicos

4.6.2.2.1. Objetivo del mantenimiento rutinario

El mantenimiento rutinario implica realizar actividades preventivas que buscan asegurar la seguridad de la carretera y evitar el deterioro considerable de los elementos de la infraestructura vial. Su propósito es mantener la carretera y toda su infraestructura en condiciones óptimas de funcionamiento, transitabilidad, seguridad y confort, además de prevenir el deterioro prematuro de la infraestructura vial.



4.6.2.2.2. Objetivo del mantenimiento periódico

El mantenimiento periódico incluye acciones de mayor envergadura que las del mantenimiento rutinario, ya que se aplican para recuperar deterioros en las calzadas y bermas, como inestabilidad de terraplenes y hundimientos. Su finalidad es restaurar las condiciones originales de serviciabilidad de la carretera, devolviéndola a los niveles de servicio que estaban disponibles al momento de su apertura al tráfico.

4.6.2.2.3. Objetivo de las actividades de emergencia

Las emergencias viales pueden ser causadas por eventos externos como fenómenos naturales (fuertes lluvias, inundaciones, riadas, etc.) que dañan severamente la infraestructura, o por incidentes en la vía, como accidentes graves que afectan los componentes de la carretera (incendios de vehículos, impactos en estructuras, etc.). Las actividades de emergencia buscan restablecer la vía en condiciones óptimas para su uso. Aunque no son programables, debe existir una previsión de los procedimientos a seguir.

4.6.3. Estudio de mantenimiento rutinario y periódico:

4.6.3.1. Mantenimiento vial

De acuerdo con la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2013a) la conservación o mantenimiento vial consiste en un conjunto de actividades técnicas diseñadas para preservar de manera continua y sostenida el buen estado de la infraestructura vial, garantizando así un servicio óptimo para los usuarios.



El mantenimiento vial abarca todas las actividades necesarias para mantener en buen estado los componentes de una carretera, asegurando así un transporte cómodo, seguro y económico. En esencia, el objetivo es conservar la inversión hecha en la carretera y prevenir su deterioro prematuro.

4.6.3.2. Mantenimiento rutinario

Definición:

Se refiere al conjunto de actividades que se llevan a cabo de manera continua a lo largo de la vía y se ejecutan diariamente en distintos tramos. Su objetivo principal es mantener todos los elementos del camino con el menor grado de deterioro posible y preservar las condiciones originales después de la construcción o rehabilitación. Estas actividades deben enfocarse de manera preventiva. De acuerdo con la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013a) El mantenimiento o conservación rutinaria abarca un conjunto de actividades realizadas en las vías para preservar sus niveles de servicio. Estas actividades pueden clasificarse en manuales y mecánicas.

4.6.3.3. Mantenimiento periódico

Definición:

Se trata del conjunto de actividades que generalmente se realizan en intervalos superiores a un año, con el objetivo de prevenir la aparición o el agravamiento de defectos graves, conservar las características superficiales, mantener la integridad estructural de la vía y corregir ciertos

defectos mayores específicos. De acuerdo con la (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013a) el mantenimiento o conservación periódica es una serie de actividades programadas periódicamente en las vías para recuperar sus condiciones de servicio. Estas actividades pueden clasificarse en manuales o mecánicas. Se realiza cuando los caminos se encuentran en un estado regular y es esencial intervenir periódicamente antes de que las vías se deterioren y requieran inversiones más costosas para su rehabilitación. De esta forma, se puede lograr un servicio vial eficaz, reflejado en una mejor transitabilidad, seguridad vial y comodidad en la circulación, todo al menor costo global posible.

4.6.4. Actividades de emergencia

Las actividades de emergencia incluyen los trabajos de prevención, destinados a mitigar los efectos de fenómenos naturales en puntos específicos de la vía que son vulnerables y podrían verse afectados por eventos extraordinarios como lluvias inusuales, inundaciones, terremotos, etc. Además, comprende los trabajos de atención de emergencias, que se llevan a cabo para remediar el mal estado de la infraestructura vial después del desastre natural o para garantizar la transitabilidad durante un tiempo limitado.

4.6.5. Evaluación de medio ambiente

Los aspectos ambientales en la actividad vial son de suma importancia y deben ser considerados en la ejecución del mantenimiento rutinario y periódico. Las principales medidas socio-ambientales incluyen la limpieza de la vía, la gestión de desechos, la extracción de materiales de canteras y zonas de préstamo, el aprovechamiento de fuentes de agua, el uso de sitios para depósito de materiales

excedentes, el cuidado de las aguas, y el manejo de la vegetación, que abarca el desbroce, la poda y la siembra, así como la descontaminación visual, entre otras.

