



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

---

“DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA  
REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE LA  
CARRETERA CUSCO-URCOS, USANDO TELÉFONOS  
INTELIGENTES Y EL RUGOSÍMETRO DE MERLIN -  
2016”

---

Presentado por: Deyse Laura  
Hirpahuanca

Para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Civil

Asesor: Ing. Herbert Jesús Zevallos  
Guzmán

CUSCO – PERÚ  
2016



## DEDICATORIA

A Dios Todo Poderoso,  
mis padres Pablo y  
Andrea, por el gran  
sacrificio realizado para  
hacer de mí un  
profesional.



## AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por darme la vida y guiarme por el camino correcto hacia mis metas.

Gracias a mis padres Pablo Laura y Andrea Hirpahuanca, ya que ellos me apoyaron en todo momento para mi educación, fortaleza, principios, sustento, por la inmensa paciencia y por guiarme por el camino correcto.

Gracias a mi asesor Ingeniero Herbert Jesús Zevallos Guzmán, por dirigir mi proyecto, darme asesorías y aconsejarme constantemente.

A mi enamorado Francisco por la ayuda permanente que me ha dado en la realización de este proyecto.

Gracias al Ingeniero Lars Forslöf por enviarme gratuitamente la aplicación Roadroid y haber tenido la paciencia de contestar mis e-mails.

Gracias a todos los ingenieros que influyeron para llevar a cabo la realización de esta tesis.



## RESUMEN

En la presente tesis se ha investigado el porcentaje de similitud que existe, entre los resultados de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid con respecto al Rugosímetro MERLIN, la diferencia de los resultados obtenidos, las ventajas de usar la aplicación Roadroid con respecto al Rugosímetro MERLIN, la serviciabilidad del pavimento, y la comparación de la regularidad superficial de ambos carriles.

Ambos equipos miden la regularidad superficial de pavimentos, pero la aplicación Roadroid se presenta como una herramienta nueva e innovadora en el mercado y el Rugosímetro de MERLIN es un equipo ampliamente conocido y usado en nuestra Región y según el Banco Mundial se caracteriza por ser uno de los equipos más precisos y recomendado para calibrar otros equipos.

Para llevar a cabo esta investigación, se midió la regularidad superficial de la carretera Cusco - Urcos usando la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN, luego se realizó el procesamiento de datos para obtener los resultados y su posterior análisis.

Llegando a la conclusión de que los resultados obtenidos con la aplicación Roadroid tiene una similitud del 89% con respecto al Rugosímetro de MERLIN. Por lo tanto, la aplicación Roadroid es una herramienta que puede ser usada para determinar la regularidad superficial de pavimentos debido a que proporciona datos de la regularidad superficial en forma eficiente, es decir que se pueden estudiar tramos más grandes en poco tiempo y con menos recursos y lo mejor que no necesita tiempo para el procesamiento de datos a comparación del Rugosímetro de MERLIN que es un equipo de bajo rendimiento tanto para la toma de datos como para su procesamiento.

**Palabras clave:** Regularidad superficial, IRI, PSI, Roadroid, MERLIN.



## ABSTRACT

The present thesis has investigated the percentage of similarity that exists between the results of the measurement of the surface regularity of the pavement of the Cusco - Urcos road; Using the Roadroid application with respect to the MERLIN Roughness Meter, the difference of the results obtained, the advantages of using the Roadroid application with respect to the MERLIN Roughness Meter, the serviciabilidad of the pavement, and the comparison of surface regularity of both lanes.

Both teams measure the surface regularity of pavements, but the Roadroid application is presented as a new and innovative tool in the market and the MERLIN Roughness Meter is a widely known and used equipment in our Region and according to the World Bank is characterized as one of the most accurate and recommended equipments to calibrate other equipment.

In order to carry out this investigation, the surface regularity of the Cusco - Urcos road was measured using the Roadroid application and the MERLIN Roughness meter, then was the processing of data for results and further analysis.

Concluding that the results obtained with the Roadroid application has a similarity of 89% with respect to the MERLIN Roughness meter. Therefore, the Roadroid application is a tool that can be used to determine the surface regularity of pavements since it provides data of the surface regularity in an efficient way, that is to say that larger sections can be studied in a short time and with fewer resources and the best that does not need time for data processing compared to the MERLIN Roughness Meter which is a low-performance equipment for both data collection and processing.

**Keywords: Surface regularity, IRI, PSI, Roadroid, MERLIN.**



## INTRODUCCIÓN

En el Perú la utilización del IRI como parámetro de control de la calidad de pavimentos data aproximadamente desde el año 1992 según el Ingeniero Pablo del Águila, puesto que el IRI es uno de los indicadores más importantes de la calidad del pavimento y es sumamente valiosa y confiable para la gestión vial, es así que tiene varias aplicaciones siendo alguna de ellas la aplicación al estudio de pavimentos para su rehabilitación, para el control de calidad de pavimentos recién construidos (recepción de obra) y como mecanismo de control de vías concesionadas.

Además, en el Manual de **“Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013”** que forma parte de los **Manuales de Carreteras**, se señala que para conocer el estado real y la capacidad de servicio de un pavimento, se debe medir con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), dada por el Banco Mundial en el año 1972. Y para medir este parámetro, en la actualidad existen muchas herramientas, pero una totalmente nueva e innovadora es el uso de una aplicación para teléfonos inteligentes llamado Roadroid, el cual mide la rugosidad por las vibraciones que experimenta un vehículo al circular por una vía, capturando mediante los acelerómetros de los teléfonos inteligentes las vibraciones del chasis, esta aplicación ha sido reconocida en muchos congresos dedicados a la investigación en los diferentes países a nivel mundial.

Por lo anterior, siendo la aplicación Roadroid una herramienta de fácil manejo, rápido y económico, es que en la presente tesis se plantea conocer qué tan confiables son los datos obtenidos con esta herramienta, y para saberlo, el objetivo planteado es determinar y comparar los resultados de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, usando la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN, asimismo analizar las ventajas de la aplicación Roadroid frente al Rugosímetro de MERLIN. En efecto, la carretera en estudio elegida para esta investigación es uno de los accesos más importantes a la Ciudad del Cusco, Patrimonio de la Humanidad.



Para llevar a cabo esta investigación se contó con los equipos y herramientas necesarios, asimismo con la Normativa Peruana vigente como son el Manual de “**Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos**”; el Manual de “**Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013**” y el “**Manual de Mantenimiento o conservación vial**” que forman parte de los Manuales de Carreteras.

Además, esta investigación está constituida por 5 capítulos:

Capítulo I: Hace mención al Planteamiento del Problema, el cual abarca la identificación del problema, justificación e importancia de la investigación, limitaciones de la investigación, objetivos, hipótesis y la definición de variables.

Capítulo II: Está referido al Marco Teórico, en el cual se indican los antecedentes de la tesis y las bases teóricas pertinentes que consiste en toda la teoría que sustenta la investigación.

Capítulo III: Se refiere a la Metodología, el cual contiene la metodología de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra, instrumentos, procedimientos de recolección de datos y procedimiento de análisis de datos.

Capítulo IV: Se refiere a los resultados.

Capítulo V: Referido a la discusión.



**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS..... x**

**ÍNDICE DE FIGURAS .....xii**

**CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 1**

**1.1. Identificación del Problema..... 1**

        1.1.1. Descripción del Problema..... 1

        1.1.2. Formulación Interrogativa del Problema ..... 2

            1.1.2.1. Formulación Interrogativa del Problema General ..... 2

            1.1.2.2. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos ..... 2

**1.2. Justificación e Importancia de la Investigación ..... 2**

        1.2.1. Justificación Técnica ..... 2

        1.2.2. Justificación Social ..... 3

        1.2.3. Justificación por Viabilidad..... 3

        1.2.4. Justificación por Relevancia..... 4

**1.3. Limitaciones de la Investigación ..... 4**

**1.4. Objetivos de la Investigación..... 5**

        1.4.1. Objetivo General..... 5

        1.4.2. Objetivos Específicos ..... 5

**1.5. Hipótesis..... 5**

        1.5.1. Hipótesis General..... 5

        1.5.2. Sub-Hipótesis..... 6

**1.6. Definición de Variables..... 6**

        1.6.1. Variables Independientes..... 6

        1.6.2. Variables Dependientes..... 7

        1.6.3. Cuadro de Operacionalización de Variables..... 7

**CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO ..... 9**

**2.1. Antecedentes de la Tesis ..... 9**

        2.1.1. Antecedentes a Nivel Nacional..... 9

        2.1.2. Antecedentes a Nivel Internacional..... 10

**2.2. Bases Teóricas – Científicos ..... 10**

        2.2.1. Reseña ..... 10

        2.2.2. Carretera..... 11

        2.2.3. Carretera en estudio..... 13

        2.2.4. Pavimento ..... 15





- 2.2.5. Revisión de la normativa peruana ..... 20
- 2.2.6. Regularidad superficial del pavimento..... 25
- 2.2.7. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)..... 26
- 2.2.8. Métodos para la medición de la rugosidad ..... 30
- 2.2.9. Equipos para evaluar la rugosidad..... 32
- 2.2.10. Rugosímetro de MERLIN ..... 38
- 2.2.11. Roadroid ..... 45
- 2.2.12. Serviciabilidad de pavimentos..... 60
- 2.2.13. Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) ..... 61
- 2.2.14. Relaciones entre PSI e IRI..... 61
- 2.2.15. Singularidades ..... 64
- 2.2.16. Análisis de las ventajas ..... 65
- CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....68**
- 3.1. Metodología de la Investigación ..... 68
  - 3.1.1. Tipo de Investigación ..... 68
  - 3.1.2. Nivel de la Investigación ..... 68
  - 3.1.3. Método de la Investigación..... 68
- 3.2. Diseño de la Investigación..... 68
  - 3.2.1. Diseño Metodológico ..... 68
  - 3.2.2. Diseño de Ingeniería..... 69
- 3.3. Población y Muestra..... 71
  - 3.3.1. Población..... 71
    - 3.3.1.1. Descripción de la población..... 71
    - 3.3.1.2. Cuantificación de la población ..... 71
  - 3.3.2. Muestra ..... 71
    - 3.3.2.1. Descripción de la muestra ..... 71
    - 3.3.2.2. Cuantificación de la muestra ..... 71
    - 3.3.2.3. Método de muestreo..... 71
    - 3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra ..... 72
  - 3.3.3. Criterios de Inclusión ..... 72
- 3.4. Instrumentos ..... 72
  - 3.4.1. Instrumentos Metodológicos ..... 72
  - 3.4.2. Instrumentos de Ingeniería..... 75
- 3.5. Procedimientos de Recolección de Datos ..... 75



3.5.1. Recolección de datos con la aplicación Roadroid.....	75
3.5.2. Recolección de datos con el Rugosímetro de MERLIN.....	86
3.5.3. Aforo vehicular de la carretera Cusco - Urcos.....	89
3.6. Procedimientos de Análisis de datos.....	92
3.6.1. Análisis de datos obtenidos con la aplicación Roadroid.....	92
3.6.2. Análisis de datos del Rugosímetro de MERLIN.....	99
3.6.3. Comparación de los resultados obtenidos.....	101
3.6.4. Análisis del Índice de serviciabilidad presente (PSI).....	112
3.6.5. Cálculo del IMDa.....	114
3.6.6. Determinación de ejes equivalentes.....	118
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>119</b>
4.1. Regularidad superficial según la aplicación Roadroid.....	119
4.2. Regularidad superficial con el Rugosímetro de MERLIN.....	119
4.3. Comparación entre el eIRI y el IRI.....	120
4.4. Ventajas de la aplicación Roadroid con respecto al Rugosímetro de MERLIN.....	121
4.5. Diferencia entre los resultados del IRI.....	122
4.6. Índice de serviciabilidad con el eIRI.....	122
4.7. Índice de serviciabilidad con el IRI.....	122
4.8. Comparación de ambos carriles.....	122
<b>CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....</b>	<b>123</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>127</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>129</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>132</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>136</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro de Operacionalización de variables.....	8
Tabla 2: Índice de serviciabilidad final (Pt). Según rango de tráfico.....	20
Tabla 3: Escala de índice de serviciabilidad.....	21
Tabla 4: Rugosidad inicial IRI (m/km). ....	23
Tabla 5: Parámetros globales para contratos por niveles de servicio. ....	24
Tabla 6: Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial del pavimento.....	37
Tabla 7: Escala para determinar la dispersión de las desviaciones de la Superficie de pavimento respecto del nivel de referencia o cuerda promedio. ....	43
Tabla 8: Formato para la recolección de datos de campo. ....	45
Tabla 9: Condición de la carretera .....	52
Tabla 10: Reporte del seguimiento del cambio de condición de carretera utilizando el RI.....	54
Tabla 11: Escala de calificaciones de la serviciabilidad según AASHTO 1962.....	60
Tabla 12: Escala de serviciabilidad .....	62
Tabla 13: Rangos y Valores característicos de IRI en función del PSI. ....	63
Tabla 14: Cálculo del rendimiento.....	66
Tabla 15: Cotización de la aplicación Roadroid más equipo.....	66
Tabla 16: Cálculo del costo para la recolección de datos con .....	67
Tabla 17: Cálculo del costo para la recolección de datos .....	67
Tabla 18: Formato de presentación de datos de la aplicación Roadroid.....	72
Tabla 19: Formato de campo para toma de datos con el Rugosímetro de MERLIN .....	73
Tabla 20: Formato de campo para el aforo vehicular.....	74
Tabla 21: Datos que proporciona la aplicación Roadroid en formato “.txt” .....	86
Tabla 22: Ensayo N° 01 con el Rugosímetro de MERLIN.....	89
Tabla 23: Conteo vehicular .....	91
Tabla 24: Ubicación de singularidades .....	92
Tabla 25: Valores el eIRI sin singularidades en promedios de 100m.....	93
Tabla 26: Porcentajes de la condición de la.....	95
Tabla 27: Promediando valores del eIRI cada 400m .....	96



Tabla 28: Resumen de los eIRI cada 400m ..... 98

Tabla 29: Conteo de las repeticiones..... 99

Tabla 30: Cálculo del IRI ..... 100

Tabla 31: IRI con el Rugosímetro de MERLIN. .... 101

Tabla 32: Porcentaje de similitud de los resultados del IRI con ambos equipos.  
..... 102

Tabla 33: Correlación de Pearson..... 104

Tabla 34: Correlación de Spearman ..... 105

Tabla 35: Ecuaciones de regresión..... 108

Tabla 36: eIRI del carril Cusco - Urcos ..... 110

Tabla 37: Obtención del IRI mediante la ecuación de regresión lineal..... 111

Tabla 38: Valores del PSI en función al eIRI y al IRI..... 112

Tabla 39: Resumen del conteo vehicular durante una semana. .... 114

Tabla 40: Factores de corrección estacional..... 115

Tabla 41: IMDa de la carretera en estudio. .... 116

Tabla 42: IMDa de la carretera Cusco – Urcos. .... 117

Tabla 43: ESAL de la carretera. .... 118

Tabla 44: Porcentajes de la condición de la carretera y el eIRI promedio ..... 119

Tabla 45: Promedios y similitud del eIRI e IRI..... 120

Tabla 46: Pruebas estadísticas ..... 120

Tabla 47: IRlc con el eIRI..... 121

Tabla 48: IRlc con el IRI..... 121

Tabla 50: Rugosidad inicial IRI (m/km). .... 123



### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tramo en estudio ..... 13

Figura 2: Hito kilométrico 984, inicio de la carretera en estudio. .... 14

Figura 3: Hito kilométrico 1015+200, final de la carretera en estudio. .... 14

Figura 4: Pavimento flexible del tramo en estudio..... 16

Figura 5: Sección típica de un pavimento. .... 17

Figura 6: Escala de rugosidad IRI (m/km)..... 22

Figura 7: Representación gráfica del modelo de “cuarto de carro” ..... 28

Figura 8: Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos. ... 29

Figura 9: Gráfico típico del avance del deterioro de un camino respecto al tiempo.  
..... 30

Figura 10: Nivel y mira topográfica..... 32

Figura 11: Equipo Dipstick. .... 33

Figura 12: Operación del equipo Dipstick ..... 33

Figura 13: Perfilógrafo California..... 34

Figura 14: Perfilógrafo Rainhart ..... 34

Figura 15: Componentes de equipos de respuesta..... 35

Figura 16: Componentes de equipos con referencia inercial ..... 36

Figura 17: Medición de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto  
de la cuerda promedio. .... 38

Figura 18: Histograma de la distribución de frecuencias de una..... 39

Figura 19: Rugosímetro de MERLIN empleado para los ensayos en esta tesis.  
..... 41

Figura 20: Esquema del Rugosímetro de MERLIN ..... 42

Figura 21: Izquierda, 1er prototipo 2002-2003 y a la derecha 2do prototipo  
desarrollado en el período 2004-2006. .... 48

Figura 22: Prueba del tercer prototipo, usando el Galaxy Tab GT P1000..... 50

Figura 23: Imagen de las carreteras de Suecia y sus respectivas calidades de  
pavimento..... 52

Figura 24: Filtro, selección y análisis de datos en la web utilizando el índice  
Roadroid (RI)..... 53



Figura 25: Izquierda: Base de estudio de correlación con eIRI. Derecha: Comparaciones del cIRI (rojo) vs. IRI de la carretera en sub-secciones..... 55

Figura 26: 72 km de prueba en Sudáfrica - una parcela agregada de eIRI, velocidad y altitud..... 57

Figura 27: Ejemplos de fotos tomadas con los smartphones con cámara incorporada y el apoyo de la herramienta web..... 58

Figura 28: Esquema de factores que afectan al programa. .... 59

Figura 29: Tachas reflectivas en la carretera Cusco – Urcos (Huaru)..... 64

Figura 30: Bandas transversales de alerta en la carretera Cusco – Urcos (desvío Huasao). .... 64

Figura 31: Cruce de riel en Saylla. .... 65

Figura 32: Diagrama de flujo de la tesis..... 70

Figura 33: Vehículo utilizado para el ensayo. .... 75

Figura 34: Smartphone empleado en el ensayo..... 76

Figura 35: Ícono Roadroid..... 76

Figura 36: Recolección de datos con la aplicación Roadroid con supervisión del Ingeniero Asesor de la Tesis..... 77

Figura 37: Dispositivo utilizado en la tesis. .... 77

Figura 38: Sujetador del teléfono. .... 78

Figura 39: Activación de datos móviles..... 78

Figura 40: izquierda, Ícono a presionar para iniciar el programa. .... 79

Figura 41: Configuración para el tipo de vehículo. .... 79

Figura 42: Configuración para el tipo de vehículo y fotos. .... 79

Figura 43: Configuración para el tipo de vehículo y fotos. .... 80

Figura 44: Procedimiento de calibración de móvil..... 80

Figura 45: Calibración del móvil. .... 80

Figura 46: Calibración del móvil. .... 81

Figura 47: Procedimiento para tomar datos. .... 81

Figura 48: Procedimiento para tomar datos. .... 81

Figura 49: Toma de datos. .... 82

Figura 50: Subir datos..... 82

Figura 51: Subir datos..... 82

Figura 52: Descarga de datos..... 83

Figura 53: Descarga de datos..... 83



Figura 54: Descarga de datos ..... 84

Figura 55: Visualización del estado de la carretera..... 84

Figura 56: Visualización de resultados del eIRI. .... 85

Figura 57: Visualización de las fotos de la carretera tomada por el Roadroid. 85

Figura 58: Proceso de calibración ..... 86

Figura 59: Colocación de la pastilla de calibración. .... 87

Figura 60: Operando el Rugosímetro de MERLIN. .... 87

Figura 61: Equipo de apoyo para toma de datos con el Rugosímetro de MERLIN.  
..... 87

Figura 62: Pastilla de calibración ..... 88

Figura 63: Izquierda, toma de datos con el Rugosímetro de MERLIN. .... 88

Figura 64: Llevando a cabo el aforo vehicular..... 90

Figura 65: Trayler 3T2 circulando por la carretera en estudio..... 90

Figura 66: Trayler 3T3 circulando por la carretera en estudio..... 90

Figura 67: Gráfico de dispersión del eIRI vs Distancia recorrida..... 94

Figura 68: Vista de la carretera en estudio. .... 95

Figura 69: Parches en la carretera..... 96

Figura 70: Histograma de frecuencias ..... 99

Figura 71: Interpretación de la correlación de Pearson..... 104

Figura 72: Comparación de resultados obtenidos con la aplicación Roadroid y el  
Rugosímetro de MERLIN. .... 106

Figura 73: Gráfico de dispersión ..... 107

Figura 74: Porcentaje por tipo de vehículo..... 117



## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Identificación del Problema

#### 1.1.1. Descripción del Problema

Dada la gran importancia de las obras viales en el mundo ha sido necesario establecer indicadores de la calidad del pavimento, ya que la calidad del pavimento puede ser entendida como la capacidad estructural del pavimento para soportar las cargas que sobre él actúan, pero también se puede entender como la comodidad que siente el usuario al transitar con su vehículo sobre él, frente a esta situación el Banco Mundial encargó a varios investigadores entre ellos Sayers, Gillespie y Paterson a desarrollar la publicación técnica N°45 y N°46, donde se presenta al IRI (índice de rugosidad internacional) como un parámetro usado para medir las irregularidades en el rodado en una carretera que indica el estado del pavimento. Y para medir este parámetro en la actualidad existen muchos equipos, pero la más nueva e innovadora es una aplicación para teléfonos inteligentes denominado Roadroid, que facilita el cálculo de la regularidad superficial de pavimentos, debido a esto; es que surge la incertidumbre de conocer que tan confiables son los resultados proporcionados por este nuevo equipo, por tal motivo es que; en la presente investigación se plantea determinar y comparar los resultados obtenidos de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación denominada Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN, siendo este último según el Banco Mundial clasificado dentro de los equipos de mayor precisión sólo superado por el nivel y mira.

Por consiguiente, se determinará la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; con una longitud total de 31.20km, tramo que pertenece a la carretera Longitudinal de la Sierra Sur PE – 3S, de la Red Vial Nacional, y por ser uno de los accesos más importantes a la Ciudad del Cusco. De tal forma, dándose a conocer el estado real en el que se encuentra dicha carretera que actualmente está concesionada a la empresa Survial S.A. para su mantenimiento, conservación y explotación.





### **1.1.2. Formulación Interrogativa del Problema**

#### **1.1.2.1. Formulación Interrogativa del Problema General**

¿Cuál es el porcentaje de similitud de los resultados de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid con respecto al Rugosímetro de MERLIN y cuáles son las ventajas de usar la aplicación Roadroid frente al Rugosímetro de MERLIN?

#### **1.1.2.2. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos**

- a) ¿Cuál es la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid?
- b) ¿Cuál es la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el Rugosímetro de MERLIN?
- c) ¿Cuál es la diferencia de los resultados de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, usando la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN?
- d) ¿Cuál es la serviciabilidad del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el eIRI?
- e) ¿Cuál es la serviciabilidad del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el IRI del Rugosímetro de MERLIN?
- f) ¿Cómo varía la regularidad superficial de ambos carriles de la carretera Cusco – Urcos?

### **1.2. Justificación e Importancia de la Investigación**

#### **1.2.1. Justificación Técnica**

Esta investigación se encuentra dentro del contexto de la Ingeniería Civil de la especialidad de Transportes, donde la determinación de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco - Urcos y la comparación de los



resultados obtenidos con los dos equipos: la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN, son de importancia para la Ingeniería Civil; pues la determinación del IRI es un requisito obligatorio de la calidad del pavimento así como lo señala la normativa peruana, además indica cuándo y dónde debe ser intervenido una vía para su mantenimiento o rehabilitación como se estipula en los contratos de concesión vial; asimismo es un parámetro que debe ser estudiado y manejado por todos los ingenieros de carreteras, porque su desconocimiento genera que más carreteras sean construidas sin cuidar la regularidad superficial trayendo como consecuencia el deterioro acelerado del pavimento que puede desencadenar en una serie de problemas que afectarían al pavimento; además permitirá que más ingenieros de transportes puedan optar como una opción el uso de la aplicación Roadroid y de tal manera hacer más eficiente la determinación del IRI y por ende conocer la serviciabilidad del pavimento.

### 1.2.2. Justificación Social

En la medida que los resultados de esta investigación estén a la disposición de la sociedad los primeros beneficiados serán los estudiantes de Ingeniería Civil; debido a que tendrán a disposición este material para próximas ideas de investigación y como material de consulta, asimismo para los ingenieros civiles que tendrán un material de consulta de procedimientos en la evaluación de la calidad del pavimento. También se beneficiará a la sociedad con esta investigación, porque permitirá conocer el estado de las carreteras de manera más eficiente y los usuarios podrán transitar con mayor comodidad y confort.

### 1.2.3. Justificación por Viabilidad

Para llevar a cabo esta investigación se cuenta con el tiempo suficiente hasta su culminación, con los recursos económicos necesarios, también se cuenta con todos los equipos y herramientas que se requieren, asimismo se cuenta con la Normativa Peruana vigente como son el Manual de “**Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos**”, el Manual de “**Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013**” y el “**Manual de mantenimiento o Conservación vial**”; que forman parte de los Manuales de Carreteras.



#### **1.2.4. Justificación por Relevancia**

Existe mucho desconocimiento a cerca de este tema, a pesar de que la regularidad superficial es admitida en las normas peruanas, las entidades estatales de transporte, los consultores privados y hasta los profesionales de la obra desconocen la aplicación de la regularidad superficial como un indicador de la calidad del pavimento y además con este indicador se puede medir en forma precisa, cómo afecta a los conductores y a los costos de operación de los vehículos.

Con esta investigación los ingenieros de transportes encargados del mantenimiento y construcción de carreteras tendrán una herramienta a la hora de conocer el estado de una carretera, ya que al usar la aplicación Roadroid conocer el estado de las mismas será mucho más fácil, rápido y económico.

#### **1.3. Limitaciones de la Investigación**

La presente investigación abarca la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco - Urcos desde el Km: 984 hasta el Km: 1015+200 con una longitud total de 31.20 km, llevándose a cabo entre los meses de septiembre y octubre de 2016. Para tal efecto se usaron dos equipos de medición como son la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN.

Esta investigación incluye aspectos relacionados con el concepto y normas pertinentes al tema de la regularidad superficial de pavimentos, índice de regularidad internacional (IRI), escalas de medición, equipos para medición entre ellos la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN, la serviciabilidad de los pavimentos, también se explica el uso del software y las ventajas de la aplicación Roadroid con respecto al Rugosímetro de MERLIN. De igual forma la toma de datos con la aplicación Roadroid se realizó con un vehículo pequeño marca Kia modelo Picanto con año de fabricación de 2015, además se utilizó un celular Samsung Galaxy S6 con su respectivo sujetador y la versión Roadroid 1.7.5, también en el análisis de datos de los resultados obtenidos con la aplicación Roadroid se realiza sin singularidades y finalmente la toma de datos con la aplicación Roadroid se realizó a una velocidad mayor a 60km/h.



## **1.4. Objetivos de la Investigación**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar y comparar los resultados de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN, asimismo analizar las ventajas de usar la aplicación Roadroid frente al Rugosímetro de MERLIN.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- a) Determinar la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid.
- b) Determinar la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el Rugosímetro de MERLIN
- c) Analizar la diferencia de los resultados obtenidos de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, usando la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN.
- d) Determinar la serviciabilidad del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el eIRI.
- e) Determinar la serviciabilidad del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, usando el IRI del Rugosímetro de MERLIN.
- f) Comparar la regularidad superficial de ambos carriles de la carretera Cusco - Urcos.

## **1.5. Hipótesis**

### **1.5.1. Hipótesis General**

El porcentaje de similitud de los resultados de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid con respecto al Rugosímetro de MERLIN es de 90%, siendo el



rendimiento y el costo las ventajas más importantes de la aplicación Roadroid frente al Rugosímetro de MERLIN.

### 1.5.2. Sub-Hipótesis

- a) La regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid, indica que el pavimento es antiguo y con imperfecciones superficiales.
- b) La regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el Rugosímetro de MERLIN; indica que el pavimento es antiguo y con imperfecciones superficiales.
- c) La diferencia entre los resultados obtenidos de la medición de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN es de 10%.
- d) La serviciabilidad del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el eIRI presenta una transitabilidad regular.
- e) La serviciabilidad del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; usando el IRI presenta una transitabilidad regular.
- f) La regularidad superficial de los dos carriles de la carretera Cusco – Urcos; son iguales.

## 1.6. Definición de Variables

### 1.6.1. Variables Independientes

✓ **Regularidad superficial**

Es la desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad de manejo.



✓ **Ventajas**

Es una condición favorable, superioridad o mejoría que algo tiene sobre otra cosa.

**1.6.2. Variables Dependientes**

✓ **Serviciabilidad del pavimento**

Es la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado.

**1.6.3. Cuadro de Operacionalización de Variables**

Tabla 1: Cuadro de Operacionalización de variables

"DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CUSCO-URCOS, USANDO TELÉFONOS INTELIGENTES Y EL RUGOSÍMETRO DE MERLIN - 2016"							
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES							
TIPO DE VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN	NIVEL	INDICADOR	UNIDAD	INSTRUMENTO METODOLÓGICO	INSTRUMENTO DE INGENIERÍA
INDEPENDIENTES	Regularidad superficial	Es la desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad de manejo.	0 -1: Muy buena	IRI	m/km	Guías de Observación y Formatos de campo	Smartphone y Rugosímetro de MERLIN
			1 - 1.9: Buena	IRI	m/km	Guías de Observación y Formatos de campo	Smartphone y Rugosímetro de MERLIN
			1.9 - 3.6: Regular	IRI	m/km	Guías de Observación y Formatos de campo	Smartphone y Rugosímetro de MERLIN
			3.6 - 6.4: Mala	IRI	m/km	Guías de Observación y Formatos de campo	Smartphone y Rugosímetro de MERLIN
			> 6.4: Muy mala	IRI	m/km	Guías de Observación y Formatos de campo	Smartphone y Rugosímetro de MERLIN
	Ventajas	Es una condición favorable, superioridad o mejoría que algo tiene sobre otra cosa.		Rendimiento	km/h	Guías de Observación	
				Costo	Soles	Guías de Observación	
DEPENDIENTES	Serviciabilidad del pavimento	Es la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado.	0-1: Muy mala	PSI		Guías de Observación	Aplicación del Método Sayers
			1-2: Mala	PSI		Guías de Observación	Aplicación del Método Sayers
			2-3: Regular	PSI		Guías de Observación	Aplicación del Método Sayers
			3-4: Buena	PSI		Guías de Observación	Aplicación del Método Sayers
			4-5: Muy buena	PSI		Guías de Observación	Aplicación del Método Sayers

Fuente: Propia



## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la Tesis

#### 2.1.1. Antecedentes a Nivel Nacional

**“Aplicación de teléfonos inteligentes para determinar la rugosidad de pavimentos urbanos en Lima”**, realizado por Carlos Ignacio Almenara Cueto, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la ciudad de Lima, en el 2015.