Además, el mantenimiento vial está estrechamente relacionado con los usuarios de las vías y con las comunidades ubicadas en la zona de influencia de la carretera, por lo que es esencial establecer vínculos de colaboración mutua entre las diferentes partes interesadas.

4.6.6. Programa de mantenimiento rutinario, periódico y actividades de emergencia

4.6.6.1. Actividades de mantenimiento rutinario

4.6.6.1.1. Limpieza de calzada y bermas

De acuerdo con la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2018b), esta actividad implica la remoción de materiales extraños de la calzada y las bermas utilizando herramientas manuales, con el fin de mantenerlas libres de obstáculos, basura y otros elementos. El propósito es asegurar que la plataforma esté libre de los siguientes materiales sueltos:

- Materiales ajenos a la superficie que podrían contaminar la capa de rodadura.
- Materiales que podrían dañar los vehículos.

4.6.6.1.2. Nivelación de bermas con material granular

De acuerdo con la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2018b), esta actividad implica nivelar las bermas granulares no pavimentadas que estén deformadas. El objetivo es garantizar la seguridad de los usuarios, ya que un desnivel entre la calzada y la berma puede

representar un riesgo para la estabilidad de los vehículos que se desvíen de la pista, especialmente a ciertas velocidades. Se considera inseguro un desnivel mayor de 40 mm, ya que también puede provocar grietas en forma de media luna en el borde del pavimento, al no existir confinamiento lateral.

4.6.6.2. Actividades de mantenimiento periódico

4.6.6.2.1. Recapeos asfálticos

De acuerdo con la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2018b), esta tarea consiste en aplicar una o más capas de mezcla asfáltica sobre la superficie del pavimento, abarcando también túneles, puentes y otros componentes, con el objetivo de restablecer sus condiciones estructurales y superficiales. El propósito es garantizar un tránsito vehicular seguro, cómodo, ágil y económico.

Normalmente, este recapeo se lleva a cabo como parte del mantenimiento periódico de un pavimento flexible cuando se encuentra en un estado regular, determinado por pruebas de evaluación técnica, como el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

4.6.6.2.2. Fresado asfáltico

De acuerdo con la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2018b), esta actividad involucra el corte total o parcial de la capa de rodadura del pavimento. El objetivo es lograr una correcta circulación vehicular con seguridad y comodidad, mediante la recuperación estructural y superficial del pavimento.

4.6.6.2.3. Reciclado asfáltico

Esta actividad consiste en reutilizar los materiales de un pavimento existente mediante técnicas especializadas para mejorar sus propiedades y reincorporarlos a la estructura. El reciclado puede realizarse en frío o en caliente, ya sea en el lugar o en una planta. En el caso del reciclado en caliente, se retira la capa asfáltica mediante fresado, se procesa en una planta con nuevos agregados, asfalto y agentes rejuvenecedores, y se obtiene una nueva mezcla asfáltica. Este proceso necesita plantas con características específicas.

4.6.7. Presupuesto de las actividades de mantenimiento vial

4.6.7.1. Actividades de mantenimiento rutinario

4.6.7.1.1. Limpieza de calzada y bermas

Metrado:

La longitud evaluada de la vía es de 3 km.

Análisis de Costos Unitarios (ACU):

Figura 41

ACU de la partida limpieza de calzada y bermas

01.01		Limpieza de calzada y bermas				TOTAL	344.80
RENDIMIENTO:	km/día	2.50	EQUIPO:	0.03			
JORNADA:	8	H-H	Costo Unitario Directo por			km	TOTAL 344.80
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
Mano de Obra							334.76
	Oficial		hh	0.10	0.32	22.62	7.24
	Peón		hh	5.00	16.00	20.47	327.52
Equipos							10.04
	Herramientas Manuales		%MO		0.03	334.76	10.04

Fuente: Elaboración propia.

4.6.7.1.2. Nivelación de bermas con material granular

Metrado:

Considerando un ancho de berma, en cada lado, de 0.50 m, y sabiendo que la longitud evaluada es de 3 km (3000 m); se tiene en total 3000 m².

Análisis de Costos Unitarios (ACU):

Figura 42

ACU de la partida nivelación de bermas con material granular

02.01		Nivelación de bermas con material granular				TOTAL		47.20
RENDIMIENTO:	m ² /día	150.00	EQUIPO:	0.03				
JORNADA:	8	H-H	Costo Unitario Directo por		m ²	TOTAL	47.20	
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL	
Mano de Obra							15.50	
	Operario		hh	1.00	0.05	28.77	1.53	
	Oficial		hh	2.00	0.11	22.62	2.41	
	Peón		hh	10.00	0.53	20.47	10.92	
	Topógrafo		hh	1.00	0.05	11.91	0.64	
Materiales							24.00	
	Material granular		m ³		0.30	80.00	24.00	
Equipos							7.70	
	Herramientas manuales		%MO		0.03	15.50	0.46	
	Camión Volquete (15 m ³)		hm	1.00	0.05	135.59	7.23	

Fuente: Elaboración propia.

4.6.7.2. Actividades de mantenimiento periódico

4.6.7.2.1. Recapeo asfáltico

Metrado:

La longitud evaluada de la vía es de 3 km (3000 m), mientras que el ancho de la calzada es de 6.60 m y un espesor de 0.05 m; por lo que se tiene un volumen total de 990 m³.

Análisis de Costos Unitarios (ACU):

Figura 43

ACU de la partida recapeo asfáltico

03.01		Recapado asfáltico				TOTAL	115.04
RENDIMIENTO:	m3/día	411.00	EQUIPO:	0.03			
JORNADA:	8	H-H	Costo Unitario Directo por		m3	TOTAL	115.04
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
Mano de Obra							2.91
	Operario		hh	0.1500	0.0029	28.77	0.08
	Oficial		hh	1.0000	0.0195	22.62	0.44
	Peón		hh	6.0000	0.1168	20.47	2.39
Equipos							6.89
	Herramientas Manuales		%MO		0.0300	2.91	0.09
	Rodillo neumático autopropulsado 81-100 HP 5.5-20 ton		hm	1.0000	0.0195	110.37	2.15
	Rodillo tandem estático autopropulsado 58-70 HP 8-10 ton		hm	1.0000	0.0195	110.37	2.15
	Pavimentadora sobre orugas 69 HP		hm	1.0000	0.0195	128.94	2.51
Subpartidas							105.24
	Preparación de mezcla asfáltica en caliente		m3		1.3000	80.95	105.24

Fuente: Elaboración propia.

4.6.7.2.2. Fresado asfáltico

Metrado:

La longitud evaluada de la vía es de 3 km (3000 m), mientras que el ancho de la calzada es de 6.60 m; se tiene un área total de 19,800 m².

Análisis de Costos Unitarios (ACU):

Figura 44

ACU de la partida fresado asfáltico

04.01		Fresado de carpeta asfáltica				TOTAL	3.81
RENDIMIENTO:	m2/día	2000.00	EQUIPO:	0.03			
JORNADA:	8	H-H	Costo Unitario Directo por		m2	TOTAL	3.81
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
Mano de Obra							0.28
	Operario		hh	0.2500	0.0010	28.77	0.03
	Oficial		hh	1.0000	0.0040	22.62	0.09
	Peón		hh	2.0000	0.0080	20.47	0.16
Equipos							3.52
	Herramientas manuales		%MO		0.0300	0.28	0.01
	Fresadora de pavimentos 565 HP		hm	1.0000	0.0040	805.14	3.22
	Cargador sobre llantas 125 HP 2.5 yd3		hm	0.5000	0.0020	147.73	0.30

Fuente: Elaboración propia.

4.6.7.2.3. Reciclado asfáltico

Metrado:

La longitud evaluada de la vía es de 3 km (3000 m), mientras que el ancho de la calzada es de 6.60 m; por lo que se tiene un área total de 19,800 m².

Análisis de Costos Unitarios (ACU):

Figura 45

ACU de la partida reciclado asfáltico

05.01		Reciclado asfáltico			TOTAL		59.87
RENDIMIENTO:	m2/día	6000.00	EQUIPO:	0.03			
JORNADA:	8	H-H	Costo Unitario Directo por		m2	TOTAL	59.87
DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
Mano de Obra							0.32
	Operario		hh	1.0000	0.0013	28.77	0.04
	Oficial		hh	2.0000	0.0027	22.62	0.06
	Peón		hh	8.0000	0.0107	20.47	0.22
Materiales							56.71
	Emulsión asfáltica		gln		6.1347	9.02	55.33
	Cemento Portland Tipo I (42.5 kg)		bls		0.0506	27.14	1.37
Equipos							2.85
	Herramientas manuales		%MO		0.03	0.32	0.01
	Rodillo neumático autopropulsado 81-100 HP 5.5-20 ton		hm	2.0000	0.0027	110.37	0.29
	Recicladora 396 HP		hm	1.0000	0.0013	771.78	1.03
	Camión cisterna (agua) 300 HP - 5000 gln		hm	2.0000	0.0027	173.50	0.46
	Camión cisterna (emulsión) 300 HP - 5000 gln		hm	2.0000	0.0027	183.50	0.49
	Motoniveladora 145-150 HP		hm	2.0000	0.0027	211.00	0.56

Fuente: Elaboración propia.