En la presente tesis se evaluó la rugosidad de la vía expresa en Lima utilizando la aplicación Roadroid, donde se analizó si la variación de la velocidad al momento del muestreo afecta los resultados obtenidos del IRI.

En esta tesis se ha concluido que el Roadroid se presenta como una alternativa muy favorable para la gestión vial, pues permite llevar un control de variación de la rugosidad en el tiempo que podrá ayudar a la toma de decisiones de cuándo y dónde intervenir una vía. Por otro lado se concluyó que las velocidades mayores a 60km/h son recomendables para realizar los ensayos ya que a esta velocidad los datos obtenidos se acercan más al IRI real de la carretera.

**“Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú”**, ejecutado por el Ingeniero José Montoya Goicochea, de la Universidad de Piura, en la ciudad de Lima en el 2013.

La presente tesis de Maestría resume el análisis del IRI en un proyecto, a partir del cual se propone un mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad establecida en los contratos de las concesiones viales. Para tal objetivo, se planteó como estrategia, relacionar el IRI de diseño de la vía con los datos geométricos de la misma.

Llegando a la conclusión de que el conocer la verdadera relación entre los valores de IRI de diseño y la geometría de la vía, nos ayudará a mejorar la lógica en el establecimiento de las exigencias técnicas en los términos de referencia de futuras concesiones viales y expedientes técnicos para caminos nuevos pavimentados.





### 2.1.2. Antecedentes a Nivel Internacional

“**Pavement performance measures using Android based smartphone application**”, realizado por Mohammed Junaid Uddin, de la Universidad de Osmania de la India en el 2015.

El objetivo de la tesis de Maestría es medir la rugosidad del pavimento en la ciudad de Hyderabad, una ciudad de la India, utilizando la tecnología del teléfono inteligente basado en un Android, donde indica que la rugosidad es un importante indicador de la condición del pavimento, los cuales deben ser considerados cuidadosamente al evaluar pavimentos nuevos; puesto que al realizar ensayos con velocidades por debajo de los 20km/h los datos que proporciona el teléfono inteligente basado en un Android ya no son confiables. Llegando a la conclusión de que la longitud para hallar el IRI promedio debe ser cada 100m, además concluyó que manejar el vehículo a una velocidad constante de 50 km/h es adecuada para la obtención del IRI.

## 2.2. Bases Teóricas – Científicos

### 2.2.1. Reseña

La ingeniería de carreteras se ha dedicado durante décadas a garantizar que la estructura del pavimento, quedara capacitada para asumir las cargas del tránsito solicitante. Así, se dio preferencia a las metodologías para determinar la capacidad de la sub-rasante y los materiales usados. Este modelo ha permitido formar generaciones de ingenieros con el concepto de que prevalece el aspecto de resistencia sobre los criterios de regularidad superficial de los pavimentos. Durante mucho tiempo, se dejó a un lado cualquier intento de mejorar los aspectos de la regularidad superficial, con lo que pasaron desapercibidos grandes problemas que pudieron haber sido minimizados en los procesos constructivos iniciales de los proyectos.

Debido a lo anterior; ahora se cuenta con un gran número de carreteras, que aun recién construidas o recién rehabilitadas, están muy lejos de cumplir los criterios que regulan la calidad de la superficie de las estructuras de pavimento asfáltico y de concreto.



La concientización sobre la necesidad de mejorar la geometría de las superficies del pavimento y hacer que esta situación se mantenga en el tiempo de uso de la carretera, es tan reciente, que aún no se exige en todos los proyectos.

Pero el poco conocimiento del tema, tampoco permite que los ingenieros se preparen en el asunto y no se logra aún, que las empresas adopten los equipos tradicionales y los procedimientos de construcción a esta exigencia, que dicho de una vez, no es de fácil cumplimiento. Por lo tanto, ni la formación de los técnicos, ni los equipos de producción de mezclas y de colocación de las mismas, ni las especificaciones vigentes, están actualmente adecuadas para la mejora de esta característica fundamental en el desarrollo vial. (Martínez Naranjo & Tobón García, 2012).

## **2.2.2. Carretera**

### **2.2.2.1. Definición**

Se define como un camino para el tránsito de vehículos motorizados, de por lo menos dos ejes, con características geométricas definidas de acuerdo a las normas técnicas vigentes en el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (MTC, 2008).

### **2.2.2.2. Clasificación por su demanda**

El MTC, clasifica a las carreteras del Perú, en función a la demanda en:

#### **Autopistas de Primera Clase**

Son carreteras con IMDA (Índice Medio Diario Anual) mayor a 6.000 veh/día, de calzadas divididas por medio de un separador central mínimo de 6,00 m; cada una de las calzadas debe contar con dos o más carriles de 3,60 m de ancho como mínimo, con control total de accesos (ingresos y salidas) que proporcionan flujos vehiculares continuos, sin cruces o pasos a nivel y con puentes peatonales en zonas urbanas.

La superficie de rodadura de estas carreteras debe ser pavimentada.

**Autopistas de Segunda Clase**

Son carreteras con un IMDA entre 6.000 y 4.001 veh/día, de calzadas divididas por medio de un separador central que puede variar de 6,00 m hasta 1,00 m, en cuyo caso se instalará un sistema de contención vehicular; cada una de las calzadas debe contar con dos o más carriles de 3,60 m de ancho como mínimo, con control parcial de accesos (ingresos y salidas) que proporcionan flujos vehiculares continuos; pueden tener cruces o pasos vehiculares a nivel y puentes peatonales en zonas urbanas.

La superficie de rodadura de estas carreteras debe ser pavimentada.

**Carreteras de Primera Clase**

Son carreteras con un IMDA entre 4.000 y 2.001 veh/día, con una calzada de dos carriles de 3,60 m de ancho como mínimo. Puede tener cruces o pasos vehiculares a nivel y en zonas urbanas es recomendable que se cuente con puentes peatonales o en su defecto con dispositivos de seguridad vial, que permitan velocidades de operación, con mayor seguridad.

La superficie de rodadura de estas carreteras debe ser pavimentada.

**Carreteras de Segunda Clase**

Son carreteras con IMDA entre 2.000 y 400 veh/día, con una calzada de dos carriles de 3,30 m de ancho como mínimo. Puede tener cruces o pasos vehiculares a nivel y en zonas urbanas es recomendable que se cuente con puentes peatonales o en su defecto con dispositivos de seguridad vial, que permitan velocidades de operación, con mayor seguridad.

La superficie de rodadura de estas carreteras debe ser pavimentada.

**Carreteras de Tercera Clase**

Son carreteras con IMDA menores a 400 veh/día, con calzada de dos carriles de 3,00 m de ancho como mínimo. De manera excepcional estas vías podrán tener carriles hasta de 2,50 m, contando con el sustento técnico correspondiente.

Estas carreteras pueden funcionar con soluciones denominadas básicas o económicas, consistentes en la aplicación de estabilizadores de suelos, emulsiones asfálticas y/o micro pavimentos; o en afirmado, en la superficie de rodadura. En caso de ser pavimentadas deberán cumplirse con las condiciones geométricas estipuladas para las carreteras de segunda clase.

### Trochas Carrozables

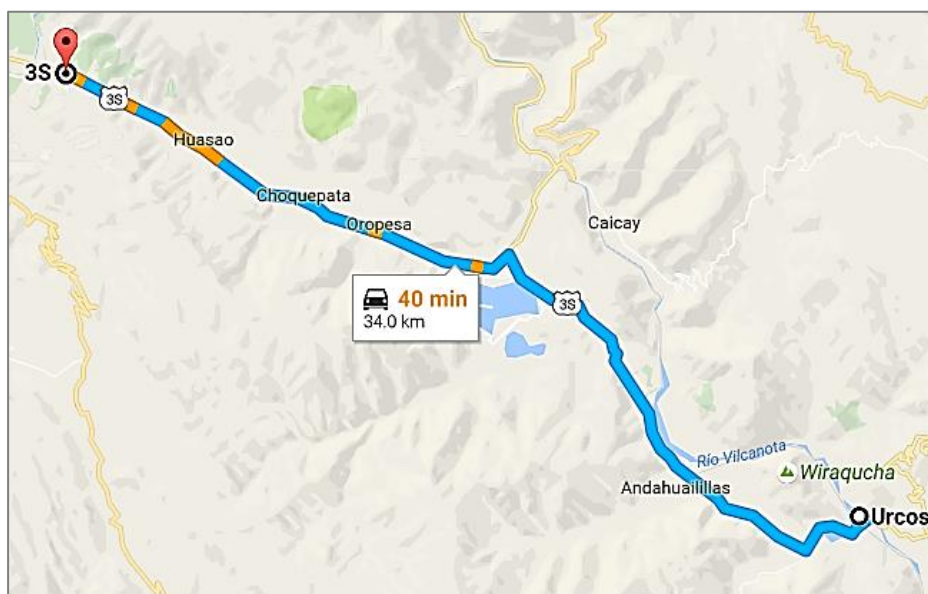
Son vías transitables, que no alcanzan las características geométricas de una carretera, que por lo general tienen un IMDA menor a 200 veh/día. Sus calzadas deben tener un ancho mínimo de 4,00 m, en cuyo caso se construirá ensanches denominados plazoletas de cruce, por lo menos cada 500 m.

La superficie de rodadura puede ser afirmada o sin afirmar. (MTC, 2013).

### 2.2.3. Carretera en estudio

La carretera en estudio para esta investigación es el tramo Cusco - Urcos que pertenece a la carretera Longitudinal de la Sierra Sur PE-3S de la Red Vial Nacional.

Figura 1: Tramo en estudio



Fuente: Google Maps

Este tramo se encuentra comprendido entre los kilómetros 984 y 1015+200.

Figura 2: Hito kilométrico 984, inicio de la carretera en estudio.



Fuente: Propia

Figura 3: Hito kilométrico 1015+200, final de la carretera en estudio.



Fuente: Propia

Este tramo abarca las provincias de Quispicanchi y Cusco que pertenecen a la Región Cusco, y está conformada por dos vías (vía de subida y bajada), cada vía conformada por un carril.

Según CESEL S.A., las características de la carretera en estudio son:

- ✓ Ancho de calzada asfaltada: 6.60m
- ✓ Bermas asfaltadas: 0.45 a 1.20m
- ✓ Carpeta asfáltica en caliente: 7.5 y 12.5cm
- ✓ Altitud: 3300 msnm.
- ✓ Ubicación: Departamento del Cusco, Perú.

El 27 de agosto de 2007 el Consorcio Interoceánico Tramo 1, conformado por las empresas Graña y Montero S.A.A., JJC Contratistas Generales S.A. e Ingenieros Civiles y Contratistas Generales S.A., resultó ganador de la Buena Pro del Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de las Obras y el Mantenimiento del Tramo Vial 1 del Proyecto Corredor Vial Interoceánico Sur, Perú – Brasil. Posteriormente, el 23 de octubre se firmó el Contrato de Concesión para la Construcción, Conservación y Explotación del Tramo I.

La Concesión, que pertenece en su totalidad a Graña y Montero, tiene una longitud de 757.64 kilómetros, atraviesa los departamentos de Ica, Ayacucho, Apurímac y Cusco. Se inicia en el puerto San Juan de Marcona, continúa hasta Nazca, en el Departamento de Ica, atraviesa el Distrito de Puquio en el Departamento de Ayacucho, Chalhuanca y Abancay en el Departamento de Apurímac y, finalmente, el Cusco, terminando la Concesión en el Distrito de Urcos de este departamento. (Survial, 2016).

#### **2.2.4. Pavimento**

##### **2.2.4.1. Definición**

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la sub-rasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

##### **2.2.4.2. Características que debe reunir un pavimento**

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- ♦ Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- ♦ Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- ♦ Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva

influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

- ◆ Debe presentar una regularidad superficial, que permita una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- ◆ Debe ser durable.
- ◆ Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- ◆ Debe ser económico.
- ◆ Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

### 2.2.4.3. Clasificación de los pavimentos

Los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados.

#### a) Pavimentos flexibles

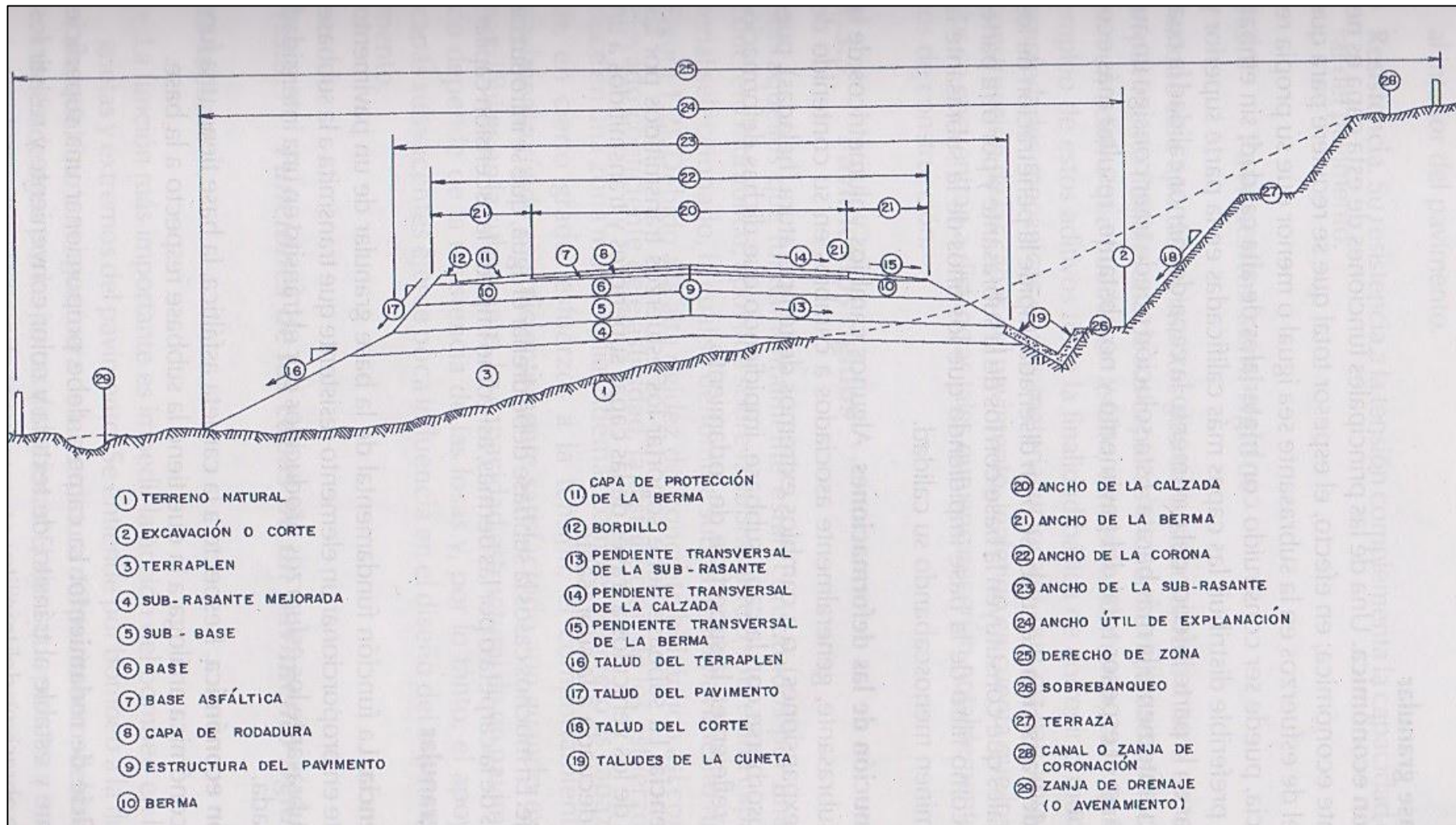
Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base. No obstante puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra. (Montejo Fonseca, 2008).

Figura 4: Pavimento flexible del tramo en estudio



Fuente: Propia

Figura 5: Sección típica de un pavimento.



Fuente: Montejo Fonseca, 2008.



## Funciones de las capas de un pavimento flexible

### La sub-base granular

- ✓ **Función económica.** Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y no obstante, resultar más económica.
- ✓ **Capa de transición.** La sub base bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.
- ✓ **Disminución de las deformaciones.** Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.
- ✓ **Resistencia.** La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitirlos a un nivel adecuado a la subrasante.
- ✓ **Drenaje.** En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

### La base granular

- ✓ **Resistencia.** La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.



- ✓ **Función económica.** Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base.

### **Carpeta**

- ✓ **Superficie de rodamiento.** La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- ✓ **Impermeabilidad.** Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- ✓ **Resistencia.** Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

### **b) Pavimentos rígidos**

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina sub-base del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante.

### **c) Pavimentos articulados**

Los pavimentos articulados están compuestos por una capa de rodadura que está elaborada con bloques de concreto prefabricados, llamados adoquines, de espesor uniforme e iguales entre sí. Esta puede ir sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad de ésta y de la magnitud y frecuencia de las cargas que circularan por dicho pavimento. (Montejo Fonseca, 2008).

### 2.2.5. Revisión de la normativa peruana

El Manual de “**Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos**” en su Sección Suelos y Pavimentos, que forma parte de los **Manuales de Carreteras** establecidos por el Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial aprobado por D.S. N° 034-2008-MTC, en el **Capítulo XII. Pavimentos flexibles**, en el subcapítulo 12.1.1 y en el acápite f. Se indica lo siguiente.

#### Serviciabilidad Final o Terminal (PT)

La Serviciosabilidad Terminal (Pt) es la condición de una vía que ha alcanzado la necesidad de algún tipo de rehabilitación o reconstrucción.

Tabla 2: Índice de serviciosabilidad final (Pt). Según rango de tráfico.

TIPO DE CAMINOS	TRAFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		INDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (PT)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP1	150,001	300,000	2.00
	TP2	300,001	500,000	2.00
	TP3	500,001	750,000	2.00
	TP4	750,001	1,000,000	2.00
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	2.50
	TP6	1,500,001	3,000,000	2.50
	TP7	3,000,001	5,000,000	2.50
	TP8	5,000,001	7,500,000	2.50
	TP9	7,500,001	10'000,000	2.50
	TP10	10'000,001	12'500,000	2.50
	TP11	12'500,001	15'000,000	2.50
	TP12	15'000,001	20'000,000	3.00
	TP13	20'000,001	25'000,000	3.00
	TP14	25'000,001	30'000,000	3.00
	TP15		>30'000,000	3.00

Fuente: Manual de “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, 2013.

También, en el acápite 12.4.5 **Serviciabilidad – Regularidad Superficial**, se señala lo siguiente:

El Present **Serviciability Index** o la **serviciabilidad** fue definida como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado. Los pavimentos fueron calificados con notas cuyos valores extremos variaban desde 0, para un camino intransitable, hasta 5 para una superficie en perfectas condiciones (situación ideal).

Tabla 3: Escala de índice de serviciabilidad.

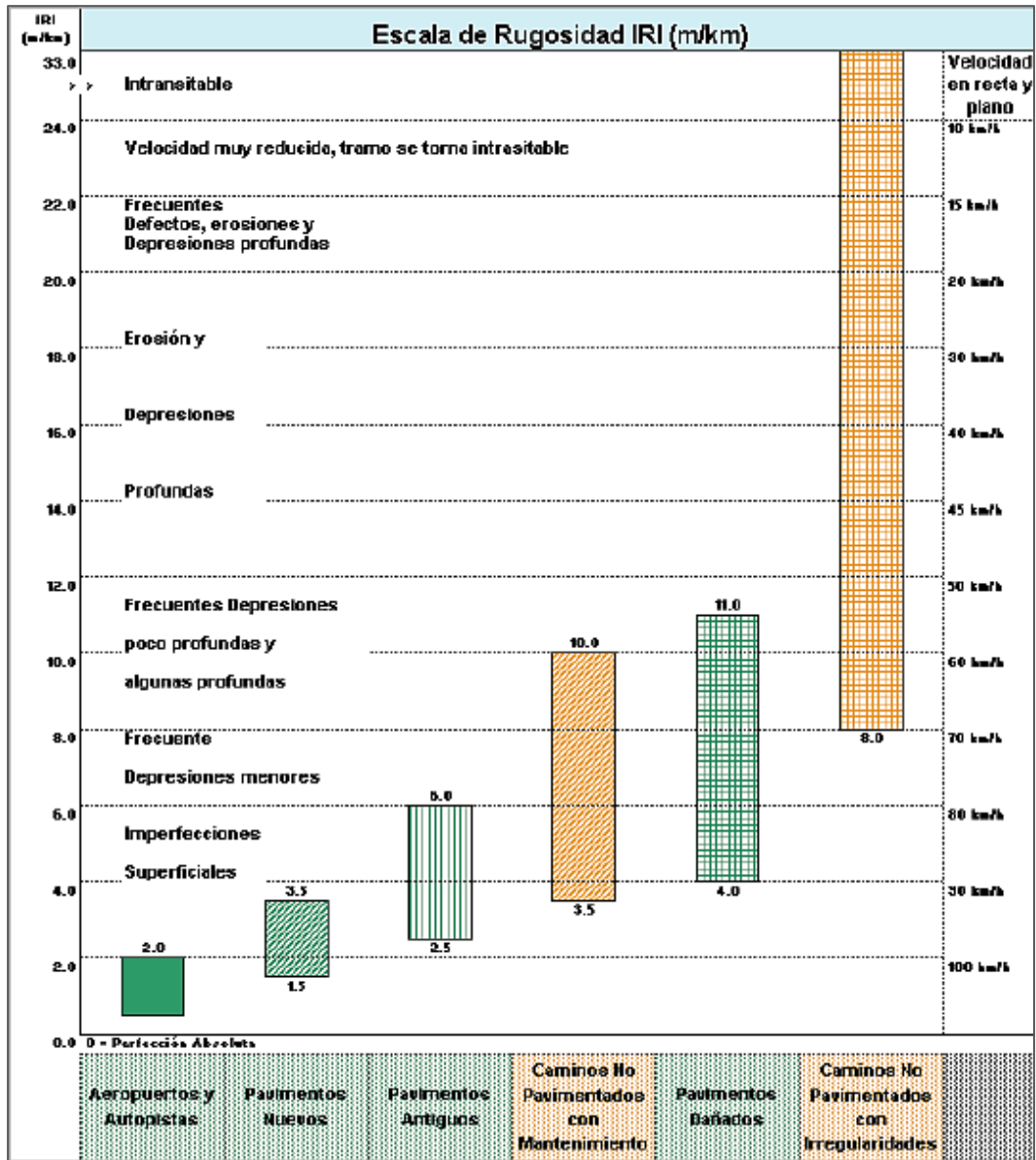
<b>Índice de Serviciabilidad</b>	<b>Calidad</b>
5	
4	<b>Muy Buena</b>
3	<b>Buena</b>
2	<b>Regular</b>
1	<b>Mala</b>
0	<b>Pésima</b>

Fuente: Guía AASHTO

Los estudios del banco mundial permiten determinar la rugosidad tanto con equipos debidamente calibrados, como a partir de evaluaciones visuales que relacionan el tipo y estado general del pavimento con la velocidad de operación de los vehículos.

A continuación se presenta un gráfico (traducido y adaptado de “Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements”, Sayers M.W., Gillespie T.D., Paterson W.D; World Bank Technical Paper Number No 46, 1986), donde se muestra escalas de rugosidad para distintos tipos de pavimento y condición. (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2013).

Figura 6: Escala de rugosidad IRI (m/km)



Fuente: Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos, 2013.

Para la rugosidad inicial de un pavimento nuevo y de un pavimento existente reforzado, asimismo para la rugosidad durante el periodo de servicio, se recomienda los siguientes valores:

Tabla 4: Rugosidad inicial IRI (m/km).  
Según tipo de carretera con carpeta asfáltica en caliente.

Tipo de Carretera	Rugosidad Característica Inicial Pavimento Nuevo IRI (m/km)	Rugosidad Característica Inicial Pavimento Reforzado IRI (m/km)	Rugosidad Característica 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	Rugosidad característica, para una 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	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA $\leq$ 200 veh/día, de una calzada.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 85%

Fuente: Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos, 2003.

De igual forma, en el Manual de “**Especificaciones Técnicas Generales para Construcción**”, en la sección 418. **Tratamientos superficiales**, en la subsección 418.15 (c) (3), se señala que el promedio por km tiene un valor de IRI igual o inferior a 2,5 m/km.

De la misma manera; en la sección 423. **Pavimento de concreto asfáltico en caliente**, en la subsección 423.18 (g) (5), indica que la rugosidad, en términos IRI, tendrá un valor máximo de 2,0 m/km.

Asimismo, en la sección 438. **Pavimento de concreto hidráulico**, en la subsección 438.26 (d) (4), se señala que la rugosidad superficial medida en unidades IRI no podrá ser mayor de 3,0 m/km. (MTC, 2013).

Por último, en el “**Manual de Mantenimiento o Conservación Vial**”, en el **Capítulo 3: Niveles de Servicio**, en el apéndice 3.b Niveles de servicio para calzada de concreto asfáltico. (MTC, 2013).

Tabla 5: Parámetros globales para contratos por niveles de servicio.

		Nivel de Servicio				
		Tipo de Vía				
		Autopista 1ª clase	Autopista 2ª clase	Carretera 1ª clase	Segunda Clase	Tercera Clase
Parámetro	Medida	IMD > 6000	4001 ≤ IMD ≤ 6000	2001 ≤ IMD ≤ 4000	400 ≤ IMD ≤ 2000	IMD < 400
Piel de Cocodrilo	Porcentaje máximo de área con piel de cocodrilo	0%	0%	0%	0%	0%
Fisuras Longitudinales	Porcentaje máximo de área con fisuras mayores a 3 mm de grosor	0%	0%	0%	0%	0%
	Porcentaje máximo de área con fisuras entre 1 y 3 mm de grosor	3%	3%	3%	5%	5%
Deformación por deficiencia estructural	Porcentaje máximo de área con hundimientos mayores que 25 mm.	0%	0%	0%	0%	0%
Ahuellamiento	Porcentaje máximo de área con ahuellamiento mayor que 12 mm.	0%	0%	0%	0%	5%
Reparaciones o parchados	Porcentaje máximo de parches en mal estado	0%	0%	0%	0%	0%
Peladuras y Desprendimientos	Porcentaje máximo de áreas con peladuras	0%	0%	5%	5%	5%
	Porcentaje máximo de áreas con desprendimiento	0%	0%	0%	0%	0%
Baches (Huecos )	Porcentaje máximo de área con Baches (huecos)	0%	0%	0%	0%	0%
Fisuras Transversales	Porcentaje máximo de área con fisuras mayores a 3 mm de grosor	0%	0%	0%	0%	0%
	Porcentaje máximo de área con fisuras entre 1 y 3 mm de grosor	2%	2%	2%	5%	5%
Desprendimiento de bordes	Porcentaje máximo de longitud con desprendimiento de bordes	0%	0%	0%	0%	5%
Rugosidad Obra Nueva	Rugosidad característica del tramo (nuevo)	2.0 IRI <sub>c</sub> (1)	2.0 IRI <sub>c</sub> (1)	2.2 IRI <sub>c</sub> (2)	2.4 IRI <sub>c</sub> (3)	2.8 IRI <sub>c</sub> (5)
Rugosidad Obra con Recapa Asfáltica	Rugosidad característica del tramo (con Recapa Asfáltica)	2.5 IRI <sub>c</sub> (1)	2.5 IRI <sub>c</sub> (1)	2.7 IRI <sub>c</sub> (2)	2.9 IRI <sub>c</sub> (3)	3.3 IRI <sub>c</sub> (5)
Rugosidad Periodo de Servicio	Rugosidad característica del tramo (Periodo de Servicio)	3.3 IRI <sub>c</sub> (1)	3.3 IRI <sub>c</sub> (1)	3.5 IRI <sub>c</sub> (2)	3.7 IRI <sub>c</sub> (3)	4.1 IRI <sub>c</sub> (5)
Fricción Superficial	Coefficiente de Fricción medido en pavimento mejorado	No menor de 0.55	No menor de 0.55	No menor de 0.55	No menor de 0.50	No menor de 0.50
(1) IRI característico (IRI <sub>c</sub> ) a la confiabilidad de 95%. IRI <sub>c</sub> = IRI <sub>p</sub> + 1,645 x ds (2) IRI característico (IRI <sub>c</sub> ) a la confiabilidad de 90%. IRI <sub>c</sub> = IRI <sub>p</sub> + 1,282 x ds (3) IRI característico (IRI <sub>c</sub> ) a la confiabilidad de 85%. IRI <sub>c</sub> = IRI <sub>p</sub> + 1,036 x ds (4) IRI característico (IRI <sub>c</sub> ) a la confiabilidad de 80%. IRI <sub>c</sub> = IRI <sub>p</sub> + 0,842 x ds (5) IRI característico (IRI <sub>c</sub> ) a la confiabilidad de 75%. IRI <sub>c</sub> = IRI <sub>p</sub> + 0,674 x ds IRI <sub>p</sub> = IRI promedio ds = desviación estándar						

Fuente: Manual de Mantenimiento o Conservación Vial, 2013.



## 2.2.6. Regularidad superficial del pavimento

### 2.2.6.1. Definición

Se define la rugosidad como 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.” (ASTM E867-06, 2012).

Algunos autores prefieren utilizar el término Regularidad, puesto que este concepto se asocia más fácilmente a la definición de Roughness, que el término Rugosidad. De esta manera, puede encontrarse bibliografía que trata indistintamente los conceptos de Regularidad y Rugosidad; sin embargo, para efectos de la presente investigación se prefiere utilizar Regularidad, para referirse a las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad del rodado, seguridad y costos de operación del vehículo.