4.6.7.3. Resumen de presupuesto de las actividades de mantenimiento vial

Figura 46

Presupuesto de mantenimiento vial

DESCRIPCIÓN	UNID.	CANT.	PRECIO	PARCIAL	SUB TOTAL
PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO VIAL					1,517,388.00
ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO RUTINARIO					142,634.40
Limpieza de calzada y bermas	km	3.00	344.80	1,034.40	
Nivelación de bermas con material granular	m2	3,000.00	47.20	141,600.00	
ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO					1,374,753.60
Recapeo asfáltico	m3	990.00	115.04	113,889.60	
Fresado asfáltico	m2	19,800.00	3.81	75,438.00	
Reciclado asfáltico	m2	19,800.00	59.87	1,185,426.00	

Fuente: Elaboración propia.

4.7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO VIAL

Figura 47

Cronograma de mantenimiento vial

DESCRIPCIÓN	UNID.	DÍAS	MESES											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO VIAL														
ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO RUTINARIO														
Limpieza de calzada y bermas	km	48.00												
Nivelación de bermas con material granular	m2	30.00												
ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO														
Recapeo asfáltico	m3	60.00												
Fresado asfáltico	m2	30.00												
Reciclado asfáltico	m2	30.00												

Fuente: Elaboración propia.

4.8. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

4.8.1. Prueba de normalidad

Puesto que la cantidad de datos fue mayor a 50, entonces se aplicó la prueba de Kolmogorov – Smirnov. Para un nivel de confianza del 95% se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0) : Los datos tienen una distribución normal.
- Hipótesis alterna (H_a): Los datos no tienen una distribución normal.

Para el nivel de confianza dado, el nivel de significancia o nivel alfa (α) fue 0.05 (5%). Los resultados de la prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov, se muestran en la Tabla 36:

Tabla 36

Prueba de normalidad de Kolmogorov - Smirnov

	Estadístico	gl	P
PCI	0.145	121	0.000
IRI	0.174	121	0.000
D_0	0.094	121	0.011

Nota: Elaboración propia mediante el software SPSS V. 26

Donde “gl” es grados de libertad, y “P” es la significancia.

Se tienen los siguientes criterios de decisión:

- Si $P < 0.05$; entonces, rechazamos la H_0 y aceptamos la H_a .
- Si $P \geq 0.05$; entonces, aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a .

Puesto que el nivel de significancia fue menor a 0.05, entonces se concluye que los datos no presentan una distribución normal. Por lo que se debe aplicar estadística no paramétrica.

4.8.2. Pruebas no paramétricas

Debido a que se tienen 3 grupos de muestras independientes y una distribución no normal, entonces se aplicó la prueba H de Kruskal – Wallis.

4.8.2.1. Comparación de la deflexión máxima con el PCI

Para un nivel de confianza del 95% se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0) : No existe diferencia significativa de la deflexión máxima (D_0) respecto al PCI.
- Hipótesis alterna (H_a): Si existe diferencia significativa de la deflexión máxima (D_0) respecto al PCI.

Para el nivel de confianza dado, el nivel de significancia o nivel alfa (α) fue 0.05 (5%). Los resultados de la prueba de Kruskal – Wallis entre los datos mencionados, se muestran en la Tabla 37:

Tabla 37

Prueba de Kruskal – Wallis entre la deflexión máxima y PCI

	Estadístico	gl	P
Prueba 1	33.362	13	0.002

Fuente: Elaboración propia mediante el software SPSS V. 26

Donde “gl” es grados de libertad, y “P” es la significancia.

Se tienen los siguientes criterios de decisión:

- Si $P < 0.05$; entonces, rechazamos la H_0 y aceptamos la H_a .
- Si $P \geq 0.05$; entonces, aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a .

Puesto que el nivel de significancia fue menor a 0.05, entonces se acepta la hipótesis alterna; es decir, si existe diferencia significativa entre la deflexión máxima (D_0) y el PCI (no existe igualdad de medianas entre los grupos analizados).

4.8.2.2. Comparación de la deflexión máxima con el IRI

Para un nivel de confianza del 95% se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0) : No existe diferencia significativa de la deflexión máxima (D_0) respecto al IRI.
- Hipótesis alterna (H_a): Si existe diferencia significativa de la deflexión máxima (D_0) respecto al IRI.

Para el nivel de confianza dado, el nivel de significancia o nivel alfa (α) fue 0.05 (5%). Los resultados de la prueba de Kruskal – Wallis entre los datos mencionados, se muestran en la Tabla 38:

Tabla 38

Prueba de Kruskal – Wallis entre la deflexión máxima e IRI

	Estadístico	gl	P
Prueba 2	26.563	7	0.000

Nota: Elaboración propia mediante el software SPSS V. 26

Donde “gl” es grados de libertad, y “P” es la significancia.

Se tienen los siguientes criterios de decisión:

- Si $P < 0.05$; entonces, rechazamos la H_0 y aceptamos la H_a .
- Si $P \geq 0.05$; entonces, aceptamos la H_0 y rechazamos la H_a .

Puesto que el nivel de significancia fue menor a 0.05, entonces se acepta la hipótesis alterna; es decir, si existe diferencia significativa entre la deflexión máxima (D_0) y el IRI (no existe igualdad de medianas entre los grupos analizados).

4.9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.9.1. Evaluación superficial

En el presente proyecto, mediante la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI) se obtuvo un valor de 10.44 para la vía Platería - Acora, lo que corresponde a una calificación de “GRAVE”.

Una calificación similar fue obtenida por (Vilca Callata & Cuba Asillo, 2020), quienes reportaron un valor PCI de 23.5 para la av. Floral y 14 para la av. El Sol, según la última clasificación estándar cualitativa propuesta por (Vásquez Varela, 2023), corresponden a una calificación de “GRAVE”.

En otro estudio, (Ramos Vilca, 2017), obtuvo un valor PCI de 36 para los 4 km más críticos de la carretera Puno – Vilque – Mañazo, lo que se clasifica como “MUY MALO”. Un valor superior fue obtenido por (Lizarbe Palacios & Longa Solon, 2022), quienes obtuvieron un PCI de 43.71 para la av. Alameda del Premio Real en Chorrillos, clasificándola como “MALO”. También tenemos a (Ramos Libandro, 2021), quien obtuvo un valor PCI de 52 para la av. Lambramani en Arequipa, también con una clasificación cualitativa de “MALO”. Finalmente, (Salinas Villegas, 2019) obtuvo un valor PCI de 47.83 para la sección 1 y 61.50

para la sección 2 de la vía Manuelita Saenz, desde la intersección con la av. Quiz Quiz hasta la intersección con la av. José Peralta en Ambato, Ecuador, con clasificaciones de “MALO” y “REGULAR”, respectivamente.

4.9.2. Evaluación funcional

En el presente proyecto, mediante el parámetro del Índice de Regularidad Internacional (IRI) se obtuvo valores de IRI promedio de 6.03 m/km, con un IRI característico de 8.36 m/km, para el carril derecho; y 6.33 m/km para el carril izquierdo, con un IRI característico de 9.19 m/km. Estos valores no cumplen con lo establecido; puesto que, el IRI durante el periodo de servicio para una carretera de primera clase, como la vía Platería – Acora, durante el periodo de servicio debe ser como máximo 4 m/km.

Al igual que en la presente investigación, en todos estos proyectos citados a continuación, los valores IRI fueron superiores al IRI máximo aceptable durante el periodo de servicio de las vías. (Vilca Callata & Cuba Asillo, 2020) obtuvo valores IRI promedio de 5.05 m/km y 6.19 m/km, para los carriles derecho e izquierdo de la av. Floral; y 4.85 m/km y 5.07 m/km, para los carriles derecho e izquierdo de la av. El Sol. Valores similares fueron los reportados por (Ramos Vilca, 2017), IRI promedio de 4.79 m/km y 4.63 m/km, para los carriles derecho e izquierdo de los 4 km más críticos de la carretera Puno – Vilque – Mañazo. Por otro lado, (Ramos Libandro, 2021) indica que los valores de IRI promedio obtenidos para la av. Lambramani en Arequipa, son 4.71 m/km y 4.68 m/km, para el carril derecho e izquierdo respectivamente.

4.9.3. Evaluación estructural

En el presente proyecto, con respecto a la deflectometría, empleando la viga Benkelman se obtuvo una deflexión promedio máxima corregida por carga a 40 kN y por temperatura a 20 °C de 871.98 μm en el carril derecho, y de 930.25 μm en el carril izquierdo. La deflexión característica en el carril derecho fue de 970.54 μm , y en el carril izquierdo fue de 1050.66 μm . Dichos valores son superiores a la deflexión admisible, para la vía Platería – Acora, cuyo valor fue de 550 μm .