### 2.2.6.2. Importancia

Una buena regularidad de la superficie de los pavimentos ofrece condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras. Una mala regularidad superficial tiene incidencia en los costos de operación de los vehículos, puesto que, dependiendo de la magnitud de las irregularidades superficiales, la velocidad de circulación también puede verse afectada negativamente, lo cual puede reflejarse por un mayor desgaste en las llantas y el consumo de combustible.

Adicionalmente, los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

Por estas razones, conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente. (Badilla Vargas, Gustavo, 2009).



## 2.2.7. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

### 2.2.7.1. Definición

El IRI se define como la acumulación del movimiento vertical que sufre la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando este recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h. En este sentido, es un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que percibe el usuario. (Caro Rivera, Fernando; Peña Castro, Germán A., 2012).

El Índice Internacional de Rugosidad, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino.

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo (cuarto de carro, Figura 7), dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km. o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/h.

Así, el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino.

### 2.2.7.2. Antecedentes

EL Banco Mundial patrocinó varios programas de investigación en los años setentas para conocer los problemas en los países en vías de desarrollo. Algunos de ellos arrojaron que los caminos con poca inversión en infraestructura resultan costosos a estos países, debido a los costos que los usuarios pagan al circular por esos caminos. La rugosidad de las carreteras fue identificada como un factor primario en los análisis que involucran la calidad del camino, en función de los costos de los usuarios. Se vio que los datos de la rugosidad de las diferentes partes del mundo no podían ser comparados, debido a que los datos, aun de un mismo país, eran poco confiables, ya que las mediciones estaban basadas en métodos diferentes.

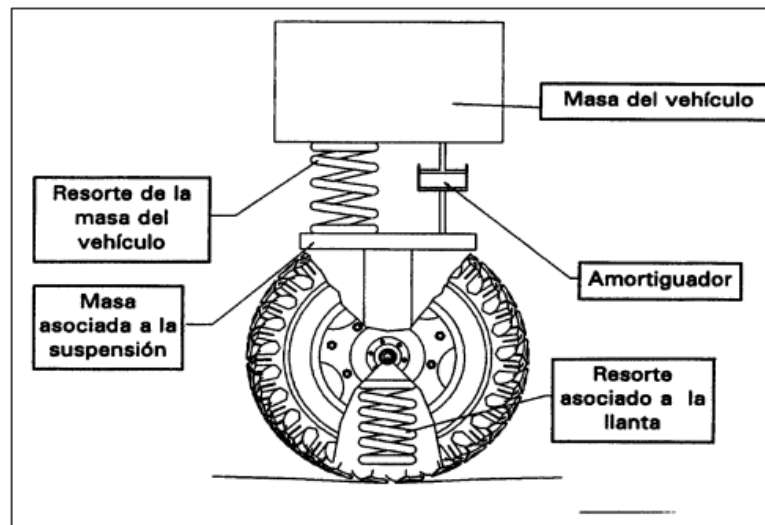


La gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial y los numerosos índices y escalas existentes para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de adoptar un "índice único". Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un solo equipo a todos y tampoco se podía coartar las futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevos equipos. En 1982, el Banco Mundial inició un experimento en Brasil para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables. Una vez establecido este punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar un índice de referencia al que posteriormente se denominó "Índice Internacional de Rugosidad". EL Índice Internacional de Rugosidad es el primer índice de perfil ampliamente utilizado, donde el método de análisis está adaptado para trabajar con diferentes tipos de equipos de medición de rugosidad y se puede decir que es una propiedad del perfil de un camino. El cálculo del Índice Internacional de Rugosidad se basa en un modelo matemático llamado Cuarto de Carro (Quarter-Car). El sistema del Cuarto de Carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero. Los desplazamientos de la suspensión del modelo son acumulados y divididos entre la distancia recorrida para dar el Índice Internacional de Rugosidad, en unidades de m/km., mm/m, in/mi, etc.

### **2.2.7.3. Características del modelo**

El modelo de Cuarto de Carro utilizado en el algoritmo del IRI debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la Figura 7; que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda. (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

Figura 7: Representación gráfica del modelo de “cuarto de carro”



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 1998.

EL modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta.

#### 2.2.7.4. Escala y características del IRI

La escala y características involucradas en el IRI son las siguientes:

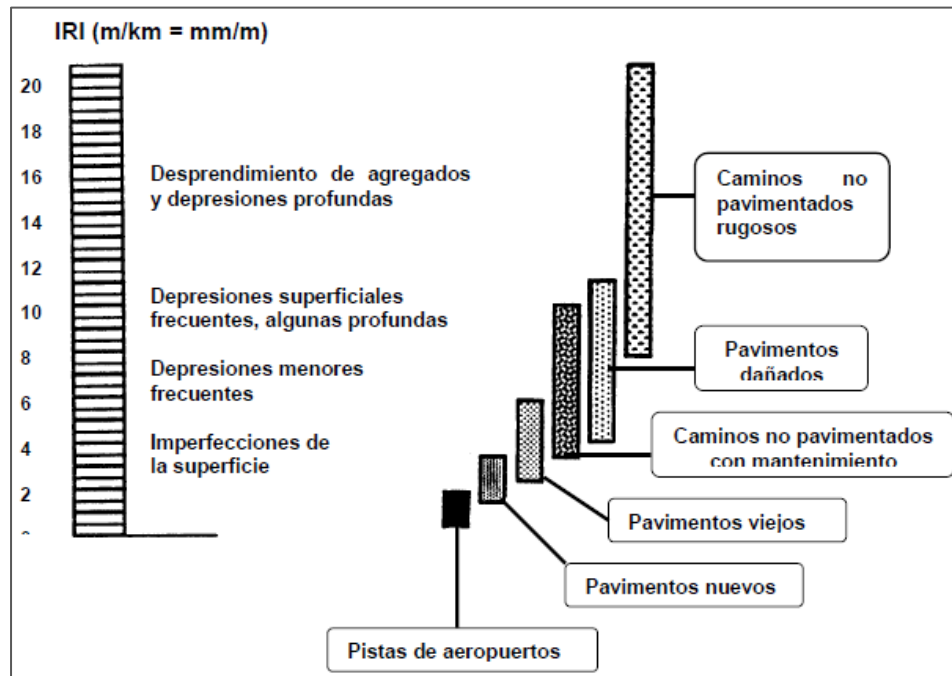
- Las unidades están en mm/m, m/km o in/mi
- El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km. (0 a 760 in/mi), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable.
- Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor del IRI, no así los cambios de pendiente.

La capa de rodadura de una carretera posee una serie de características técnicas y funcionales, obtenidas a partir de criterios y especificaciones de construcción. Su estado depende de la calidad inicial y del desgaste o deterioro producido por el tránsito y los factores climáticos, entre otros.

A nivel de red, partiendo de las mediciones de rugosidad de un camino, se puede definir el estado de los pavimentos mediante el índice de rugosidad; si

se realiza un programa de evaluación anual en esos mismos caminos se puede llegar a conocer el comportamiento del deterioro a través del tiempo.

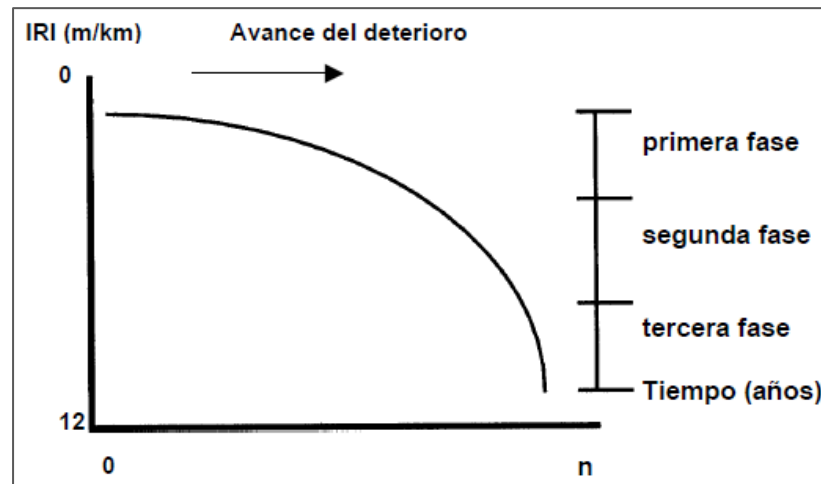
Figura 8: Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos.



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 1998.

El comportamiento típico de la condición superficial respecto al tiempo se puede representar en la Figura 9; en la que se observa que a partir de un cierto nivel de rugosidad del camino, los factores que afectan al mismo son el tránsito, el medio ambiente, etc., que ocasionan la disminución de la calidad superficial. Esta disminución no es lineal sino que se puede dividir en tres etapas, donde la primera tiene un deterioro poco significativo en los primeros años; la segunda presenta un deterioro más acusado que en la primera, y requiere comenzar a programar un mantenimiento para no dejar avanzar el deterioro, la tercera significa una etapa de deterioro acelerado, ya que en pocos años el nivel de servicio cae de forma importante, con lo que va a llegar a un costo significativo de mantenimiento del camino y, como límite, puede ser necesaria una reconstrucción total del mismo. (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

Figura 9: Gráfico típico del avance del deterioro de un camino respecto al tiempo.



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 1998.

Los sistemas de gestión deben tratar de que gran parte de las carreteras por las que pasa la mayor riqueza del país, se mantengan con una buena calidad de servicio, a base de programar su rehabilitación a tiempo y con recursos suficientes. (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

## 2.2.8. Métodos para la medición de la rugosidad

### 2.2.8.1. Clasificación de los métodos

Los diversos métodos para medir la rugosidad que existe en el mundo pueden agruparse, de acuerdo a la clasificación dada por el Banco Mundial, en cuatro clases genéricas, con relación a cuán directa sea la correlación que emplean para relacionar sus medidas con el Índice Internacional de Rugosidad (IRI).

**Métodos Clase 1.-** Basados en la medición de perfiles topográficos de gran precisión, estos métodos se constituyen como los más exactos que existen para la determinación del IRI. Los métodos de la clase 1 establecen la rugosidad a través de la determinación muy exacta del perfil longitudinal de un pavimento, con medidas espaciadas cada 0.25m y cotas con una precisión de 0.5 mm. A esta clase pertenecen los métodos basados en la medición del perfil del pavimento con el perfilómetro TRRL Beam, y, con mira y nivel de precisión (Rod and Level).



**Métodos Clase 2.-** Esta clase incluye todos los otros métodos en los cuales la rugosidad se determina sobre la base de la medición del perfil longitudinal, pero con una exactitud menor que los de la Clase 1. Estos métodos recurren al uso de perfilómetros de alta velocidad o mediciones estáticas con equipos similares a los de Clase 1, pero con niveles inferiores de exactitud. Entre los perfilómetros de alta velocidad se tienen, el APL Trailer y GMRtype Inertial Profilometer.

Tanto los métodos Clase 1, como los Clase 2, establecen la rugosidad en unidades IRI haciendo uso de programas de cómputo, los cuales se basan en algoritmos matemáticos que simulan la respuesta dinámica que experimenta el sistema de suspensión de un vehículo modelo, al “transitar” por el perfil medido. Dicha respuesta se sintetiza finalmente en la cantidad de movimiento relativo vertical acumulado por unidad de longitud, expresado en m/km y que recibe el nombre de IRI.

**Métodos Clase 3.-** En esta clase están los métodos que recurren al uso de una ecuación de correlación para la estimación del IRI. Estos métodos, también denominados “tipo respuesta” (Response-Type Road Roghness Measuring System, o simplemente, RTRRMS), establecen la rugosidad basados en la detección del movimiento relativo que experimenta el sistema de suspensión de un vehículo de pasajeros o de un tráiler remolcado, al transitar sobre el pavimento.

Las mediciones efectuadas mediante los métodos Clase 3 dependen de las características dinámicas de un vehículo, para proporcionar parámetros de rugosidad que puedan correlacionarse con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Sin embargo, las propiedades dinámicas de cada vehículo son particulares y cambian con el tiempo, por lo que las mediciones directas deben ser correlacionadas con el IRI mediante una ecuación de calibración, que debe ser obtenida experimentalmente y específicamente para el vehículo empleado.

Los métodos Clase 3 emplean diversos tipos de equipos, tales como el Mays Meter (Norteamericano), Bump Integrator (Inglés), NAASRA Meter (Australiano), etc., todos ellos producidos comercialmente.

**Métodos Clase 4.-** Hay situaciones en las que se requieren datos de rugosidad sin necesidad de una gran precisión o simplemente no es posible obtener datos precisos. En tales casos se puede recurrir a una evaluación subjetiva, ya sea mediante experiencia previa recorriendo caminos o basándose en una inspección visual. De hecho un equipo tipo respuesta que no está calibrado cae dentro de la categoría de Clase 4. (Del Águila Rodríguez, 1999).

### 2.2.9. Equipos para evaluar la rugosidad

Existen diferentes equipos para determinar la regularidad superficial de los pavimentos, los cuales han venido evolucionando en el tiempo, variando unos de otros en la precisión y rapidez para la obtención de los resultados.

#### a) Nivel y mira topográfica

Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o ft), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal. Debido a que el proceso de recolección de datos es relativamente lento, en comparación con otros equipos, es considerado de bajo rendimiento. Tiene una gran precisión y permite obtener una medida exacta del perfil del pavimento, generalmente utilizado cuando se miden pocos perfiles.

Figura 10: Nivel y mira topográfica.

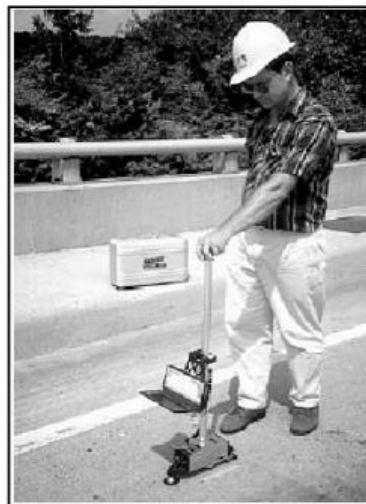


Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

## b) Dipstick

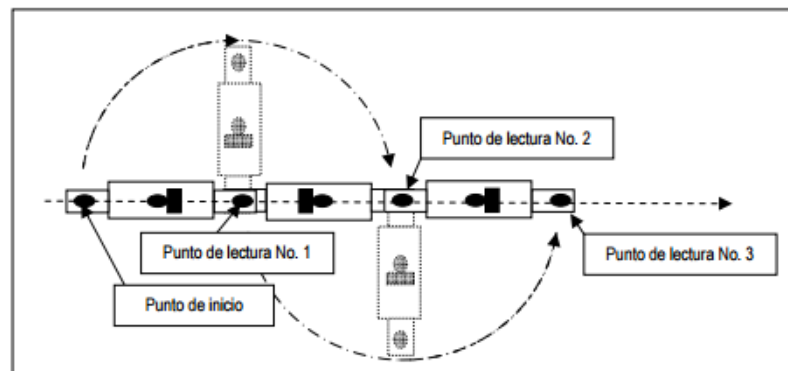
Los equipos Dipstick pueden usarse para obtener una cantidad relativamente pequeña de medidas del perfil longitudinal del pavimento. El Dipstick consiste en un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300mm o 250mm, los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro. El operador conduce el Dipstick sobre una sección de pavimento premarcada, rotando el instrumento alternadamente sobre cada apoyo (ver Figura 11 y 12). El Dipstick comúnmente es usado para medir un perfil para la calibración de instrumentos más complejos, tal como los equipos tipo respuesta RTRRMS, así mismo para la verificación de resultados obtenidos por los perfilómetros inerciales. (Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008).

Figura 11: Equipo Dipstick.



Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

Figura 12: Operación del equipo Dipstick



Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.



### c) Perfilógrafos

Los Perfilógrafos han estado disponibles durante muchos años y han existido en una variedad de formas, configuraciones y marcas. Dos tipos básicos de perfilógrafos que se han desarrollado, que difieren en la configuración del sistema de ruedas que los soportan, el funcionamiento y procedimientos de medida de los dispositivos, son el perfilógrafo California y el Rainhart (ver Figura 13 y Figura 14).

Figura 13: Perfilógrafo California



Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

Figura 14: Perfilógrafo Rainhart



Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra en papel según el movimiento de la rueda sensible.

Los perfilógrafos pueden calcular desviaciones muy ligeras de la superficie y ondulaciones en aproximadamente 6.0 m (20 pies) en longitud. Los perfilógrafos son aparatos relativamente baratos, simples de manejar y

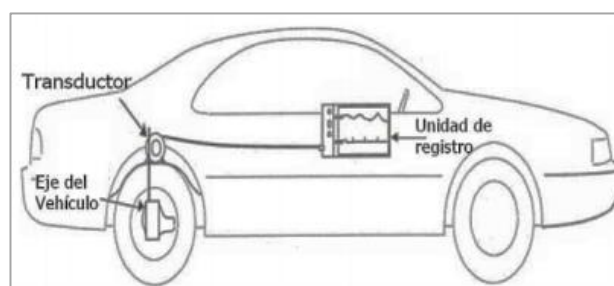
mantener, y proveen un perfil de la superficie analizada que los usuarios fácilmente pueden entender. Ambos son operados manualmente por una sola persona, a la velocidad normal de caminado; por esta razón no se usan para obtener la regularidad de una red de carreteras, labor que requiere de alta velocidad.

Su principal uso ha sido en el control de calidad de construcciones, en los cuales se realizan rechequeos de los nuevos tramos de pavimentos con defectos y verificar su corrección. Son también muy apropiados para examinar losas de puentes, así como para aquellos trabajos que requieren sólo una distancia corta de perfil.

#### d) Equipos Tipo Respuesta (RTRRMS)

Por largos años, la mayoría de datos de regularidad de los pavimentos de una red fueron obtenidos con vehículos instrumentados con medidores de las irregularidades de las superficies de rodamiento, llamados sistemas de medición de la regularidad de una carretera tipo respuesta (RTRRMS, por sus siglas del inglés “response-type road roughness measuring system”). Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera, estos dispositivos están montados en un vehículo liviano, o en un remolque especial. Los equipos RTRRMS miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie (ver Figura 15). (Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008).

Figura 15: Componentes de equipos de respuesta



Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

Por consiguiente, el hecho de que el sistema tipo respuesta dependa de la dinámica del vehículo anfitrión tiene varios efectos no deseados:

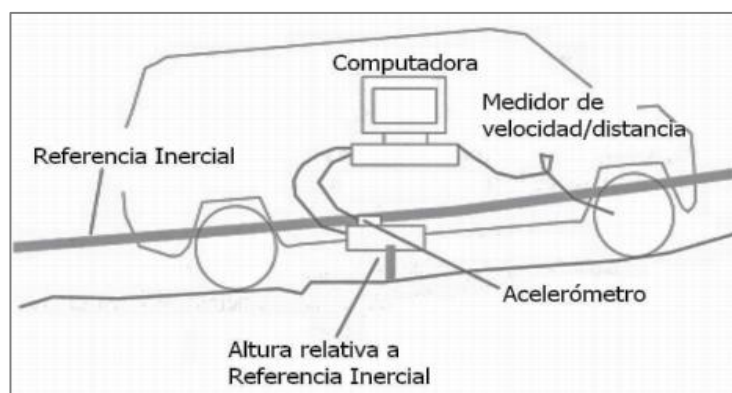
- ✓ Las medidas de regularidad no son estables en el tiempo.
- ✓ Las medidas de regularidad no son transportables.

A pesar de estos y otros problemas asociados con medidores tipo respuesta, han estado funcionando durante los últimos 50 años y aún con el advenimiento de otros perfilógrafos, gran cantidad de agencias de carreteras los siguen usando.

### e) Perfilómetro Inercial

El perfilómetro inercial es un equipo de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino; concebidos especialmente para el análisis de la regularidad superficial de la carretera, tanto longitudinal como transversal, superando la calidad y precisión a cualquier equipo tradicional. Estos equipos producen medidas continuas del perfil longitudinal a altas velocidades a través de la creación de una referencia inercial, integrado por acelerómetros colocados en el vehículo los cuales permiten obtener el movimiento vertical del mismo y sensores de “no contacto” (por ejemplo, dispositivos láser infrarrojos) utilizados para medir el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento (ver Figura 16).

Figura 16: Componentes de equipos con referencia inercial



Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento. Generan el perfil longitudinal del camino en tiempo real y sobre todo tienen la ventaja de realizar las mediciones a altas velocidades, facilitando la obtención de datos en una determinada vía. (Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008).

Tabla 6: Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial del pavimento.

Equipo	Grado de precisión	Implementación	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy Simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo
Perfilómetro inercial	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy Compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de red viales grandes

Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

La mayor experiencia en el Perú está relacionada con el método basado en el uso del Rugosímetro denominado MERLIN, desarrollado por el TRRL de Gran Bretaña. De acuerdo a la clasificación del Banco Mundial, el método de medición del MERLIN califica por la forma como Clase 3, ya que hace uso de una ecuación de correlación para relacionar los valores que determina con la escala del IRI. Sin embargo, por haber sido diseñado como una variación de un perfilómetro estático, y debido a la gran exactitud de sus resultados, es considerado como un método Clase 1. (Del Águila Rodríguez, 1999).

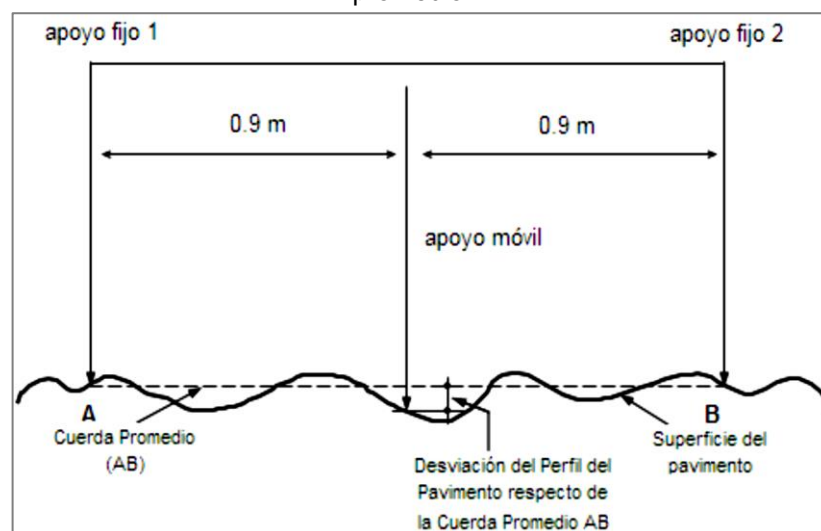
### 2.2.10. Rugosímetro de MERLIN

El Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL) desarrolló el Rugosímetro MERLIN (acrónimo de la terminología inglesa Machine for Evaluating Roughness using low-cost Instrumentation), basándose en el principio del perfilómetro estático, con el objetivo de obtener un equipo de bajo costo, fácil manejo y un método de análisis simple con resultados confiables.

#### Fundamentos Teóricos

La determinación de la rugosidad de un pavimento se basa en el concepto de usar la distribución de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio. La Figura 17; ilustra cómo el MERLIN mide el desplazamiento vertical entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante. EL desplazamiento es conocido como “la desviación respecto a la cuerda promedio”.

Figura 17: Medición de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto de la cuerda promedio.

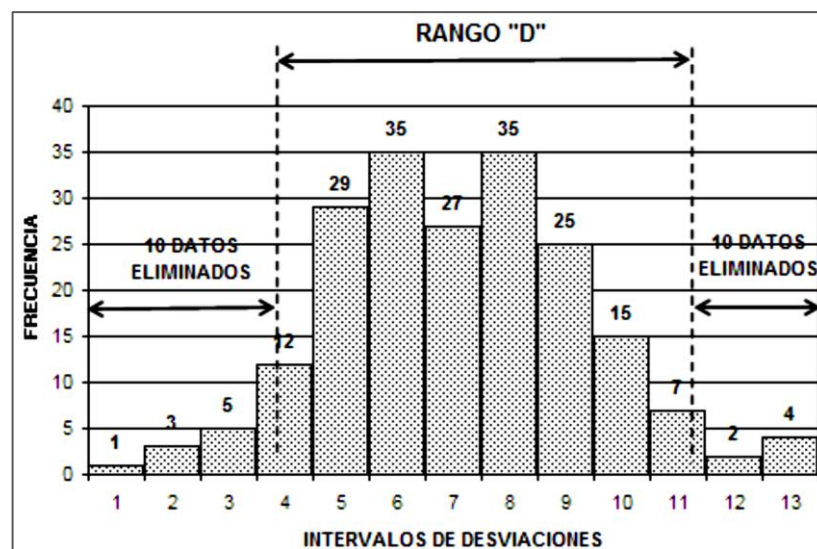


Fuente: Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999.

La longitud de la cuerda promedio es 1.80m, por ser la distancia que proporciona los mejores resultados en las correlaciones. Asimismo, se ha definido que es necesario medir 200 desviaciones respecto de la cuerda promedio, en forma consecutiva a lo largo de la vía y considerar un intervalo

constante entre cada medición. Para dichas condiciones se tiene que, a mayor rugosidad de la superficie mayor es la variabilidad de los desplazamientos. Si se define el histograma de la distribución de frecuencias de las 200 mediciones, es posible medir la dispersión de las desviaciones y correlacionarla con la escala estándar de la rugosidad (Ver Figura 18). El parámetro estadístico que establece la magnitud de la dispersión es el Rango de la muestra (D), determinado luego de efectuar una depuración del 10% de observaciones (10 datos en cada cola del histograma). El valor D es la rugosidad del pavimento en “unidades MERLIN”.

Figura 18: Histograma de la distribución de frecuencias de una Muestra de 200 desviaciones medidas en forma consecutiva.



Fuente: Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999.

El concepto de usar la dispersión de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio, como una forma para evaluar la rugosidad de un pavimento no es nuevo ni original del TRRL. Varios parámetros de rugosidad precedentes, tal como el conocido Quarter-car Índice (QI), han sido propuestos por otros investigadores basándose en el mismo concepto, los que son analizados en la referencia. (Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999).

**Correlaciones D versus IRI**

Para relacionar la rugosidad determinada con el MERLIN con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que es el parámetro utilizado para uniformizar



los resultados provenientes de la gran diversidad de equipos que existen en la actualidad, se utilizan las siguientes expresiones:

- a) Cuando  $2.4 < IRI < 15.9$ , entonces  $IRI = 0.593 + 0.0471 D$  (1)
- b) Cuando  $IRI < 2.4$ , entonces  $IRI = 0.0485 D$  (2)

La expresión 1 es la ecuación original establecida por el TRRL mediante simulaciones computarizadas, utilizando una base de datos proveniente del Ensayo Internacional sobre Rugosidad realizado en Brasil en 1982. La ecuación de correlación establecida es empleada para la evaluación de pavimentos en servicio, con superficie de rodadura asfáltica, granular o de tierra, siempre y cuando su rugosidad se encuentre comprendida en el intervalo indicado.

La expresión 2 es la ecuación de correlación establecida de acuerdo a la experiencia peruana y luego de comprobarse, después de ser evaluados más de 3,000 km de pavimentos, que la ecuación original del TRRL no era aplicable para el caso de pavimentos asfálticos nuevos o poco deformados. Se desarrolló entonces, siguiendo la misma metodología que la utilizada por el laboratorio británico, una ecuación que se emplea para el control de calidad de pavimentos recién construidos.

El Rugosímetro MERLIN, es un instrumento versátil, sencillo y económico, pensado especialmente para uso en países en vías de desarrollo. Fue introducido en el Perú por el Ing. Pablo del Águila en 1993, existiendo en la fecha (Junio 1999) más de 15 unidades pertenecientes a otras tantas empresas constructoras y consultoras.

De acuerdo con la clasificación del Banco Mundial los métodos para la medición de la rugosidad se agrupan en 4 clases, siendo los de Clase 1 los más exactos (Mira y Nivel, TRRL Beam, perfilómetros estáticos). La Clase 2 agrupa a los métodos que utilizan los perfilómetros estáticos y dinámicos, pero que no cumplen con los niveles de exactitud que son exigidos para la Clase 1. Los métodos Clase 3 utilizan ecuaciones de correlación para derivar sus resultados a la escala del IRI (Bump integrator, Mays meter). Los métodos Clase 4

permiten obtener resultados meramente referenciales y se emplean cuando se requieren únicamente estimaciones gruesas de la rugosidad.

El método de medición que utiliza el MERLIN, por haber sido diseñado este equipo como una variación de un perfilómetro estático y debido a la gran exactitud de sus resultados, califica como un método Clase 1. La correlación de los resultados obtenidos con el MERLIN, con la escala del IRI, tiene un coeficiente de determinación prácticamente igual a la unidad ( $R^2=0.98$ ). Por su gran exactitud, sólo superado por el método topográfico (mira y nivel), algunos fabricantes de equipos tipo respuesta (Bump Integrator, Mays Meter, etc.) lo recomiendan para la calibración de sus rugosímetros.

El MERLIN es un equipo de diseño simple. Las figuras 19 y 20; presentan un esquema ilustrativo del instrumento. Consta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. Para facilidad de desplazamiento y operación el elemento vertical delantero es una rueda, mientras que el trasero tiene adosados lateralmente dos soportes inclinados, uno en el lado derecho para fijar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y otro en el lado izquierdo para descansar el equipo. El elemento horizontal se proyecta, hacia la parte trasera, con 2 manijas que permiten levantar y movilizar el equipo, haciéndolo rodar sobre la rueda en forma similar a una carretilla. (Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999).

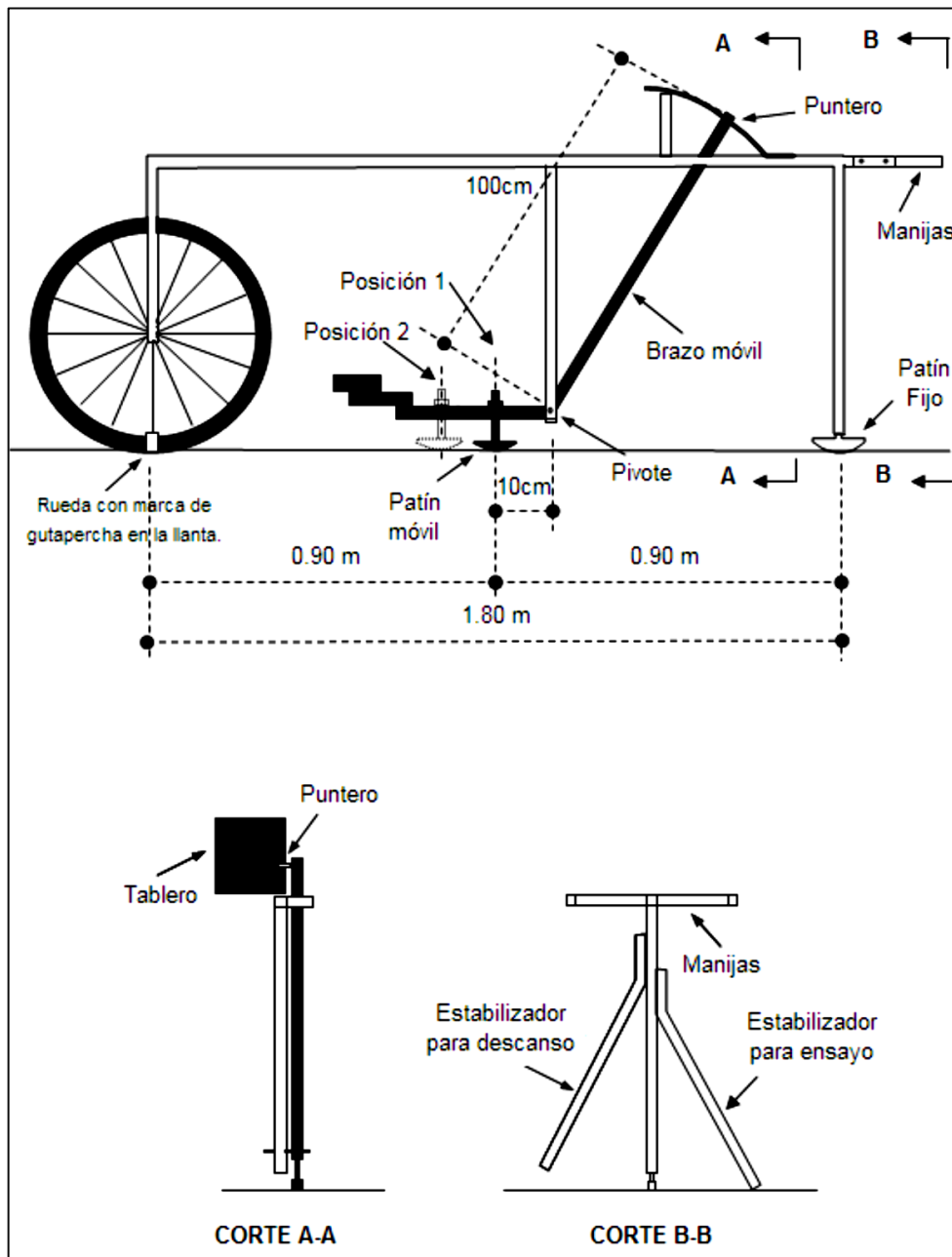
Figura 19: Rugosímetro de MERLIN empleado para los ensayos en esta tesis.



Fuente: Propia



Figura 20: Esquema del Rugosímetro de MERLIN



Fuente: Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999.

Aproximadamente en la parte central del elemento horizontal, se proyecta hacia abajo una barra vertical que no llega al piso, en cuyo extremo inferior pivotea un brazo móvil.

El extremo inferior del brazo móvil está en contacto directo con el piso, mediante un patín empernado y ajustable, el cual se adecua a las imperfecciones del terreno, mientras que el extremo superior termina en un puntero o indicador que

se desliza sobre el borde de un tablero, de acuerdo a la posición que adopta el extremo inferior del patín móvil al entrar en contacto con el pavimento.

Para registrar los movimientos del puntero, se utiliza una escala gráfica con 50 divisiones, de 5 mm de espesor cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cuál se desliza el puntero (Ver Tabla 7). (Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999).

Tabla 7: Escala para determinar la dispersión de las desviaciones de la Superficie de pavimento respecto del nivel de referencia o cuerda promedio.

<b>RUGOSIMETRO MERLIN</b>	
1 DIVISION = 5 mm	50
	49
	48
	47
	46
	45
	44
	43
	42
	41
	40
	39
	38
	37
	36
	35
	34
	33
	32
	31
	30
	29
	28
	27
	26
	25
	24
	23
	22
	21
	20
	19
	18
	17
	16
	15
	14
	13
	12
	11
	10
	9
	8
	7
	6
	5
	4
	3
	2
	1

Fuente: Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999.

### Ejecución de ensayos

Para la ejecución de los ensayos se requiere de dos personas que trabajan conjuntamente, un operador que conduce el equipo y realiza las lecturas y un auxiliar que las anota. Asimismo, debe seleccionarse un trecho de



aproximadamente 400 m de longitud, sobre un determinado carril de una vía. Las mediciones se efectúan siguiendo la huella exterior del tráfico.

Para determinar un valor de rugosidad se deben efectuar 200 observaciones de las “irregularidades que presenta el pavimento” (desviaciones relativas a la cuerda promedio), cada una de las cuáles son detectadas por el patín móvil del MERLIN, y que a su vez son indicadas por la posición que adopta el puntero sobre la escala graduada del tablero, generándose de esa manera las lecturas. Las observaciones deben realizarse estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2m de distancia; en la práctica esto se resuelve tomando como referencia la circunferencia de la rueda del MERLIN, que es aproximadamente esa dimensión, es decir, cada ensayo se realiza al cabo de una vuelta de la rueda.

En cada observación el instrumento debe descansar sobre el camino apoyado en tres puntos fijos e invariables: la rueda, el apoyo fijo trasero y el estabilizador para ensayo (Figura 20, Corte B-B). La posición que adopta el puntero corresponderá a una lectura entre 1 y 50, la que se anotará en un formato de campo, tal como el mostrado en la Tabla 8. El formato consta de una cuadrícula compuesta por 20 filas y 10 columnas; empezando por el casillero (1,1), los datos se llenan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

El proceso de medición es continuo y se realiza a una velocidad promedio de 2 km/h. La prueba empieza estacionando el equipo al inicio del trecho de ensayo, el operador espera que el puntero se estabilice y observa la posición que adopta respecto de la escala colocada sobre el tablero, realizando así la lectura que es anotada por el auxiliar.

Paso seguido, el operador toma el instrumento por las manijas, elevándolo y desplazándolo la distancia constante seleccionada para usarse entre un ensayo y otro (una vuelta de la rueda). En la nueva ubicación se repite la operación explicada y así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas. El espaciado entre los ensayos no es un factor crítico, pero es recomendable que las lecturas se realicen siempre estacionando la rueda en una misma posición, para lo cual se pone una señal o marca llamativa sobre la llanta (con gutapercha fosforescente, por ejemplo), la que debe quedar siempre en contacto con el

piso. Ello facilita la labor del operador quién, una vez hecha la lectura, levanta el equipo y controla que la llanta gire una vuelta haciendo coincidir nuevamente la marca sobre el piso. (Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999).

Tabla 8: Formato para la recolección de datos de campo.

**ENSAYOS PARA MEDICION DE LA RUGOSIDAD CON MERLIN  
(HOJA DE CAMPO)**

PROYECTO : \_\_\_\_\_ OPERADOR : \_\_\_\_\_  
SECTOR : \_\_\_\_\_ SUPERVISOR : \_\_\_\_\_  
TRAMO : \_\_\_\_\_ FECHA : \_\_\_\_\_  
CARRIL : \_\_\_\_\_

ENSAYO N°  KM  +  HORA  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1											TIPO DE PAVIMENTO :
2											AFIRMADO <input type="checkbox"/>
3											BASE GRANULAR <input type="checkbox"/>
4											BASE IMPRIMADA <input type="checkbox"/>
5											TRAT. BICAPA <input type="checkbox"/>
6											CARPETA EN FRIO <input type="checkbox"/>
7											CARP. EN CALIENTE <input type="checkbox"/>
8											RECAPEO ASFALTICO <input type="checkbox"/>
9											SELLO <input type="checkbox"/>
10											OTROS <input type="checkbox"/>
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

OBSERVACIONES : \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Fuente: Del Águila Rodríguez, Pablo, 1999.

### 2.2.11. Roadroid

#### Definición

Roadroid es 1) un "app" para medir la calidad de las carreteras, y 2) un sitio web para ver la calidad de las carreteras. La "aplicación" está diseñado para teléfonos inteligentes Android. Se puede medir y controlar fácilmente la calidad de las carreteras y también utilizar la cámara de fotos con etiquetas GPS. La aplicación se basa en varios años de investigación para la Administración de Carreteras de Suecia en cooperación con Roadroid Inventor and Engineers.



Por un inicio de sesión en la página de ROADROID, puede supervisar los datos, planificar, ejecutar y hacer seguimiento del mantenimiento de carreteras.

Roadroid se correlaciona con la norma internacional IRI y puede proporcionar a los usuarios una imagen diaria de la calidad de las carreteras y ser una ayuda poderosa en los seguimientos operativos. No es un sustituto de los métodos avanzados o encuestas oculares, pero es un gran complemento, al ser capaz de generar grandes cantidades de datos, Roadroid crea estadísticas que ninguno de los otros métodos permite. (Forslof, Lars, 2012).

El índice de rugosidad Internacional (IRI) es un índice de rugosidad de carreteras comúnmente obtenida a partir de las mediciones de perfiles longitudinales de carreteras. Desde su introducción en 1986, el IRI se ha convertido en un parámetro comúnmente usado en todo el mundo para evaluar y gestionar sistemas de carreteras, sin embargo la medición de la rugosidad en carreteras ha sido utilizada desde principios de 1960 para expresar las condiciones de la carretera y la calidad de rodado. Desde finales de la década de 1960, sin embargo la mayoría de perfiles de carreteras se miden con instrumentos de alta velocidad.

Las modernas técnicas tradicionales para la medición de la rugosidad pueden ser categorizadas como construcciones especiales de vagones con escáneres láser, pero estos equipos especialmente contruidos son muy costosas, debido al hardware complejo y pesado que llevan, su baja producción y la necesidad de sofisticados sistemas y accesorios.

La recopilación y análisis de datos quitan a menudo mucho tiempo. En el hemisferio norte, la recolección de datos se realiza normalmente durante el verano, luego analizar y entregar los resultados a los sistemas de gestión de mantenimiento lo realizan a finales de otoño. Durante el invierno y la primavera el camino generalmente se enfrenta a un continuo cambio (con períodos muy dramáticos para la vida del camino y con cambios extremos de su rugosidad), por lo que los valores del IRI que eran "exactos" hace casi un año ahora pueden no ser las mismas. Además, dado que es muy costoso recoger y analizar datos, en muchas carreteras se analizan solamente un carril cada tercer o cuarto año.

Usando un Smartphone para la recopilación de datos de la rugosidad de la carretera, que esencialmente es de tipo respuesta (RTRRMS) se puede realizar a un bajo costo, supervisar los cambios diarios de la rugosidad, además se puede saber cuándo y dónde está sucediendo y si la situación es peor que en años anteriores. Pueden ser utilizados en los contratos basados en el rendimiento o en investigaciones sobre el deterioro de las carreteras.

Cabe mencionar que los sistemas basados en teléfonos inteligentes como Roadroid pueden desafiar el conocimiento antiguo en lo que respecta a las normas, los procedimientos y las formas existentes para obtener la rugosidad:

- ✓ Las organizaciones han invertido tiempo, prestigio y enormes cantidades de dinero para recolectar datos complejos y el uso adecuado para lograr el resultado exacto.

Es necesario entender la diferencia entre las cuatro clases de métodos de medición de la rugosidad de la carretera:

- ✚ Clase 1 - Perfiles de precisión
- ✚ Clase 2 - Otros métodos de perfilómetros
- ✚ Clase 3 - El IRI se calcula a partir de ecuaciones de correlación
- ✚ Clase 4 - Valoraciones subjetivas y medidas no calibrados

Es natural que el escepticismo aparezca cuando un equipo de clase 2/3 es comparado con equipos de clase 1 o clase 2, sin embargo, un teléfono inteligente puede ofrecer datos actualizados de rugosidad de buena calidad en una página web en cuestión de horas, en contraste con un costoso software de clase 1 o clase 2.

En el otro extremo de la escala, muchos inventarios de carreteras y evaluaciones son hechos por seres humanos (clase 4 valoraciones subjetivas) en grandes áreas usando sólo lápiz y papel.

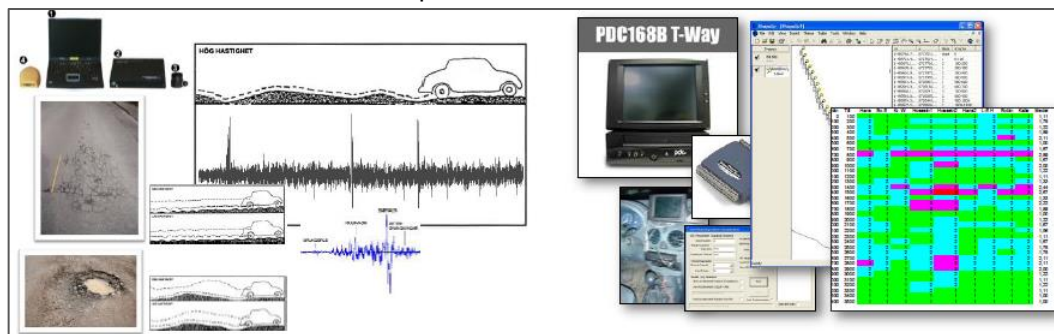
La recopilación de datos de la rugosidad de carreteras usando teléfonos inteligentes viene a llenar un vacío entre las mediciones de clase 1 y mediciones de clase 4 (inspecciones visuales). A continuación daremos las etapas de desarrollo de esta tecnología. (Forslof, Lars; Jones, Hans, 2014).

### Los primeros prototipos 2002-2006

El equipo Roadroid ha estado trabajando en un lenguaje de programación para móviles mobile ITS desde mediados de la década de 1990, particularmente en la recolección de datos como la información del clima en vías y datos del tráfico. En la Junta de Investigaciones del transporte (TRB) en Washington 2001, se presentó un proyecto canadiense basado en el estudio de la velocidad de los camiones de acarreo de madera, donde concluyeron que si la velocidad es baja, la carretera era de mala calidad y viceversa. Por lo que el equipo Roadroid tuvo la idea de añadir la lectura de vibraciones a este estudio para obtener mejores resultados a lo largo del rastreo.

Junto con el Instituto Real de Tecnología, un primer sistema experimental fue construido entre el 2002-2003 (Figura 21). En ese momento se utilizó un acelerómetro de alta resolución en el eje trasero de un vehículo de tracción delantera conectado por cable a una PC portátil a través de un acondicionador de señal en la que dos estudiantes de maestría construyeron un primer prototipo utilizando un sistema de software industrial para el análisis de señales (Figura 21).

Figura 21: Izquierda, 1er prototipo 2002-2003 y a la derecha 2do prototipo desarrollado en el período 2004-2006.



Fuente: Forsl f, Lars; Jones, Hans, 2014

Los resultados iniciales fueron prometedores y la Administración Nacional de Carreteras Sueca (SNRA) financió el proyecto R&d para desarrollar y validar el prototipo, con un enfoque en caminos de grava. El sistema fue desarrollado para un sistema Windows acoplado a un vehículo, implementado con conexión externa para GPS y un acelerómetro, asimismo se implementó una herramienta web para visualizar la calidad del pavimento de las carreteras a través de



diferentes colores, según la intensidad de las vibraciones. Una validación de las inspecciones visuales y mediciones del sistema fue realizado y presentado en el Foro sobre el transporte en Linköping, 2005.

Dicha investigación se basó en 35 segmentos de 100m que fueron evaluados para 4 clases de condiciones de carreteras. Un módulo de Matlab realizó el análisis de las muestras de referencia de las 4 secciones de carreteras.

Un análisis de regresión se llevó a cabo con reglas basadas en:

- 1) Niveles de amplitud del acelerómetro
- 2) Algoritmos basados en la raíz cuadrada media (RMS)
- 3) La velocidad del vehículo
- 4) Longitud de los datos de la muestra

El análisis mostró que con una sola prueba, se puede obtener hasta un 70% de respuestas correctas en comparación al promedio de inspecciones visuales subjetivas hecha por expertos.

El método se consideró objetivo con muy buena repetitividad, pero en el 2006 el desarrollo se estancó. El sistema se consideraba relativamente barato (7000 dólares) y sencillo de manejar. En retrospectiva, había varias limitaciones; especialmente el montaje del sensor y los cables expuestos al duro ambiente húmedo a menudo bajo el chasis del vehículo, así como lo difícil que era conseguir los componentes en aquel entonces como Windows 98, la Pc para el vehículo, los cables, sus respectivas conexiones, etc. (Forslof, Lars; Jones, Hans, 2014).

### **Nuevos avances 2010-2011**

Los problemas del anterior prototipo pudieron solucionarse a través de la creación del Smartphone o teléfono inteligente, el cual tenía instalado casi todos los componentes (acelerómetro, memoria de almacenamiento, procesador interno) que en el año 2006 sólo se podían añadir al vehículo a través de cables y conexiones.

Sin embargo, ahora habían otros problemas a solucionar, tales como:



- ¿Existe la posibilidad de recoger las señales filtradas en el chasis del vehículo?
- Sabíamos que los diferentes modelos de coches darían señales diferentes, ¿cómo podríamos hacer frente?
- ¿La sensibilidad de los acelerómetros de los teléfonos inteligentes eran suficientes?
- ¿Los diferentes modelos de teléfonos inteligentes pueden proporcionar diferentes valores de medición?

Se desarrolló una aplicación para Android basado en algunos algoritmos de prueba utilizando la señal del acelerómetro integrado.

En el 2011, se empezaron a recolectar datos de ejemplo en caminos con diferentes tipos de vehículos pasando por diferentes obstáculos construidos.

Figura 22: Prueba del tercer prototipo, usando el Galaxy Tab GT P1000.



Fuente: Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014.

Se eligió el mejor hardware de referencia de ese momento (dispositivo Samsung Galaxy Tab P1000 GT). Los obstáculos fueron recorridos por diferentes tipos de vehículos (desde coches pequeños hasta jeep 4WD) a 6 diferentes velocidades: 20, 40, 60, 80, 100 y 120 km/h.

Los datos fueron muestreados con diferentes dispositivos basado en algoritmos y usando la señal del acelerómetro. Durante el análisis de los datos, se obtuvo lo siguiente:

- Se presentaron diferencias entre los distintos tipos de vehículos, especialmente cuando estos recorrían las rutas a velocidades bajas, sin

embargo, se encontró que en un rango de velocidades de entre 40 a 80 km/h, estas diferencias disminuían.

- Se encontraron modelos que permiten calcular la influencia de las velocidades en los tres distintos tipos de vehículos (pequeños, medianos y grandes). También, las diferencias entre los distintos dispositivos, especialmente en sus frecuencias y en la sensibilidad de sus acelerómetros. Esto requiere que se realice un proceso de calibración que permita unir y estandarizar los parámetros de cada dispositivo en uno solo.
- Se demostró que los datos recolectados pueden ser transferidos y su confiabilidad depende fundamentalmente de que la base del celular sea rígida y estable para que los datos recolectados sean tomados en cuenta.

Lo más importante es que los ensayos realizados durante el 2011 demostraron que sí podían ser utilizables.

### **Visualización de datos**

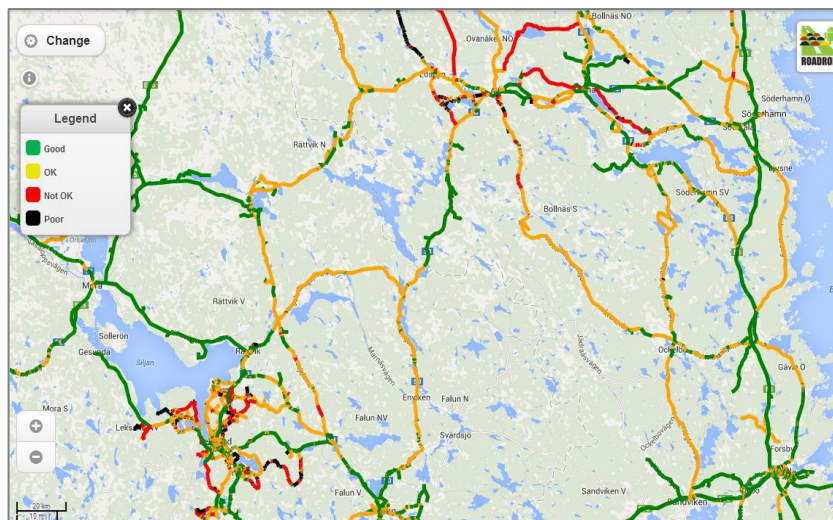
Faltaba contar con un dispositivo de suministro de datos, por lo que se necesitaba un visor adecuado de la información. Entonces, se creó en el internet un lenguaje de programación (HTML5) que consiste en un mapa que permite mostrar el estado de la carretera. Los datos (que están codificados) son comprimidos y enviados desde el dispositivo a través de un servicio de transferencia de archivos a un servidor de web Amazon en la nube. Los archivos de datos cargados desde diferentes unidades son importados y posiblemente coinciden con la geometría de las carreteras del Open Street Maps (OSM) o Google Maps. Los datos de la condición de carretera están divididos en 4 diferentes niveles para la visualización: verde para buenos, amarillo para satisfactorios, rojo para insatisfactorios y negro para pobres. (Forslof, Lars; Jones, Hans, 2014).

Tabla 9: Condición de la carretera mediante colores

Condición de la carretera	eIRI	Color
Bueno	< 2.2	Verde
Satisfactorio	2.2 - 3.8	Amarillo
No Satisfactorio	3.8 - 5.4	Rojo
Pobre	> 5.4	Negro

Fuente: Propia

Figura 23: Imagen de las carreteras de Suecia y sus respectivas calidades de pavimento



Fuente: Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014

La app móvil almacena un gran número de valores de datos cada segundo en un archivo CSV, pero para obtener una visión general en una escala mayor es más conveniente utilizar conexiones con datos agregados y promedios de puntos muestreados. Dependiendo de la base de datos del camino, habrá muchas oportunidades para perfeccionar los datos y agregar información de atributos tales como el ancho de la carretera, los volúmenes de tráfico, etc. En Suecia han estado utilizando la base de datos de la Carretera Nacional Sueca (NVDB).

A nivel mundial en su mayoría se utiliza las geometrías del Open Street Maps (OSM) o Google Maps, además los datos de la condición de carretera pueden exportarse en formato shapefile a otros sistemas.

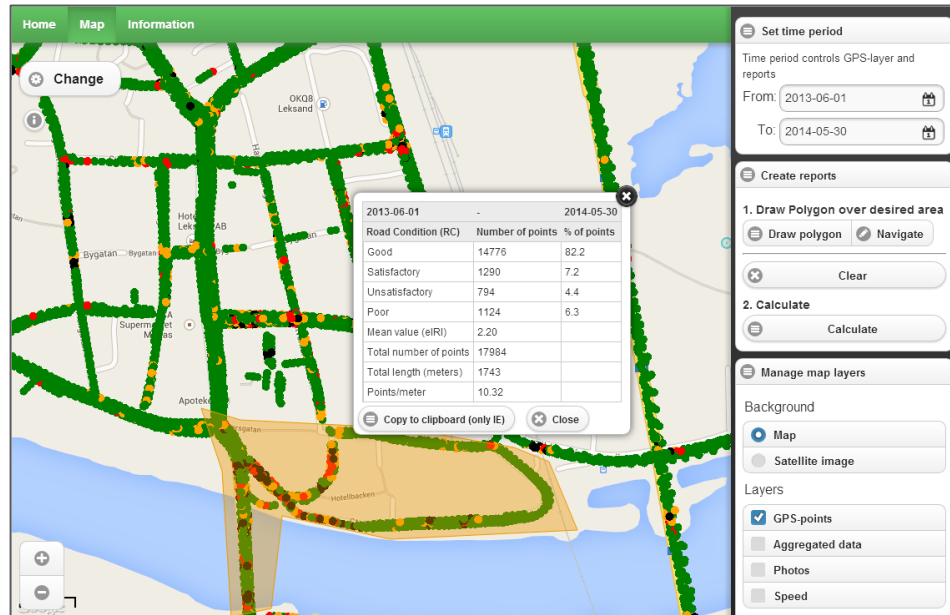
## Uso de datos y el índice ROADROID

Se llevaron a cabo estudios sobre el índice de rugosidad Internacional (IRI); usando el sistema cuarto de coche (QCS) para obtener el valor del cIRI, pero utilizar el medio más complejo como es el modelo de cuarto de coche tiene beneficios limitados, pero valores casi idénticos.

Agregaron datos de varias mediciones a lo largo del tiempo y compararon los resultados de manera flexible, también generaron automáticamente informes para un camino específico y comparar los caminos con cada uno de ellos y así hacer comparaciones dentro de regiones enteras.

La solución fue utilizar el porcentaje de cada clase de carretera para los distintos puntos de muestreo que se han recogido dentro de un área. Llamamos a esto el Roadroid Índice (RI), el RI es un parámetro que puede ser usado para una parte del camino, un camino entero, una ciudad, una región o incluso el mundo entero! (Forslöv, Lars; Jones, Hans, 2014).

Figura 24: Filtro, selección y análisis de datos en la web utilizando el índice Roadroid (RI).



Fuente: Forslöv, Lars; Jones, Hans, 2014

Tabla 10: Reporte del seguimiento del cambio de condición de carretera utilizando el RI.

Road Condition Change report Q4 - 2012														ROADROID
Gävleborg		Hudiksvall		Contractor <b>NCC</b>		69,4%	15,5%	7,4%	7,8%	Good for Q4 minus Good for all year.				
1089	Km	Phone 010-476 14 07		Q4 - 2012				Helår - 2012						
Road no.	Traffic	Class	Length	Comments	Good	Sat	Usat	Poor	TREND	Good	Sat	Usat	Poor	eIRI avg
E4	14000	1	143		93,9%	4,6%	0,9%	0,5%	3,4%	97,4%	2,0%	0,4%	0,3%	1,8
83	8300	2	167	Salt road	88,9%	7,4%	2,2%	1,5%	3,3%	85,6%	8,0%	3,2%	3,2%	2,6
84	7500	2	210	Salt road	90,9%	6,1%	1,7%	1,3%	1,6%	92,5%	4,8%	1,6%	1,1%	2,9
305	1200	3	105		76,7%	14,4%	5,3%	3,6%	-0,6%	77,3%	13,3%	5,2%	4,1%	4,5
307	900	3	75		93,7%	5,2%	0,7%	0,4%	0,4%	93,3%	5,5%	0,8%	0,4%	3,7
539	300	3	33	Gravel road						9,1%	23,2%	24,2%	43,4%	7,5
583	1700	3	89		96,9%	2,6%	0,2%	0,3%	0,0%	96,9%	2,0%	0,6%	0,5%	2,3
660	1850	3	64		88,6%	8,3%	0,6%	2,5%	9,1%	79,5%	9,7%	4,5%	6,3%	6,7

Fuente: Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014

Para hacer un seguimiento continuo de la vía a lo largo del tiempo, también se necesitaba una manera de producir informes. La recolección de datos puede hacerse mediante los oficiales o guardias de carretera que están realizando inspecciones visuales de 1-3 veces por semana, o por operadores como un distribuidor de periódicos. El RI es muy adecuado para hacer informes a partir de los datos de la condición de carretera.

### IRI estimado

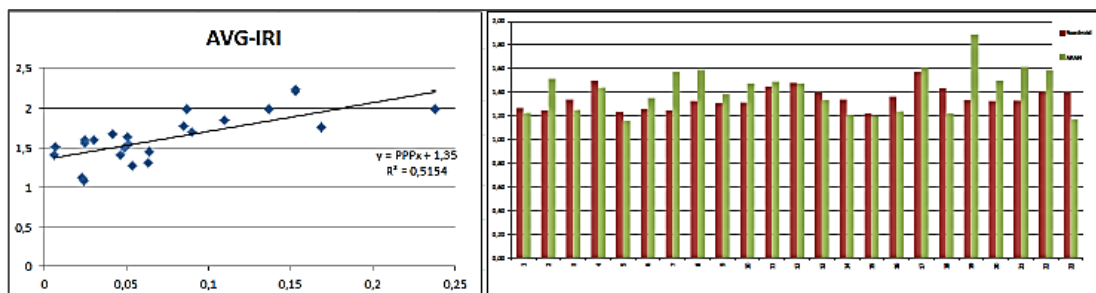
El índice Roadroid (RI) es escalable y prometedor, pero necesitan correlacionarlo con el IRI. Para encontrar la correlación se ha reunido lo siguiente:

- 1) Se realizaron mediciones del IRI en las carreteras de la NVDB con los equipos de la clase 1 (alta precisión) cada 20 metros de longitud y los datos fueron promediados en los distintos tramos de la carretera.
- 2) Los valores promedio muestran la condición de carretera.

Mediante la comparación de cientos de carreteras se estableció un factor de correlación que podría estimar un valor para el eIRI. El coeficiente inicial de determinación ( $R^2$ ) fue de 0,5 (75 %) que se considera satisfactorio. Se percataron de las limitaciones en la adaptación de la velocidad, especialmente en superficies de pavimento en mal estado por los mini coches (bastante más sensibles que nuestra referencia coche pequeño).

La investigación realizada por diferentes instituciones de todo el mundo, como el Banco Mundial, las Naciones Unidas, universidades y empresas de ingeniería de carreteras a lo largo de 2014 han presentado diferentes informes que muestran en su mayor parte el mismo resultado, alcanzando una correlación de hasta un 80 % entre el eIRI y el IRI. (Forslof, Lars; Jones, Hans, 2014).

Figura 25: Izquierda: Base de estudio de correlación con eIRI. Derecha: Comparaciones del cIRI (rojo) vs. IRI de la carretera en sub-secciones.



Fuente: Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014.