En los proyectos que serán mencionados a continuación, emplearon la viga Benkelman para el cálculo de la deflectometría. (Vilca Callata & Cuba Asillo, 2020) reportaron deflexiones características de 117.28×10^{-2} mm y 106.78×10^{-2} mm, dichos valores son superiores a 71.08×10^{-2} mm y 79.21×10^{-2} mm, que corresponden a los valores de las deflexiones admisibles del carril derecho e izquierdo de la av. Floral, respectivamente. Respecto a la av. El Sol, obtuvieron deflexiones características de 110.99×10^{-2} mm y 103.71×10^{-2} mm, valores que también son superiores a las deflexiones admisibles, de 66.70×10^{-2} mm y 66.32×10^{-2} mm, para los carriles derecho e izquierdo, respectivamente.

Por el contrario, (Ramos Vilca, 2017) obtuvo resultados satisfactorios; puesto que, reportó deflexiones características de 69.22×10^{-2} mm y 65.53×10^{-2} mm, para el carril derecho e izquierdo de los 4 km más críticos de la carretera Puno – Vilque – Mañazo, respectivamente. Estos valores no superan a la deflexión admisible, que resultó ser 127.5×10^{-2} mm. De la misma forma, (Lizarbe Palacios & Longa Solon, 2022) en su proyecto obtuvieron una deflexión característica de 47.7×10^{-2} mm, para la av. Alameda del Premio Real en Chorrillos, que no supera



a la deflexión admisible que fue igual a 107.23×10^{-2} mm. (Ramos Libandro, 2021), igualmente, reportó una deflexión característica inferior a la deflexión admisible; puesto que dichos valores fueron 73.06×10^{-2} mm y 82.63×10^{-2} mm, respectivamente, para la av. Lambramani en Arequipa. Finalmente, (Salinas Villegas, 2019), en su proyecto, reportó igualmente una deflexión característica inferior a la admisible, en la vía Manuelita Saenz, desde la intersección con la av. Quiz Quiz hasta la intersección con la av. José Peralta en Ambato, Ecuador.

Entonces, luego de ver los resultados obtenidos por diversos autores, se puede corroborar lo afirmado por (Guzmán Suárez, 2023), quien indica que, si un pavimento presenta defectos estructurales, también presentará defectos funcionales. Sin embargo, un pavimento fallado funcionalmente puede ser bueno estructuralmente.

V. CONCLUSIONES

- PRIMERA:** Se determinó el estado superficial del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según la metodología del índice de Condición del Pavimento (PCI), el valor de toda la sección fue 10.44, que corresponde a una calificación de “grave”. Lo cual indica que el pavimento se encuentra muy deteriorado, con una gran cantidad de fallas y con altos niveles de severidad. La falla que se presentó en la vía, con mayor frecuencia y generalmente a un alto nivel de severidad fue la falla “piel de cocodrilo”, la cual se origina principalmente por la acción de las cargas de tránsito.
- SEGUNDA:** Se determinó el estado funcional del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el parámetro del Índice de Regularidad Internacional (IRI), el promedio del carril derecho fue 6.03 m/km, con un IRI característico de 8.36 m/km; y del carril izquierdo fue 6.33 m/km, con un IRI característico de 9.19 m/km. Lo que indica que el pavimento está dañado y presenta muchas irregularidades; puesto que, el IRI durante el periodo de servicio de una “carretera de primera clase” debe ser como máximo 4 m/km. Para tales valores del IRI, se tiene un “pavimento dañado”.
- TERCERA:** Se determinó el estado estructural del pavimento flexible en la vía Platería - Acora, según el ensayo de deflectometría, empleando la viga Benkelman, la deflexión promedio máxima corregida en el carril derecho fue 70.14×10^{-2} mm; mientras que en el carril izquierdo fue 78.13×10^{-2} mm. Así mismo, se obtuvo una deflexión característica en el carril derecho de 78.81×10^{-2} mm, y en el carril izquierdo de 92.16×10^{-2} mm. Estos valores son superiores a la deflexión admisible, cuyo valor fue 55.0×10^{-2} mm.



CUARTA: Se establecieron las actividades necesarias de mantenimiento vial del pavimento flexible en la vía Platería – Acora, mediante la elaboración de un plan de mantenimiento vial, se indicó que las actividades de mantenimiento rutinario a ejecutar son: limpieza de cazada y bermas, y nivelación de bermas con material granular; mientras que las actividades de mantenimiento periódico a ejecutar son: recapeo asfáltico, fresado asfáltico y reciclado asfáltico.



VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Se recomienda que la evaluación superficial se realice con el rango de clasificación PCI actualizado, propuesto por el ASTM; puesto que, en muchos proyectos aún se utilizan denominaciones antiguas. Además, se debe tener en cuenta que existen 20 tipos de fallas en pavimentos asfálticos, y no 19 como se consideraba anteriormente.
- SEGUNDA:** Se recomienda en futuros proyectos, como parte de la evaluación funcional de pavimentos, realizar la evaluación de la textura superficial del pavimento, la cual involucra la microtextura, macrotextura y megatextura.
- TERCERA:** Se recomienda utilizar un perfilómetro láser si la vía a evaluar es muy extensa. Ya que este equipo analiza el perfil de la superficie con alta precisión y a una velocidad de operación rápida.
- CUARTA:** Se recomienda que la temperatura de las capas asfálticas esté dentro del rango de 5 °C y 35 °C, siendo deseable que no supere los 30 °C, para tener una mejor confiabilidad en las mediciones de las deflexiones del pavimento; puesto que la superficie del pavimento absorbe entre el 90 y el 95% de la radiación solar, esto influye en el comportamiento de las deflexiones.
- QUINTA:** Se recomienda realizar las actividades de mantenimiento periódico y rutinario señaladas en el Plan de Mantenimiento Vial, para corregir las fallas presentes en el pavimento y para preservar el funcionamiento del mismo a lo largo de su vida útil.



SEXTA: Se recomienda ampliar la vía Platería - Acora; puesto que, después de realizados los estudios de tráfico, se determinó que el IMDA corresponde a una "carretera de primera clase". Es decir, la vía debe presentar una calzada de dos carriles de 3.60 m. de ancho como mínimo; sin embargo, actualmente la vía tiene un ancho de 3.30 m por carril.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D4694. (2017). Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. *Instituto Mexicano del Transporte*.
- ASTM D6433. (2018). Standard practice for roads and parking lots Pavement Condition Index. *Universidad de los Andes*. <https://doi.org/10.1520/D6433-18>
- ASTM E867. (2004). Standard terminology relating to vehicle - pavement systems. *Universidad de los Andes*.
- Badilla Vargas, G. A. (2009). *Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo del Índice Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes*.
- Cajo Gomez, D. S. (2021). *Evaluación superficial y estructural del pavimento flexible de la carretera comprendida entre los distritos de Ferreñafe y Mesones Muro, 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/3760>
- CONREVIAl. (1982). *Estudio de rehabilitación de carreteras en el país*. MTC.
- Corros B., M., Urbáez P., E., & Corredor M., G. (2009). *Manual de Evaluación de Pavimentos*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Del Águila Rodríguez, P. (1999a). Manual de usuario MERLIN. Equipo para rugosidad. *Camineros S.A.C.*
- Del Águila Rodríguez, P. (1999b). Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión. *X Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto*.
- Devore, J. L. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (7a ed.). Cengage Learning.
- Diaz Montoya, D. F. (2021). *Evaluación del estado superficial y capacidad estructural de pavimentos flexibles mediante el Índice de Condición del Pavimento y deflectometría en calles y avenidas del cercado del distrito de Pimentel 2020*



[Tesis de Pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].

<https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/3787>

- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2013a). Manual de carreteras. Conservación vial. En *MTC*.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2013b). Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para la construcción (EG - 2013). En *MTC*.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2014). Manual de carreteras. Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos. En *MTC*.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2016). Manual de ensayo de materiales (EM - 2016). En *MTC*.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2018a). Manual de carreteras. Diseño Geométrico (DG - 2018). En *MTC*.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2018b). Manual de carreteras. Mantenimiento o conservación vial. En *MTC*.
- Fernandez Ruiz, M. A. (2020). *Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Celendín-Balsas, tramo Chaquilpampa-Santa Rosa de Chaquil, mediante el análisis deflectométrico* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca].
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3733>
- Guzmán Suárez, E. A. (2023). *Evaluación estructural de pavimentos flexibles*. Editorial Fundación Universitaria Juan de Castellanos.
- Hall, J. W., Smith, K. L., Titus-Glover, L., Wambold, J. C., Yager, T. J., & Rado, Z. (2009). Guide for pavement friction. *NCHRP Project*.
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill.
- Hoffman, M. S., & Del Aguila, P. M. (1985). *Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos)*.