- ✚ En una investigación de la Universidad de Pretoria – 2013, se concentraron en la búsqueda del eIRI, si eran coherentes los estudios realizados con diferentes condiciones del vehículo como la velocidad, la ruta, carga y presión de los neumáticos, etc. Llegando a la conclusión de que Roadroid era capaz de producir buenos resultados si los mencionados indicadores estaban estandarizados.
- ✚ La investigación por la Universidad de Auckland - 2013, se centró en si el eIRI podría representar a la rugosidad sentida por los automovilistas a un cierto nivel. En ambos informes se constató que la aplicación Roadroid respondió a las diversas características de la red de carreteras de Auckland de manera similar a los sistemas aceptados en el sector. Para ser precisos Roadroid tenía un 81% de correlación con los sistemas de medición láser.
- ✚ Nuevas investigaciones realizadas por el Banco Mundial en cooperación con la Universidad de Pretoria - 2014 (SATC - Sr. Schlotjes, Visser, C Bennett), evaluaron la rugosidad usando un teléfono inteligente llegando a la conclusión de que el rendimiento fue satisfactorio para un método de medición de clase 3/4.



### **IRI calculado**

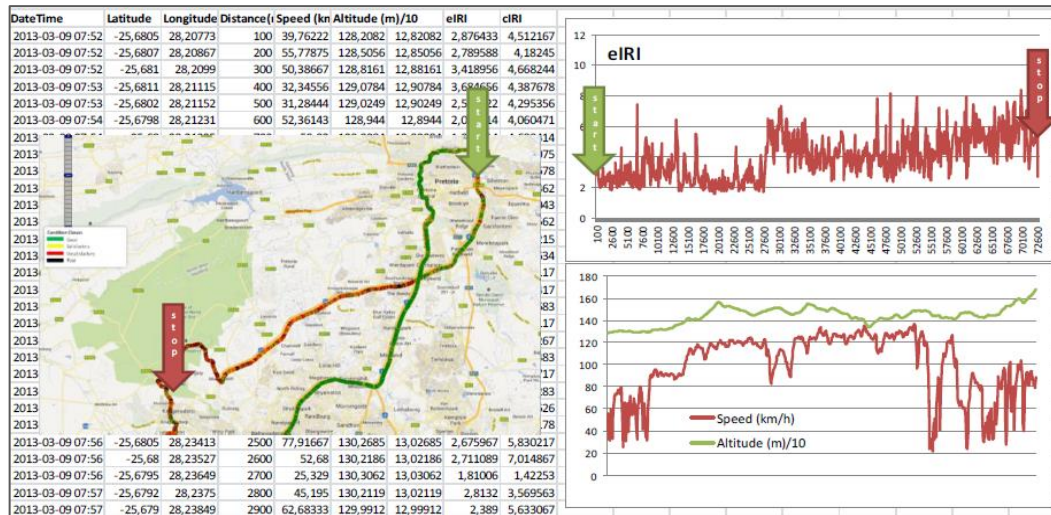
Con la información obtenida de las organizaciones y de la investigación interna, se desarrolló un nuevo parámetro denominado IRI calculado (cIRI). Las pruebas confirman que si se calibra correctamente, el cIRI puede satisfacer las demandas de la condición de carreteras para un método de medición de clase 2/3. Sin embargo se necesita una velocidad estable de 60 - 80 km/h. El modelo del cuarto de carro junto con los dos pesos (el amortiguado y el no amortiguado) y el movimiento del vehículo son simulados como datos de entrada. Asimismo, se estima el comportamiento que va a tener el marco y el cuerpo del vehículo en los datos recolectados por el acelerómetro, así como la calibración, que puede ser realizada fácilmente por el usuario.

La validación de los datos de salida del IRI ha sido realizada con el software ProVal (Visualización de perfiles y análisis). ProVal es la herramienta más ampliamente utilizado, validada y fiable para el análisis de perfil del pavimento, según estudios desarrolladores por el Grupo Transtec y sus clientes en estados unidos, por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y por el Programa de rendimiento a largo plazo del pavimento (LTPP), se observó que el cIRI no era exacta en carreteras con superficies rugosas (carreteras adoquinadas), pero al mismo tiempo los resultados fueron prometedores en carreteras de grava en Afganistán y Suecia. A partir de lo que hemos visto, es principalmente una cuestión de filtrar correctamente los datos para obtener resultados correctos.

### **Datos agregados**

El mapa en el internet es una buena herramienta para ver y analizar rápidamente los datos, además es necesario para obtener datos en secciones de 100 metros para producir gráficos. (Forslof, Lars; Jones, Hans, 2014)

Figura 26: 72 km de prueba en Sudáfrica - una parcela agregada de eIRI, velocidad y altitud.



Fuente: Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014.

Así, en la herramienta web, se pueden agregar datos al archivo como eIRI, cIRI, velocidad y altitud (grado) en secciones seleccionables de 25-200m, también añade la fecha y hora, las coordenadas (latitud, longitud) para cada fila. Los datos pueden importarse a hojas de cálculo o sistemas de gestión de mantenimiento de carreteras (RMMS).

### Uso profesional 2013-2014

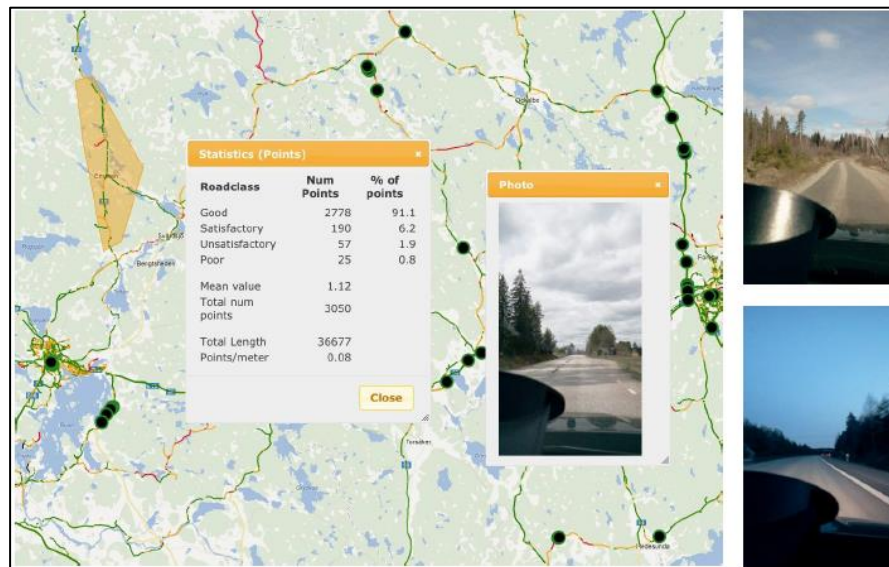
Durante el 2014 una encuesta a gran escala con 12 coches fue realizada por la asociación automovilística sueca (Motormännen). La organización realizó un estudio de más de 100.000 kilómetros de la red de carreteras de Suecia para identificar y señalar los defectos de la carretera. Se preparó un informe para vigilar las peores carreteras en Suecia. El proyecto fue parcialmente financiado por el Organismo Sueco de Administración del Transporte (Trafikverket).

### Uso de la cámara incorporada

Como hoy en día la mayoría de los smartphones tienen incorporados una cámara y GPS de alta calidad, Roadroid desarrolló una función para tomar fácilmente las fotos etiquetadas con GPS y la posición en el mapa. Las imágenes son a menudo de calidad aceptable, pero están sujetas a condiciones de luz y de montaje. (Forslof, Lars; Jones, Hans, 2014).



Figura 27: Ejemplos de fotos tomadas con los smartphones con cámara incorporada y el apoyo de la herramienta web.



Fuente: Forsl f, Lars; Jones, Hans, 2014.

Esto puede ser un apoyo valioso para inspecciones visuales, y también puede ser usado para capturar eventos dinámicos, tales como nieve, hielo u otras cuestiones de contrato de mantenimiento.

### Tipos de vehículos

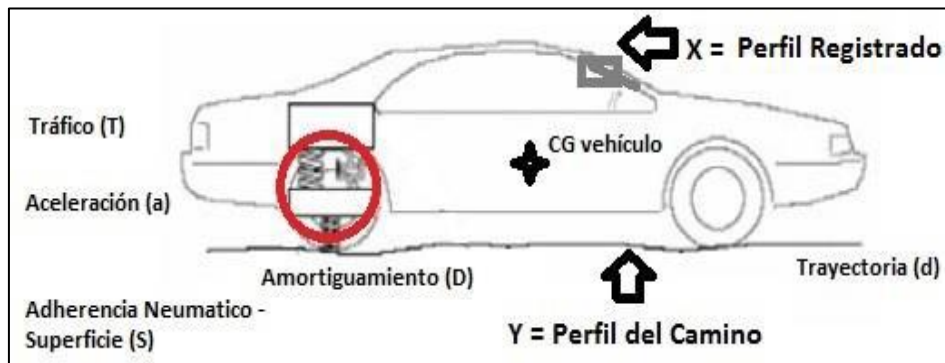
Los tipos de vehículos estipulados en la configuración del programa antes de iniciar el ensayo son:

- Vehículo pequeño/ furgoneta comercial
- Sedan grande/ Station wagon
- Camioneta Jeep 4WD/Hilux

### Variables de corrección

Muchas dudas surgen sobre la confiabilidad de los resultados, sabiendo que entre el perfil real del camino (Y) y el perfil registrado para el análisis de rugosidad con la aplicación Roadroid (X) existen diversos factores que pueden alterar los resultados. Estas condiciones externas son tratadas con las diferentes configuraciones solicitadas por el programa, a continuación se detalla en un esquema las condiciones a las que se ve expuesta el programa y se explica cómo corrige el programa cada una de ellas:

Figura 28: Esquema de factores que afectan al programa.



Fuente: Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014.

- ✓ La Trayectoria (d) seguida por el vehículo no afectará los resultados gracias a la calibración de la posición del equipo que solicita la aplicación, la cual nos permite solo leer las variación en el eje Z o eje vertical.
- ✓ El Amortiguamiento (D) será corregido según el tipo de vehículo a utilizar, una configuración previa que también exige el programa.
- ✓ Si bien la Adherencia Neumático – Superficie (S) se da por la textura del pavimento, las pequeñas vibraciones podrán desviar el cálculo certero, es por ello que el programa solicita mantener altas velocidades constantes además de existir una configuración de sensibilidad capaz de contrarrestarlas.
- ✓ Las Aceleraciones (a) generan una fuerza de arranque en el punto de contacto neumático – superficie, estas fuerzas por acción y reacción afectarán al vehículo respecto a su Centro de Gravedad (CG), este vector fuerza trasladado al CG del vehículo contendrá una componente vertical y una horizontal. Es la componente Vertical la que genera alteraciones en la medición pues genera vibraciones en el eje Z percibidas por el programa, es por ello que el programa exige mantener velocidades constantes.
- ✓ El Tráfico (T), más allá de los cambios de velocidad que representa, genera vibraciones en el vehículo donde se realiza la medición debido a factores externos como ruidos, motores de otros vehículos y más que serán registradas por el programa alterando las mediciones. (Forslöf, Lars; Jones, Hans, 2014).

### 2.2.12. Serviciabilidad de pavimentos

La serviciabilidad se define como la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento, por tal razón es que la opinión de ellos es la que debe ser medida para calificar la serviciabilidad.

Se definió una escala de evaluación de 0 a 5. En ella una evaluación con nota 5 significa una superficie perfecta, mientras que una nota 0 significa intransitable. La siguiente tabla muestra la escala de evaluación. (Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008).

Tabla 11: Escala de calificaciones de la serviciabilidad según AASHTO 1962.

CALIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
NUMÉRICA	VERBAL	
5.0 – 4.0	Muy buena	Solo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son los suficientemente suaves y sin deterioro para calificar en sus categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasifican como muy buenos.
4.0 – 3.0	Buena	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy Buenos", entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un nivel de deterioro superficial, como desconches y fisuras menores.
3.0 – 2.0	Regular	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en los pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamientos, parches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamientos, escalonamiento y pumping.
2.0 – 1.0	Mala	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde puedan afectar la velocidad del tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y ahuellamientos; y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconche de juntas escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo.
1.0 – 0.0	Muy mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75 % o más de la superficie.

Fuente: Badilla, Elizondo, & Barrantes, 2008.

### 2.2.13. Índice de Serviabilidad Presente (PSI)

El PSI por sus siglas en inglés (Present Serviability Índex) de un pavimento, es el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo; en otras palabras a un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviabilidad inicial que depende del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, de 5 (perfecto); y un pavimento en franco deterioro o con un índice de serviabilidad final que depende de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del proyectista, con un valor de 0 (pésimas condiciones).

El índice de serviabilidad de un pavimento, es un valor de apreciación con el cual se evalúan las condiciones de deterioro o confort de la superficie de rodadura de un pavimento; actualmente para medir este deterioro se utiliza el IRI, índice internacional de rugosidad (International Roughness Índex).

Y para correlacionar el índice de serviabilidad y el IRI, se utilizan ecuaciones. (Coronado Iturbide, 2002).

### 2.2.14. Relaciones entre PSI e IRI

Para evaluar la serviabilidad del pavimento se emplea el parámetro denominado Índice de Serviabilidad Presente (PSI), el cual establece la condición funcional o capacidad de servicio actual del pavimento, conceptos que fueron desarrollados por el cuerpo técnico del Ensayo Vial AASHO, en 1957. Los valores del PSI se evalúan mediante una escala que va de 0 a 5, en donde la condición óptima corresponde al máximo valor.

En el Perú, la determinación analítica del PSI se efectúa utilizando la expresión establecida por Sayers, que relaciona la Rugosidad con el Índice de Serviabilidad. La expresión, es una correlación desarrollada con la base de datos establecida en el Ensayo Internacional sobre Rugosidad de Caminos, realizado en Brasil en 1982.

Donde:

$$IRI = 5.5 \operatorname{Ln} \left( \frac{5.0}{PSI} \right)$$



IRI: Rugosidad, IRI (International Roughness Index)

PSI: Índice de Serviciabilidad Presente

La Transitabilidad de la vía, es decir, la adjetivación de la calidad de servicio que brinda en un momento determinado el pavimento, se evalúa en función de los valores de PSI calculados, de acuerdo a los siguientes rangos: (Del Águila Rodríguez, 1999).

Tabla 12: Escala de serviciabilidad

<b>PSI</b>	<b>TRANSITABILIDAD</b>
0 - 1	MUY MALA
1 - 2	MALA
2 - 3	REGULAR
3 - 4	BUENA
4 - 5	MUY BUENA

Fuente: Del Águila Rodríguez, 1999.

Se pueden establecer rangos para el IRI, cuyos límites van a estar determinados por los correspondientes valores del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), los cuales ya fueron definidos por la AASHO en 1962. (Barrantes Jiménez, 2011).

Tabla 13: Rangos y Valores característicos de IRI en función del PSI.

Pavimentos Flexibles (Modelo de AASHO)			Pavimentos Rígidos (Modelo de AASHO)			Clasificación	Descripción AASHO
Valores de PSI	Valores de IRI	Rangos de IRI	Valores de PSI	Valores de IRI	Rangos de IRI		
5.0	0.0	0 - 1.0	5.0	0	0 - 1.4	Muy Buena	Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficiente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasificaría como muy buenos.
4.2	0.8		4.5	0.97			
4.0	1.0		4.0	1.4			
3.0	1.9	1.0 - 1.9	3.0	2.3	1.4 - 2.3	Buena	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy Buenos", entregan un manejo de primera clase y muetsran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desprendimientos y fisuras menores.
2.5	2.6	1,9 - 3,6	2.5	2.9	2,3 - 3,6	Regular	En esta categoría la calidad del manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y pueden presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamiento, parches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamiento, escalonamiento y bombeo de finos.
2.0	3.6		2.0	3.6			
1.5	4.9	3,6 - 6,4	1.5	4.6	3,6 - 6,0	Mala	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y ahuellamiento, y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconches de juntas, escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo.
1.0	6.4		1.0	6.0			
0.0	9.5	> 6,4	0.0	11.2	> 6,0	Muy Mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.

Fuente: Barrantes Jiménez, 2011.

### 2.2.15. Singularidades

Singularidad es “Cualquier alteración del perfil Longitudinal del camino que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. Entre ellas se pueden citar puentes, badenes, tapas de alcantarillas, cuñas, cruces de calles y otras, que por diseño geométrico alteren el perfil del camino”. (Caro Rivera & Peña Castro, 2012).

Para el caso de esta investigación, las singularidades que se encontró a lo largo de la vía fueron bandas transversales de alerta, tachas reflectivas y rieles de tren. A continuación algunas imágenes.

Figura 29: Tachas reflectivas en la carretera Cusco – Urcos (Huaró).



Fuente: Propia

Figura 30: Bandas transversales de alerta en la carretera Cusco – Urcos (desvío Huasao).



Fuente: Propia

Figura 31: Cruce de riel en Saylla.



Fuente: Propia

## 2.2.16. Análisis de las ventajas

### 2.2.16.1. Definición de Ventaja

Una ventaja es una superioridad o una mejoría de algo o alguien respecto de otra cosa o persona. Puede definirse como una condición favorable que algo o alguien tiene. (Pérez Porto & Merino, 2016).

La aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN son equipos con diferentes características, por ello se realizó un análisis a cerca del rendimiento y el costo usando los datos de este proyecto.

#### a) Rendimiento

La recopilación de datos con el Rugosímetro de MERLIN de los 31.20km de longitud de la carretera en estudio; se realizó con el apoyo de 4 personas durante 6 días, trabajando 7 horas diarias, lo que hace un total de 42 horas de trabajo continuo.

Por otro lado, la toma de datos con la aplicación Roadroid de los 31.20km de longitud que tiene la carretera en estudio, se realizó con 2 personas, uno el chofer que lleva el carro a una velocidad alrededor de 80km/h y otro el operador del Smartphone, realizándose el trabajo en 25 minutos (0.42 horas). A continuación se muestra una tabla comparativa con los datos de este proyecto con respecto al rendimiento de estos equipos.



Tabla 14: Cálculo del rendimiento.

	Aplicación Roadroid	Rugosímetro MERLIN
Cuadrilla	1.00	1.00
Número de personas	2.00	4.00
Longitud de muestreo (Km)	31.20	31.20
Horas de muestreo	0.42	42.00
<b>Rendimiento (Km/h)</b>	<b>74.88</b>	<b>0.74</b>

Fuente: Propio


En la tabla se observa que con la aplicación Roadroid se pueden ensayar 74.88km de carretera en una hora, mientras que con el Rugosímetro de MERLIN sólo 0.74km/h; es decir 740m de carretera en una hora.

**b) Costo**

La compañía Roadroid presentó la siguiente cotización para la adquisición de la aplicación. Según la tabla 15, suponiendo el caso más crítico, que representa la adquisición del hardware más el software, por doce (12) meses, el costo será de 650 dólares, siendo un aproximado de 2,184 soles.

Tabla 15: Cotización de la aplicación Roadroid más equipo.

**Price examples – Roadroid**  
 Cloud based systems for Roughness data and Road inventory's  
 2014-12-17




Items	Demo RDC+RI app 2 months	Example 1 Inventory 12 months	Example 2 Roughness 12 months	Example 3 RIU+RDCU 12 months	Example 4 Inventory 24 months	Example 5 RIU+RDCU 36 months	Example 6 Roughness 48 months
<b>Road inventory unit (RIU)</b> For manual/visual assessment. Logging of +100 road parameters with GPS coordinates, altitude and speed. <b>Software:</b> Installed and configured, software updates during the license period.	Download and installation at your own Android.	1	0	1	4	5	10
<b>Road data management system - Inventory (RDMS-I)</b> Login to web tool, viewing of inventory data on map. 100+ layer monitoring. Section aggregation and spatial data creator (make shape files from your data).	Uploads and login to a demo account.	1	0	1	4	5	10
<b>Roughness data collection units (RDCU):</b> <b>Hardware:</b> Android unit, including car mounting devices <b>Software:</b> Installed and configured.	No support!	0	1	1	0	5	0
<b>Road data management system – Roughness (RDMS-R)</b> Login to web tool. Viewing of data on map. Photo and layer monitoring. Polygon analyze tool, section aggregation and spatial data creator (make shape files from your data).	No hardware.	0	1	1	0	5	0
<b>Summary cost per unit/month</b>	<b>FREE</b>	<b>585</b>	<b>650</b>	<b>450</b>	<b>200</b>	<b>175</b>	<b>190</b>

PRICES ARE IN US DOLLAR, EXCLUSIVE OF ANY LOCAL TAXES/FEES


**Notes:**

- Prices are including data collection units include hardware with installed and configured software. Broken hardware can be replaced at a cost of 500 USD/unit.
- Updates of the data collection software and the web data management service are provided during the binding period.
- Custom support or consulting services, such as special reports or data exports, can be supplied on demand at an hourly rate.
- On-site training and workshops by our professionals can be quoted on demand.
- Prices are based on full payment at delivery. Annual payments in advance are offered at a 10% surcharge. Monthly payments are possible at 15% surcharge.

Lars Forslöf, CEO/Founder



www.roadroid.com



Fuente: [www.roadroid.com](http://www.roadroid.com)

Pero, en esta investigación se empleó la aplicación Roadroid por un día, lo que significa un costo de 1.66 dólares siendo un aproximado de 6.08 soles, y

el Rugosímetro de MERLIN se utilizó por 6 días. Debido a lo cual, se presenta un análisis de costos con datos de este proyecto.

Tabla 16: Cálculo del costo para la recolección de datos con el Rugosímetro de MERLIN.

Rugosímetro MERLIN					
Equipo	Unidad	Cantidad	N° de días	Costo Unitario	Monto
Alquiler del Rugosímetro	día	1	6	80	480
Vehículo	día	1	6	50	300
<b>Total equipo</b>					<b>780</b>
Mano de obra	Unidad	Cantidad	N° de días	Costo Unitario	Monto
Operador	día/hombre	1	6	50	300
Ayudante	día/hombre	3	6	50	900
<b>Total mano de obra</b>					<b>1200</b>
				<b>Total equipo</b>	780
				<b>Total mano de obra</b>	1200
				<b>TOTAL</b>	<b>S/. 1,980.00</b>

Fuente: Propia

Tabla 17: Cálculo del costo para la recolección de datos con la aplicación Roadroid.

Aplicación Roadroid					
Equipo	Unidad	Cantidad	N° de días	Costo Unitario	Monto
Costo de la Aplicación Roadroid	día	1	1	6.08	6.08
Vehículo	día	1	1	50	50
<b>Total equipo</b>					<b>56.08</b>
Mano de obra	Unidad	Cantidad	N° de días	Costo Unitario	Monto
Chofer	día/hombre	1	1	50	50
Operador del Smartphone	día/hombre	1	1	50	50
<b>Total mano de obra</b>					<b>100</b>
				<b>Total equipo</b>	56.08
				<b>Total mano de obra</b>	100
				<b>TOTAL</b>	<b>S/. 156.08</b>

Fuente: Propia

Se concluye que para la realización de los ensayos en esta investigación se gastó con la aplicación Roadroid 156.08 soles; mientras que con el Rugosímetro de MERLIN 1,980 soles, encontrando un margen positivo de rentabilidad de 92.12%.



## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1. Metodología de la Investigación**

#### **3.1.1. Tipo de Investigación**

Considerando que el procedimiento de la presente tesis es medir la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco - Urcos con dos equipos distintos y luego comparar los resultados obtenidos, se establece que el proyecto se encuentra enmarcado dentro de un tipo de Investigación Cuantitativa.

#### **3.1.2. Nivel de la Investigación**

Esta investigación alcanza un nivel de Investigación Descriptiva, porque cuantifica la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco – Urcos; y luego describe el estado de la carretera de la manera más precisa posible, además esta investigación sigue los criterios de (Tamayo y Tamayo, 2003), que define la investigación descriptiva como la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o procesos de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre como una persona, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente.

#### **3.1.3. Método de la Investigación**

El método considerado para esta investigación es el Método Hipotético - Deductivo, porque se han formulado hipótesis o alternativas de solución a cada uno de los problemas planteados, para después de concluir la investigación; ratificar o no dichas hipótesis a través de deducciones.

### **3.2. Diseño de la Investigación**

#### **3.2.1. Diseño Metodológico**

En esta investigación las variables sólo han sido observadas en su contexto real sin alterarlas intencionalmente, por lo tanto esta investigación se enmarca dentro de una investigación No Experimental del tipo Transversal, además según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006),

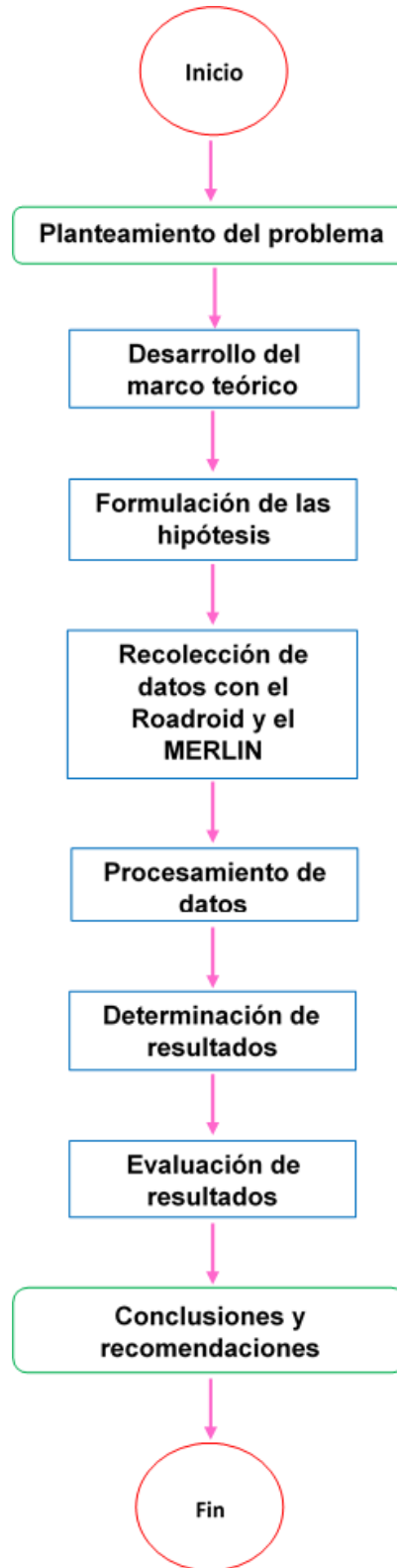


define la investigación no experimental como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables; es decir, se trata de estudios donde no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para después analizarlos.

Por otro lado, también se ha considerado que es del tipo Transversal; porque la recolección de datos se ha realizado en un solo momento; es decir entre septiembre y octubre de 2016.

### **3.2.2. Diseño de Ingeniería**

Figura 32: Diagrama de flujo de la tesis.



Fuente: Propia



### **3.3. Población y Muestra**

#### **3.3.1. Población**

##### **3.3.1.1. Descripción de la población**

La carpeta de rodadura del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, que recorre los lugares de Saylla, Oropesa, Huacarpay, Piñipampa, Andahuaylillas y Huaró.

##### **3.3.1.2. Cuantificación de la población**

La carpeta de rodadura del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, que recorre los lugares de Saylla, Oropesa, Huacarpay, Piñipampa, Andahuaylillas y Huaró; con un total de 31.20km de longitud.

#### **3.3.2. Muestra**

##### **3.3.2.1. Descripción de la muestra**

La carpeta de rodadura del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, que recorre los lugares de Saylla, Oropesa, Huacarpay, Piñipampa, Andahuaylillas y Huaró.

##### **3.3.2.2. Cuantificación de la muestra**

La carpeta de rodadura del pavimento de la carretera Cusco – Urcos, que recorre los lugares de Saylla, Oropesa, Huacarpay, Piñipampa, Andahuaylillas y Huaró; con un total de 31.20km de longitud.

##### **3.3.2.3. Método de muestreo**

Considerando que esta investigación se realiza siguiendo los parámetros que indican las normas nacionales e internacionales vigentes para medir la regularidad superficial de pavimentos, como la recolección de datos con equipos específicos, según se señala en el Capítulo II, se establece que la muestra utilizada en la presente investigación es del tipo No Probabilístico; además según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006), señalan que, las muestras no probabilísticas, pueden también llamarse muestras dirigidas, pues la elección de sujetos u objetos de estudio depende

del criterio del investigador. Asimismo en las muestras de este tipo, la elección de los sujetos no depende de que todos tengan la misma probabilidad de ser elegidos, sino de la decisión de un investigador o grupo de personas que recolectan los datos.

#### 3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra

La muestra será medida en su totalidad, evaluándose los 31.20km de carretera.

#### 3.3.3. Criterios de Inclusión

La presente investigación involucra la carpeta de rodadura del pavimento de la carretera Cusco – Urcos desde el Km 984 hasta el Km 1015+200, ubicada en la región Cusco, asimismo el uso de la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN para la toma de datos de la regularidad superficial del pavimento.

### 3.4. Instrumentos

#### 3.4.1. Instrumentos Metodológicos



Los instrumentos utilizados para la recolección de datos en esta investigación son formatos de elaboración propia, que se elaboraron de acuerdo a los ensayos que se han realizado en campo, como siguen a continuación:

Tabla 18: Formato de presentación de datos de la aplicación Roadroid.

N°	DateTime	Latitude	Longitude	Distance (m)	Speed (km/h)	Altitude (m)	eIRI	cIRI	RoadId

Fuente: [www.roadroid.com](http://www.roadroid.com)

Tabla 19: Formato de campo para toma de datos con el Rugosímetro de MERLIN

	<p><b>Tesis: "DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CUSCO-URCOS, USANDO TELÉFONOS INTELIGENTES Y EL RUGOSÍMETRO DE MERLIN - 2016"</b></p>										
<b>Ensayos con el Rugosímetro de MERLIN</b>											
<p><b>Carretera:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p> <p><b>Sector:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p> <p><b>Fecha:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p> <p><b>Hora:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p>	<p><b>Ensayo N°:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p> <p><b>KM:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p> <p><b>Progresiva:</b> <input style="width: 95%;" type="text"/></p>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1											<b>Tipo de pavimento:</b>
2											Afirmado
3											Base granular
4											Base imprimada
5											Tratamiento bicapa
6											Carpeta en frío
7											Carpeta en caliente
8											Recapeo asfáltico
9											Sello
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
<b>Observaciones:</b>											

Fuente: Propia





Tabla 20: Formato de campo para el aforo vehicular.

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO		Tesis: "DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CUSCO-URCOS, USANDO TELÉFONOS INTELIGENTES Y EL RUGOSÍMETRO DE MERLIN - 2016"																INSTITUTO TECNOLÓGICO PROFESIONAL DE CUSCO			
Formato de aforo vehicular																					
TRAMO DE LA CARRETERA																		ESTACIÓN			
SENTIDO																		DÍA			
OPERADOR																		FECHA			
HORA	AUTO	STATION WAGON	CAMIONETAS			MICRO	BUS		CAMION			SEMI TRAYLER				TRAYLER					
			PICK UP	PANEL	RURAL Combi		2 E	>=3 E	2 E	3 E	4 E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>= 3S3	2T2	2T3	3T2	>=3T3		

Fuente: Propia

### 3.4.2. Instrumentos de Ingeniería

Los instrumentos de ingeniería utilizados para esta investigación son:

- ✚ Smartphone
- ✚ Rugosímetro de MERLIN
- ✚ Método Sayers.

### 3.5. Procedimientos de Recolección de Datos

Se recolectaron datos de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco - Urcos, usando primero la aplicación Roadroid y segundo usando el Rugosímetro de MERLIN, para así cumplir con los objetivos trazados en esta investigación.

#### 3.5.1. Recolección de datos con la aplicación Roadroid

##### 3.5.1.1. Planificación

La planificación es muy importante antes de realizar la toma de datos, debido a que se debe mantener una velocidad de 20 a 80 km/h, rango recomendado para obtener buenos resultados. Por lo tanto, se tomó la decisión de realizar la toma de datos durante la media noche del día sábado 01 de octubre de 2016, recorriendo desde Cusco hasta Urcos y tratando de mantener una velocidad alrededor de 80km/h.

Las herramientas empleadas para llevar acabo la recolección de datos fueron:

- Un automóvil Modelo PICANTO, marca KIA con año de fabricación 2015, considerado para la aplicación Roadroid como un vehículo pequeño.

Figura 33: Vehículo utilizado para el ensayo.



Fuente: Propia

- Un celular Samsung Galaxy S6 con su respectivo sujetador.

Figura 34: Smartphone empleado en el ensayo.



Fuente: Propia

- La aplicación Roadroid versión 1.7.5

Figura 35: Ícono Roadroid



Fuente: [www.roadroid.com](http://www.roadroid.com)

### 3.5.1.2. Recopilación de datos

El ensayo se realizó desde el Km 984; culminando en el Km 1015+200 de la Red Vial Nacional.

Figura 36: Recolección de datos con la aplicación Roadroid con supervisión del Ingeniero Asesor de la Tesis.



Fuente: Propia

Para recolectar los datos con la aplicación Roadroid se puede seguir las indicaciones que se presentan en el manual de uso del mismo, pero a continuación se presenta el procedimiento del ensayo en esta investigación.

- a) Contar con un celular Samsung Galaxy S6.

Figura 37: Dispositivo utilizado en la tesis.



Fuente: Propia

- b) Comprar la licencia de la aplicación Roadroid mediante la empresa Roadroid.
- c) Registrar el número de IMEI del celular con la empresa.

- d) Crear una cuenta para acceder a la página <http://www.roadroid.com/Account/Login>, donde se encuentran todos los archivos subidos de las carreteras ensayadas.
- e) Instalar el sujetador del celular en la ventana delantera (parabrisas) del vehículo, de modo que se encuentre fija, estable y fácil de alcanzar con las manos.

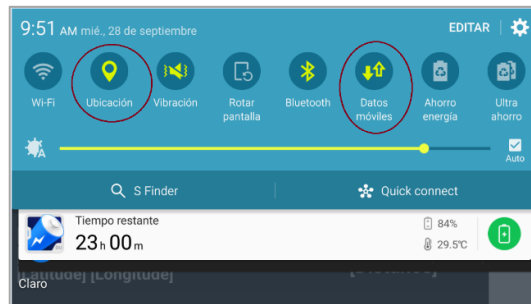
Figura 38: Sujetador del teléfono.



Fuente: Propia

- f) Colocar el teléfono de manera horizontal (esta es la posición más adecuada para el uso de la función GPS).

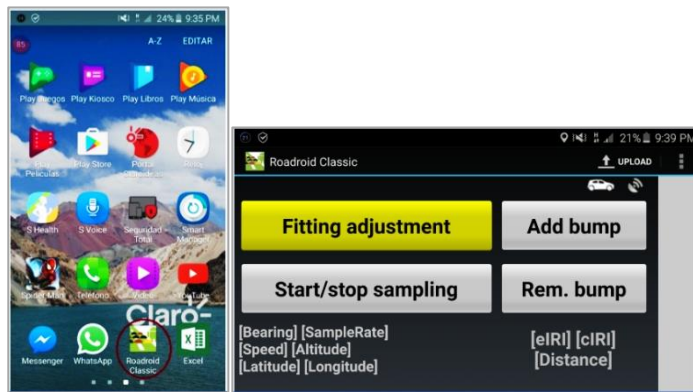
Figura 39: Activación del GPS



Fuente: Propia

- g) Abrir la aplicación Roadroid pulsando el ícono del programa (izquierda) y mostrará la pantalla (derecha):

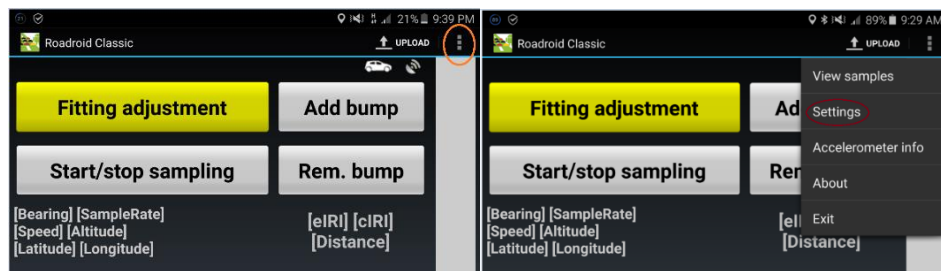
Figura 40: Izquierda, ícono a presionar para iniciar el programa. Derecha, pantalla mostrada.



Fuente: Propia

h) Luego, pulsar los tres puntos (izquierda) y dar clic en “Settings” (derecha).

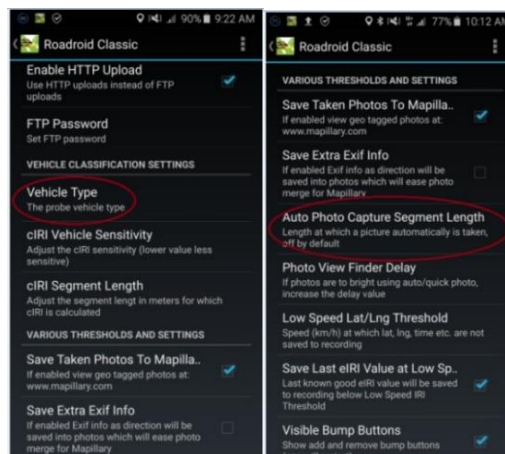
Figura 41: Configuración para el tipo de vehículo.



Fuente: Propia

i) Se abre la siguiente pantalla, donde se busca “vehicle type”, asimismo se puede elegir la opción “Auto Photo Capture Segment Length” para tomar fotos instantáneas durante el recorrido.

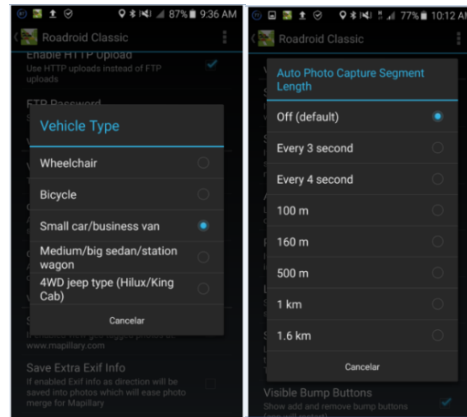
Figura 42: Configuración para el tipo de vehículo y fotos.



Fuente: Propia

- j) Pulsando en “vehicle type” aparecerá la siguiente pantalla, donde se escogió la opción “Small car/business van”, debido a que en esta tesis se usó un auto pequeño. También se puede escoger la longitud para configurar la toma de fotos.

Figura 43: Configuración para el tipo de vehículo y fotos.



Fuente: Propia

- k) Luego volver con el botón de regreso del celular y aparecerá la siguiente pantalla, donde se pulsa la opción “Fitting adjustment”.

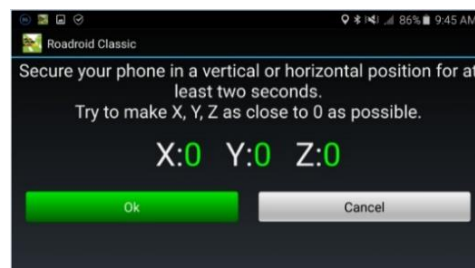
Figura 44: Procedimiento de calibración de móvil.



Fuente: Propia

- l) Luego muestra la siguiente pantalla, donde se calibra la posición del equipo cuando las coordenadas X, Y, Z están en cero o hasta que el “OK” se vuelva verde.

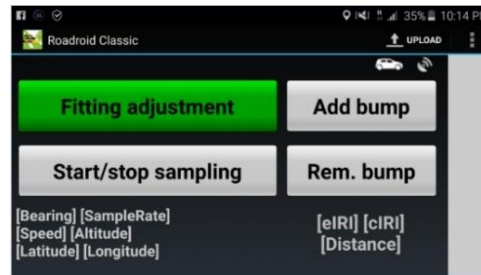
Figura 45: Calibración de la posición del móvil.



Fuente: Propia

- m) Se observa que la palabra “Fitting adjustment” cambió de color amarillo (figura 44) a verde.

Figura 46: Calibración del móvil.



Fuente: Propia

- n) Luego, presionar “Start/stop sampling”.

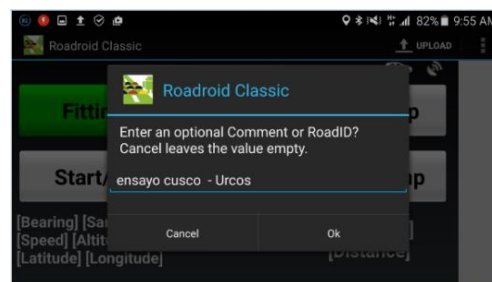
Figura 47: Procedimiento para tomar datos.



Fuente: Propia

- o) Y aparece la siguiente ventana, donde se escribe el nombre de la carretera a ensayar. Ojo, el vehículo debe estar a una velocidad mínima de 60km/h antes de pulsar OK.

Figura 48: Procedimiento para tomar datos.

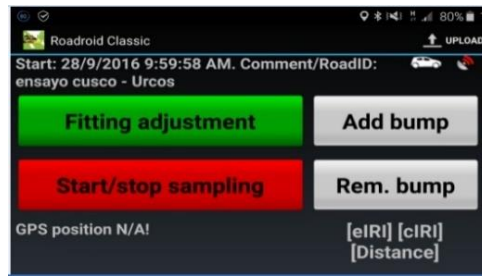


Fuente: Propia

- p) Luego pulsar “OK”, y se observa que ya se inició con la toma de datos.



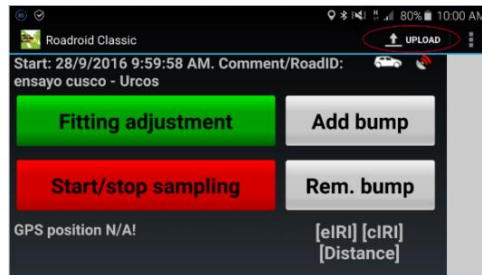
Figura 49: Toma de datos.



Fuente: Propia

- q) Una vez culminado la toma de datos, presionar la opción “Start/stop samplig” para detener el ensayo.
- r) Para proceder a cargar los datos se necesita tener conexión a internet.
- s) Luego, pulsar la opción “Upload”, como se muestra.

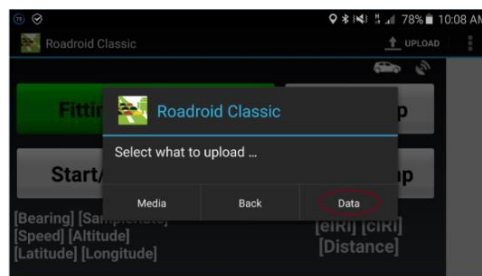
Figura 50: Subir datos.



Fuente: Propia

- t) Y aparecerá la siguiente ventana, donde se elige la opción “Data” para subir los datos del IRI; y “Media” para subir las fotos de la carretera.

Figura 51: Subir datos.



Fuente: Propia

- u) Los datos tomados se subirán a la página [www.roadroid.com](http://www.roadroid.com), el cual puede demorar 1 hora aproximadamente dependiendo del tamaño del archivo.

- v) Para descargar los datos; se ingresa a la página [www.roadriod.com](http://www.roadriod.com), con la cuenta y contraseña respectiva.

Figura 52: Descarga de datos.



Fuente: Propia

- w) Vamos a la opción “Import History”, donde se observa los datos cargados de la carretera ensayada.

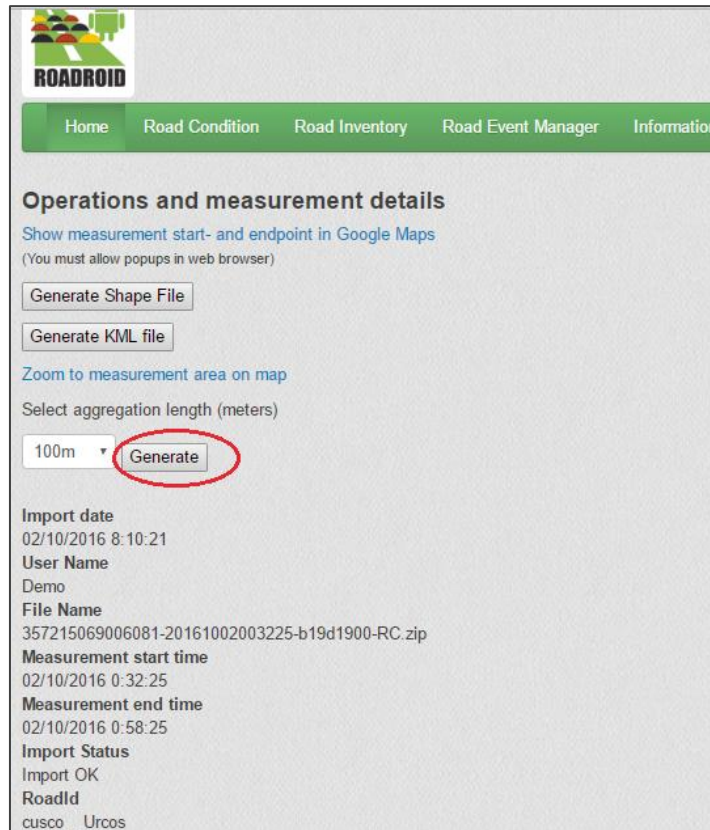
Figura 53: Descarga de datos.

Import date	User Name	Unit Name	File Name	Import Status	Road Id	Measurement Length (m)	Type	
02/10/2016 8:40:20	Demo	Deysi	357215069006081-20161002010059-4f39d8ef-RC.zip	Import OK	Urcos_cusco	32249	RoadCondition	<a href="#">Details</a>
02/10/2016 8:10:21	Demo	Deysi	357215069006081-20161002003225-b19d1900-RC.zip	Import OK	cusco_Urcos	32347	RoadCondition	<a href="#">Details</a>

Fuente: Propia

- x) Luego de hacer clic en “Details”, aparecerá la siguiente imagen, donde se hace clic en la opción “Generate”, y automáticamente se descargará el archivo en formato .txt.

Figura 54: Descarga de datos



Fuente: Propia

y) Por otro lado, se puede visualizar en el mapa, la condición de la carretera en estudio, haciendo clic en “Zoom to measurement area on map” de la figura anterior; y aparecerá la siguiente figura.

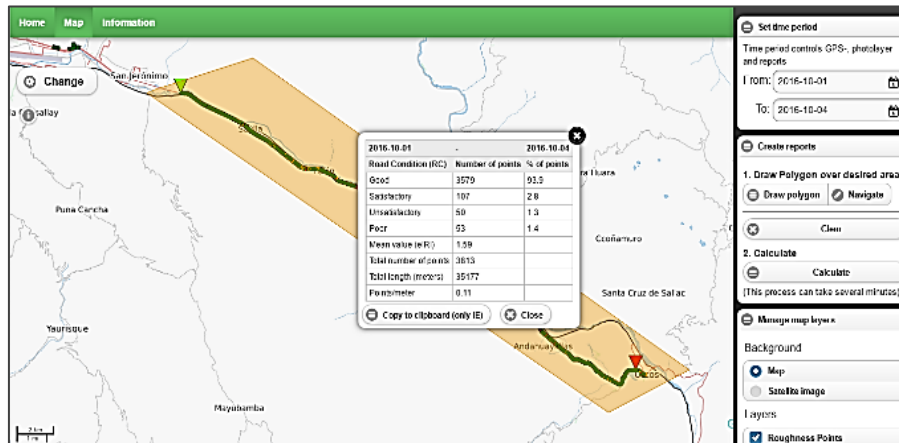
Figura 55: Visualización del estado de la carretera.



Fuente: Propia

z) Además de otras funciones, en este caso haciendo clic en “Change” pulsamos “Create reports”, luego “draw polygon” dibujar el polígono y hacer clic en “calculate”, se obtendrá los resultados de la carretera.

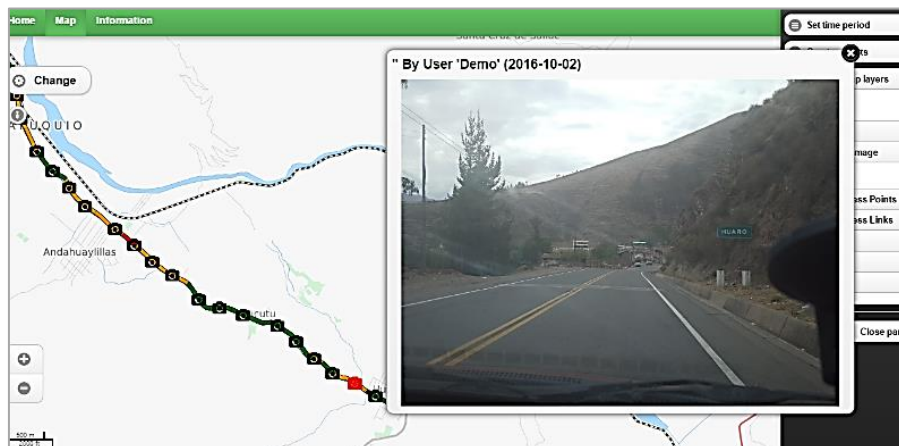
Figura 56: Visualización de resultados del eIRI.



Fuente: Propia

Finalmente esta aplicación tiene la opción de mostrar fotos instantáneas que realiza en la carretera durante la toma de datos, en este caso hacer clic en “change”, luego en “Manage map layers” y “photos”, como se muestra:

Figura 57: Visualización de las fotos de la carretera tomada por el Roadroid.



Fuente: Propia

Los datos descargados de la página <http://www.roadroid.com>, automáticamente son:

Tabla 21: Datos que proporciona la aplicación Roadroid en formato “.txt”

357215069006081-20161002003225-b19d1900-RC_aggr.txt: Bloc de notas											
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda							
cIRI-sensitivity: 1,5	DateTime	Latitude	Longitude	Distance(m)	Speed (km/h)	Altitude (m)	Grade (%)	eIRI	cIRI	RoadId	
	02/10/2016 0:32:25	-13,553166	-71,862965	100	65,04	3242,13	0	1,79	0,46	cusco	
	02/10/2016 0:32:30	-13,5532905624697	-71,8620627627024	200	66,72	3239,65	-2,48	1,95	2,78	cusco	
	02/10/2016 0:32:35	-13,5534086046306	-71,8612704086484	300	68,31	3237,33	-2,32	1,28	5,25	cusco	
	02/10/2016 0:32:41	-13,5536099551906	-71,8600765958303	400	69,47	3235,46	-1,87	1,65	3,38	cusco	
	02/10/2016 0:32:46	-13,5538100569769	-71,8592516565658	500	68,42	3233,48	-1,98	1,86	3,91	cusco	
	02/10/2016 0:32:51	-13,5541259623758	-71,8585032681342	600	68,67	3231,68	-1,79	1,26	3,5	cusco	
	02/10/2016 0:32:56	-13,5545673553829	-71,8577846433593	700	70,99	3231,2	-0,49	1,23	2,68	cusco	
	02/10/2016 0:33:01	-13,5550695828319	-71,8570309531999	800	73,35	3231,76	0,56	1,25	2,83	cusco	
	02/10/2016 0:33:06	-13,5556151316645	-71,856246853539	900	75,87	3231,89	0,13	1,3	2,97	cusco	
	02/10/2016 0:33:11	-13,5561953800249	-71,855400432464	1000	78,4	3231,68	-0,2	1,23	3,3	cusco	
	02/10/2016 0:33:15	-13,5565838672507	-71,8548357481425	1100	80,43	3231,07	-0,62	1,35	3,21	cusco	
	02/10/2016 0:33:20	-13,5572272751029	-71,8539007237707	1200	81,46	3230,17	-0,9	1,33	2,64	cusco	
	02/10/2016 0:33:24	-13,5576417850014	-71,8532925765717	1300	81,16	3228,09	-2,08	1,37	2,64	cusco	
	02/10/2016 0:33:29	-13,5582063031681	-71,8522787765277	1400	80,15	3225,22	-2,87	1,48	2,94	cusco	
	02/10/2016 0:33:33	-13,5585065385742	-71,8516458330893	1500	77,09	3222,12	-3,1	1,23	3,99	cusco	
	02/10/2016 0:33:38	-13,5589374499089	-71,8507031229854	1600	74,58	3219,54	-2,58	1,27	3,06	cusco	
	02/10/2016 0:33:43	-13,5593424701184	-71,8498205078173	1700	73,7	3217,56	-1,98	1,07	2,64	cusco	
	02/10/2016 0:33:48	-13,5597409493964	-71,8489511109386	1800	72,76	3215,91	-1,65	1,28	2,6	cusco	
	02/10/2016 0:33:53	-13,5601291505877	-71,8481091058834	1900	71,56	3214,62	-1,3	1,3	2,67	cusco	
	02/10/2016 0:33:58	-13,5605070717126	-71,8472930012592	2000	71,1	3213,53	-1,08	1,09	2,66	cusco	
	02/10/2016 0:34:03	-13,5608797209363	-71,846482139441	2100	71,18	3212,56	-0,97	1,13	2,42	cusco	
	02/10/2016 0:34:08	-13,5612558872859	-71,8456626701016	2200	71,72	3211,57	-1	1,11	2,19	cusco	
	02/10/2016 0:34:13	-13,5616378212859	-71,8448335387688	2300	72,21	3210,52	-1,05	1,39	2,42	cusco	
	02/10/2016 0:34:18	-13,562025956621	-71,8439905096661	2400	71,27	3209,72	-0,79	1,49	2,49	cusco	
	02/10/2016 0:34:23	-13,562399759329	-71,8431768030584	2500	69,93	3209,25	-0,47	0,97	5,69	cusco	
	02/10/2016 0:34:28	-13,5627582341097	-71,8423903740867	2600	68,82	3208,6	-0,65	1,07	3,08	cusco	
	02/10/2016 0:34:33	-13,5631063861452	-71,8416298354666	2700	67,62	3207,51	-1,09	1,04	2,2	cusco	

Fuente: Propia

### 3.5.2. Recolección de datos con el Rugosímetro de MERLIN

#### 3.5.2.1. Planificación

La planificación es muy importante antes de realizar la toma de datos, ya que para operar este equipo, es necesario que la vía no tenga tráfico; porque perjudicaría la toma de datos, por tal motivo se decidió tomar los datos durante la noche a partir de las 10:00pm hasta las 5:00am. Iniciando con el ensayo el 10 de octubre de 2016.

#### 3.5.2.2. Toma de datos

Para tomar los datos se siguieron los siguientes pasos:

- Se inicia con la calibración del equipo, ubicándolo en una superficie horizontal para luego ajustar sus puntos de apoyo hasta que el puntero marque 25.

Figura 58: Proceso de calibración



Fuente: Propia

- b) Colocar al equipo en el punto de inicio del ensayo (Km 984) y leer la primera lectura ( $L_i$ ), después la otra lectura con la pastilla de calibración colocada ( $L_f$ ), este proceso es para determinar el factor de corrección.

Figura 59: Colocación de la pastilla de calibración.



Fuente: Propia

- c) Para llevar a cabo el ensayo se necesitan cuatro personas una que conduce el equipo, otra que anota las lecturas y dos que apoyan en la seguridad.

Figura 60: Operando el Rugosímetro de MERLIN.



Fuente: Propia

Figura 61: Equipo de apoyo para toma de datos con el Rugosímetro de MERLIN.



Fuente: Propia

- d) Antes de iniciar cada ensayo, el equipo se debe calibrar usando la pastilla (figura 62) para determinar el factor de corrección.

Figura 62: Pastilla de calibración



Fuente: Propia

- e) El ensayo consiste en que el operador toma el equipo por las manijas, elevándolo y desplazándolo hasta que la rueda de una vuelta completa; luego el equipo se apoya en sus 3 puntos fijos (la rueda, el apoyo fijo trasero y el brazo lateral estabilizador) para luego recién leer la posición que adopta el puntero y anotar en el formato de campo. Así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas que admite el formato. Se recomienda colocar una marca visible en la llanta para que facilite ver la vuelta completa de la llanta.

Figura 63: Izquierda, toma de datos con el Rugosímetro de MERLIN.  
Derecha, marca visible en la llanta.



Fuente: Propia

- f) Del formato (tabla 19), cada casillero indica una vuelta completa de la rueda del Rugosímetro de MERLIN, tomando un total de 200 datos en una longitud aproximada de 400m en cada ensayo. Los datos se llenan de arriba para abajo y de izquierda a derecha y toda observación es apuntada.

- g) Se midió toda la carretera en forma continua; y se obtuvo 78 formatos, de los cuales a continuación se presenta el ensayo N° 01 y los otros ensayos se encuentran en **Anexos 2**.

Tabla 22: Ensayo N° 01 con el Rugosímetro de MERLIN.

<b>Tesis: "DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CUSCO-URCOS, USANDO TELÉFONOS INTELIGENTES Y EL RUGOSÍMETRO DE MERLIN - 2016"</b>													
<b>Ensayos con el Rugosímetro de MERLIN</b>													
<b>Carretera:</b>		Cusco - Urcos									<b>Ensayo N°:</b>	01	
<b>Sector:</b>		Angostura									<b>KM:</b>	984	
<b>Fecha:</b>		10 de octubre de 2016									<b>Progresiva:</b>	984 al 984+400	
<b>Hora:</b>		10:00:00 p. m.											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1		29	28	29	28	28	28	28	31	29	26	<b>Tipo de pavimento:</b>	
2		27	26	32	30	27	30	30	30	27	30	Afirmado	
3		30	27	32	29	31	30	32	26	28	26	Base granular	
4		30	31	28	28	30	29	27	30	32	32	Base imprimada	
5		30	29	29	30	28	32	27	28	30	32	Tratamiento bicapa	
6		30	30	32	30	28	27	25	28	31	32	Carpeta en frío	
7		28	31	30	30	28	27	32	28	27	28	Carpeta en caliente	
8		29	29	30	28	30	30	31	30	28	30	Recapeo asfáltico	X
9		28	29	28	29	29	31	30	32	29	28	Sello	
10		29	28	30	32	30	28	28	29	28	29		
11		29	28	27	27	30	27	29	28	31	29		
12		30	26	31	27	29	29	30	28	31	30		
13		27	29	28	27	31	30	28	29	34	29		
14		28	29	28	29	31	27	27	30	28	27		
15		32	29	33	30	29	29	27	29	29	28		
16		30	27	30	30	32	30	30	26	30	29		
17		30	28	26	31	28	33	27	29	30	30		
18		33	28	30	30	31	27	29	27	28	28		
19		29	29	30	32	28	30	30	28	25	29		
20		30	29	30	31	28	30	26	30	30	29		
<b>Observaciones:</b>		li 29											
		lf 19											
		Km : 984											

Fuente: Propia

### 3.5.3. Aforo vehicular de la carretera Cusco - Urcos

El conteo de los vehículos que circulan en la carretera en estudio; se tomó durante 24 horas continuas en un lapso de 7 días, iniciando con el conteo el día viernes 11 de noviembre hasta el día jueves 17 de noviembre de 2016. El punto de aforo fue la antigua Estación C057 del MTC, ubicado en el paradero principal del Distrito de Oropesa.



Figura 64: Llevando a cabo el aforo vehicular.



Fuente: Propia

Para realizar el conteo vehicular, se empleó el Reglamento Nacional de Vehículos D.S. N°058-2003-MTC; considerando el tipo de vehículos, peso, dimensiones y la disposición de sus ejes. A continuación se muestran algunos vehículos registrados durante el conteo:

Figura 65: Trayler 3T2 circulando por la carretera en estudio.



Fuente: Propia

Figura 66: Trayler 3T3 circulando por la carretera en estudio.



Fuente: Propia



Tabla 23: Conteo vehicular

<b>Tesis: "DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO DE LA CARRETERA CUSCO-URCOS, USANDO TELÉFONOS INTELIGENTES Y EL RUGOSÍMETRO DE MERLIN - 2016"</b>																			
Formato de aforo vehicular																			
TRAMO DE LA CARRETERA	Cusco - Urcos	ESTACIÓN	Oropesa																
SENTIDO	Bajada (Cusco - Urcos)	DÍA	Viernes																
OPERADOR	Deyse Laura Hirpahuanca	FECHA	11/11/2016																
HORA	AUTO	STATION WAGON	CAMIONETAS			MICRO	BUS		CAMION			SEMI TRAYLER				TRAYLER			
			PICK UP	PANEL	RURAL Combi		2 E	>=3 E	2 E	3 E	4 E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>= 3S3	2T2	2T3	3T2	>=3T3
7-8	164	33	48	3	21	8	26	2	21	11	1	2	0	2	1	0	0	0	0
8-9	95	21	31	3	5	2	15	1	27	10	0	0	1	0	1	0	0	0	0
9-10	80	28	53	4	14	6	16	3	29	0	0	2	0	1	2	0	0	0	1
10-11	107	28	50	6	13	11	21	3	29	14	1	0	0	1	1	0	0	0	0
11-12	85	27	46	7	15	9	19	1	28	18	0	0	1	5	3	0	0	0	0
12-13	110	45	70	6	18	6	24	1	25	20	0	0	0	15	5	0	0	0	2
13-14	73	22	42	5	14	7	13	0	28	12	0	2	0	12	3	0	0	0	1
14-15	78	36	33	3	14	8	23	1	35	17	0	2	0	8	7	0	0	0	0
15-16	76	32	47	6	12	8	22	2	32	12	0	0	1	4	5	0	0	0	0
16-17	78	31	38	4	7	9	19	0	25	10	0	1	0	4	4	0	0	0	1
17-18	116	33	37	5	14	7	29	2	27	19	0	0	0	3	8	0	0	0	0
18-19	72	49	29	4	21	3	14	3	34	14	0	1	0	8	9	0	0	0	0
19-20	86	21	27	5	14	8	23	3	17	15	0	1	0	6	8	0	0	0	0
20-21	62	11	16	6	4	8	12	10	15	13	0	1	0	4	5	0	0	1	0
21-22	56	10	14	5	4	9	10	16	12	14	0	0	0	4	6	0	0	0	0
22-23	47	8	8	1	2	7	6	18	10	8	0	0	0	7	7	0	0	0	0
23-00	20	5	5	0	1	2	3	9	4	1	0	0	0	3	11	0	0	0	0
00-1	14	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
1-2	8	2	0	0	0	0	0	2	1	2	0	1	1	1	0	0	0	0	0
2-3	10	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0
3-4	6	1	3	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
4-5	41	7	21	0	8	0	9	3	19	1	0	2	2	3	3	0	0	0	0
5-6	89	12	29	1	11	1	14	5	17	11	1	0	0	7	2	0	0	0	0
6-7	132	29	34	2	17	7	21	4	22	13	0	0	0	2	1	0	0	0	1
	<b>1705</b>	<b>492</b>	<b>682</b>	<b>77</b>	<b>230</b>	<b>127</b>	<b>341</b>	<b>92</b>	<b>459</b>	<b>235</b>	<b>3</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>102</b>	<b>95</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>10</b>

Fuente: Propia

### 3.6. Procedimientos de Análisis de datos

#### 3.6.1. Análisis de datos obtenidos con la aplicación Roadroid

Los datos que proporciona la aplicación Roadroid es en formato texto, pero para su análisis fueron copiados al Microsoft Excel.

Antes de analizar estos datos, cabe señalar que el programa mide la rugosidad de la carretera en forma continua; es decir incluido las singularidades (tabla 24), pero al tomar datos con el Rugosímetro de MERLIN este no mide las singularidades, por lo tanto todas las singularidades a lo largo de la carretera fueron identificadas mediante las coordenadas geográficas que proporciona la aplicación Roadroid y cambiados por un promedio de los extremos como se muestra con un ejemplo en la siguiente tabla:

Tabla 24: Ubicación de singularidades

29	02/10/2016 00:35	-13.5683262118229	-71.8305552648186	2900	58.94	3200.95	1.51	3.75	Cusco _ Urcos			
30	02/10/2016 00:35	-13.5688723809495	-71.8298642155422	3000	56.08	3204.50	1.20	3.97	Cusco _ Urcos			
31	02/10/2016 00:35	-13.5694005334351	-71.8292668342969	3100	54.62	3206.99	1.21	3.60	Cusco _ Urcos			
32	02/10/2016 00:36	-13.5700844614098	-71.8285056171636	3200	57.42	3207.88	1.22	2.68	Cusco _ Urcos			
33	02/10/2016 00:36	-13.5706453560017	-71.8278783112602	3300	62.74	3207.98	1.24	2.54	Cusco _ Urcos			
34	02/10/2016 00:36	-13.5713172707329	-71.8271186669630	3400	67.62	3206.99	1.58	3.14	Cusco _ Urcos			
35	02/10/2016 00:36	-13.5718636421459	-71.8265180409488	3500	73.09	3204.37	1.49	3.86	Cusco _ Urcos			
36	02/10/2016 00:36	-13.5724320706976	-71.8257124676336	3600	77.48	3202.44	1.55	4.03	Cusco _ Urcos	Tachas reflectivas		
37	02/10/2016 00:36	-13.5727451970728	-71.8251086876394	3700	80.83	3199.86	1.61	5.38	Cusco _ Urcos			
38	02/10/2016 00:36	-13.5732440946113	-71.8241020552071	3800	82.82	3196.78	1.38	4.91	Cusco _ Urcos			
39	02/10/2016 00:36	-13.5735821605086	-71.8234041368226	3900	84.31	3193.61	1.26	4.04	Cusco _ Urcos			
40	02/10/2016 00:36	-13.5741179930423	-71.8222901113630	4000	83.72	3191.18	1.34	2.67	Cusco _ Urcos			
41	02/10/2016 00:36	-13.5744639364078	-71.8215766359796	4100	82.53	3189.94	1.46	2.00	Cusco _ Urcos			
42	02/10/2016 00:36	-13.5748026062951	-71.8208800153286	4200	80.98	3189.45	1.66	3.29	Cusco _ Urcos			
43	02/10/2016 00:36	-13.5753232175298	-71.8198629513370	4300	78.95	3189.51	1.42	5.29	Cusco _ Urcos			
44	02/10/2016 00:37	-13.5756679745553	-71.8192742985813	4400	78.06	3189.38	1.84	3.40	Cusco _ Urcos			
45	02/10/2016 00:37	-13.5762700291724	-71.8183772650344	4500	78.05	3190.31	1.36	4.48	Cusco _ Urcos			
46	02/10/2016 00:37	-13.5766707670558	-71.8178292483206	4600	78.40	3191.33	1.32	2.88	Cusco _ Urcos			
47	02/10/2016 00:37	-13.5773012564134	-71.8169724852522	4700	78.66	3190.10	1.82	3.68	Cusco _ Urcos			
48	02/10/2016 00:37	-13.5779505655269	-71.8161093740814	4800	80.33	3187.90	1.66	5.62	Cusco _ Urcos	Bandas transversales de alerta		

Fuente: Propia

Luego, los datos del eIRI sin singularidades son los que se muestran a continuación y con los cuales se realizó esta investigación.

Tabla 25: Valores elIRI sin singularidades en promedios de 100m

N°	DateTime	Latitude	Longitude	Distance (m)	Speed (km/h)	Altitude (m)	eIRI (m/km)	clRI (m/km)	RoadId
1	02/10/2016 00:33	-13.5572272751029	-71.8539007237707	100	81.46	3230.17	1.33	2.64	Cusco _ Urcos
2	02/10/2016 00:33	-13.5576417850014	-71.8532925765717	200	81.16	3228.09	1.37	2.64	Cusco _ Urcos
3	02/10/2016 00:33	-13.5582063031681	-71.8522787765277	300	80.15	3225.22	1.48	2.94	Cusco _ Urcos
4	02/10/2016 00:33	-13.5585065385742	-71.8516458330893	400	77.09	3222.12	1.23	3.99	Cusco _ Urcos
5	02/10/2016 00:33	-13.5589374499089	-71.8507031229854	500	74.58	3219.54	1.27	3.06	Cusco _ Urcos
6	02/10/2016 00:33	-13.5593424701184	-71.8498205078173	600	73.70	3217.56	1.07	2.64	Cusco _ Urcos
7	02/10/2016 00:33	-13.5597409493964	-71.8489511109386	700	72.76	3215.91	1.28	2.60	Cusco _ Urcos
8	02/10/2016 00:33	-13.5601291505877	-71.8481091058834	800	71.56	3214.62	1.30	2.67	Cusco _ Urcos
9	02/10/2016 00:33	-13.5605070717126	-71.8472930012592	900	71.10	3213.53	1.09	2.66	Cusco _ Urcos
10	02/10/2016 00:34	-13.5608797209363	-71.8464822139401	1000	71.18	3212.56	1.13	2.42	Cusco _ Urcos
11	02/10/2016 00:34	-13.5612558872859	-71.8456626701016	1100	71.72	3211.57	1.11	2.19	Cusco _ Urcos
12	02/10/2016 00:34	-13.5616378212859	-71.8448335387688	1200	72.21	3210.52	1.39	2.42	Cusco _ Urcos
13	02/10/2016 00:34	-13.5620259566210	-71.8439905096661	1300	71.27	3209.72	1.49	2.49	Cusco _ Urcos
14	02/10/2016 00:34	-13.5623997593290	-71.8431768030584	1400	69.93	3209.25	0.97	5.69	Cusco _ Urcos
15	02/10/2016 00:34	-13.5627582341097	-71.8423903740867	1500	68.82	3208.60	1.07	3.08	Cusco _ Urcos
16	02/10/2016 00:34	-13.5631063861452	-71.8416298354666	1600	67.62	3207.51	1.04	2.20	Cusco _ Urcos
17	02/10/2016 00:34	-13.5635886701551	-71.8405904337481	1700	66.02	3206.33	1.07	2.36	Cusco _ Urcos
18	02/10/2016 00:34	-13.5639057900031	-71.8398988845647	1800	65.57	3205.28	1.15	2.36	Cusco _ Urcos
19	02/10/2016 00:34	-13.5643590547799	-71.8389078794843	1900	66.63	3204.31	1.01	2.41	Cusco _ Urcos
20	02/10/2016 00:34	-13.5646866657918	-71.8381945606322	2000	68.36	3203.53	1.01	1.46	Cusco _ Urcos
21	02/10/2016 00:35	-13.5650305043712	-71.8374367848200	2100	69.49	3202.60	1.07	1.80	Cusco _ Urcos
22	02/10/2016 00:35	-13.5655314747459	-71.8363335967932	2200	68.74	3201.81	1.04	2.45	Cusco _ Urcos
23	02/10/2016 00:35	-13.5658791919759	-71.8355788584632	2300	67.63	3201.10	1.08	2.10	Cusco _ Urcos
24	02/10/2016 00:35	-13.5662130579487	-71.8348496725128	2400	64.50	3200.55	0.97	2.56	Cusco _ Urcos
25	02/10/2016 00:35	-13.5666497820963	-71.8338954181218	2500	62.57	3200.34	1.49	1.93	Cusco _ Urcos

Fuente: Propia

En la tabla 25; se muestra sólo los primeros datos y para mayor información los datos continúan en **Anexos 1**.

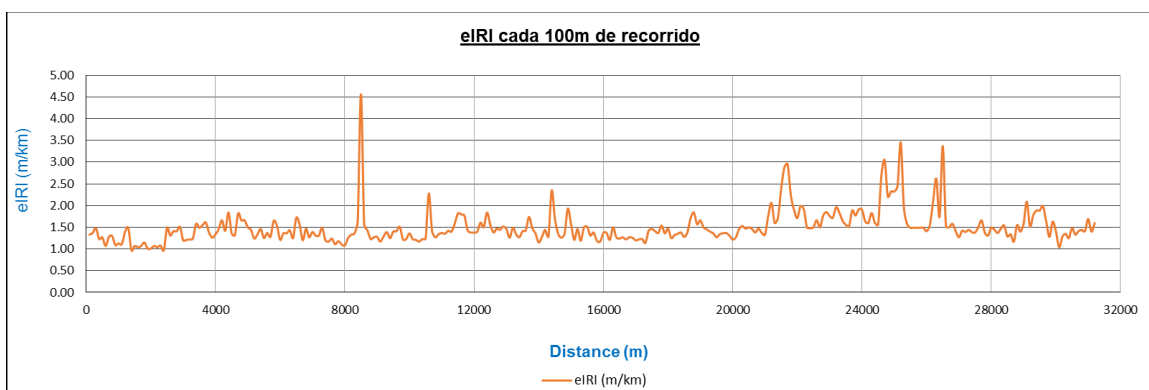
Asimismo; se observa que la aplicación Roadroid genera dos valores para el IRI como el eIRI y el clRI por cada 100m de longitud de carretera; pero el clRI aún se encuentra en estudios; y necesita velocidad constante lo que fue difícil

alcanzar en esta tesis; siendo el eIRI el que mejor se ajusta al IRI real del pavimento.

De igual forma, proporciona las coordenadas geográficas de los puntos; el cual facilita la ubicación de cualquier punto para que pueda ser intervenido, asimismo proporciona las velocidades a la que viaja el vehículo, entre otros datos.

Con los datos de la tabla 25 y con los datos que continúan en Anexos 1, se realizó un gráfico de dispersión para observar de manera más didáctica la variación del eIRI, de tal forma realizar un análisis como se muestra a continuación:

Figura 67: Gráfico de dispersión del eIRI vs Distancia recorrida.



Fuente: Propia

En la figura 67; se observa que la rugosidad a lo largo de la carretera es muy variable, existen valores del eIRI que se encuentran entre 1m/km y 1.9m/km lo que significa que el tramo desde el Km 984 (Puente Angostura) hasta el Km 992 (Tipón) se encuentra en buenas condiciones; sin muchas imperfecciones entregando un manejo de primera clase; pero también puede estar empezando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria. Por el contrario el tramo desde el Km 992 (Tipón) hasta el Km 1015+200 (Urcos) presenta una rugosidad muy variable que va desde 1m/km hasta 4.56m/km lo que significa que en este tramo las altas velocidades de tránsito se ven afectadas. Por ejemplo al ubicar los picos más elevados mediante sus coordenadas geográficas se comprobó que el pico más elevado de la Figura 67 se trata de un parche debido al mantenimiento, asimismo ubicando las coordenadas de los

otros picos elevados se corroboró que se tratan de parches, agrietamientos y ahuellamientos profundos.

Continuando con el análisis de la tabla 25, la aplicación Roadroid cuenta con su propio índice como es el Roadroid Índice (RI) que proporciona el estado de la carretera mediante colores y según este índice el 94.87% de la carretera tiene una buena condición.

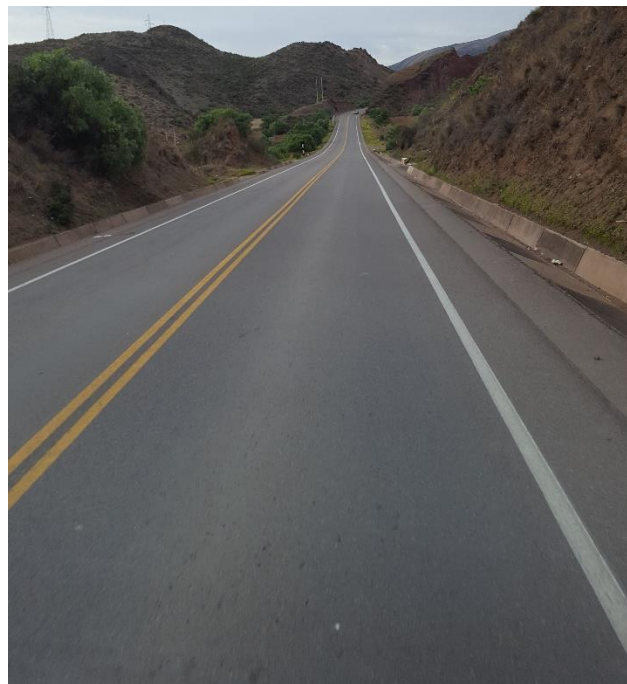
Tabla 26: Porcentajes de la condición de la carretera y el eIRI promedio.

	Condición de la carretera	Número de Puntos	Porcentaje (%)	eIRI promedio (m/km)
	Bueno	296	94.87	1.50
	Satisfactorio	15	4.81	
	No Satisfactorio	1	0.32	
	Pobre	0	0.00	
	Total	312	100	

Fuente: Propia

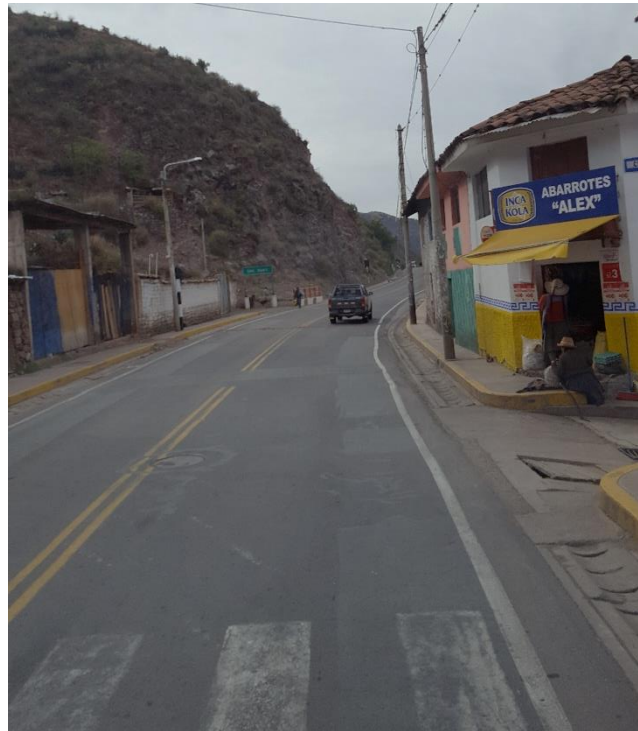
A continuación se muestran algunas imágenes del estado de la carretera.

Figura 68: Vista de la carretera en estudio.



Fuente: Propia

Figura 69: Parches en la carretera.



Fuente: Propia

Seguidamente, para demostrar la hipótesis general planteada en esta investigación se promedió cada 400m los valores del eIRI; puesto que los valores que proporciona el Rugosímetro de MERLIN son cada 400m.

Tabla 27: Promediando valores del eIRI cada 400m

CUSCO - URCOS				CUSCO - URCOS				CUSCO - URCOS				CUSCO - URCOS			
N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom	N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom	N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom	N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom
1	100	1.33	1.35	41	4100	1.46	1.60	81	8100	1.25	1.40	121	12100	1.40	1.59
2	200	1.37		42	4200	1.66		82	8200	1.33		122	12200	1.61	
3	300	1.48		43	4300	1.42		83	8300	1.36		123	12300	1.50	
4	400	1.23		44	4400	1.84		84	8400	1.64		124	12400	1.84	
5	500	1.27	1.23	45	4500	1.36	1.54	85	8500	4.56	2.20	125	12500	1.56	1.46
6	600	1.07		46	4600	1.32		86	8600	1.57		126	12600	1.38	
7	700	1.28		47	4700	1.82		87	8700	1.43		127	12700	1.47	
8	800	1.30		48	4800	1.66		88	8800	1.23		128	12800	1.44	
9	900	1.09	1.18	49	4900	1.66	1.46	89	8900	1.27	1.25	129	12900	1.52	1.43
10	1000	1.13		50	5000	1.50		90	9000	1.28		130	13000	1.46	
11	1100	1.11		51	5100	1.44		91	9100	1.17		131	13100	1.26	
12	1200	1.39		52	5200	1.24		92	9200	1.29		132	13200	1.49	
13	1300	1.49	1.14	53	5300	1.34	1.36	93	9300	1.39	1.36	133	13300	1.34	1.36
14	1400	0.97		54	5400	1.46		94	9400	1.25		134	13400	1.27	
15	1500	1.07		55	5500	1.25		95	9500	1.40		135	13500	1.41	
16	1600	1.04		56	5600	1.37		96	9600	1.41		136	13600	1.43	
17	1700	1.07	1.06	57	5700	1.28	1.42	97	9700	1.51	1.33	137	13700	1.74	1.43
18	1800	1.15		58	5800	1.65		98	9800	1.22		138	13800	1.48	
19	1900	1.01		59	5900	1.54		99	9900	1.23		139	13900	1.36	
20	2000	1.01		60	6000	1.21		100	10000	1.36		140	14000	1.15	



21	2100	1.07	1.04	61	6100	1.36	1.35	101	10100	1.23	1.21	141	14100	1.28	1.59
22	2200	1.04		62	6200	1.36		102	10200	1.21		142	14200	1.44	
23	2300	1.08		63	6300	1.43		103	10300	1.17		143	14300	1.29	
24	2400	0.97		64	6400	1.25		104	10400	1.23		144	14400	2.35	
25	2500	1.49	1.41	65	6500	1.72	1.49	105	10500	1.24	1.55	145	14500	1.70	1.42
26	2600	1.31		66	6600	1.57		106	10600	2.28		146	14600	1.35	
27	2700	1.41		67	6700	1.20		107	10700	1.41		147	14700	1.26	
28	2800	1.41		68	6800	1.47		108	10800	1.27		148	14800	1.35	
29	2900	1.51	1.29	69	6900	1.27	1.32	109	10900	1.34	1.37	149	14900	1.93	1.54
30	3000	1.20		70	7000	1.39		110	11000	1.37		150	15000	1.57	
31	3100	1.21		71	7100	1.31		111	11100	1.35		151	15100	1.21	
32	3200	1.22		72	7200	1.31		112	11200	1.42		152	15200	1.46	
33	3300	1.24	1.47	73	7300	1.49	1.28	113	11300	1.40	1.65	153	15300	1.19	1.38
34	3400	1.58		74	7400	1.20		114	11400	1.58		154	15400	1.50	
35	3500	1.49		75	7500	1.17		115	11500	1.82		155	15500	1.51	
36	3600	1.55		76	7600	1.24		116	11600	1.80		156	15600	1.31	
37	3700	1.61	1.40	77	7700	1.11	1.12	117	11700	1.77	1.49	157	15700	1.38	1.28
38	3800	1.38		78	7800	1.18		118	11800	1.43		158	15800	1.19	
39	3900	1.26		79	7900	1.11		119	11900	1.38		159	15900	1.17	
40	4000	1.34		80	8000	1.08		120	12000	1.38		160	16000	1.37	

CUSCO - URCOS				CUSCO - URCOS				CUSCO - URCOS				CUSCO - URCOS			
N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom	N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom	N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom	N°	Distancia (m)	eIRI (m/km)	Prom
161	16100	1.37	1.34	201	20100	1.27	1.43	241	24100	1.64	1.67	281	28100	1.44	1.46
162	16200	1.21		202	20200	1.46		242	24200	1.60		282	28200	1.37	
163	16300	1.50		203	20300	1.53		243	24300	1.83		283	28300	1.47	
164	16400	1.27		204	20400	1.47		244	24400	1.60		284	28400	1.54	
165	16500	1.24	1.25	205	20500	1.50	1.45	245	24500	1.56	2.38	285	28500	1.29	1.34
166	16600	1.27		206	20600	1.46		246	24600	2.69		286	28600	1.34	
167	16700	1.22		207	20700	1.38		247	24700	3.05		287	28700	1.17	
168	16800	1.27		208	20800	1.47		248	24800	2.21		288	28800	1.55	
169	16900	1.26	1.23	209	20900	1.37	1.63	249	24900	2.33	2.64	289	28900	1.40	1.65
170	17000	1.20		210	21000	1.33		250	25000	2.33		290	29000	1.57	
171	17100	1.22		211	21100	1.76		251	25100	2.44		291	29100	2.09	
172	17200	1.23		212	21200	2.06		252	25200	3.45		292	29200	1.52	
173	17300	1.14	1.36	213	21300	1.60	2.14	253	25300	1.93	1.62	293	29300	1.78	1.89
174	17400	1.42		214	21400	1.71		254	25400	1.57		294	29400	1.89	
175	17500	1.46		215	21500	2.38		255	25500	1.49		295	29500	1.89	
176	17600	1.41		216	21600	2.88		256	25600	1.49		296	29600	1.99	
177	17700	1.37	1.44	217	21700	2.95	2.20	257	25700	1.49	1.47	297	29700	1.64	1.49
178	17800	1.54		218	21800	2.24		258	25800	1.49		298	29800	1.28	
179	17900	1.36		219	21900	1.90		259	25900	1.49		299	29900	1.63	
180	18000	1.47		220	22000	1.71		260	26000	1.41		300	30000	1.41	
181	18100	1.25	1.33	221	22100	1.99	1.72	261	26100	1.55	2.00	301	30100	1.04	1.23
182	18200	1.32		222	22200	1.92		262	26200	2.09		302	30200	1.28	
183	18300	1.35		223	22300	1.50		263	26300	2.62		303	30300	1.35	
184	18400	1.38		224	22400	1.48		264	26400	1.74		304	30400	1.25	
185	18500	1.28	1.55	225	22500	1.50	1.61	265	26500	3.37	1.99	305	30500	1.48	1.42
186	18600	1.38		226	22600	1.66		266	26600	1.52		306	30600	1.33	
187	18700	1.71		227	22700	1.50		267	26700	1.50		307	30700	1.41	
188	18800	1.84		228	22800	1.77		268	26800	1.58		308	30800	1.44	
189	18900	1.57	1.55	229	22900	1.85	1.82	269	26900	1.41	1.37	309	30900	1.41	1.53
190	19000	1.66		230	23000	1.76		270	27000	1.27		310	31000	1.69	
191	19100	1.50		231	23100	1.72		271	27100	1.42		311	31100	1.40	
192	19200	1.45		232	23200	1.96		272	27200	1.39		312	31200	1.60	
193	19300	1.40	1.34	233	23300	1.84	1.64	273	27300	1.44	1.43				
194	19400	1.36		234	23400	1.65		274	27400	1.39					
195	19500	1.27		235	23500	1.56		275	27500	1.38					
196	19600	1.34		236	23600	1.52		276	27600	1.50					
197	19700	1.36	1.32	237	23700	1.89	1.87	277	27700	1.66	1.46				
198	19800	1.37		238	23800	1.77		278	27800	1.38					
199	19900	1.31		239	23900	1.91		279	27900	1.31					
200	20000	1.22		240	24000	1.91		280	28000	1.49					

Fuente: Propia



Por lo tanto, el resumen de los resultados obtenidos con la aplicación Roadroid los cuales serán comparados con el Rugosímetro de MERLIN son en total 78. Lo que significa que se tiene un valor de regularidad superficial cada 400m de carretera.

Tabla 28: Resumen de los eIRI cada 400m

N°	Distancia (m)	IRI con la aplicación Roadroid (m/km)	N°	Distancia (m)	IRI con la aplicación Roadroid (m/km)
1	400	1.35	40	16000	1.28
2	800	1.23	41	16400	1.34
3	1200	1.18	42	16800	1.25
4	1600	1.14	43	17200	1.23
5	2000	1.06	44	17600	1.36
6	2400	1.04	45	18000	1.44
7	2800	1.41	46	18400	1.33
8	3200	1.29	47	18800	1.55
9	3600	1.47	48	19200	1.55
10	4000	1.40	49	19600	1.34
11	4400	1.60	50	20000	1.32
12	4800	1.54	51	20400	1.43
13	5200	1.46	52	20800	1.45
14	5600	1.36	53	21200	1.63
15	6000	1.42	54	21600	2.14
16	6400	1.35	55	22000	2.20
17	6800	1.49	56	22400	1.72
18	7200	1.32	57	22800	1.61
19	7600	1.28	58	23200	1.82
20	8000	1.12	59	23600	1.64
21	8400	1.40	60	24000	1.87
22	8800	2.20	61	24400	1.67
23	9200	1.25	62	24800	2.38
24	9600	1.36	63	25200	2.64
25	10000	1.33	64	25600	1.62
26	10400	1.21	65	26000	1.47
27	10800	1.55	66	26400	2.00
28	11200	1.37	67	26800	1.99
29	11600	1.65	68	27200	1.37
30	12000	1.49	69	27600	1.43
31	12400	1.59	70	28000	1.46
32	12800	1.46	71	28400	1.46
33	13200	1.43	72	28800	1.34
34	13600	1.36	73	29200	1.65
35	14000	1.43	74	29600	1.65
36	14400	1.59	75	30000	1.65
37	14800	1.42	76	30400	1.23
38	15200	1.54	77	30800	1.42
39	15600	1.38	78	31200	1.53
				<b>Promedio</b>	<b>1.50</b>

Fuente: Propia

**3.6.2. Análisis de datos del Rugosímetro de MERLIN**

Las 78 hojas de campo fueron transcritos al Microsoft Excel para su análisis. El procedimiento de análisis consistió en:

- a) Contar cuántas veces se repiten los valores de los casilleros de cada formato de campo.

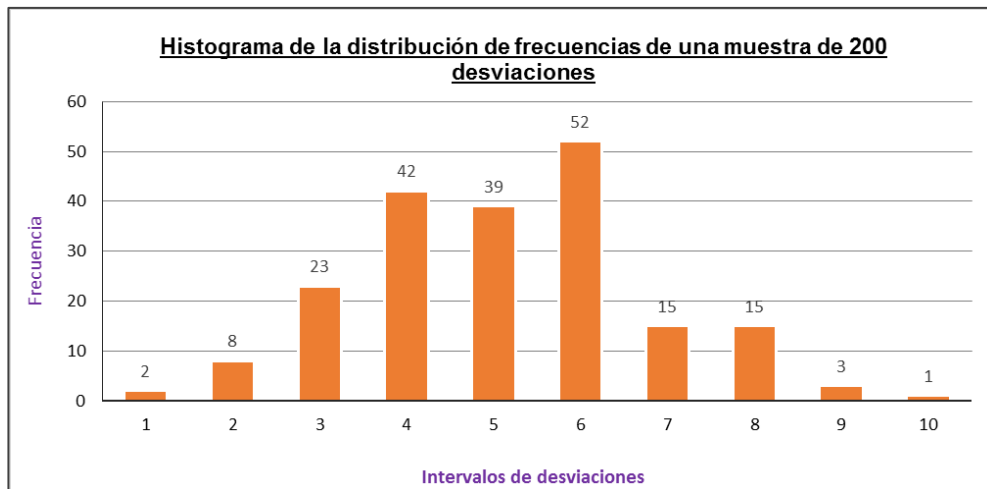
Tabla 29: Conteo de las repeticiones

Nº	Rep.	Nº	Rep.	Nº	Rep.	Nº	Rep.	Nº	Rep.
1	0	11	0	21	0	31	15	41	0
2	0	12	0	22	0	32	15	42	0
3	0	13	0	23	0	33	3	43	0
4	0	14	0	24	0	34	1	44	0
5	0	15	0	25	2	35	0	45	0
6	0	16	0	26	8	36	0	46	0
7	0	17	0	27	23	37	0	47	0
8	0	18	0	28	42	38	0	48	0
9	0	19	0	29	39	39	0	49	0
10	0	20	0	30	52	40	0	50	0
	valor	frecuencia	orden						
	25	2	1						
	26	8	2						
	27	23	3						
	28	42	4						
	29	39	5						
	30	52	6						
	31	15	7						
	32	15	8						
	33	3	9						
	34	1	10						
		200							

Fuente: Propia

- b) Con esos datos dibujar el histograma de frecuencias.

Figura 70: Histograma de frecuencias



Fuente: Propia

- c) Luego, obtener el IRI con los procedimientos que se indicó en el marco teórico.

Tabla 30: Cálculo del IRI

Nº DATOS:	200
10% DATOS ELIMINADOS:	20
DATOS ELIMINADOS:	10 superiores - 10 inferiores
ANCHO DEL HISTOGRAMA:	8.381
RANGO "D" (en mm):	41.905
ESPESOR DE LA PASTILLA (mm.):	4.90
LECTURA INICIAL:	27
LECTURA FINAL:	15
RELACIÓN DE BRAZOS:	1:10
FACTOR DE CORRECCIÓN POR BRAZOS:	1.00
FACTOR DE CORRECCIÓN:	0.82
RANGO "D" CORREGIDO (unidades MERLIN):	34.22
IRI (m/Km):	1.66
PSI	3.70

Fuente: Propia

- d) El procesamiento de datos de los 78 ensayos se encuentra en **Anexos 2**, pero el resumen de los datos obtenidos son:

Tabla 31: IRI con el Rugosímetro de MERLIN.

Ensayo	PROGRESIVAS		IRI con el Rugosímetro de MERLIN (m/km)	Ensayo	PROGRESIVAS		IRI con el Rugosímetro de MERLIN (m/km)
	Desde	Hasta			Desde	Hasta	
1	984+000	984+400	1.33	40	999+600	1000+000	1.55
2	984+400	984+800	1.33	41	1000+000	1000+400	1.61
3	984+800	985+200	1.26	42	1000+400	1000+800	1.33
4	985+200	985+600	1.20	43	1000+800	1001+200	1.34
5	985+600	986+000	1.26	44	1001+200	1001+600	1.52
6	986+000	986+400	1.16	45	1001+600	1002+000	1.60
7	986+400	986+800	1.52	46	1002+000	1002+400	1.62
8	986+800	987+200	1.51	47	1002+400	1002+800	1.93
9	987+200	987+600	1.58	48	1002+800	1003+200	2.01
10	987+600	988+000	1.62	49	1003+200	1003+600	1.77
11	988+000	988+400	1.71	50	1003+600	1004+000	1.54
12	988+400	988+800	1.78	51	1004+000	1004+400	1.78
13	988+800	989+200	1.57	52	1004+400	1004+800	1.81
14	989+200	989+600	1.43	53	1004+800	1005+200	2.02
15	989+600	990+000	1.41	54	1005+200	1005+600	2.29
16	990+000	990+400	1.57	55	1005+600	1006+000	2.22
17	990+400	990+800	1.52	56	1006+000	1006+400	1.78
18	990+800	991+200	1.48	57	1006+400	1006+800	1.92
19	991+200	991+600	1.43	58	1006+800	1007+200	1.86
20	991+600	992+000	1.37	59	1007+200	1007+600	1.84
21	992+000	992+400	1.46	60	1007+600	1008+000	2.07
22	992+400	992+800	2.05	61	1008+000	1008+400	1.71
23	992+800	993+200	1.50	62	1008+400	1008+800	2.81
24	993+200	993+600	1.51	63	1008+800	1009+200	2.87
25	993+600	994+000	1.56	64	1009+200	1009+600	2.18
26	994+000	994+400	1.31	65	1009+600	1010+000	1.71
27	994+400	994+800	1.70	66	1010+000	1010+400	2.19
28	994+800	995+200	1.66	67	1010+400	1010+800	2.20
29	995+200	995+600	1.83	68	1010+800	1011+200	1.57
30	995+600	996+000	1.54	69	1011+200	1011+600	1.65
31	996+000	996+400	1.68	70	1011+600	1012+000	1.52
32	996+400	996+800	1.68	71	1012+000	1012+400	1.46
33	996+800	997+200	1.52	72	1012+400	1012+800	1.61
34	997+200	997+600	1.52	73	1012+800	1013+200	1.96
35	997+600	998+000	1.49	74	1013+200	1013+600	1.92
36	998+000	998+400	1.97	75	1013+600	1014+000	2.06
37	998+400	998+800	1.63	76	1014+000	1014+400	1.62
38	998+800	999+200	1.70	77	1014+400	1014+800	1.49
39	999+200	999+600	1.43	78	1014+800	1015+200	1.95
						<b>Promedio</b>	<b>1.69</b>

Fuente: Propia

### 3.6.3. Comparación de los resultados obtenidos

Haciendo uso de correlaciones estadísticas se compararon los resultados obtenidos en las tablas 28 y 31.

Tabla 32: Porcentaje de similitud de los resultados del IRI con ambos equipos.

Ensayo	Progresivas		Distancia (m)	IRI (m/km)		% de similitud
	Desde	Hasta		Aplicación Roadroid	Rugosímetro de MERLIN	
1	984+000	984+400	400	1.35	1.33	101.6
2	984+400	984+800	800	1.23	1.33	92.3
3	984+800	985+200	1200	1.18	1.26	93.4
4	985+200	985+600	1600	1.14	1.20	95.5
5	985+600	986+000	2000	1.06	1.26	84.4
6	986+000	986+400	2400	1.04	1.16	89.6
7	986+400	986+800	2800	1.41	1.52	92.1
8	986+800	987+200	3200	1.29	1.51	85.2
9	987+200	987+600	3600	1.47	1.58	92.6
10	987+600	988+000	4000	1.40	1.62	86.1
11	988+000	988+400	4400	1.60	1.71	93.3
12	988+400	988+800	4800	1.54	1.78	86.4
13	988+800	989+200	5200	1.46	1.57	93.1
14	989+200	989+600	5600	1.36	1.43	95.0
15	989+600	990+000	6000	1.42	1.41	100.4
16	990+000	990+400	6400	1.35	1.57	85.9
17	990+400	990+800	6800	1.49	1.52	98.0
18	990+800	991+200	7200	1.32	1.48	89.0
19	991+200	991+600	7600	1.28	1.43	89.4
20	991+600	992+000	8000	1.12	1.37	81.9
21	992+000	992+400	8400	1.40	1.46	95.4
22	992+400	992+800	8800	2.20	2.05	107.4
23	992+800	993+200	9200	1.25	1.50	83.5
24	993+200	993+600	9600	1.36	1.51	90.3
25	993+600	994+000	10000	1.33	1.56	85.0
26	994+000	994+400	10400	1.21	1.31	92.4
27	994+400	994+800	10800	1.55	1.70	91.2
28	994+800	995+200	11200	1.37	1.66	82.5
29	995+200	995+600	11600	1.65	1.83	90.3
30	995+600	996+000	12000	1.49	1.54	96.6
31	996+000	996+400	12400	1.59	1.68	94.6
32	996+400	996+800	12800	1.46	1.68	87.0
33	996+800	997+200	13200	1.43	1.52	94.4
34	997+200	997+600	13600	1.36	1.52	89.7
35	997+600	998+000	14000	1.43	1.49	95.9
36	998+000	998+400	14400	1.59	1.97	80.9
37	998+400	998+800	14800	1.42	1.63	87.0
38	998+800	999+200	15200	1.54	1.70	90.5
39	999+200	999+600	15600	1.38	1.43	96.4
40	999+600	1000+000	16000	1.28	1.55	82.4
41	1000+000	1000+400	16400	1.34	1.61	83.2
42	1000+400	1000+800	16800	1.25	1.33	94.1
43	1000+800	1001+200	17200	1.23	1.34	91.8
44	1001+200	1001+600	17600	1.36	1.52	89.1

Ensayo	Progresivas		Distancia (m)	IRI (m/km)		% de similitud
	Desde	Hasta		Aplicación Roadroid	Rugosímetro de MERLIN	
45	1001+600	1002+000	18000	1.44	1.60	89.4
46	1002+000	1002+400	18400	1.33	1.62	81.8
47	1002+400	1002+800	18800	1.55	1.93	80.5
48	1002+800	1003+200	19200	1.55	2.01	77.1
49	1003+200	1003+600	19600	1.34	1.77	75.8
50	1003+600	1004+000	20000	1.32	1.54	85.5
51	1004+000	1004+400	20400	1.43	1.78	80.4
52	1004+400	1004+800	20800	1.45	1.81	80.2
53	1004+800	1005+200	21200	1.63	2.02	80.6
54	1005+200	1005+600	21600	2.14	2.29	93.4
55	1005+600	1006+000	22000	2.20	2.22	99.2
56	1006+000	1006+400	22400	1.72	1.78	96.8
57	1006+400	1006+800	22800	1.61	1.92	83.7
58	1006+800	1007+200	23200	1.82	1.86	98.2
59	1007+200	1007+600	23600	1.64	1.84	89.4
60	1007+600	1008+000	24000	1.87	2.07	90.4
61	1008+000	1008+400	24400	1.67	1.71	97.3
62	1008+400	1008+800	24800	2.38	2.81	84.7
63	1008+800	1009+200	25200	2.64	2.87	91.9
64	1009+200	1009+600	25600	1.62	2.18	74.4
65	1009+600	1010+000	26000	1.47	1.71	85.9
66	1010+000	1010+400	26400	2.00	2.19	91.3
67	1010+400	1010+800	26800	1.99	2.20	90.4
68	1010+800	1011+200	27200	1.37	1.57	87.5
69	1011+200	1011+600	27600	1.43	1.65	86.7
70	1011+600	1012+000	28000	1.46	1.52	95.8
71	1012+000	1012+400	28400	1.46	1.46	99.5
72	1012+400	1012+800	28800	1.34	1.61	83.0
73	1012+800	1013+200	29200	1.65	1.96	83.9
74	1013+200	1013+600	29600	1.65	1.92	85.5
75	1013+600	1014+000	30000	1.65	2.06	79.7
76	1014+000	1014+400	30400	1.23	1.62	75.7
77	1014+400	1014+800	30800	1.42	1.49	95.3
78	1014+800	1015+200	31200	1.53	1.95	78.2
		<b>PROMEDIO</b>		<b>1.50</b>	<b>1.69</b>	<b>89</b>

Fuente: Propia

De la tabla 32; se puede apreciar que existen tramos en donde el eIRI y el IRI son muy similares llegando casi al 100%, no obstante; en otros tienden a diferir llegando hasta 74.4%, esta diferencia está asociada a la técnica de toma de datos de cada equipo, mientras que el Rugosímetro de MERLIN toma los datos directamente midiendo las deformaciones, la aplicación Roadroid toma los

datos indirectamente capturando las vibraciones del chasis mediante el acelerómetro del Smartphone.

Del mismo modo, se observa que el promedio del eIRI es 1.50m/km y el promedio del IRI del Rugosímetro de MERLIN es 1.69m/km; y comparando ambos resultados se determina un parecido de 89% de los valores de la aplicación Roadroid con respecto al IRI obtenido con el Rugosímetro de MERLIN; pero tal aseveración se demuestra mediante un análisis estadístico.

El **Coefficiente de correlación de Pearson** se define como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y que mientras más grande sea la muestra más exacta será la estimación. Y para determinar este coeficiente se usó el paquete estadístico SPSS. (Vila & Sedano, 2010).

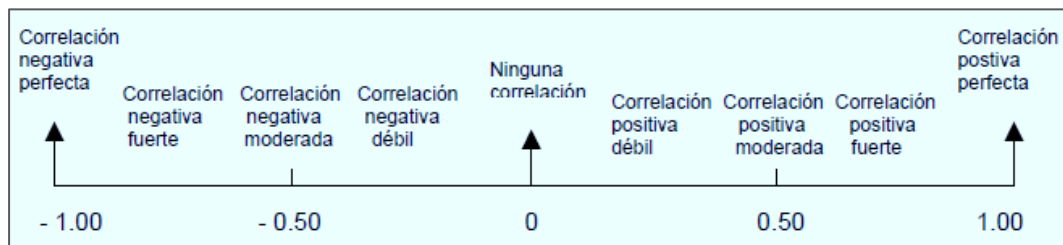
Tabla 33: Correlación de Pearson

		ROADROID	MERLIN
ROADROID	Correlación de Pearson	1	.910**
	Sig. (bilateral)		.000
	N	78	78
MERLIN	Correlación de Pearson	.910**	1
	Sig. (bilateral)	.000	
	N	78	78

Fuente: Propia

En consecuencia, el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.910; interpretándose este resultado según la figura siguiente:

Figura 71: Interpretación de la correlación de Pearson.



Fuente: Vila & Sedano, 2010.

De donde se concluye que la relación entre el eIRI y el IRI es una **Correlación Positiva fuerte**; es decir el eIRI y el IRI se correlacionan en sentido directo.

También, se usó el **Coefficiente de Correlación de Spearman**, que se define como una medida de relación lineal entre dos variables. Y para determinar este coeficiente se usó el paquete estadístico SPSS. (Vila & Sedano, 2010).

Tabla 34: Correlación de Spearman

		ROADROID	MERLIN
Rho de Spearman	Coeficiente de correlación	1.000	.848**
	ROADROID Sig. (bilateral)	.	.000
	N	78	78
	Coeficiente de correlación	.848**	1.000
	MERLIN Sig. (bilateral)	.000	.
	N	78	78

Fuente: Propia

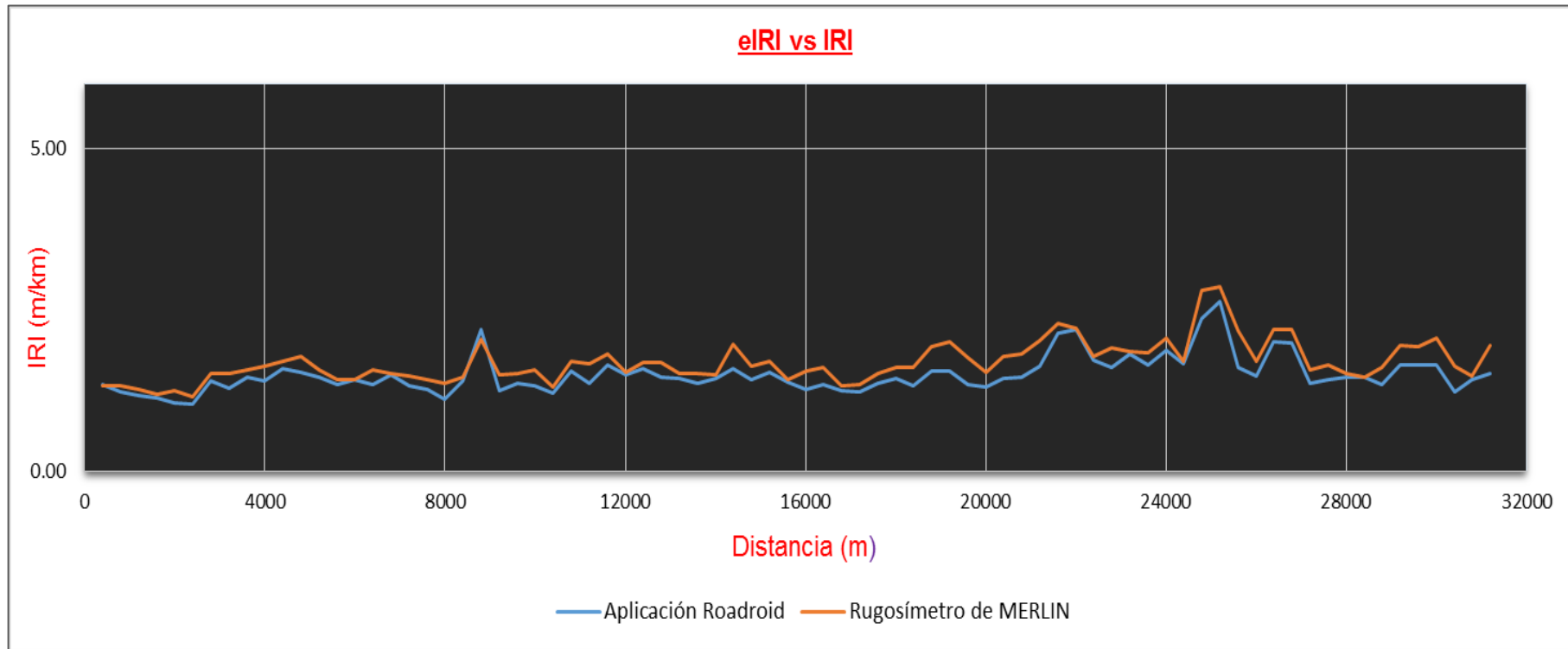
Por lo que, este coeficiente resultó 0.848, lo que indica una **Buena Correlación**, según el siguiente rango:

- ✓ Perfecta=1
- ✓ Excelente 0.9<1
- ✓ Buena 0.8<0.9
- ✓ Regular 0.5<0.8
- ✓ Mala <0.5

Igualmente, para poder apreciar de mejor manera la similitud entre el eIRI y el IRI se muestra el siguiente gráfico de dispersión con líneas rectas usando los datos de la tabla 32.



Figura 72: Comparación de resultados obtenidos con la aplicación Roadroid y el Rugosímetro de MERLIN.

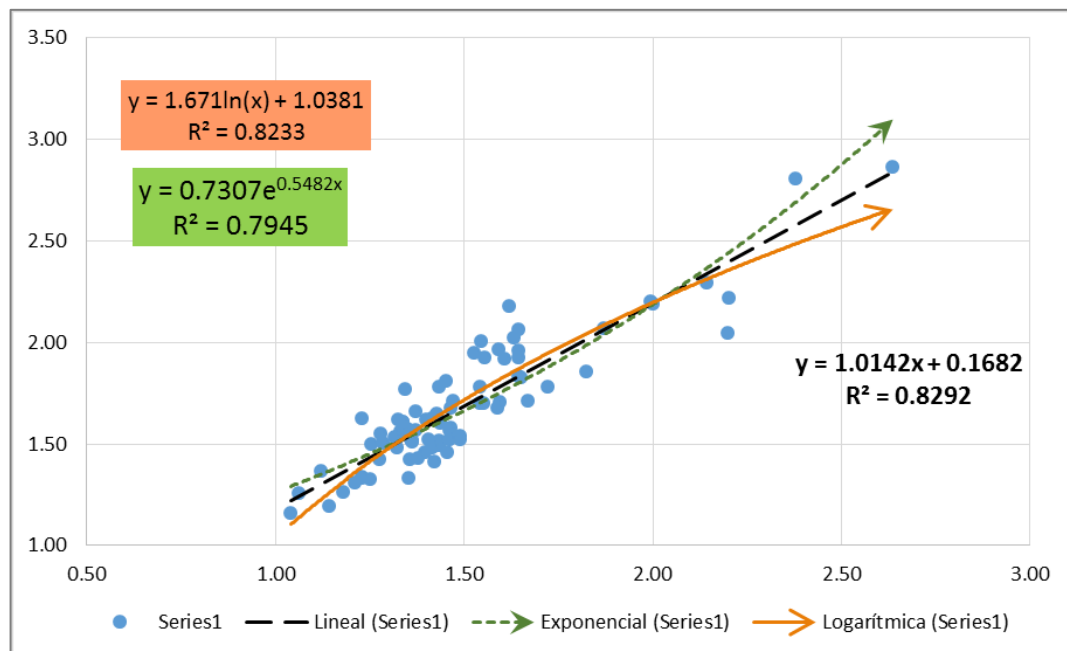


Fuente: Propia

En la figura 72; se observa que los resultados obtenidos con la aplicación Roadroid en su gran mayoría se encuentran por debajo de los valores obtenidos con el Rugosímetro de MERLIN, además se observa una gran similitud entre ambos valores; pero hay algunos puntos en las cuales difieren.

Adicionalmente, se realizó un gráfico de dispersión para obtener una ecuación de correlación que relacione el eIRI de la aplicación Roadroid con el IRI del Rugosímetro de MERLIN, de tal manera obtener el IRI en unidades MERLIN del otro carril de la carretera en estudio, ya que los análisis anteriores sólo se realizaron para el carril de bajada (Cusco- Urcos), más no para el carril de regreso (Urcos – Cusco), el cual también es objetivo de esta tesis.

Figura 73: Gráfico de dispersión



Fuente: Propia

De la figura 73, se obtuvo 3 ecuaciones de regresión lineal, como son:

- ❖ Regresión Lineal:  $y = 1.0142x + 0.1682$
- ❖ Regresión Exponencial:  $y = 0.7307 e^{(0.5482x)}$
- ❖ Regresión Logarítmica:  $y = 1.671\ln(x) + 1.0381$

Luego se utilizó las 3 ecuaciones para conocer cuál de tales ecuaciones es la que relaciona de mejor manera el eIRI y el IRI.

Tabla 35: Ecuaciones de regresión

Ensayo	Progresivas		IRI (m/km)		Ecuaciones de Regresión		
	Desde	Hasta	Aplicación Roadroid	Rugosímetro de MERLIN	Lineal	Exponencial	Logarítmica
1	984+000	984+400	1.35	1.33	1.540	1.534	1.543
2	984+400	984+800	1.23	1.33	1.416	1.434	1.384
3	984+800	985+200	1.18	1.26	1.365	1.395	1.315
4	985+200	985+600	1.14	1.20	1.327	1.367	1.261
5	985+600	986+000	1.06	1.26	1.243	1.306	1.135
6	986+000	986+400	1.04	1.16	1.223	1.292	1.104
7	986+400	986+800	1.41	1.52	1.593	1.578	1.606
8	986+800	987+200	1.29	1.51	1.471	1.478	1.457
9	987+200	987+600	1.47	1.58	1.654	1.631	1.676
10	987+600	988+000	1.40	1.62	1.586	1.572	1.597
11	988+000	988+400	1.60	1.71	1.786	1.752	1.818
12	988+400	988+800	1.54	1.78	1.730	1.700	1.760
13	988+800	989+200	1.46	1.57	1.649	1.627	1.670
14	989+200	989+600	1.36	1.43	1.542	1.536	1.546
15	989+600	990+000	1.42	1.41	1.608	1.592	1.624
16	990+000	990+400	1.35	1.57	1.537	1.532	1.540
17	990+400	990+800	1.49	1.52	1.679	1.654	1.704
18	990+800	991+200	1.32	1.48	1.507	1.507	1.502
19	991+200	991+600	1.28	1.43	1.461	1.470	1.444
20	991+600	992+000	1.12	1.37	1.304	1.350	1.227
21	992+000	992+400	1.40	1.46	1.583	1.570	1.594
22	992+400	992+800	2.20	2.05	2.397	2.437	2.354
23	992+800	993+200	1.25	1.50	1.438	1.452	1.414
24	993+200	993+600	1.36	1.51	1.550	1.542	1.555
25	993+600	994+000	1.33	1.56	1.517	1.515	1.515
26	994+000	994+400	1.21	1.31	1.395	1.418	1.357
27	994+400	994+800	1.55	1.70	1.740	1.709	1.770
28	994+800	995+200	1.37	1.66	1.558	1.548	1.564
29	995+200	995+600	1.65	1.83	1.840	1.804	1.874
30	995+600	996+000	1.49	1.54	1.679	1.654	1.704
31	996+000	996+400	1.59	1.68	1.778	1.745	1.810
32	996+400	996+800	1.46	1.68	1.651	1.629	1.673
33	996+800	997+200	1.43	1.52	1.621	1.602	1.639
34	997+200	997+600	1.36	1.52	1.550	1.542	1.555
35	997+600	998+000	1.43	1.49	1.621	1.602	1.639
36	998+000	998+400	1.59	1.97	1.781	1.747	1.813
37	998+400	998+800	1.42	1.63	1.603	1.587	1.618
38	998+800	999+200	1.54	1.70	1.733	1.702	1.762
39	999+200	999+600	1.38	1.43	1.565	1.555	1.573
40	999+600	1000+000	1.28	1.55	1.464	1.472	1.447
41	1000+000	1000+400	1.34	1.61	1.525	1.521	1.524
42	1000+400	1000+800	1.25	1.33	1.436	1.450	1.411
43	1000+800	1001+200	1.23	1.34	1.413	1.432	1.381
44	1001+200	1001+600	1.36	1.52	1.545	1.538	1.549
45	1001+600	1002+000	1.44	1.60	1.624	1.605	1.642

Ensayo	Progresivas		IRI (m/km)		Ecuaciones de Regresión		
	Desde	Hasta	Aplicación Roadroid	Rugosímetro de MERLIN	Lineal	Exponencial	Logarítmica
46	1002+000	1002+400	1.33	1.62	1.512	1.511	1.508
47	1002+400	1002+800	1.55	1.93	1.743	1.711	1.773
48	1002+800	1003+200	1.55	2.01	1.735	1.704	1.765
49	1003+200	1003+600	1.34	1.77	1.530	1.525	1.530
50	1003+600	1004+000	1.32	1.54	1.502	1.503	1.496
51	1004+000	1004+400	1.43	1.78	1.621	1.602	1.639
52	1004+400	1004+800	1.45	1.81	1.641	1.620	1.662
53	1004+800	1005+200	1.63	2.02	1.821	1.786	1.855
54	1005+200	1005+600	2.14	2.29	2.341	2.365	2.311
55	1005+600	1006+000	2.20	2.22	2.399	2.441	2.356
56	1006+000	1006+400	1.72	1.78	1.915	1.879	1.947
57	1006+400	1006+800	1.61	1.92	1.799	1.764	1.831
58	1006+800	1007+200	1.82	1.86	2.017	1.984	2.041
59	1007+200	1007+600	1.64	1.84	1.834	1.798	1.867
60	1007+600	1008+000	1.87	2.07	2.065	2.037	2.084
61	1008+000	1008+400	1.67	1.71	1.859	1.823	1.893
62	1008+400	1008+800	2.38	2.81	2.579	2.690	2.485
63	1008+800	1009+200	2.64	2.87	2.841	3.098	2.657
64	1009+200	1009+600	1.62	2.18	1.811	1.776	1.844
65	1009+600	1010+000	1.47	1.71	1.659	1.636	1.682
66	1010+000	1010+400	2.00	2.19	2.197	2.187	2.196
67	1010+400	1010+800	1.99	2.20	2.189	2.178	2.190
68	1010+800	1011+200	1.37	1.57	1.560	1.551	1.567
69	1011+200	1011+600	1.43	1.65	1.616	1.598	1.633
70	1011+600	1012+000	1.46	1.52	1.649	1.627	1.670
71	1012+000	1012+400	1.46	1.46	1.644	1.622	1.665
72	1012+400	1012+800	1.34	1.61	1.525	1.521	1.524
73	1012+800	1013+200	1.65	1.96	1.837	1.800	1.870
74	1013+200	1013+600	1.65	1.92	1.837	1.800	1.870
75	1013+600	1014+000	1.65	2.06	1.837	1.800	1.870
76	1014+000	1014+400	1.23	1.62	1.416	1.434	1.384
77	1014+400	1014+800	1.42	1.49	1.603	1.587	1.618
78	1014+800	1015+200	1.53	1.95	1.715	1.686	1.743
		<b>PROMEDIO</b>	<b>1.50</b>	<b>1.6882</b>	<b>1.6882</b>	<b>1.6837</b>	<b>1.6882</b>

Fuente: Propia

Como resultado de la tabla 35, las ecuaciones que mejor correlacionan los pares ordenados son la regresión lineal y la regresión logarítmica, obteniéndose un valor promedio de IRI igual al obtenido con el Rugosímetro de MERLIN. Por lo tanto, se empleó la ecuación de regresión lineal para obtener el IRI del carril de subida (Urcos – Cusco) en función al eIRI de la aplicación Roadroid (previamente se realizó la toma de datos con la aplicación Roadroid, tabla 36) como se muestra a continuación:

Tabla 36: eIRI del carril Urcos - Cusco

N°	Distancia (m)	IRI con la aplicación Roadroid (m/km)	N°	Distancia (m)	IRI con la aplicación Roadroid (m/km)
1	400	1.32	40	16000	1.73
2	800	1.32	41	16400	1.65
3	1200	1.36	42	16800	1.73
4	1600	2.00	43	17200	1.30
5	2000	1.97	44	17600	1.53
6	2400	1.69	45	18000	1.42
7	2800	1.85	46	18400	1.40
8	3200	1.97	47	18800	1.51
9	3600	1.54	48	19200	1.45
10	4000	1.55	49	19600	1.91
11	4400	1.42	50	20000	1.80
12	4800	1.76	51	20400	1.66
13	5200	1.54	52	20800	2.46
14	5600	4.02	53	21200	2.28
15	6000	2.66	54	21600	1.68
16	6400	2.08	55	22000	1.43
17	6800	1.46	56	22400	1.85
18	7200	1.54	57	22800	1.89
19	7600	1.86	58	23200	1.66
20	8000	1.78	59	23600	1.82
21	8400	1.37	60	24000	1.80
22	8800	1.48	61	24400	2.71
23	9200	1.80	62	24800	1.90
24	9600	1.57	63	25200	2.00
25	10000	1.47	64	25600	1.58
26	10400	1.35	65	26000	1.91
27	10800	1.55	66	26400	1.81
28	11200	1.42	67	26800	2.72
29	11600	1.38	68	27200	1.71
30	12000	1.58	69	27600	1.49
31	12400	1.62	70	28000	1.53
32	12800	1.57	71	28400	2.35
33	13200	1.44	72	28800	1.71
34	13600	1.67	73	29200	1.45
35	14000	2.05	74	29600	1.57
36	14400	1.69	75	30000	1.51
37	14800	1.73	76	30400	1.43
38	15200	1.35	77	30800	1.76
39	15600	1.50	78	31200	1.38
				<b>Promedio</b>	<b>1.73</b>

Fuente: Propia