- Leguía Loarte, P. B., & Pacheco Risco, H. F. (2016). Evaluación superficial del pavimento flexible por el método Pavement Condition Index (PCI) en las vías arteriales: Cincuentenario, Colón y Miguel Grau (Huacho-Huaura-Lima). En *REPOSITORIO ACADÉMICO USMP*.
<https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/2311>
- Lizarbe Palacios, C., & Longa Solon, J. C. (2022). *Evaluación superficial y estructural del pavimento flexible en la av. Alameda del Premio Real, Chorrillos - 2022* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/96778>
- López Estrada, L. C., & Mendoza Díaz, A. (1998). *Evaluación estructural no destructiva de pavimentos*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Mamani Arcata, S. M., & Pilco Chura, W. C. (2021). *Evaluación estructural por deflectometría e IRI para determinar la vida remanente del pavimento flexible en la av. Circunvalación - Puno, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/72352>
- Mamani Nina, J. R., & Torres Salas, J. A. (2021). *Evaluación del pavimento flexible para plantear el mejoramiento de la serviciabilidad utilizando parámetros de rugosidad – deflectometría, carretera Puno - Mañazo 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/86150>
- Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería de Pavimentos. Materiales, diseño y conservación* (1a ed.). Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG).
- Montejo Fonseca, A. (2006). Ingeniería de pavimentos para carreteras. En *Universidad Católica de Colombia* (2a ed.). Universidad Católica de Colombia.
- Morales Cárdenas, P. J., Chávez Arévalo, O., & López Poveda, L. (2009). Efectos de la alta compactación de la capa de base en pavimentos flexibles. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- MTC. (2021). *Informe sobre el Estado de las Carreteras en Perú*.
- OMS. (2018). *Global Status Report on Road Safety*.



- PITRA. (2018). *Parámetros de análisis estructural de pavimentos en Costa Rica*.
Universidad de Costa Rica.
- Queiroz, C., & Gautam, S. (1992). *Road Infrastructure and Economic Development*.
- Ramos Libandro, R. R. (2021). *Evaluación estructural y superficial del pavimento de la av. Lambramani con fines de diagnóstico y rehabilitación* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<http://hdl.handle.net/20.500.12773/12707>
- Ramos Vilca, W. (2017). *Evaluación del estado del pavimento por deflectometría e índice de rugosidad internacional de la carretera: Puno – Vilque – Mañazo - 4km críticos - 2015* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/5094>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño* (1a ed.). ECOE Ediciones.
- Salinas Villegas, E. X. (2019). *Evaluación funcional y estructural del pavimento de la vía Manuelita Saenz desde la intersección con la av. Quiz Quiz hasta la intersección con la av. José Peralta* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30410>
- Sánchez, C. A. (2023). Las pruebas de normalidad. *Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM)*.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. O. (1986). *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements*. World Bank Technical Paper N° 46.
- Sigueñas Medina, J. C. (2021). *Análisis del estado estructural y funcional del pavimento flexible en la avenida Coronel Portillo, Distrito de Huaura, 2021* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión].
<https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/6963>
- Solminihac T., H., Echaveguren N., T., & Chamorro G., A. (2019). *Gestión de infraestructura vial* (3a ed.). Alfaomega U.C.



- Vásquez Varela, L. R. (2002). *Pavement Condition Index (PCI). Para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. INGEPAV.
- Vásquez Varela, L. R. (2023). *Índice de Condición del Pavimento. Para pavimentos asfálticos, de concreto de cemento Portland y de adoquines en vías y estacionamientos; e índice de condición de carreteras no pavimentadas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Vilca Callata, R. J., & Cuba Asillo, A. B. (2020). *Evaluación superficial en pavimentos flexibles aplicando la metodología PCI, IRI y deflectometría en las avs. Floral y El Sol de la ciudad de Puno 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/16428>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9a ed.). Pearson Education.



ANEXOS

ANEXO 1. Curvas de valores deducidos – PCI

ANEXO 2. Hojas de campo PCI y cálculos

ANEXO 3. Hojas de campo IRI y cálculos

ANEXO 4. Hojas de campo deflectometría y cálculos

ANEXO 5. Planos

ANEXO 6. Certificados

ANEXO 7. Macros en VBA

ANEXO 8. Panel fotográfico

ANEXO 9. Declaración jurada de autenticidad de tesis

ANEXO 10. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



ANEXO 9. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Alexander Edmundo Hermosa Sánchez,
identificado con DNI 70136533 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Evaluación Superficial, funcional y estructural del pavimento flexible, mediante PCI, IRI y deflectometría, en la vía Plateria - Acaes ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 03 de octubre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO 10. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Alexander Edmundo Herrojo Sánchez,
identificado con DNI 70136533 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Evaluación Superficial, funcional y estructural del pavimento flexible, mediante PCI, IRI y deflectometría, en la vía Platería - Acra ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 03 de octubre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella