



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



**“DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DEL EQUIPO  
BASADO EN EL SENSOR DE DISTANCIA VL53L0X PARA EL  
CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL  
(IRI) APLICADO AL TRAMO KM 1326+000 - KM 1327+600 DE LA  
CARRETERA PUNO – JULIACA”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. ALAVE ARACA, KEYLA PAMELA**

**Bach. FLORES DUEÑAS, GERMAN ARMANDO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



NOMBRE DEL TRABAJO

DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA D  
EL EQUIPO BASADO EN EL SENSOR DE  
DISTANCIA VL53L0X PARA EL CÁLCULO  
DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACI  
ONAL (IRI) APLICADO AL TRAMO KM 13  
26+000 - KM 1327+600 DE LA C

AUTOR

ALAVE ARACA, KEYLA PAMELA - FLORE  
S DUEÑAS, GERMAN ARMANDO

RECUENTO DE PALABRAS

27990 Words

RECUENTO DE CARACTERES

146935 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

148 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.5MB

FECHA DE ENTREGA

Jan 25, 2024 6:42 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jan 25, 2024 6:44 AM GMT-5

● 9% de similitud general

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

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Cros:

● Excluir del Reporte de Similitud

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



Ing. Félix Rojas Chahuares  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA N° 2051221



Ing. Emilio Castillo Aroni  
DOCENTE UNIVERSITARIO  
COD. UNA N° 920514



## DEDICATORIA

A dios, por cuidar de mí en cada paso que he dado, por cuidar de mi salud en cada momento y acompañarme en cada decisión que he tomado.

A mis padres Julio y Lourdes, que siempre apoyaron mis sueños, me brindaron un amor incondicional y me abrieron las alas para volverme una mujer fuerte, a mi hermano Yeison que ha demostrado ser un excelente ejemplo para seguir, con su disciplina y determinación. A ustedes les debo todos mis logros familia, y les estoy eternamente agradecida.

A mis mejores amigos, Madeleine Velásquez y Gonzalo Salazar su apoyo en esta etapa ha sido fundamental para obtener este logro, los tengo presente siempre.

**Keyla Pamela Alave Araca**



## DEDICATORIA

A dios y a mi apreciada madre Nilda Valentina Dueñas Silva por su incondicional y constante apoyo y ser un ejemplo para seguir, muchos de mis aciertos y logros se los debo a ella y le estaré agradecido eternamente.

A mi pareja Doris y hermanos Rolhy, Gabriela y Gustavo, por el apoyo que me brindaron.

A mi hijo Jose Antonio por ser la motivación para poder obtener este logro, en esta etapa importante de mi formación profesional.

Gracias familia.

**German Armando Flores Dueñas**



## AGRADECIMIENTOS

Ante todo, queremos agradecer a Dios por brindarnos siempre las fuerzas para seguir en lo adverso, por darnos la vida, y protegernos durante todo el camino, en cada obstáculo superado, por guiarnos en el camino de lo sensato y darnos sabiduría para mejorar día a día.

A nuestras familias por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas, su dedicación, sus consejos y por estar siempre a nuestros lados de forma excepcional.

Nuestra gratitud, a la Universidad Nacional del Altiplano y a nuestra querida Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por su formación, a los docentes la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, que contribuyeron en cada etapa de nuestra formación universitaria.

Agradecemos profundamente a nuestro asesor de tesis el D.Sc. Felix Rojas Chahuares por su dedicación, apoyo incondicional y paciencia en guiarnos en este proceso tan importante en nuestra vida académica.

A los distinguidos miembros del jurado evaluador, Ing. Jose Luis Cutipa Arapa, Ing. Fausto Ponciano Mamani Mamani e Ing. Gleny Zoila De La Riva Tapia, cuyos argumentos, críticas y profesionalismo fueron cruciales para la realización de esta tesis, y también agradecer los consejos brindados en cada momento, ya que nos ayudaron a formarnos como investigadores y profesionales.

Finalmente, un agradecimiento de manera especial a nuestro amigo Alex Cano por todo el apoyo que nos ha brindado, acompañándonos incondicionalmente en todo el proceso de nuestra investigación, querido Alex, este logro queremos compartir contigo.

Muchas gracias.

**Keyla Pamela Alave Araca**  
**German Armando Flores Dueñas**



# ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN</b> .....	16
<b>ABSTRACT</b> .....	17
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	21
<b>1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	22
1.2.1. Problema General.....	22
1.2.2. Problemas Específicos .....	22
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	23
1.3.1. Hipótesis General.....	23
1.3.2. Hipótesis Específicas .....	23
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	24
<b>1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	26
1.5.1. Objetivo General .....	26
1.5.2. Objetivos Específicos.....	27



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	28
<b>2.2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	31
2.2.1.	Pavimento.....	31
2.2.2.	Tipos de Pavimento.....	33
2.2.3.	Evaluación de Pavimentos .....	34
2.2.4.	Carreteras .....	35
2.2.5.	Índice de Rugosidad Internacional (IRI).....	35
2.2.6.	Métodos de medida del IRI.....	38
2.2.7.	Caso particular de Éxito en el Perú: Rugosímetro de Merlín .....	40
2.2.8.	Rugosímetro de Merlín .....	41
2.2.9.	Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).....	47
2.2.10.	Variación de IRI.....	49
2.2.11.	Sensores y actuadores .....	52
2.2.12.	Medición de distancia y reconocimiento al usar los sensores ToF.....	53
2.2.13.	Niveles de Confiabilidad.....	55
2.2.14.	Estadística Descriptiva.....	56
2.2.15.	Estadística Correlacional.....	57

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1.</b>	<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	58
3.1.1.	Tipo de Investigación.....	58
3.1.2.	Nivel de Investigación .....	58
3.1.3.	Población y muestra .....	59



3.1.4. Variables .....	59
<b>3.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA .....</b>	<b>59</b>
<b>3.3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE IRI .....</b>	<b>60</b>
3.3.1. Programa del banco mundial para el cálculo del IRI .....	60
3.3.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el Equipo de Rugosímetro de Merlín .....	70
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
<b>4.1. RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
4.1.1. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido con el Rugosímetro Merlín .....	75
4.1.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) método de Mira y Nivel .....	87
4.1.2.1. Levantamiento topográfico de los tramos de prueba .....	87
4.1.2.2. Cálculo de IRI .....	90
4.1.3. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x.....	98
4.1.4. Procedimientos para la comparación del IRI con un equipo .....	103
4.1.4.1. Comparación de datos obtenidos con el programa del Banco Mundial y el Sensor V15310x.....	103
4.1.4.2. Correlación IRI obtenido entre sensor v15310x y Rugosímetro de Merlín .....	113
<b>4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>117</b>
4.2.1. Comprobación De Hipótesis .....	123
<b>4.3. DISCUSIÓN .....</b>	<b>126</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>130</b>



<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>133</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>144</b>

**Área:** Transportes

**Tema:** Carreteras

**Línea de investigación:** Transportes y gestión vial

**FECHA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS:** 30 de enero del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Equipos empleados para evaluar la regularidad de la superficie del pavimento .....	51
<b>Tabla 2</b> Programa de demostración del cálculo del IRI .....	63
<b>Tabla 3</b> Histograma para cálculo de Rango “D” de datos obtenidos con equipo de Rugosímetro de Merlín .....	83
<b>Tabla 4</b> Resultado de ensayo con equipo de Rugosímetro de Merlín .....	87
<b>Tabla 5</b> Muestra corta de toma de datos topográficos del tramo km 1326 + 000 hasta km 1327 + 600 huella derecha, carretera Puno-Juliaca .....	89
<b>Tabla 6</b> Valores iniciales para un $dx=0.5m$ en el funcionamiento del programa.....	90
<b>Tabla 7</b> IRI obtenido del programa del banco mundial con datos del levantamiento topográfico realizado. ....	94
<b>Tabla 8</b> IRI obtenido del programa del banco mundial con datos del levantamiento topográfico realizado .....	96
<b>Tabla 9</b> Modelo de procesamiento de datos .....	102
<b>Tabla 10</b> Tabla para el cálculo del IRI .....	104
<b>Tabla 11</b> Modelo de tabla de cálculo de IRI con la formula hallada con los datos del valor promedio del sensor v153l0x.....	110
<b>Tabla 12</b> Resumen de valores de IRI (sensor VL53L0X) vs IRI (rugosímetro).....	114
<b>Tabla 13</b> Modelo de tabla de cálculo de IRI con la formula hallada con los datos del valor promedio del sensor v153l0x.....	117
<b>Tabla 14</b> IRI obtenido con el método de Mira y Nivel (de 00 a 825 metros) .....	118
<b>Tabla 15</b> IRI obtenido con el método de Mira y Nivel (de 825 a 1606 metros) .....	120
<b>Tabla 16</b> Resultado de ensayo con equipo de Rugosímetro de Merlín .....	122



<b>Tabla 17</b>	Resultado de ensayo con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x .....	122
<b>Tabla 18</b>	Cuadro comparativo para hallar la eficiencia de los métodos de medición de IRI por costo y tiempo de 1.6 km .....	123
<b>Tabla 19</b>	Cuadro de resultado de eficiencia de los métodos de medición de IRI .....	125
<b>Tabla 20</b>	IRI con el método de Mira y Nivel .....	130
<b>Tabla 21</b>	IRI con el Rugosímetro de Merlín. ....	131
<b>Tabla 22</b>	IRI con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x .....	132



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Escala de valores del Índice de Rugosidad Internacional .....	37
<b>Figura 2</b> Cálculo de las variaciones en la superficie del pavimento en comparación con la cuerda promedio .....	42
<b>Figura 3</b> Medición de las desviaciones respecto a la superficie del pavimento, de la cuerda promedio .....	43
<b>Figura 4</b> Esquema Del Rugosímetro de Merlín (Vista De Perfil) .....	44
<b>Figura 5</b> Esquema Del Rugosímetro Merlín (Cortes) .....	45
<b>Figura 6</b> Escala utilizada para medir la dispersión de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto del nivel de referencia o la cuerda promedio (mid-cord deviations) .....	46
<b>Figura 7</b> Modelo del cuarto de carro .....	48
<b>Figura 8</b> Diferentes variaciones en el cálculo del IRI en función de la longitud de la evaluación .....	50
<b>Figura 9</b> Montaje desarrollado para la medida correspondiente a la deflexión de la membrana de Si .....	53
<b>Figura 10</b> Grafica de confianza estadística a un 95% .....	56
<b>Figura 11</b> Gráfica de estadística correlacional .....	57
<b>Figura 12</b> Ubicación de la muestra .....	60
<b>Figura 13</b> Equipos del sensor v15310x y el Rugosímetro de Merlín .....	70
<b>Figura 14</b> Esquema Del Rugosímetro Merlín .....	73
<b>Figura 15</b> Esquema Del Rugosímetro Merlín .....	73



<b>Figura 16</b>	Escala para medir la dispersión de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto del nivel de referencia, también conocidas como desviaciones de la cuerda media. (mid-cord deviations). ....	74
<b>Figura 17</b>	Laboratorio encargado, listos para iniciar con el Ensayo del Rugosímetro de Merlín .....	75
<b>Figura 18</b>	Formato para la recolección de datos de campo .....	76
<b>Figura 19</b>	Realización del ensayo con el Rugosímetro de Merlín.....	78
<b>Figura 20</b>	Valores obtenidos del ensayo de Rugosímetro de Merlín .....	79
<b>Figura 21</b>	Valores obtenidos del ensayo de rugosímetro de merlín colocados en Excel para cálculo de IRI .....	80
<b>Figura 22</b>	Modelo de histograma para cálculo de Rango “D” .....	80
<b>Figura 23</b>	Histograma para cálculo de Rango “D” de datos obtenidos con equipo de Rugosímetro de Merlín .....	82
<b>Figura 24</b>	Histograma para cálculo de Rango “D” de datos obtenidos con equipo de Rugosímetro de Merlín .....	86
<b>Figura 25</b>	Fotografía tomada del levantamiento topográfico del tramo km 1326 + 000 hasta km 1327 + 600 huella derecha, carretera Puno-Juliaca .....	88
<b>Figura 26</b>	Modelo del Programa del Banco Mundial en el Programa Excel.....	91
<b>Figura 27</b>	Modelo del Programa del Banco Mundial en el Programa Excel.....	92
<b>Figura 28</b>	Modelo de equipo que llevara el sensor para la toma de muestras .....	98
<b>Figura 29</b>	Equipo previo al inicio del montaje .....	99
<b>Figura 30</b>	Equipo montado en el vehículo.....	99
<b>Figura 31</b>	Recepción de datos del sensor vl53l0x .....	100
<b>Figura 32</b>	Modelo de recepción de datos del programa en block de notas por parte de la aplicación puTTY .....	101



<b>Figura 33</b>	Imagen de valor obtenido en programa Minitab de la correlación entre el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl53l0x y el IRI del método de mira y nivel .....	108
<b>Figura 34</b>	Grafica de dispersión en Excel entre IRI del método de mira y nivel Vs el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl53l0x.....	108
<b>Figura 35</b>	Grafica de dispersión en el programa Minitab entre IRI del método de mira y nivel Vs el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl53l0x..	109
<b>Figura 36</b>	Ecuación de regresión obtenida en el programa Minitab entre IRI del método de mira y nivel vs el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl53l0x.....	109
<b>Figura 37</b>	Imagen de valor obtenido en programa Minitab de la correlación entre el IRI del sensor de distancia vl53l0x y el IRI del rugosímetro de merlín.....	114
<b>Figura 38</b>	Grafica de dispersión en Excel entre IRI del Sensor de distancia vl53l0x Vs el IRI del Rugosímetro de Merlín .....	115
<b>Figura 39</b>	Grafica de dispersión obtenido en programa Minitab entre IRI del rugosímetro de merlín Vs el IRI del sensor de distancia vl53l0x .....	116
<b>Figura 40</b>	Ecuación de regresión obtenida en programa Minitab entre IRI del rugosímetro de merlín Vs el IRI del sensor de distancia vl53l0x .....	116
<b>Figura 41</b>	Imagen de porcentaje de confiabilidad obtenido entre el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl53l0x y el IRI del método de mira y nivel .....	125
<b>Figura 42</b>	Imagen de porcentaje de confiabilidad obtenido entre el IRI del sensor de distancia vl53l0x y el IRI del Rugosímetro de Merlín.....	126



## ACRÓNIMOS

MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
PROVIAS:	Proyecto Especial de Infraestructura del Transporte Nacional
IRI:	Índice de Regularidad Internacional
MERLIN:	Máquina para la Evaluación de la Rugosidad con Instrumentación de Bajo Costo
CCL:	Cámara del Comercio de Lima
IPE:	Instituto Peruano de Economía
TRRL:	Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos
RTRRMS:	Tipo de respuesta Sistema de medición de rugosidad de carreteras
VCSEL:	Vertical Cavity Surface-Emitting Laser (Láser emisor de superficie de cavidad vertical)
ToF:	Time of Flying (Tiempo de vuelo).
IMDA:	Índice Medio Diario Anual



## RESUMEN

La construcción de infraestructura en Perú es considerada como el primer objetivo prioritario de acuerdo con el Plan Nacional de Competitividad y Productividad. Por esta razón, se plantea la posibilidad de utilizar el sensor de distancia v15310x para realizar una evaluación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de una manera distinta al método tradicional con el Rugosímetro de Merlín. El sensor v15310x utiliza un láser de luz para medir el tiempo que dedica la luz en transitar una distancia determinada, lo que permite calcular la distancia al objeto mediante el tiempo de vuelo (ToF). El tipo de investigación es aplicada, de nivel explicativo, de diseño cuasi experimental de muestra por conveniencia, como población se toma la carretera Puno – Juliaca del KM 1326+000 hasta KM 1327+600, siendo la extensión de la muestra de 1600 metros. Se utiliza dos métodos convencionales: Rugosímetro de Merlín y mediante el método “mira y nivel”, este último procesado con el programa propuesto por el Banco Mundial para el cálculo del IRI, estos dos métodos se comparan con los valores promedio de los datos recopilados por el sensor de distancia v15310x, de esta manera se determinó la precisión de la obtención de datos con el sensor de distancia v15310x, logrando obtener un 89% de precisión comparada al método de mira y nivel siendo una correlación de Pearson fuerte, y un 99% de precisión comparada al método del rugosímetro de merlín siendo una correlación de Pearson casi perfecta, lo cual permite validar los datos obtenidos recopilados por el sensor de distancia v15310x los cuales al ser procesados por el método de valor promedio nos da resultados de IRI de clasificación tipo clase 1.

**Palabras Clave:** Equipos de Medición, IRI, Pavimento Flexible, Regularidad superficial, Superficie de Rodadura.



## ABSTRACT

The construction of infrastructure in Peru is considered the priority objective according to the National Competitiveness and Productivity Plan. For this reason, the possibility of using the v15310x distance sensor to conduct an evaluation of the International Roughness Index (IRI) in a different way to the traditional method with the Merlin Roughness Meter is proposed. The v15310x sensor uses a light laser to measure the time it takes for light to travel a given distance, allowing the distance to the object to be calculated using time of flight (ToF). The type of research is applied, at an explanatory level, with a quasi-experimental convenience sample design. The population is the Puno – Juliaca highway from KM 1326+000 to KM 1327+600, with the extension of our sample being 1600 meters. Two conventional methods are used: Merlin roughness meter and through the “sight and level” method, the latter processed with the World Bank program for calculating the IRI, these two methods are compared with the average values of the data collected by the sensor. v15310x distance sensor, in this way the precision of data collection with the v15310x distance sensor was determined, achieving 89% precision compared to the sight and level method, with a strong Pearson correlation, and 99% precision compared to the Merlin roughness meter method, being a perfect Pearson correlation, which allows us to validate the data obtained collected by the v15310x distance sensor which, when processed by the average value method, gives us class 1 type classification IRI results.

**Keywords:** Measuring Equipment, IRI, Flexible Pavement, Surface Regularity, Rolling Surface.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Según Ramos (2018) En los años setenta, el Banco mundial comenzó a financiar proyectos de desarrollo en países a través de la mejora de la infraestructura vial. Sin embargo, surgieron dificultades en la comparación de la calidad de las carreteras debido a la falta de estándares y equipos de medición homogéneos. Esta disparidad se debió principalmente a las diferencias en la dinámica de los motores de los vehículos que eran utilizados para medir la regularidad superficial.

La sensación de comodidad, seguridad y confort que un conductor experimenta al circular por una carretera está principalmente determinada por su regularidad. Es importante destacar que el conductor valora más la regularidad de la superficie de la carretera que su capacidad para soportar peso, ya que solo le interesa esta última en relación con la aparición de baches y deformaciones. (Sánchez & de Solmniac, 1989)

Como afirma Badilla (2011) varios estudios han demostrado que la magnitud de las ondulaciones superficiales que tiene un pavimento muestra un impacto en la velocidad de circulación, la degradación del vehículo y el consumo de combustible. Los efectos dinámicos de las irregularidades de las carreteras pueden verse no solo en los vehículos sino también en los cambios del estado de esfuerzo y las deformaciones mostradas en la estructura del pavimento, lo que puede aumentar los costos de conservación y de rehabilitación. La regularidad de la superficie de un pavimento desde el principio de su periodo de servicio o en cualquier momento de su vida útil permitirá determinar qué medidas de conservación o rehabilitación se deben tomar en el momento adecuado.



El Rugosímetro Merlín, creado por el TRRL fue basado en el principio del perfilómetro estático, que se creó con el objetivo de lograr crear un equipo de bajo costo, fácil de manejar y un método que tenga un análisis simple con resultados confiables. La principal ventaja del uso de Merlín es la precisión de los resultados, que solo puede ser superada por el método de nivel de ingeniero y observación. (Almanza, 2014)

De acuerdo con Del Águila (1999). El TRRL presentó el Rugosímetro Merlín en Perú en 1993, tres años después de su lanzamiento. Aunque el método original para lograr el cálculo de la rugosidad incluye un método que es de medición sencillo y un proceso simple de cálculo gráfico, el cual no permite de por sí obtener un rendimiento óptimo con el equipo, un problema que ya se ha identificado. De 1993 a 1998, se utilizó el Merlín para evaluar la rugosidad de más de 3,000 kilómetros de carreteras en Perú, lo que dio lugar a la creación de una metodología propia.

En Perú, el MTC y Provias Nacional, manejan las redes viales a través de contratos de conservación que se dan por niveles de servicio con empresas privadas. La rugosidad del pavimento es un indicador del nivel de servicio de las vías, esto citado en Almanza, (2014).

La economía peruana depende en gran medida del sector de la construcción no solo por la ejecución de megaproyectos, sino también de su vínculo con actividades de producción en diferentes sectores industriales. Según la Cámara del Comercio de Lima (2022), se destaca la importancia de la construcción ya que el aporte económico corresponde al 6,7% del PBI nacional durante el año 2022.

Según el Instituto Peruano de Economía (2017) publicado en la Revista Costos, existe una gran diferencia en materia de infraestructura de transporte esta asciende a US\$ 57,499 millones durante el periodo evaluado del 2016 al 2025. Realizando una



comparación con otros sectores, esta es la brecha más significativa que debe cerrarse. El sector de transporte representa el 36% de las brechas correspondientes a infraestructura de mediano y largo plazo, seguido de energía con un 19%, en tercer lugar, está telecomunicaciones con un 17%, seguido de salud con un 12%, no muy distante se encuentra agua y saneamiento con un 8%, finalmente hidráulica con un 5% y educación con un 3%, según la investigación realizada por la Universidad del Pacífico.

Según el Informe Anual 2023 del Gobierno Regional de Puno, solo el 20% de la Red Vial Departamental se encuentra en buen estado, lo que implica un margen de mejora del 80%. Por esta razón, esta investigación tiene como foco implementar un nuevo método de medición del IRI utilizando el sensor de distancia v15310x. Este método ofrece una evaluación rápida, a bajo costo y con un nivel de precisión aceptable según los estándares del Banco Mundial. El propósito es desarrollar un prototipo que a futuro puede ser de implementación a nivel local y, a largo plazo, facilitando la toma de decisiones para la conservación de los pavimentos flexibles.

Para lograr esto, nos centraremos en la validación de la presente propuesta mediante la correlación de datos entre el método Mira y Nivel, el Rugosímetro de Merlín y la recolección de datos a través del sensor de distancia v15310x. Utilizaremos un enfoque cuantitativo y una investigación de tipo aplicativo, a nivel explicativo, con un diseño no experimental. La población seleccionada para este estudio corresponde al pavimento flexible de la carretera Puno-Juliaca, específicamente en el tramo de muestra que va desde el KM 1326+000 hasta el KM 1327+600, con una extensión total de 1600 metros.

El presente trabajo de investigación está dividido en siete capítulos, en el primer capítulo, se aprecia las generalidades, que ayudaron a guiar el desarrollo de la presente investigación, seguido del capítulo segundo, que muestra una revisión de literatura,



mientras que, en el capítulo tercero, se muestra lo relacionado con los materiales y métodos, en el capítulo cuarto se muestra y discute los resultados, en el capítulo cinco se dan las conclusiones, en el capítulo seis se han considerado las recomendaciones respectivas y finalmente en el capítulo siete se muestran las referencias y posterior los anexos.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

De acuerdo con la publicación de Schwab (2017), donde se muestra el Informe de Competitividad Global 2017-2018, el Perú ocupa el lugar 108 en calidad de infraestructura de vial con un valor de 3.0 sobre una escala de 1 a 7 es decir que la calidad de las infraestructuras viales en el Perú está por debajo de la mediana que sería 3.5.

Dentro del análisis de las deficiencias de infraestructura o de acceso a servicios PMI 2025-2027 del Gobierno Regional de Puno, la red vial departamental del Departamento de Puno consta de 1,803.90 km. Su principal objetivo es conectar las capitales de las provincias. De ese total, 393.20 km corresponden a carreteras pavimentadas, 1,303.80 km a carreteras afirmadas, 33.60 km a carreteras sin pavimentar y 73.30 km a caminos transitables. En la Red Vial Departamental, solo un poco más del 20% de su longitud total está en buenas condiciones. (Hanco, 2023)

Parte de estas carreteras departamentales es objeto de estudio de esta investigación, nos referimos a la carretera de Juliaca-Puno, tramo Km 1326+000 hasta al Km 1327+600. Existen diversos indicadores en la medición de la calidad, uno de ellos en las vías terrestres es la del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), la cual mide la calidad de rodadura del camino, sabemos que el Rugosímetro de Merlín, es de los equipos más baratos y eficientes en esta medición, sin embargo, su procedimiento de toma de datos es manual lo cual lo hace ineficiente. En ese entender la presente propuesta



busca poder mejorar la velocidad de toma de datos mediante el sensor de distancia v15310x, y de esta manera lograr que empresas locales y/o entidades públicas puedan replicar las evaluaciones a fin de tomar medidas de conservación vial de manera anticipada y tener control de la conservación y una rápida acción ante el desgaste habitual por uso de carreteras, y así lograr tener una mejor calidad de infraestructuras viales, mejorando la transitabilidad de la red vial departamental del Departamento de Puno.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es la eficiencia obtenida con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x, comparado con el Rugosímetro de Merlín y el método Mira y nivel, para medir el IRI, tomando como tramo de prueba del KM 1326+000 hasta KM 1327+600 del pavimento flexible de la carretera Puno-Juliaca?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el tramo del KM 1326+000 hasta KM 1327+600 del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el método de mira y nivel?
- ¿Cuál es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el tramo del KM 1326+000 hasta KM 1327+600 del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el Rugosímetro Merlín?
- ¿Cuál es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el tramo del KM 1326+000 hasta KM 1327+600 del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el equipo basado en el sensor de distancia v15310x?



## **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Hipótesis General**

El nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia v15310x comparado con el Rugosímetro de Merlín y el método de Mira y Nivel tienen una relación de confiabilidad que superan el 90% al medir el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible en el tramo de la carretera Puno-Juliaca de KM 1326+000 hasta KM 1327+600.

### **1.3.2. Hipótesis Específicas**

- El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el método de mira y nivel presenta valores de precisión, y existe relación con los datos obtenidos con el sensor distancia v15310x para el cálculo del IRI con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x.
- El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el Rugosímetro Merlín presenta valores de precisión, y existe relación con el IRI obtenido con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x.
- El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el equipo basado en el sensor de distancia v15310x presenta valores de precisión con mayor eficiencia en la recolección de datos.



#### 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En el Perú y la Región de Puno, para evaluar el estado de las carreteras, existen muchos factores y métodos; dentro de esta evaluación es necesario realizar mediciones constantes del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), de acuerdo a Saldaña et al. (2017) los métodos más rápidos que son de clase III y IV, estos no presentan una precisión adecuada, y los métodos de clase I y II presentan un perfil de precisión mayor, sin embargo son lentos y costosos, por ello, se plantea poder tomar estos datos con la ayuda del sensor de distancia v15310x donde se pretende optimizar este proceso, mantener una precisión alta de clase I y a un bajo costo.

La muestra tomada en la presente investigación es una muestra por conveniencia. Según Campbell et al.; (2020) se realiza el muestreo intencionado o por conveniencia. Esta es una técnica que se emplea para elegir a las piezas que tienen una alta posibilidad de proporcionar información relevante y valiosa. Por lo tanto, permite identificar y seleccionar los casos que se utilizarán de manera efectiva, también los recursos limitados dentro de la investigación, ya que, estos se toman debido a los objetivos y propósitos del estudio.

Según Sayer et al. (1986), mediante un método tradicional de levantamiento con mira y nivel, se puede referenciar una sección de 320 metros por día, lográndose tomar en tres días 2500 datos, a cada 50 cm, lo cual acorde a un estudio aplicado en Brasil, se demostró que 320 metros es una muestra de rugosidad relevante para determinar un análisis de mira y nivel. Sin embargo, la recomendación planteada es que la longitud no sea menor a 160 metros lineales. En esta investigación se ha tomado una extensión de 1600 metros, con una toma de 3200 datos, tomados cada 50 cm, cumpliendo los requisitos mínimos establecidos acorde al Banco Mundial.



Camacho (2008), nos indica que el método más común para la asociación lineal entre dos variables cuantitativas es la correlación de Pearson. Además de ello, Ortiz y Rico (2021), nos confirma que el comportamiento en la correlación de Pearson se observa a través de una pareja de valores. Ambos autores nos confirman que un mínimo de datos para hallar la correlación de Pearson son 2. En la presente investigación, se tienen 147 datos disponibles en 1600 metros del levantamiento mediante el sensor de distancia VI5310x y 4 datos correspondientes al Rugosímetro de Merlín, ya que cada ciclo corresponde a 400 metros. Por lo cual cumplimos los datos necesarios para aplicar la correlación de Pearson.

Para complementar, en la presente investigación, se decidió tomar la muestra por conveniencia del tramo del KM 1326+000 hasta KM 1327+600 del pavimento flexible Puno-Juliaca, siendo una extensión de 1600 metros, debido a las condiciones óptimas que presenta el tramo, esto con el objetivo de calibración del sensor de distancia VI5310x. Tomando las siguientes consideraciones dentro de la preevaluación: El tramo escogido, es un tramo recto, sin curvaturas ni pendientes pronunciadas, no presenta rompemuelles, canaletas o algún elemento estructural de obra de arte que pueda generar alteraciones al momento de tomar los datos con el Rugosímetro de Merlín, la extensión del tramo cumple 4 ciclos del Rugosímetro de Merlín, ya que cada IRI obtenido por este método, representa una extensión de 400 metros. La accesibilidad al tramo y su condición de carretera de primera clase establecido acorde al MTC (2013), ya que conecta dos provincias con un flujo continuo de vehículos en movilización constante, por lo cual la huella que se genera con la rodadura de las llantas del margen derecho de la vía es clara. Por lo cual se puede obtener una muestra real y considerable para la presente investigación.

**Relevancia social:** Se promueve la investigación en la región de Puno, al plantear la creación de un prototipo de equipo nuevo. El cual puede ser utilizado para la toma de



datos en campo para el cálculo del IRI a nivel académico y de ser replicado a mayor escala, se podría utilizar por empresas de la región.

**Implicaciones prácticas:** El uso del Rugosímetro de Merlín convencional en una carretera, es un método lento, ya que se realiza el ensayo de manera manual cada 2 metros, lo que ocasiona un alto uso de recursos para el ensayo. La solución presentada para este problema es el uso del nuevo equipo basado en el sensor de distancia v15310x, el cual es aún más barato que un Rugosímetro de Merlín, y se prevé tener resultados de clasificación clase I, siendo esta clase, la más precisa y confiable.

**Valor teórico:** Se aporta a la investigación en la región Puno, para la creación de equipos nuevos en el ámbito de carreteras y vías, de ser factible podría replicarse a niveles de mayor escala y de uso en la región y todo el territorio peruano.

**Utilidad metodológica:** La investigación presentada determinará el nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia v15310x. Esta determinación se dará con la comparación de toma de datos entre el Rugosímetro de Merlín, el método de “mira y nivel” y el equipo basado en el sensor de distancia v15310x, como población se tomará el KM 1326+000 hasta KM 1327+600 de la carretera Puno – Juliaca.

## 1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.5.1. Objetivo General

Determinar el nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia v15310x comparado con el Rugosímetro de Merlín y el Método de Mira y Nivel tienen una relación de confiabilidad que superan el 90% al medir el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible en el tramo de la carretera Puno-Juliaca de KM 1326+000 hasta KM 1327+600.



### 1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar si el índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el método de mira y nivel presenta valores de precisión.
- Determinar si el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el Rugosímetro Merlín presenta valores de precisión.
- Determinar si el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el equipo basado en el sensor de distancia v15310x presenta valores de precisión.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Goicochea & Ibáñez (2020), en su tesis que les permitió alcanzar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Cesar Vallejo, la cual lleva por título: Análisis comparativo entre el sistema Roadroid y el procedimiento fotogramétrico, para realizar el diagnóstico IRI de la Av. Enrique Meiggs, Chimbote – 2020, el objetivo de la tesis fue comparar el IRI del pavimento flexible de la Av. Enrique Meiggs (tramo que va desde el cruce del estadio Manuel Rivera Sánchez hasta llegar a la Av. José Gálvez)

Chayña (2022), en su tesis que le permitió obtener el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Cesar Vallejo, titulada: Estudio comparativo de la condición superficial del pavimento flexible aplicando el Software Evalpav y Método de Rugosidad de Merlín en la Av. Argentina de la Ciudad de Arequipa, el propósito era evaluar el pavimento flexible y comparar el uso del programa EvalPav con respecto al método del Merlín aplicado a la Av. Argentina de la ciudad de Arequipa.

Bong & Servan (2022), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Cesar Vallejo, titulada: Evaluación de la carretera Banda de Shilcayo – Tres de Octubre Km. 625+000 - 629+000, mediante el Rugosímetro de Merlín y Roadbump, San Martín 2022, donde el objetivo fue realizar la evaluación para lograr una comparativa sobre el costo y ventajas de ambos métodos.

Lanado (2021), en su tesis que le permitió obtener el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Andina Del Cusco, titulada: Determinación del Índice de Serviciabilidad e Índice de Condición del pavimento de la ruta CU-100 tramo



Izcuchaca - Huarucondo, utilizando el Rugosímetro de Merlín y dron: Se planteó evaluar el estado del pavimento flexible de la Ruta CU-110 Tramo Izcuchaca - Huarucondo, el presente estudio comprendió 08+245 km en el cual se aplicó los métodos de Índice de Serviciabilidad de Pavimento (PSI) y el Índice de Condición de Pavimento (PCI), determinándose en función a la rugosidad y fallas del pavimento.

Chambilla & Ramos (2021), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Cesar Vallejo, titulada: Evaluación de pavimento flexible mediante método del Rugosímetro de Merlín y el aplicativo IRI - calcfree en la avenida Simón Bolívar - Puno, donde el objetivo de la investigación es efectuar la Evaluación de Pavimento flexible mediante método de Rugosímetro de Merlín y el aplicativo IRI-Calc-Free en realizando una comparación de similitudes de IRI entre ambos métodos.

Bustamante & Cayo (2019), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Andina Del Cusco, titulada: Contraste del índice de rugosidad internacional mediante mediciones de RPAS y smartphome en la carretera Enaco – Pumamarca, Cusco 2019, donde el objetivo fue contrastar el Índice de Rugosidad Internacional mediante mediciones de RPAS y Smartphone en la Carretera Enaco - Pumamarca, a través del costo, tiempo, dificultad de recolección de datos y dificultad de procesamiento de datos.

Lloclla & Sánchez (2019), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Andina Del Cusco, titulada: Análisis comparativo del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento de la av. La Cultura de la Ciudad del Cusco mediante el aplicativo para smartphome Roadroid, Rugosímetro Electrónico Bump Integrator B1-100a y Rugosímetro de Merlín, en esta investigación se planteó



realizar la comparación de métodos, para evaluar el IRI y las condiciones del pavimento, asimismo, muestran diferentes IRI's obtenidos entre cada método planteado.

Angarita & Sánchez (2017), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero (a) en Topografía, de la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, titulada: Comparación del índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos, donde el objetivo fue obtener el IRI mediante metodología fotogramétrica y métodos tradicionales de topografía, en un trayecto de vía compuesta por pavimento flexible.

Ramírez (2017), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, titulada: Cálculo del IRI mediante acelerómetro de smartphone en el tramo Huarmey – Casma de la carretera Panamericana Norte, donde el objetivo fue explicar el concepto de rugosidad en pavimentos y la importancia del IRI en carreteras; y comparar los resultados de los cálculos del IRI obtenidos con una aplicación para teléfonos inteligentes y un perfilómetro láser en un tramo de la vía nacional.

Hirpahuanca (2016), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Andina Del Cusco, titulada: Determinación y comparación de la Regularidad Superficial del Pavimento de la carretera Cusco-Urcos, usando teléfonos inteligentes y el Rugosímetro de Merlín – 2016. Planificaron medir y comparar los resultados obtenidos, así como evaluar los beneficios de usar la aplicación Roadroid en comparación con el Rugosímetro de Merlín.

Asencios (2016), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, titulada: Medición y comparación de la rugosidad en pavimentos de la ciudad de Huánuco: mediante



smartphone y un método tradicional, En ese lugar, se propuso realizar una evaluación del estado de los pisos de la ciudad de Huánuco y sus alrededores. Determinar y destacar los beneficios de esta aplicación en comparación con las técnicas de cálculo del IRI más comunes. Finalmente, verifique el desempeño y la eficacia del programa Roadroid en comparación con el método Mira y Nivel para el cálculo del IRI.

Almanza (2014), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad Nacional del Altiplano, titulada: Evaluación del modelo “quarter car” para la estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del tramo Huancavelica - Santa Inés, se buscó estudiar, evaluar y relacionar los hallazgos del Equipo Roughmeter III con la estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la carretera Huancavelica - Santa Inés. Este equipo presenta datos que se obtienen de manera directa e indirecta.

Onofre, Sánchez & Santiago (2008), en su tesis que les permitió optar el título profesional de Ingeniero Civil, de la Universidad de El Salvador, titulada: Determinación del Índice de Rugosidad Internacional de pavimentos usando el Perfilómetro Romdas z-250. donde el objetivo fue obtener el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en pavimentos asfálticos utilizando el perfilómetro Romdas Z-250.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Pavimento**

El MTC (2013) nos dice que el pavimento es una estructura de múltiples capas que se coloca sobre la superficie del camino para distribuir y resistir los esfuerzos causados por los vehículos y mejorar la seguridad y la comodidad del tránsito. Por lo general son la capa de rodadura, la base y la subbase que la conforman.



**a) Capa de Rodadura:**

Según Garzón & Hernandez, (2018) la capa de rodadura está hecho de materiales pétreos y mezclas asfálticas. Esta capa recibe las cargas vehiculares de manera directa y los efectos ambientales tales como la lluvia y la radiación solar, la capa de rodadura es resistente al tráfico y al intemperismo y protege la estructura impermeabilizando el pavimento. Para ayudar a la circulación de los vehículos, la textura de la superficie de la capa de rodadura debe tener dos características: suavidad, porque es importante que sea cómoda, y rugosidad, para la seguridad.

**b) Base:**

La base, es la capa que se encuentra debajo de la capa de rodadura y se encarga principalmente de soportar, repartir y transmitir las cargas causadas por el tránsito. Esta capa debe estar hecha de material que sea granular drenante (CBR de al menos 80%) o debe estar tratada con asfalto, cal o cemento. MTC (2013)

**c) Subbase:**

Vergara, (2015). Nos indica que la subbase se encuentra debajo de la base y encima de la subrasante. Su función es soportar, trasladar y distribuir uniformemente las cargas en la capa asfáltica. Se compone por materiales granulares que permiten que funcione como una capa de drenaje y previene problemas causados por la acumulación de agua debido al congelamiento a bajas temperaturas. A su vez, la subbase logra controlar los cambios de volumen y la elasticidad del suelo de la fundación, lo cual podría dañar el pavimento.



### 2.2.2. Tipos de Pavimento

Los tipos de pavimento acorde al Manual de carreteras - Suelos, geología, geotecnia y pavimentos del MTC (2013) son los siguientes:

- Pavimentos Flexibles
- Pavimentos Semirrígidos
- Pavimentos Rígidos

#### a) **El Pavimento Flexible:**

Acorde a Castaño et al. (2009) Este tipo de pavimento está formado por una carpeta de asfalto que generalmente se apoya sobre dos capas no rígidas: la base y la subbase. Sin embargo, según las exigencias específicas de cada trabajo, es posible prescindir de cualquiera de estas capas.

#### b) **El Pavimento Semirrígido:**

Acorde al MTC (2013), nos indica que el pavimento semirrígido se constituye principalmente por diferentes capas asfálticas que conforman una superficie resistente (con una carpeta asfáltica caliente encima de una base tratada con asfalto). También se considera pavimento semirrígido aquel que está compuesto por una carpeta asfáltica por encima de una base tratada con cemento o cal. Los pavimentos adoquinados también se incluyen dentro de esta categoría de pavimento semirrígido.

#### c) **El Pavimento Rígido:**

Unifort (2023) afirma que un pavimento rígido se refiere a un pavimento autoportante hecho de una losa de cemento portland la cual se apoya en la base o



una capa de subbase, por lo cual, los esfuerzos se transmiten directamente al suelo con un impacto mínimo.

Según el MTC (2013), los pavimentos de concreto que tienen juntas son los que mejor se adaptan a la realidad nacional debido a su buena funcionalidad y a los periodos de diseño cortos que suelen emplearse.

### 2.2.3. Evaluación de Pavimentos

Según Badilla (2011), la información obtenida por la evaluación de pavimentos se puede utilizar tanto en el diseño como en la gestión de infraestructura, lo que permite priorizar actividades de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.

Según Del Águila (2019), la evaluación estructural de pavimentos se enfoca principalmente en determinar la capacidad portante que tiene el sistema pavimento-subrasante en un sistema vial ya existente en términos de módulos de capas. Esta evaluación compete durante la construcción para verificar que su desempeño logra cumplir con lo descrito en el diseño, o en algún momento de su vida útil para verificar niveles de servicio, cuantificar las necesidades de servicio y evaluar la capacidad portante del sistema pavimento.

Para terminar Badilla (2011), reconoce que hay dos diferentes de evaluaciones en los pavimentos: **la evaluación estructural** (que evalúa la capacidad del pavimento para soportar la carga transmitida por vehículos) y **la evaluación funcional** (que evalúa lo que percibe el usuario al usar una vía específica).

#### **2.2.4. Carreteras**

Acorde al MTC (2013), las carreteras se definen como un camino de por lo menos dos ejes con particularidades geométricas definidas de acuerdo con las normas técnicas vigentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, incluido el derecho de vía.

Ferrovial (2023), nos indica que, el término "carretera", también conocido como "ruta", se refiere a un camino utilizado principalmente para transportar vehículos. El camino es de uso público y se puede conectar a través de varios accesos con otros tipos de vías como autopistas o con propiedades cercanas.

#### **2.2.5. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)**

##### **2.2.5.1. Definición**

El IRI se caracteriza por la acopiar movimiento vertical causado por la suspensión de una rueda (conocido como el cuarto de carro) a una velocidad de referencia de 80 km/h. El modelo de cuarto carro (quarter car) se basa en una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de suspensión, un amortiguador y la masa del vehículo soportada por la suspensión de la rueda. (Tingal, 2021)

El Banco Mundial propuso el Índice Internacional de Rugosidad, también conocido como IRI (International Roughness Index), en 1986 como un estándar estadístico de rugosidad y un parámetro de referencia para medir la calidad de la rodadura de un camino. (Pradena, 2006)

El Índice Internacional de Rugosidad se calcula dividiendo la distancia trazada sobre un camino (en metros, kilómetros o incluso millas) por los



desplazamientos del vehículo (en milímetros, metros o pulgadas) y la masa superior con referencia a la masa inferior de un modelo de vehículo (el cuarto de carro). El IRI se puede representar en unidades como mm/m, m/km, in/mi y así sucesivamente. (Arriaga et al., 1998)

Por lo que, Pradena (2006) en su investigación concluye que, la medida de regularidad tiene la mayor influencia en los valores estimados del Índice de Serviciabilidad. Esta es una de las causas por las que el IRI es utilizado en todo el mundo porque le da al usuario una apreciación directa de la calidad del servicio de la vía.

#### **2.2.5.2. Escala y características del IRI**

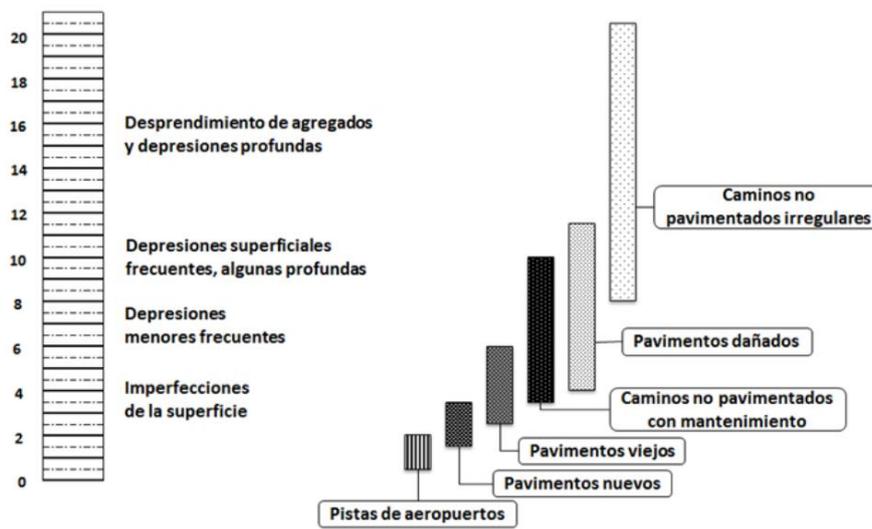
Acorde a la investigación de Arriaga et al. (1998), las dimensiones y características del IRI son las siguientes:

- a) Las unidades utilizadas son mm/m, m/km o in/mi.
- b) Para un camino pavimentado, el rango de escala IRI es de 0 a 12 m/km (o también de 0 a 760 in/mi), donde 0 indica una superficie que es perfectamente uniforme y 12 indica que es un camino intransitable.
- c) El IRI es igual a cero en una superficie con una inclinación constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto). Como resultado, la pendiente no tiene influencia en el valor del IRI ni en los cambios de pendiente.

A continuación, la Figura 1 muestra la escala de valores del Índice de Rugosidad Internacional:

**Figura 1**

*Escala de valores del Índice de Rugosidad Internacional*



Tomado de: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. Por EUM, 2016 (<https://normas.imt.mx/normativa/N-CSV-CAR-1-03-004-16.pdf>)

Acorde a Angarita y Sánchez (2017), los valores de IRI establecidos para los niveles de aceptación y rechazo en términos de los requisitos del contrato son:

**Rango de aceptación** :  $0 < \text{IRI} \leq 2.95 \text{ m/Km}$

**Rango de rechazo** :  $\text{IRI} > 2.95 \text{ m/Km}$

Además, Angarita y Sánchez (2017), explican que entre los factores más cruciales a considerar al definir el IRI de una superficie se encuentran estos cuatro elementos:

- a) **Seguridad y comodidad:** Las condiciones óptimas para los usuarios de las vías se logran con una buena regularidad superficial.
- b) **Costos de operación vehicular:** Acorde a la magnitud de las irregularidades superficiales encontradas, la velocidad de circulación se ve afectada negativamente, lo que puede reflejar un desgaste superior en las llantas y



los componentes mecánicos del vehículo, así como un considerable consumo de combustible.

**c) Efectos dinámicos:** Se presentan en las irregularidades de las vías, que pueden verse reflejadas no solo en los vehículos, sino en alteraciones de estado de esfuerzos como en las deformaciones del sistema del pavimento, lo que puede conllevar al aumento de costos de las actividades de conservación (mantenimiento, restauración o reconstrucción).

**d) Acciones de conservación de las vías:** Un indicador importante de la calidad de la construcción de las vías es la rugosidad inicial de los pavimentos.

#### **2.2.6. Métodos de medida del IRI**

De acuerdo con la clasificación dada por la investigación de Sánchez & de Solmniac (1989), nos indican que son cuatro grupos y/o clases, para la estimación de la medida del índice IRI, las cuales se detallarán a continuación:

##### **a) Clase 1. Los Perfiles de Precisión**

Esta clase es la más precisa en la medición y cálculo del IRI; requiere una medida de precisión del perfil longitudinal y se define mediante una serie de elevaciones a pequeñas distancias. Actualmente, solo los métodos de Clase 1 son los de "mira y nivel" y "viga y nivel". Estos métodos son adecuados para convalidar y calibrar otras técnicas. No se recomienda para grandes auscultaciones debido a su bajo rendimiento y excesiva precisión en comparación con la incertidumbre de la trayectoria recorrida. (Sánchez & de Solmniac, 1989)

**b) Clase 2. Otros métodos perfilométricos**

Este grupo incluye otras técnicas que utilizan las mediciones del perfil longitudinal para calcular el IRI, pero no tienen la precisión de la clase 1. Esta clase incluye medidas realizadas con perfilómetros de velocidad alta y los métodos estáticos que no cumplen con los criterios de precisión y determinación de clase uno. Actualmente, se pueden encontrar en el mercado perfilómetros de clase uno y clase dos que han sido verificados por su eficacia para medir el IRI en todas las irregularidades y longitudes de onda necesarias. (Sachún, 2016)

**c) Clase 3. Estimaciones del IRI mediante correlaciones**

Anteriormente, se utilizaban otros sistemas de medición para la rugosidad por reacción o sistemas tipo respuesta para medir la regularidad superficial, que estaba conectado a las características dinámicas del vehículo. Las ecuaciones de correlación que se obtenían de la calibración de los equipos de clase 1 o 2 se utilizaron para corregir y convertir estos datos recolectados a la escala del IRI. Debido a que las características mecánicas cambiaban fácilmente, se utilizaban controles extremadamente rigurosos. Después de estas variaciones, el vehículo se recalibró. (Sayers, et al., 1986).

Según Del Águila, (1999) El NAASRA Meter, el Bump Integrator y el metro Mays son algunos de los equipos más usados.

Aunque el instrumento Merlín no mide el perfil longitudinal, se pueden obtener valores de irregularidad superficial que están relacionados con el IRI. Este aparato de medición necesita ser calibrado con frecuencia. (Ramírez, 2017)



**d) Clase 4. Valores subjetivos y medidas sin calibrar**

En ocasiones, debido a factores económicos u otros motivos, es necesario tener conocimiento del aproximado del estado de la uniformidad superficial de una carretera. Sin embargo, es recomendable establecer una conexión entre la evaluación de esta regularidad superficial y la escala IRI. Por lo cual, se puede utilizar un aparato de tipo respuesta, el cual puede estar sin calibrar para evaluar el estado de la carretera, también se puede estimar mediante las sensaciones de confort y la seguridad que experimenta una persona experta en el tema al circular por una carretera.

La conversión de estas observaciones hacia la escala IRI se reduce a una equivalencia, que se aproxima y se relaciona con descripciones del estado del pavimento flexible en función del valor IRI. Estas medidas o inspecciones visuales se consideran de Clase 4. (Sánchez & de Solmniac, 1989)

**2.2.7. Caso particular de Éxito en el Perú: Rugosímetro de Merlín**

El método utilizando del rugosímetro de Merlín, creado por el TRRL de Gran Bretaña, cuenta con la mayor experiencia en el Perú. Según la clasificación del Banco Mundial, el método de evaluación del Merlín obtiene una calificación de Clase 3 debido a que utiliza una ecuación de correlación, valga la redundancia, para correlacionar los valores que evalúa acorde a la escala del IRI. Sin embargo, debido a su diseño como una variación de un perfilómetro estático y a la alta precisión de sus resultados, se considera un método Clase 1. (Del Águila, 1999)

### 2.2.8. Rugosímetro de Merlín

#### a) **Métodos y equipos para la medición de la rugosidad superficial de los Pavimentos**

El Rugosímetro de Merlín, creado por el Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL) basándose en el principio del perfilómetro estático, se creó con el objetivo de obtener un equipo de bajo costo, fácil de manejar y un método de análisis simple con resultados confiables. (Del Águila, 1993)

A pesar de la gran precisión de los resultados del Rugosímetro de Merlín, que solo es superada por la precisión del método topográfico, Mira y Nivel, la desventaja del equipo es su bajo rendimiento en comparación con los rugosímetros dinámicos automatizados como el Bump Integrator, Mays Meter, Laser Perfilometer, etc. (Sechún, 2016)

Rivera, (2017) declara que, cuando se trata de evaluar la rugosidad de vías de gran longitud (100 km o más), se hace más evidente la gran cantidad de tiempo que se requiere para recopilar datos y calcular el IRI utilizando el método gráfico original establecido por el TRRL. Además, hay muy poco tiempo disponible para hacerlo.

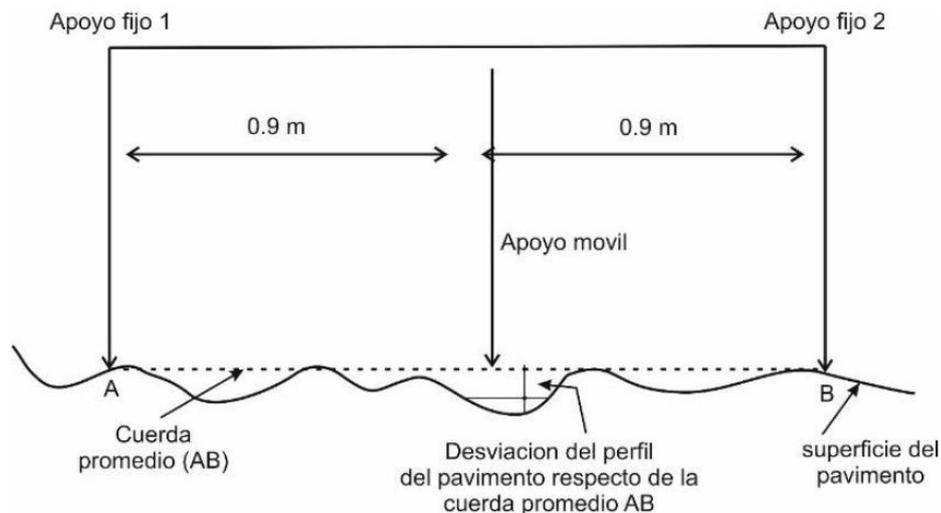
#### b) **Fundamentos teóricos**

La distribución de las ondulaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio es el fundamento para determinar la rugosidad de un pavimento. El Merlín mide el desplazamiento vertical entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante, como se muestra en la Figura

2. (Del Águila, 1999). "La desviación respecto a la cuerda promedio" es el término utilizado para describir el desplazamiento. (Tingal, 2021).

## Figura 2

*Cálculo de las variaciones en la superficie del pavimento en comparación con la cuerda promedio*

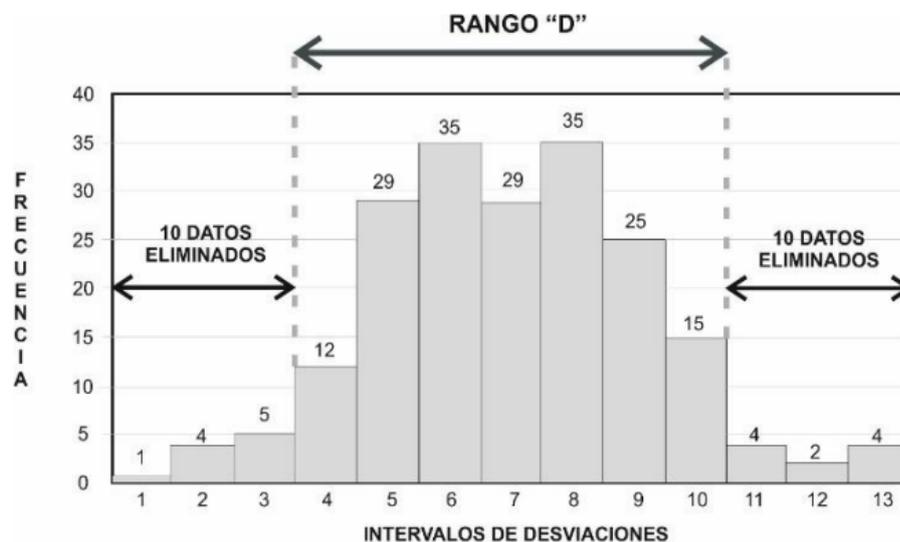


Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.

Por ser la distancia que equilibra los mejores resultados en las correlaciones, la longitud promedio de la cuerda es de 1,8 metros. Además, se estableció que se deben medir 200 desviaciones de la cuerda promedio de manera consecutiva a lo largo de la ruta y se debe tener en cuenta un intervalo constante entre cada medición. La variabilidad de los desplazamientos aumenta con la rugosidad de la superficie en dichas condiciones. Es posible medir la dispersión de las desviaciones y correlacionarla con la escala estándar de rugosidad si se define el histograma de la distribución de frecuencias de las 200 mediciones. (Tapia, 2018)

**Figura 3**

*Medición de las desviaciones respecto a la superficie del pavimento, de la cuerda promedio*



Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.

El Rango de la muestra (D), es computado después de realizar una depuración del 10% de las observaciones (10 datos en cada cola del histograma), es el parámetro estadístico que determina la magnitud de la dispersión. El valor D representa la rugosidad del pavimento en "unidades Merlín". (Del Águila, 1993)

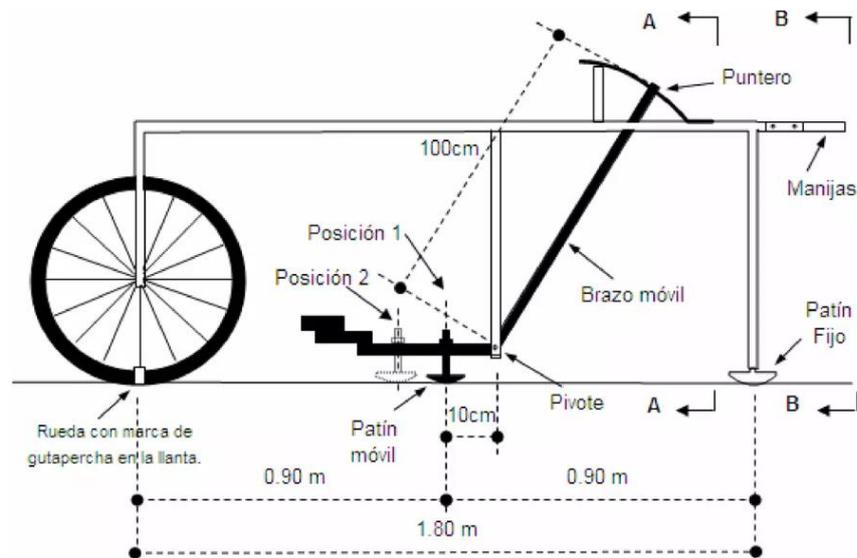
El método de evaluar la rugosidad de un pavimento mediante la dispersión de las desviaciones de la superficie frente a una cuerda típica no es nuevo ni original en el TRRL. Otros investigadores han propuesto varios parámetros de rugosidad anteriores basados en la misma idea, como el Índice de Carros Quarter (QI), que se analiza en la referencia. (Tingal, 2021)

El Merlín es un equipo básico. Presenta un diagrama que muestra el instrumento. Consta de dos componentes verticales y uno horizontal. Considerando el elemento vertical delantero, este tiene una rueda para facilitar el

desplazamiento y la operación, mientras que la segunda parte, la posterior, tiene dos soportes inclinados colocados lateralmente: uno en el lado derecho que sirve para fijar el equipo sobre el suelo a medida que se realizan los ensayos y otro en el lado izquierdo para que el equipo pueda descansar. El elemento horizontal se proyecta hacia la parte trasera y tiene dos manijas que permiten levantar y movilizar el equipo, haciéndolo rodar sobre la rueda en forma de carretilla. (Rivera, 2017)

#### Figura 4

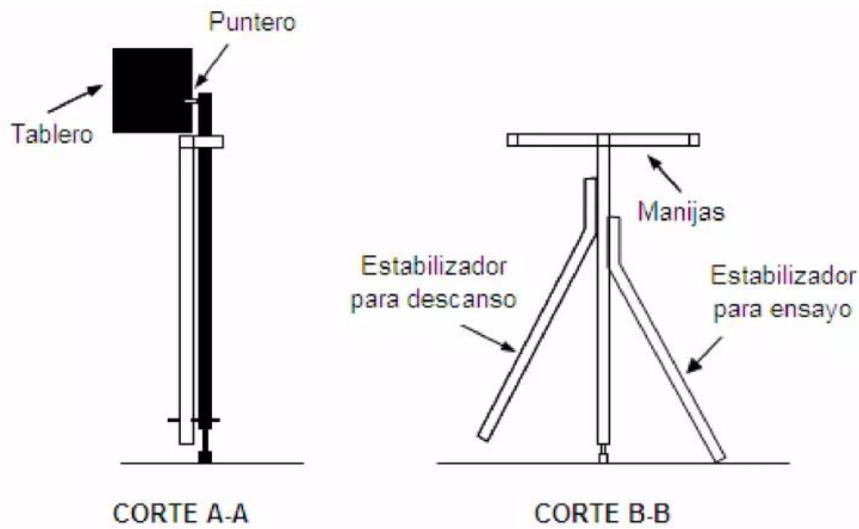
*Esquema Del Rugosímetro de Merlín (Vista De Perfil)*



Tomado de: Del Águila, P. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión. *Ponencia Presentada al X Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto, Sevilla, España, 1999*, 1–11.

## Figura 5

### Esquema Del Rugosímetro Merlín (Cortes)



Tomado de: Del Águila, P. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión. *Ponencia Presentada al X Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto, Sevilla, España, 1999*, 1–11.

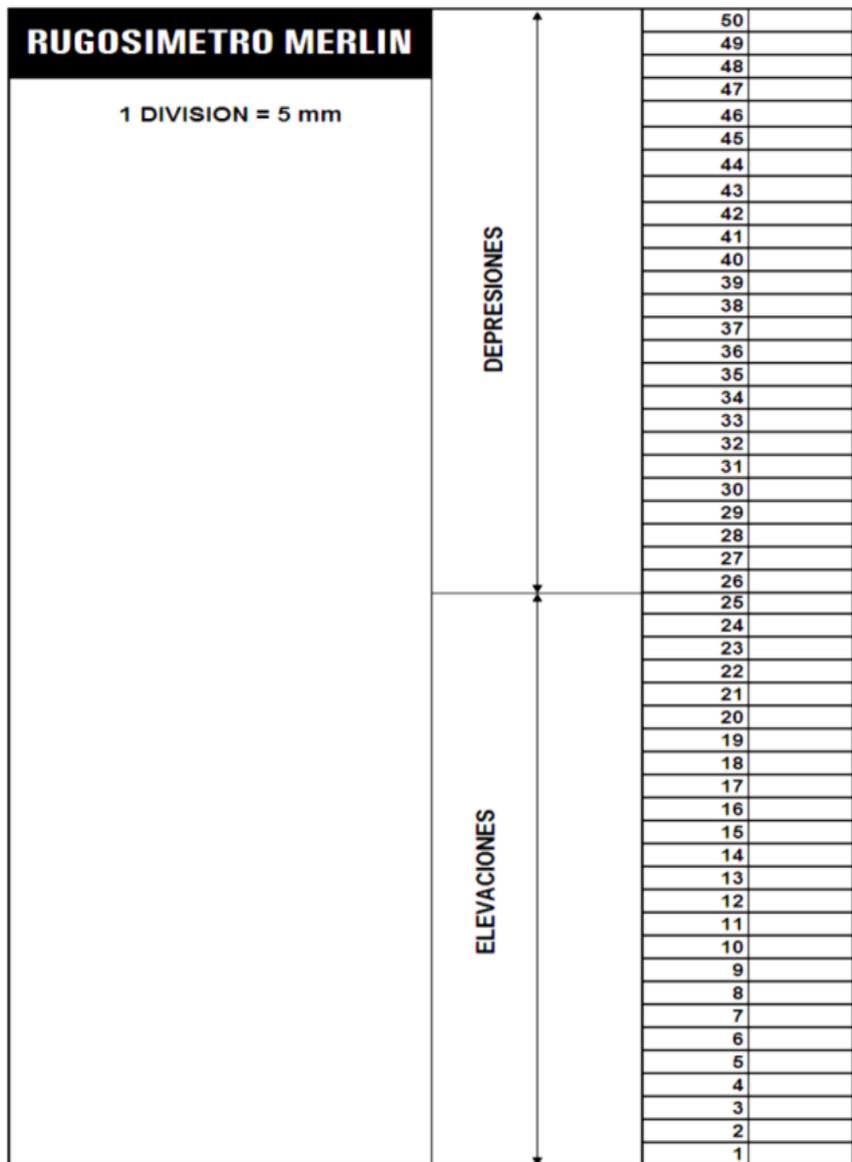
Una barra vertical que no llega al piso se proyecta hacia abajo en la parte central del elemento horizontal, en cuyo extremo inferior oscila un brazo móvil. El extremo inferior que tiene un brazo móvil está en directo contacto con el pavimento a través de un patín ajustable que se adapta a las huellas dentro del pavimento flexible. El extremo superior del brazo móvil se convierte en un puntero, este indicador se desliza sobre el borde de un tablero, de acuerdo con la posición que adopta el extremo inferior del patín móvil al entrar en contacto con la huella. (Laura, 2016)

La relación de brazos está entre las secciones de extremo inferior del patín móvil y el pivote es de 1 a 10, lo que significa que se tiene un movimiento de sentido vertical de 1 mm en el extremo inferior del patín móvil hace que el puntero se mueva 1 cm. Se utiliza una escala gráfica de 50 divisiones, cada una de 5 mm

de espesor, adherida al borde del tablero sobre el que se desliza el puntero para registrar sus movimientos. (Del Águila, 1999)

### Figura 6

Escala utilizada para medir la dispersión de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto del nivel de referencia o la cuerda promedio (mid-cord deviations)



Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.



### 2.2.9. Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

De acuerdo con Badilla (2011), el cálculo del IRI requiere el uso de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales para determinar la medida de regularidad relacionada con el camino. Este proceso incluye etapas claramente distintas y adaptadas a un desarrollo sistemático.

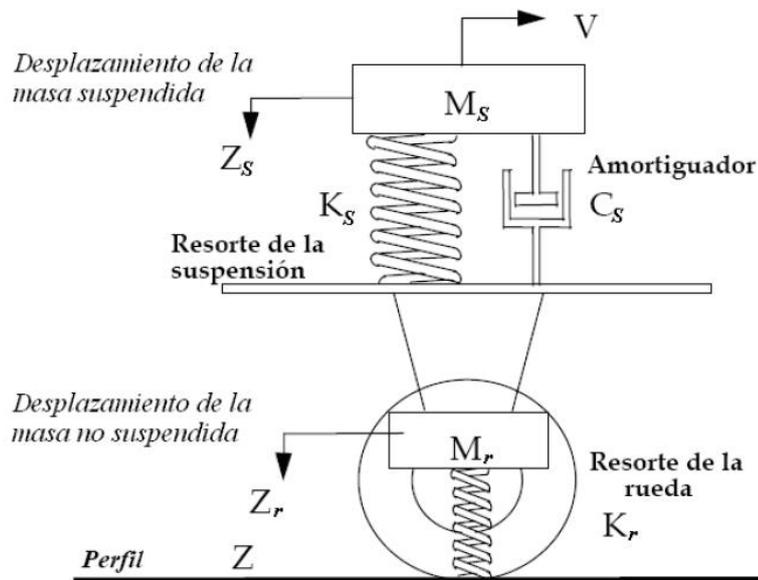
El primer paso del proceso para calcular el IRI es medir las cotas o elevaciones de terreno que nos dan la oportunidad de representar el perfil real del camino. Este es el paso más importante de todos. Esto significa que el IRI solo dependerá de la calidad del perfil longitudinal y no dependerá de la técnica y/o equipo utilizados para obtener el perfil. Un primer filtro se aplica a estos datos, donde se realiza un previo análisis estadístico (media móvil) y ajustes matemáticos para crear un nuevo perfil que se puede analizar en función de las irregularidades detectadas. El uso de este primer filtro se basa en dos objetivos principales: a) simular el comportamiento entre las llantas del vehículo y la carretera; y b) reducir la sensibilidad del algoritmo IRI al intervalo de muestreo. (Lluncor & Salcedo, 2015)

Utilizando un modelo de cuarto carro que se mueve a una velocidad aproximada de 80 km/h, se tendrá un segundo filtro para el nuevo perfil creado. Esto registra las características del camino basadas en los desplazamientos verticales que son inducidos hacia un vehículo estándar, que se modela simplídicamente como un conjunto de masas que están ligadas entre sí con resortes y amortiguadores en la superficie de la carretera. El movimiento en el perfil de la carretera causa desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las

masas, lo que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados causados por la irregularidad del camino. (Badilla, 2011)

### Figura 7

#### Modelo del cuarto de carro



Tomado de: Badilla, G. (2011). Determinación de la Regularidad Superficial de Pavimentos mediante el cálculo del Índice Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes. *Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP*, 1–10.

El modelo de simulación consta de una masa que se encuentra "amortiguada o suspendida", que es la masa de un cuarto de carro ideal, conectada a una masa "no amortiguada", que es la masa de un eje y un neumático, a través de un resorte y un amortiguador lineal, y otro resorte lineal representa el neumático. (Pagola et al., 2009)

Los parámetros utilizados en lo que se ha llamado el Carro de Oro se ven a continuación para el modelo de cuarto de carro:

$$k_2 = \frac{k_s}{M_s} = 63,3 \quad k_1 = \frac{k_r}{M_s} = 653 \quad c = \frac{C_s}{M_s} = 6 \quad \mu = \frac{M_r}{M_s} = 0,15 \dots (1)$$

donde:



$k_s$ : constante del resorte de la suspensión

$M_s$ : masa suspendida

$c_s$ : amortiguador

Un sistema de ecuaciones con las ecuaciones dinámicas del modelo utiliza el perfil de una carretera (en la parte inferior del "resorte del neumático"). El cálculo y la aglomeración del movimiento vertical del eje respecto a la masa suspendida. La medida final de la regularidad del camino es el valor en m/km (metros acumulados por kilómetro viajado). (Badilla, 2011)

#### **2.2.10. Variación de IRI**

##### **Variación del IRI acorde a la longitud de evaluación**

El IRI puede calcularse sobre una longitud de camino indistinta, pero los usuarios deben comprender que el cálculo del IRI va a depender mucho de la longitud acumulada. La comprensión de la relación entre la variación de regularidad a lo largo del camino y el largo del camino sobre el cual la regularidad es promediada es crucial. (Onofre, Sánchez & Santiago, 2008)

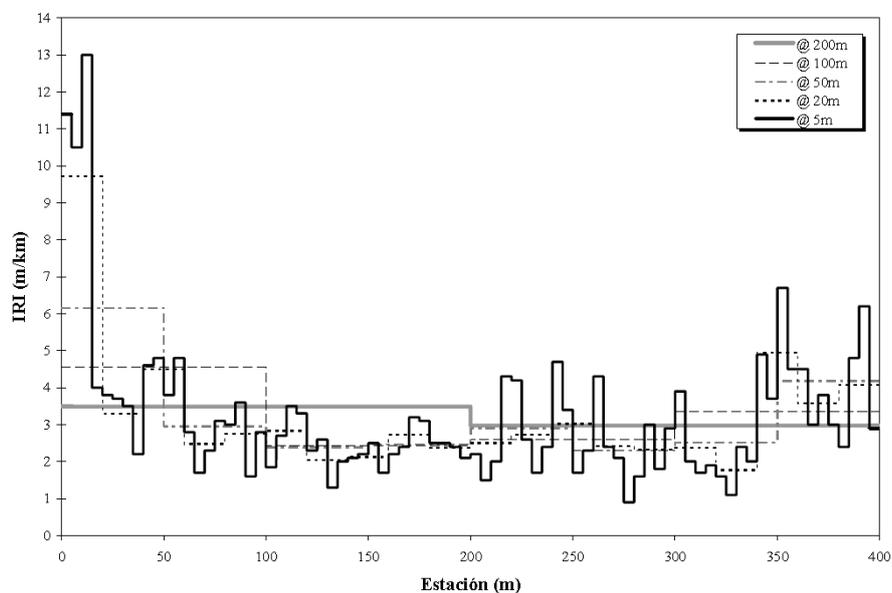
A pesar de que en la literatura se menciona principalmente el valor del IRI presente en una carretera, es bien sabido que, para calcularlo correctamente, se debe agregar a cada distancia, ya que el IRI es el valor promedio de los IRI indivisibles o puntuales que se obtienen. El valor unitario más común es cada 0.25 metros, pero el valor global de referencia puede variar según cada país o agencia que supervisa los pavimentos, es por ello que hay medidas diferentes como 0.25, 0.50 e incluso 1.00 metros. (Badilla, 2011)

Chavarría, (2018) aclara que, es necesario establecer un intervalo de longitud debido a la importancia de la longitud para determinar el IRI, ya que intervalos de longitud más largos ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, lo que resulta en valores de IRI insatisfactorios. Además, el uso de intervalos de longitud más pequeños para medir el IRI puede revelar altos niveles de irregularidad, lo que ayuda a obtener pavimentos con mayor seguridad y comodidad. Según estos criterios de evaluación, el contratista está obligado a presentar mejores técnicas constructivas para prevenir incumplimientos.

En la figura siguiente, se exponen los resultados del IRI, cuando se realizan modificaciones en la longitud a evaluar.

### Figura 8

*Diferentes variaciones en el cálculo del IRI en función de la longitud de la evaluación*



Tomado de: Badilla, G. (2011). Determinación de la Regularidad Superficial de Pavimentos mediante el cálculo del Índice Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 1–10.



Como se puede apreciar, las variaciones en la distancia del intervalo de cálculo del IRI tienen un impacto directo en los resultados. Como resultado del efecto de promedio, los valores son más suaves. Es evidente que en los primeros 200 metros del segmento se presentan valores de IRI superiores a 10 y valores de IRI inferiores a 2, siempre y cuando el intervalo de evaluación sea igual a 5 m. Al calcular el valor de IRI en una longitud de evaluación de 200 m, el efecto de promediar los valores muestra un valor de IRI de 3.5, lo que puede resultar en que en algunos casos se obtengan valores de IRI insuficientes. (Badilla, 2011)

**Tabla 1**

*Equipos empleados para evaluar la regularidad de la superficie del pavimento*

<b>Equipo</b>	<b>Grado de precisión</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Complejidad del equipo</b>	<b>Observaciones</b>
Nivel y mira topográfica	Muy alto	Medidas y calibración de perfiles de equipos más complejos	Simple	Poco útil y costoso para proyectos prolongados
Dipstick	Muy alto	Medidas y calibración de perfiles de equipos más complejos	Muy simple	Poco útil y costoso para proyectos prolongados
Perfilógrafos	Medio	Recepción y control de calidad	Simple	No son adecuados para la evaluación de la condición a nivel de red
Equipo tipo respuesta (RTRRMS)	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Debido a que dependen de la dinámica específica del movimiento del vehículo, los resultados no son transportables ni estables en el tiempo.
Perfilómetro inercial	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy compleja	Equipo de alta precisión, con resultados que se pueden transportar y mantener en el tiempo. La



Equipo	Grado de precisión	Aplicaciones	Complejidad del equipo	Observaciones
				evaluación de redes viales grandes es su principal uso

Adaptado de: Badilla, G. (2009). Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). *Infraestructura Vial N° 21*.

### 2.2.11. Sensores y actuadores

En los últimos años, gracias al avance de la micromecánica y la mecanización del silicio, los sensores y actuadores de reducidas dimensiones, como acelerómetros, microbombas, micromembranas, piezoeléctricos, detectores de infrarrojos, etc., se presentan como principal característica el responder a una señal eléctrica y/o a una radiación de excitación, con una modificación de su geometría, estos se han sumado a los sensores y actuadores tradicionales. (Duarte, et al., 2008)

Estos componentes tienen características de control específicas, por lo que su descripción debe basarse en una técnica confiable, viable y económica. El problema que se presenta aquí es la medida de la deflexión, que se puede lograr a través de una variedad de métodos, particularmente a través de métodos ópticos. (Duarte, et al., 2005)

### 2.2.8.1. Técnicas de medida

De acuerdo con Delgado (2019), en la medición de pequeños desplazamientos, existen básicamente tres tipos diferentes de métodos:

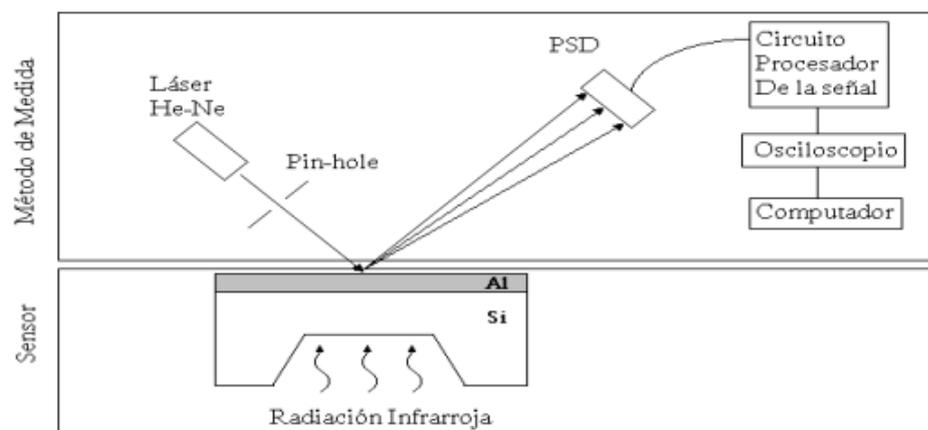
- a) **Eléctrica:** Corriente túnel, piezoeléctricas, piezoresistivas y capacitivas.
- b) **Magnético:** Magnetización, magnetoelástica y campo magnético externo.

c) **Óptica:** Son técnicas de espacio libre y una guía de ondas que sirven para medir la distribución de todas las deflexiones del sensor que tiene forma de membrana micromecánica.

Es interesante utilizar una técnica que pueda medir directamente el desplazamiento del objeto para simplificar el procesamiento de la señal obtenida. El método de sensado (o de medida) se refiere al proceso físico por el cual se censa y cuantifica la respuesta de la estructura del sensor. (Duarte, et al., 2008)

### Figura 9

*Montaje desarrollado para la medida correspondiente a la deflexión de la membrana de Si*



Tomado de: Duarte, J.; Fernández, F. & Moreno, M. (2008). *Técnicas de medida para pequeños desplazamientos*. Dyna rev. fac. nac. minas vol.72 no.158 Medellín May/Aug. 2009. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532009000200016](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000200016)

#### 2.2.12. Medición de distancia y reconocimiento al usar los sensores ToF

Los sensores ToF (Time of Flight = Time of Flight) son un tipo de sensor de distancia que ha evolucionado a lo largo del tiempo. Miden la distancia con el objetivo al medir el viaje de ida y vuelta de los fotones al desplazarse desde el sensor hasta el objetivo y luego regresar al sensor. (Leibson, 2018)



## Principio de funcionamiento

Acorde a la página web de Electricity & Magnetism (2023). Para comprender cómo funciona un sensor ToF, primero debe comprender el principio de tiempo de vuelo. Este principio se basa en una ecuación muy sencilla de física:  $d=c*t$ . D es la distancia que recorre la luz, c es la velocidad de la luz y t es el tiempo que tarda la luz en viajar en esta ecuación. Por lo tanto, podemos encontrar la distancia a la que se localiza un objeto midiendo el tiempo que tarda en rebotar una señal.

- a) **Emisión de señal:** El sensor emite un pulso de luz, generalmente infrarrojo, en una dirección específica.
- b) **Rebote de la señal:** Cuando una señal se encuentra con un objeto, parte de la luz se refleja y luego regresa al sensor.
- c) **Detección de señal de retorno:** La luz reflejada es detectada por el sensor.
- d) **Medición del tiempo:** Se utiliza para sondear la cantidad de tiempo que tarda la señal en volver al sensor.

## Reconocimiento

Vargas (2019), Según su investigación sobre los sensores ToF, registra un mayor espacio y aumenta el campo de visión en un 60 %. En comparación con su predecesor, es capaz de reconocer hasta seis personas en escena. Con su sensor de infrarrojos más potente, puede reconocer objetos y personas incluso en condiciones muy pocas luces o completamente a oscuras. Distingue con precisión los dedos cuando detecta posturas de la mano a una distancia de hasta cuatro



metros. El reconocimiento facial ha mejorado significativamente y puede reconocer gestos de manera precisa.

Además, indica que una cámara Time-of-Flight (ToF) de alta resolución puede capturar mayor detalle y resolución con mayor precisión. (Vargas, 2019).

### **2.2.13. Niveles de Confiabilidad**

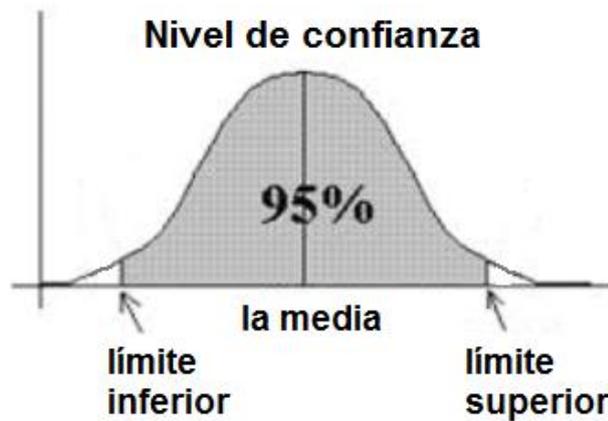
Según Batanero & Díaz (2008), la fiabilidad estadística se refiere a la estabilidad o consistencia de los resultados obtenidos en un estudio o experimento estadístico. A medida que se incrementa la fiabilidad estadística, se disminuye la posibilidad de obtener resultados equivocados o sesgados.

Paéz (2009) afirma que los valores de probabilidad porcentual o confianza suelen incluir el 90 %, el 95 % y el 99 %. Aunque dichos valores se pueden utilizar en la mayoría de los estudios de pruebas o contrastes de hipótesis, no hay restricciones dadas para usar directamente otros porcentajes como el 91 %, 92 %, 93 %, 94 %, 96 %, 97 % y 98 %.

Por otro lado, Salinas (1993), nos aclara que el nivel de confianza estadística comúnmente empleado es el 95%. Esto implica que hay un 95% de probabilidad de que los resultados obtenidos sean consistentes y no sean producto de la casualidad o el azar. Es relevante tener en cuenta que estas cifras implican un 5% de posibilidad de obtener resultados incorrectos.

**Figura 10**

*Grafica de confianza estadística a un 95%*



Nota: La grafica muestra un nivel de confianza de 95% y una probabilidad de error de 5%, tomado de Aprendiendo Electrónica.

#### **2.2.14. Estadística Descriptiva**

Faraldo y Pateiro (2012), nos indican que la estadística del tipo descriptiva es un conjunto de métodos numéricos y gráficos utilizados para describir y analizar un conjunto de datos sin llegar a conclusiones (inferencias) sobre la población a la que pertenecen. Las técnicas de descripción básicas, como la creación de tablas de frecuencia y gráficos, así como las principales medidas de descripción de dispersión, centralización y forma, se explicarán en este tema.

Salinas (1993) muestra que la estadística descriptiva se encarga de resumir y presentar los datos de manera clara y comprensible, utilizando diferentes medidas y técnicas. Es una técnica fundamental en cualquier análisis de datos, ya que permite obtener una visión general de las características y propiedades de la muestra o población estudiada.

### 2.2.15. Estadística Correlacional

El objetivo del enfoque correlacional es entender la conexión o nivel de asociación entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto o muestra específica. (Hernández, et al., 2014)

También nos menciona que la estadística correlacional es un tipo de estadística que analiza cómo se relacionan dos o más variables. Se utiliza la correlación para determinar si las variables tienen una relación entre sí, y si esta relación es positiva, negativa o nula.

#### Figura 11

*Gráfica de estadística correlacional*



Nota: Las gráficas son referenciales para mostrar las tendencias de correlación



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Tipo de Investigación

Según Vargas (2009), la investigación aplicada se refiere a la aplicación práctica del conocimiento para beneficiar a los involucrados en esos procesos y a la sociedad en general.

##### 3.1.2. Nivel de Investigación

La investigación presentada es de nivel Exploratorio.

Acorde a Hernández Sampieri, citado por Zafra (2006), se refiere a los estudios exploratorios, que se llevan a cabo con frecuencia y tienen como objetivo investigar una interrogante o problema, que aún no ha sido estudiado o abordado.

Según Galarza (2020), Se pueden utilizar tanto métodos cualitativos como cuantitativos en este tipo de investigación. La investigación se aplica a fenómenos que no se han estudiado previamente y se tiene interés en conocer sus características en el alcance exploratorio.

Por ello, se puede afirmar que este tipo de investigación corresponde realizarse sobre una materia, inquietud u objeto poco conocido o cuando se carece de información, es por ello, que sus resultados brindan una visión aproximada de dicha inquietud, es decir, un nivel superficial de conocimientos. De manera similar, las investigaciones exploratorias tienen como objetivo obtener una comprensión general y aproximada del tema en estudio. ULA (2017)



### 3.1.3. Población y muestra

**Población:** Pavimento flexible de la carretera Puno-Juliaca en el tramo de muestra del KM 1326+000 hasta KM 1327+600, siendo su extensión 1600 metros.

**Muestra:** Tramos cada 0.25 metros, 1 metro y 2 metros acorde al método utilizado del Pavimento flexible de la carretera Puno-Juliaca de 221 KM 1326+000 hasta 1327+600, siendo su extensión 1600 metros.

### 3.1.4. Variables

#### **Variable 1 (Independiente):**

Equipo basado en el sensor de distancia v15310x.

#### **Variable 2 (Dependiente):**

Índice de Rugosidad Internacional.

#### **Dimensión:**

Método de mira y nivel, Rugosímetro de merlín y Equipo basado en el sensor de distancia v15310x.

## 3.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

La ubicación de la muestra es en la Región de Puno, entre las Provincias de Puno y San Román, específicamente en la carretera Puno-Juliaca, siendo el tramo de muestra del KM 1326+000 hasta KM 1327+600, siendo la extensión de la muestra 1600 metros.

Inicio: -15.587918, -70.098326

Fin: -15.608671, -70.092552

## Figura 12

### *Ubicación de la muestra*



Tomado de: Google Maps, con adaptación propia.

### **3.3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE IRI**

#### **3.3.1. Programa del banco mundial para el cálculo del IRI**

A continuación, se procedió a realizar el programa de cálculo acorde a la investigación de Sayers et al. (1986), publicado por el Banco Mundial, esta es una adaptación y traducción parafraseada de la publicación técnica.



### Algoritmo de cálculo

El cálculo del IRI se basa en cuatro variables que se derivan de la representación de la respuesta dinámica de un vehículo de referencia, también conocido como el cuarto de carro, que sigue el perfil de la ruta en estudio.

Para cada punto, excepto la primera (cuando  $x = 0$ ), se resuelven las ecuaciones de las cuatro variables. Las variables siguientes se inician utilizando la pendiente que se ve entre la primera elevación y la elevación a los 11 metros:

$$Z'_1 = Z'_3 = (Y_a - Y_i) / 11 \quad (1)$$

$$Z'_2 = Z'_4 = 0 \quad (2)$$

$$a = (11/dx) + 1 \quad (3)$$

Donde:

$Z'_1, Z'_2, Z'_3$  y  $Z'_4$ ; son las cuatro variables

$Y_a$  ; representa la elevación del perfil a los 11m.

$Y_i$  ; es la elevación en el primer punto.

$dx$  ; es el intervalo de muestreo.

Por ejemplo, si el intervalo  $dx = 0,5$  m, es la ecuación (1) la cual será diferente de elevación entre el punto 23 y el punto 1 entre 11, se toma 11 metros porque el programa del Banco Mundial toma datos cada 11 metros, y el total de datos tomados cada 0,5m en los 11 metros es 23 datos, debido a que la ecuación (3) será:  $a = (11 / 0,5) + 1 = 23$ , y se usa los datos del perfil de estudio para establecer una pendiente inicial para el cálculo del IRI

Para cada punto de elevación, desde el 2 hasta "n" (n = número de elevaciones medidas), las cuatro ecuaciones siguientes son utilizadas:

$$Z_1 = S_{11} * Z'_1 + S_{12} * Z'_2 + S_{13} * Z'_3 + S_{14} * Z'_4 + P_1 * Y_p \quad (4)$$

$$Z_2 = S_{21} * Z'_1 + S_{22} * Z'_2 + S_{23} * Z'_3 + S_{24} * Z'_4 + P_2 * Y_p \quad (5)$$

$$Z_3 = S_{31} * Z'_1 + S_{32} * Z'_2 + S_{33} * Z'_3 + S_{34} * Z'_4 + P_3 * Y_p \quad (6)$$

$$Z_4 = S_{41} * Z'_1 + S_{42} * Z'_2 + S_{43} * Z'_3 + S_{44} * Z'_4 + P_4 * Y_p \quad (7)$$

Donde:

$$Y_p = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = \text{pendiente de entrada} \quad (8)$$

$$Z_j, = Z_j \text{ de la posición anterior, para } j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

$S_{ij}, P_j = \text{coeficientes que están en un arreglo}$

*para un intervalo de muestra dado.*

Por lo tanto, las ecuaciones (4) a (7) se resuelven para cada posición en la señal ahuellada de la llanta, y la ecuación (9) se utiliza para encontrar los valores de  $Z'_1, Z'_2, Z'_3$  y  $Z'_4$  para la posición siguiente. Por lo tanto, la pendiente rectificadora (RS) de un perfil filtrado se encuentra para cada posición de la siguiente manera:

$$RS_j = |Z_1 - Z_3| \quad (10)$$

Para cada punto del perfil de estudio, se debe resolver la ecuación anterior.

El IRI se calcula como:

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum RS_i \quad (11)$$



El IRI del tipo estadístico corresponde al cálculo del promedio de la pendiente que se tiene en el tramo de prueba rectificado. Los coeficientes  $S_{jj}$  y  $P_j$  son considerados constantes, estos se encuentran en un intervalo de tiempo, donde el tiempo que necesita un vehículo para transitar una distancia de un perfil en estudio para la velocidad de simulación es el tiempo que se necesita para recorrer el perfil.

Estos coeficientes de IRI han sido calculados para cada intervalo de muestreo que son cada 11 metros y la distancia que se toman los datos dentro de estos 11 metros, para el presente caso, son los datos de  $dx=0.50m$  todo ello acorde al paper N° 45 de Sayers, et al. (1986).

### Descripción del programa

De acuerdo con Sayers et al. (1986) El programa se encuentra de la siguiente manera y se especifica para un intervalo  $dx = 0.25$ :

**Tabla 2**

*Programa de demostración del cálculo del IRI*

---

1000	RE M	This program demonstrates the IRI computation.
1010	RE M	A number of recommended modifications are described in
1020	RE M	the accompanying text.
1030	RE M	-----Initialize constants
1040	DI M	Y(26) , Z(4) , Z1(4) , ST(4,4) , PR(4)
1050	RE A D	DX
1060		K = INT (.25 / DX + .5) + 1
1070		IF K < 2 THEN K = 2
1080		BL = (K - 1) * DX
1090		FOR I = 1 TO 4
1100		FOR J = 1 TO 4
1110		READ ST(I,J)
1120		NEXT J
1130		READ PR(I)
1140		NEXT I
1150	RE M	----- Initialize variables.

---



```
1160      INPUT "profile elevation 11 m from start:", Y(K)
1170      INPUT "X = 0. Elevation = ", Y (1)
1180      Z1(1) = (Y(K) - Y (1)) / 11
1190      Z1(2) = 0
1200      Z1(3) = Z1(1)
1210      Z1(4) = 0
1220      RS = 0
1230      IX = 1
1240      I=0
1250      REM ----- Loop to input profile and Calculate Roughness
1260      I=I+1
1270      PRINT "X = " ; IX * DX ,
1280      IX = IX + 1
1290      INPUT "Elev. = "; Y(K)
1300      REM ----- Compute slope input
1310      IF IX < K THEN Y(IX) = Y(K)
1320      IF IX < K THEN GOTO 1270
1330      YP = (Y(K) - Y (1)) / BL
1340      FOR J = 2 TO K
1350      Y(J-1) = Y(J)
1360      NEXT J
1370      REM ----- Simulate vehicle response
1380      FOR J = 1 TO 4
1390      Z(J) = PR(J) * YP
1400      FOR JJ = 1 TO 4
1410      Z(J) = Z(J) + ST(J, JJ) * Z1(JJ)
1420      NEXT JJ
1430      NEXT J
1440      FOR J = 1 TO 4
1450      Z1(J) = Z(J)
1460      NEXT J
1470      RS = RS + ABS (Z(1) - Z(3))
1480      PRINT "disp = "; RS * DX, "IRI = ";RS / I
1490      GOTO 1260
1500      END
1510      DATA .25
1520      DATA .9966071, .01091514, -.002083274, .0003190145, .005476107
1530      DATA -.5563044, .9438768, -.8324718, .05064701, 1.388776
1540      DATA .02153176, .002126763, .7508713, .008221888, .2275968
1550      DATA 3.335013, .3376467, -39.12762, .4347564, 35.79262
```

Adaptado de: Sayers, M.; Gillespie, T. & Queiroz, C. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. *World Bank Technical Paper Number 46*.



a) El programa va a determinar el valor del IRI a partir del perfil que ha sido generado del camino, este pudo ser realizado por un levantamiento topográfico de un ahuellamiento para un intervalo de muestra ( $dx$ ) que puede ser seleccionado entre 0.10 metros y 0.60 metros. Las medidas más habituales para el cálculo son las de 0.25 metros y 0.50 metros para una longitud de tramo estudiado no mayor de 600 metros. El Banco Mundial indica que trabajar entre 0.25 metros y 0.50 metros es lo óptimo, ya que la precisión obtenida de las deformaciones del pavimento es similar, no existiendo diferencias significativas en los resultados del IRI con respecto a utilizar  $dx = 0.25$  metros o  $dx = 0.50$  metros, esto referido al trabajo de levantamiento y al manejo de datos.

b) De las líneas 1030 -1140 del cuadro de código de la tabla 2, las constantes se inician y se lee la matriz de transición de estado  $ST$  ( $4 \times 4$ ) para cada uno de los intervalos de muestra  $dx$ , que se encuentran en la línea 1510 del cuadro de código de la tabla 2, así como para el vector  $PR$  ( $4 \times 1$ ). Estos valores se encuentran entre las líneas 1520 y 1550 del cuadro de código de la tabla 2, y  $Y$  depende del intervalo de muestra. Este programa tiene un intervalo de 0.25 m.

**Nota:** Debido a la forma de leer los datos, en las líneas 1520 a la 1550 del cuadro de código de la tabla 2, se encuentran unidos, ya que los datos de la matriz  $ST$  y el vector  $PR$ , se lee de la siguiente manera:

Línea 1520  $ST_{11}$  ,  $ST_{12}$  ,  $ST_{13}$  ,  $PR_1$ , del cuadro de código de la tabla 2

Línea 1530  $ST_{21}$  ,  $ST_{22}$  ,  $ST_{23}$  ,  $PR_2$  del cuadro de código de la tabla 2

Línea 1540  $ST_{31}$  ,  $ST_{32}$  ,  $ST_{33}$  ,  $PR_3$  del cuadro de código de la tabla 2

Línea 1550  $ST_{41}$  ,  $ST_{42}$  ,  $ST_{43}$  ,  $PR_4$  del cuadro de código de la tabla 2



Para  $dx = 0.25$  m

$RT =$

$$\begin{bmatrix} 0.9966071 & .01091514 & -0.002083274 & 0.0003190145 \\ -0.5563044 & 0.9438768 & -0.8324718 & 0.050647014 \\ 0.02153176 & 0.002126763 & 0.7508714 & 0.008221888 \\ 3.335013 & 0.3376467 & -39.12762 & 0.4347564 \end{bmatrix}$$

$$RT = \begin{bmatrix} 0.00547610 \\ 1.388776 \\ 0.2275968 \\ 35.79262 \end{bmatrix}$$

Las evaluaciones se especifican a cada 0.50m (dx), entre las líneas 1510 - 1550 del cuadro de código de la tabla 2, se realizan cambios por los valores siguientes:

Para  $dx = 0.50$  m

$$RT = \begin{bmatrix} 0.9881727 & 0.02128394 & -0.02520931 & 0.000992317 \\ -0.928516 & 0.9001616 & -3.391369 & 0.06280167 \\ 0.06386326 & 0.006615445 & 0.2402896 & 0.00986268 \\ 3.743294 & 0.4186779 & -46.67883 & -0.1145251 \end{bmatrix}$$

$$RT = \begin{bmatrix} 0.03703847 \\ 4.319885 \\ 0.6958473 \\ 42.93555 \end{bmatrix}$$

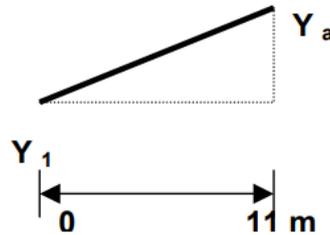
También, acorde a Sayers et al. (1986), en la página 37 de la publicación No. 46 del Banco Mundial, se muestran los valores de ST y PR para intervalos de muestreo que van desde 0.25 a 0.50 metros, que se escribirán en las líneas 1510 a 1550 del cuadro de código de la Tabla 2.

c) De las líneas 1150 -1240 del cuadro de código de la tabla 2, se inicializan variables En la línea 1160 y 1170 del cuadro de código de la tabla 2, para calcular la deflexión existente entre ambos puntos y colocar las variables de entrada, para

esto se solicita la elevación  $Y$  (K) para cuando  $x = 11$  m y  $x = 0$ . De la ecuación

(1):

$$Z'_1 = Z'_2 = (Y_a - Y_1)/11$$



Donde;

$$a = 11/dx + 1$$

Para  $dx = 0.50$  m  $Y_a = Y_{23}$

En el programa, las ecuaciones (1) y (2) son representadas por las líneas 1180 -1210 del cuadro de código de la tabla 2, de la siguiente manera:

$$Z1(1) = Z1(3) = (Y(K) - Y(1))/11$$

$$Z1(2) = Z1(4) = 0$$

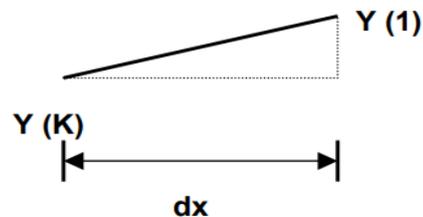
Nota: Estos valores de las elevaciones  $Y$  (K) para este programa se presentan en unidades de milímetros, mientras que el intervalo de muestreo  $dx$  se encuentra en metros. Como resultado, el IRI resultante será en unidades de mm/m, que son equivalentes a las unidades m/Km.

d) De las filas 1250 -1290 del cuadro de código de la tabla 2, Los valores del perfil se ingresan. Las elevaciones se indicarán en mm y se introducirán para cada intervalo de muestreo desde  $x = dx$  (en metros).

e) Analizando ahora las filas de 1300 -1360 del cuadro de código de la tabla 2, se calculan los ingresos pendientes. La diferencia entre los valores de elevación  $Y (K)$ , que es la elevación en la punta actual, restándole la elevación de la punta anterior  $Y (1)$ , esto dividido entre el intervalo de muestreo  $dx$ , es la pendiente de entrada  $YP$ , según la ecuación (8).

Esta ecuación se muestra en la línea 1330 del cuadro de código de la tabla 2, como:

$$YP = (Y(K) - Y(1))/dx$$



Donde  $Y (1)$  es un almacenamiento temporal que guarda la elevación de la punta anterior al evaluado  $Y (K)$ .

f) En las líneas 1370 -1490 del cuadro de código de la tabla 2, se efectúa la simulación del vehículo (el cálculo del IRI)

El programa utilizó las cuatro variables de estado del vehículo del arreglo  $Z (Z1, Z2, Z3 \text{ y } Z4)$ . Obtenidas mediante el cálculo de las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) calculadas en la línea 1410 del cuadro de código de la tabla 2, mediante un ciclo de "J" desde 1 hasta 4:

$$Z(J) = Z(J) + ST(J, JJ) * Z1(JJ)$$

Los coeficientes  $Z$  utilizados provienen de las propiedades dinámicas del modelo de vehículo mencionado, también conocido como "cuarto de carro". Las cuatro ecuaciones diferenciales que describen estas características dinámicas son las siguientes:

$$dz(t)/dt = A * z(t) + B * y(t)$$

donde  $z$  es el vector que contiene las cuatro variables de  $Z$ ,  $A$  es la matriz de estado de transición ( $4 \times 4$ ) que describe los movimientos dinámicos del modelo,  $B$  es un vector ( $4 \times 1$ ) que describe cómo el perfil interactúa con el vehículo y  $y(t)$  es el perfil de entrada.

La pendiente rectificadora (RS: rectified slope) es la suma de los valores absolutos de las diferencias entre las variables  $Z(1)$  y  $Z(3)$ , así, la ecuación 10 queda como:

$$RS = \sum |Z(1) - Z(3)|$$

representada en el programa en la línea 1470 como:

$$RS = RS + ABS (Z(1) - Z(3))$$

La suma de la pendiente rectificadora dividida entre el número de puntas consideradas en el perfil da el IRI. En la punta  $x = 0$  no se obtiene la pendiente rectificadora porque no existe una elevación anterior, por lo que la ecuación 11 queda:

$$RS = \frac{1}{n - 1} \sum RS$$

representada en la línea 1480 como:

$$IRI = RS/I$$

donde "I" es el número de elevaciones del perfil menos uno (n -1)

El IRI está en unidades de metros/Km, o su equivalente mm/metros.

### 3.3.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el Equipo de Rugosímetro de Merlín

Para tener mayor fundamento en los datos obtenidos con el sensor se realizó también el ensayo de cálculo de IRI con Rugosímetro de Merlín. Del mismo tramo el cual tiene el siguiente procedimiento. (Tingal, 2021)

#### Figura 13

*Equipos del sensor vl5310x y el Rugosímetro de Merlín*



Nota: Equipo con sensor vl5310x previo al inicio de calibración.

#### Fundamentos Teóricos.

Según Del Águila (1999) la rugosidad de un pavimento se basa en la distribución de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio.



La longitud promedio de la cuerda es de 1,8 metros porque es la distancia que da los mejores resultados en las correlaciones. Además, se estableció que se deben medir 200 desviaciones de la cuerda promedio de manera consecutiva a lo largo de la ruta y se debe considerar un intervalo constante entre cada medición.

### **Correlaciones D vs IRI**

Se utilizan las siguientes expresiones para relacionar la rugosidad obtenida con el IRI, que es el parámetro utilizado para hacer que los resultados sean uniformes debido a la gran diversidad de equipos que existe actualmente:

- a) Cuando  $2.4 < IRI < 15.9$  ó  $D > 50mm$  , entonces

$$IRI = 0.593 + 0.0471 D \quad \dots\dots\dots (1)$$

- b) Cuando  $IRI < 2.4$  ó  $D < 50mm$ , entonces

$$IRI = 0.0485 D \quad \dots\dots\dots (2)$$

La expresión (1) contiene la ecuación original que el TRRL estableció mediante simulaciones computarizadas utilizando una base de datos del Ensayo Internacional sobre Rugosidad que se llevó a cabo en Brasil en 1982. Si su rugosidad se encuentra dentro del intervalo indicado, se pueden evaluar los pavimentos en servicio con superficies de rodadura asfáltica, granular o de tierra utilizando la ecuación de correlación establecida.

Después de evaluar más de 3,000 km de pavimentos, se descubrió que la ecuación original del TRRL no era aplicable a pavimentos asfálticos nuevos o poco deformados, como se indica en la expresión (2). Se creó una ecuación para evaluar la calidad de los pavimentos recién construidos utilizando la misma técnica que el laboratorio británico.



Existen expresiones adicionales que han sido investigadas para cubrir superficies con un patrón de deformación específico que afecta de manera significativa las medidas que ofrece en Merlín. En 1996, M.A. Cundill del TRRL estableció la siguiente expresión para superficies con macadam de penetración de extendido manual:

$$IRI = 1.913 + 0.0490 D \quad \dots \dots \dots (3)$$

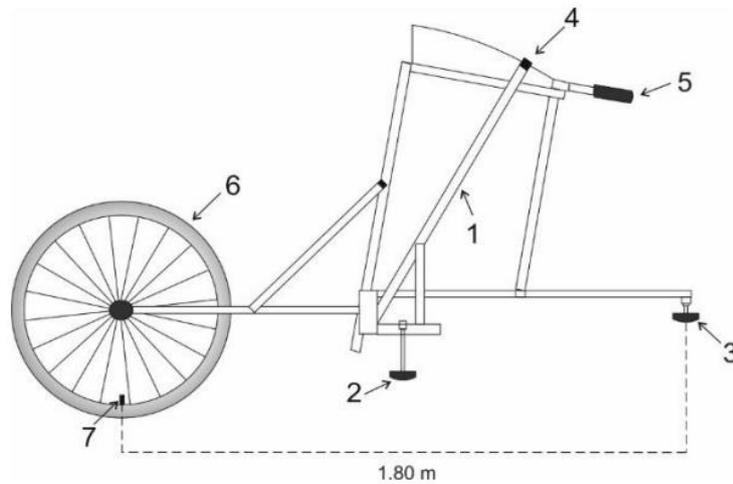
### **Método De Medición**

Según la clasificación del Banco Mundial, citado en Sayers et al. (1986), existen cuatro categorías de métodos para medir la rugosidad, siendo los de la Clase 1 los más precisos (perfilómetros estáticos, TRRL Beam y Mira y Nivel). Los métodos de la Clase 2 incluyen perfilómetros estáticos y los dinámicos, pero no alcanzan los niveles de precisión requeridos para la Clase 1. Los métodos Clase 3 derivan sus resultados a la escala del IRI utilizando ecuaciones de correlación. Los métodos Clase 4 se utilizan cuando se requieren solo estimaciones de rugosidad y brindan resultados solo referenciales.

Debido a que fue diseñado como una variación de un perfilómetro estático y a su gran precisión de sus resultados, el método de medición que utiliza el Merlín califica como un método Clase 1. Los resultados alcanzados con Merlín, con la escala IRI, tienen un coeficiente de determinación prácticamente igual a la unidad ( $R^2=0.98$ ). Algunos fabricantes de equipos tipo respuesta (Bump Integrator, Mays Meter, etc.) lo recomiendan para la calibración de sus rugosímetros debido a su gran precisión, que solo puede ser superada por el método topográfico (mira y nivel). Merlín es un equipo de diseño sencillo.

**Figura 14**

*Esquema Del Rugosímetro Merlín.*

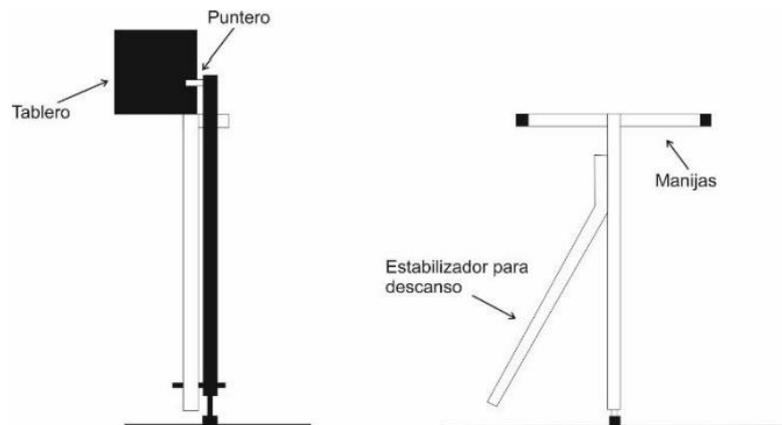


- 1: Brazo móvil
- 2: Pivote móvil
- 3: Pivote fijo
- 4: Puntero
- 5: Manijas
- 6: Rueda
- 7: Marca o Guía

Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.

**Figura 15**

*Esquema Del Rugosímetro Merlín*



Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.

**Figura 16**

*Escala para medir la dispersión de las desviaciones de la superficie del pavimento respecto del nivel de referencia, también conocidas como desviaciones de la cuerda media. (mid-cord deviations).*

RUGOSIMETRO MERLIN		
1 Division = 5 mm	DEPRESIONES	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
	ELEVACIONES	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

Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS

##### 4.1.1. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido con el Rugosímetro Merlín

a) Se necesitan dos personas que trabajen juntas para llevar a cabo el ensayo: un operador que dirige el equipo y realiza las lecturas y un asistente que las anota. Además, se debe seleccionar un área de aproximadamente 400 metros sobre un carril específico. La huella exterior del vehículo se utiliza para medir. Para calcular el valor de rugosidad, es necesario realizar 200 observaciones de las "irregularidades del pavimento" (desviaciones de la cuerda promedio), las cuales se detectan mediante el patín móvil del Merlín y se señalan mediante la posición del puntero sobre la escala graduada del tablero, lo que da como resultado las lecturas. Las observaciones deben realizarse estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2 m de distancia. En la práctica, esto se resuelve utilizando la circunferencia de la rueda de Merlín, que es aproximadamente esa dimensión. Cada prueba se realiza después de una vuelta de la rueda.

### Figura 17

*Laboratorio encargado, listos para iniciar con el Ensayo del Rugosímetro de Merlín*



Nota: En proceso de toma de ratos con el Merlín.

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 de ensayo. De acuerdo con la posición del puntero va a corresponder a una lectura que puede variar entre 1 y 50 y se anotará en un formato de campo, como se muestra en la Figura. La forma es una cuadrícula de veinte filas y diez columnas. Los datos se mueven de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha desde el casillero (1,1).

**Figura 18**

*Formato para la recolección de datos de campo*

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

PROYECTO : \_\_\_\_\_  
SECTOR : \_\_\_\_\_  
TRAMO : \_\_\_\_\_  
CARRIL : \_\_\_\_\_

OPERADOR : \_\_\_\_\_  
SUPERVISOR : \_\_\_\_\_  
FECHA : \_\_\_\_\_

ENSAYO N°  KM  +  HORA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

TIPO DE PAVIMENTO:

AFIRMADO

BASE GRANULAR

BASE AFIRMADA

TRATAMIENTO MONOCAPA

CARPETA EN FRIO

CARPETA EN CALIENTE

RECAPEO ASFALTICO

SELLO

OTRO

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

Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.

## Figura 19

### *Realización del ensayo con el Rugosímetro de Merlín*



Nota: Se realiza el registro de datos brindados por el equipo.

b) La medición se lleva a cabo de manera continua a una velocidad promedio de 0.6 km/h. La prueba comienza estacionando el equipo al comienzo del trecho. El operador realiza la lectura después de que el puntero se estabilice y observe su posición en relación con la escala colocada en el tablero. Luego, el operador realiza la lectura que el auxiliar anota. Después, el operador levanta el instrumento por las manijas y lo mueve entre un ensayo y otro en la distancia constante que se ha seleccionado. La operación se realiza de nuevo en una nueva ubicación hasta completar las 200 lecturas.

Aunque el tiempo entre las lecturas no es importante, es recomendable estacionar la rueda en la misma posición y poner una señal o marca llamativa sobre la llanta.

**Figura 20**

Valores obtenidos del ensayo de Rugosímetro de Merlín

NOTA: Se registra desde la primera fila, posición (1) hasta la posición (20), continuando sucesivamente hacia abajo																				TIPO DE PAVIMENTO					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Afirmado				
1	32	23	32	30	33	33	32	33	33	32	33	32	31	33	32	31	32	33	32	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	32	31	34	32	34	32	31	32	33	31	34	32	31	32	32	32	31	33	32	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	31	32	34	32	34	34	33	33	33	34	32	32	32	28	32	32	32	32	31	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	33	31	31	34	33	30	32	32	33	31	32	31	32	28	32	33	33	30	32	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	33	34	32	34	32	31	33	34	34	32	33	33	33	32	32	32	30	33	33	34	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	32	30	34	33	32	32	32	32	34	32	32	33	33	32	32	32	30	33	33	34	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	31	32	31	32	33	34	31	32	32	31	32	33	31	31	33	31	33	34	34	32	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	32	32	32	32	33	33	32	32	31	32	33	31	31	33	31	33	34	34	32	34	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	33	32	31	31	32	32	32	33	32	34	33	34	34	33	30	33	32	32	34	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	31	32	32	30	33	31	34	30	32	32	32	30	31	32	32	32	32	32	31	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
NOTA: Se registra desde la primera fila, posición (1) hasta la posición (20), continuando sucesivamente hacia abajo																				TIPO DE PAVIMENTO					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Afirmado				
1	31	32	33	34	32	31	30	34	32	32	32	32	30	31	33	33	32	33	33	34	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	31	30	32	33	33	31	33	32	33	33	34	32	31	34	34	32	32	32	33	34	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	32	32	34	35	33	31	31	33	34	31	32	31	32	30	33	33	33	34	33	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	33	33	31	32	33	32	33	32	33	31	34	32	32	32	34	34	34	34	34	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	32	32	34	31	32	33	32	32	31	34	32	32	31	34	31	33	34	32	34	32	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	32	31	32	33	31	34	34	30	33	32	34	31	34	31	33	34	32	34	34	32	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	32	32	31	33	35	32	35	34	33	33	32	32	34	34	33	33	32	34	32	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	32	34	30	32	32	31	30	29	32	32	32	32	32	32	33	32	31	31	30	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	31	31	32	29	30	34	30	34	32	32	32	32	32	33	34	32	35	30	33	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	33	33	33	31	32	30	33	34	34	31	33	33	33	33	34	32	35	30	33	33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
NOTA: Se registra desde la primera fila, posición (1) hasta la posición (20), continuando sucesivamente hacia abajo																				TIPO DE PAVIMENTO					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Afirmado				
																						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
																						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Nota: Datos obtenidos del ensayo realizado en campo, con el laboratorio contratado.

**Figura 21**

Valores obtenidos del ensayo de rugosímetro de merlín colocados en Excel para cálculo de IRI

CARRIL : DERECHO      TESISISTAS: Keyla P. Alave Araca, German A. Flores Dueñas  
APOYO:

ENSAYO N° 1      KM 1326 + 0      HORA: 09:36 a. m.

TIPO DE PAVIMENTO Pavimento Flexible

1	29	29	30	29	26	25	28	27	28	26	F. C	1.09	E=	5.0 mm
2	28	27	26	28	26	27	25	26	28	27	minimo	21		
3	28	25	27	27	25	25	25	27	26	27	maximo	34		
4	29	31	31	30	30	30	31	27	27	29	EP = Espesor de la Pastilla		6.1	
5	34	32	26	28	26	28	27	27	26	25	Li = Pos inicial del puntero		25	
6	25	26	30	27	27	24	24	29	26	26	LF = Pos final del puntero		14	
7	25	27	26	28	27	29	30	30	29	28	$FC = \frac{EP \times 10}{(LI - LF) \times 5}$	FC =	1.09	
8	26	24	25	25	25	24	23	23	26	29	<b>RANGOD</b>			
9	28	29	27	28	27	27	28	30	29	26	V. ENTERO	V. FRACCIONARIO		
10	24	28	27	27	30	28	26	29	27	24		EXTR. IZQ	EXTR. DER	
11	27	25	27	29	28	24	26	24	26	27	5	0.93	0.94	
12	28	27	24	26	28	26	27	23	26	27	D= 6.87			
13	24	26	28	28	24	25	23	27	28	28	<b>D= 34.373 mm</b>			
14	27	26	23	27	29	30	27	24	25	24	Dcorr= 37.466 mm			
15	26	26	27	28	32	27	25	21	27	27	<b>CALCULO DEL IRI</b>			
16	23	29	31	30	23	27	25	25	28	29	IRI = 0.593 + 0.0471 * D; D > 50			
17	27	27	28	27	26	28	27	26	26	29	IRI = 0.0485 * D; D < 50			
18	30	29	27	24	23	24	25	26	27	25	IRI= 1.81710 m/Km			
19	25	27	29	26	27	25	26	26	27	28	<b>SERVICIABILIDAD</b>			
20	27	29	30	30	30	31	30	27	28	30				

Nota: El gráfico es una muestra del cálculo del IRI en el Excel de procesamiento.

### Cálculo del Rango “D”

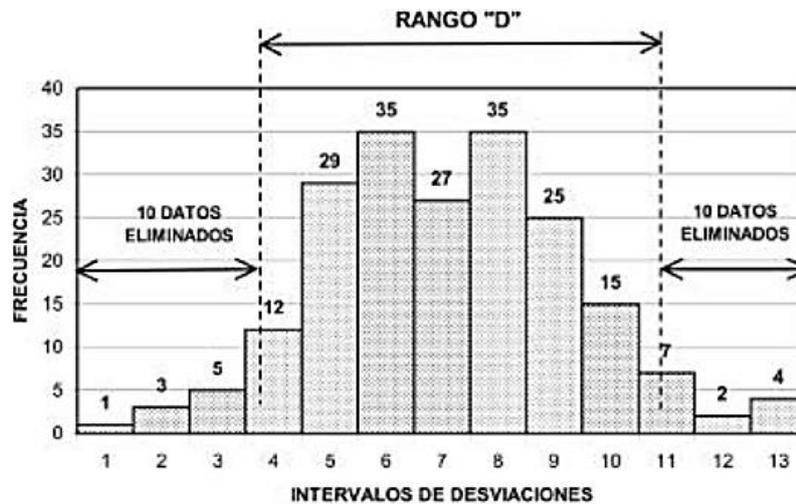
Se utiliza una escala de 50 unidades sobre el tablero del rugosímetro para generar los 200 datos necesarios para determinar el valor de rugosidad. El puntero del brazo móvil registra las doscientas posiciones en las que se mueve. Cuando el perfil del terreno concuerda con la línea o cuerda promedio, la división número 25 debe corresponder a la posición central del puntero sobre el tablero. Si las

diferentes posiciones del puntero coincidan con la división 25 o con alguna cercana, el ensayo demostrará que el pavimento tiene un perfil igual o cercano a una línea recta (baja rugosidad). Sin embargo, si el puntero se aleja de la división N° 25 (alta dispersión), se indica que el pavimento tiene un perfil con múltiples inflexiones (alta rugosidad).

El cálculo de la distribución de frecuencias de las lecturas o posiciones adoptadas por el puntero se utiliza para analizar la dispersión de los datos obtenidos con Merlín. Este histograma se puede usar para enseñar.

**Figura 22**

*Modelo de histograma para cálculo de Rango "D"*



Tomado de: Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.

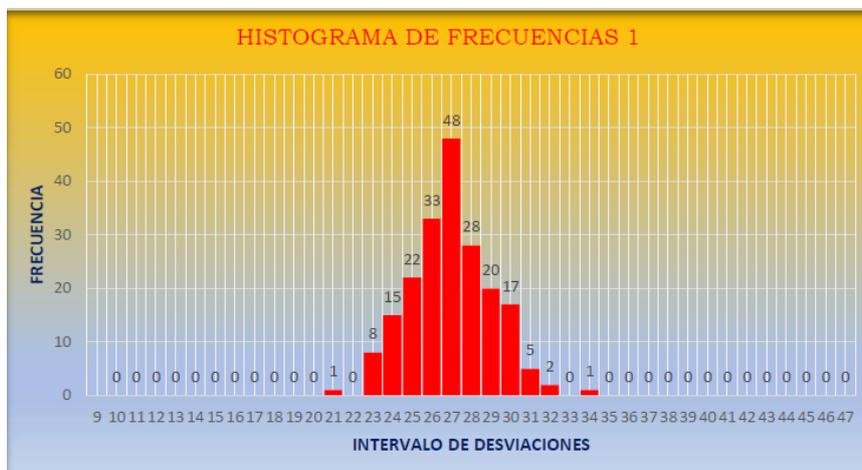
Posteriormente, se establece el rango de los valores agrupados en intervalos de frecuencia (D) después de eliminar aproximadamente la décima parte de los datos que correspondan a posiciones de puntero que son poco representativas o erráticas. En la práctica, se elimina el cinco por ciento correspondiente a 10 datos del extremo inferior y el otro cinco por ciento del extremo superior del histograma. Se calcula el "ancho del histograma" en unidades

de escala después de descartar los datos, teniendo en cuenta las fracciones que podrían haber surgido como resultado de la eliminación de los datos. En la Figura anterior, se observa que en la parte inferior del histograma se eliminan los intervalos 1, 2 y 3, así como un dato de los doce que pertenecen al intervalo 4, lo que resulta en una unidad dividida igual a  $11/12=0.92$ . En la parte superior del histograma, hay una unidad dividida igual a  $3/7=0.43$ . Como resultado, se obtiene un rango de  $0.92+6+0.43=7.35$  unidades.

Se debe multiplicar el número de unidades calculadas por el valor de cada unidad en milímetros para expresar el rango D. Los valores obtenidos con los datos recolectados se muestran en el histograma siguiente.

### Figura 23

*Histograma para cálculo de Rango “D” de datos obtenidos con equipo de Rugosímetro de Merlín*



Nota: Datos obtenidos del cálculo propio

Otro ejemplo para el cálculo del Rango “D” de uno de los histogramas de frecuencias sacadas de los datos obtenidos en campo sería, el descarte de los 10 datos del extremo inferior son los intervalos 21,23 y un dato de los quince que pertenecen al intervalo 24, en consecuencia resulta una unidad fraccionada igual

a  $14/15=0.933$ , de igual manera los datos del extremo superior se eliminan los intervalos 34,32,31 y un dato de diez que también resulta una unidad fraccionada que es igual a  $16/17= 0.941$ . la cantidad de intervalos que están en centro de los intervalos que participan en el descarte son 5. Se tiene como consecuencia un Rango igual a  $0.933+5+0.941= 6.874$  unidades.

El rango D, que se ha encontrado, debe expresarse en milímetros, multiplicando el número de unidades calculadas por el valor de cada unidad en milímetros.

### Tabla 3

*Histograma para cálculo de Rango “D” de datos obtenidos con equipo de Rugosímetro de Merlín*

RANGO D		
V. Entero	V. Fraccionario	
	Extr. Izquierdo	Extr. Derecho
5	<b>0.93</b>	<b>0.94</b>

Nota: Corresponde al cálculo realizado para el rango “D”

Para lo cual con los datos se tienen el siguiente histograma como ejemplo de los valores obtenidos y nos da un  $D = (6.874 * 5.00) = 34.373$  mm

#### a) Factor de corrección para el ajuste de “D”

Se utiliza un disco circular de material bronce de diámetro de 5 cm aproximadamente y 6.00 mm de espesor para calcular el factor de corrección y se procede de la siguiente manera:

El espesor de la pastilla se mide con un calibrador que permite una aproximación de 10 mm en milímetros. Se utilizarán cuatro medidas diametralmente opuestas para encontrar el valor promedio del espesor. Por



ejemplo, el espesor medido es de 6.05 mm, lo que es un equipo calibrado para el presente caso.

$$F.C. = (EP \times 10) / [(LI - LF) \times 5]$$

donde,

EP: Espesor de la pastilla

LI: Posición inicial del puntero

LF: Posición final del puntero

Para calcular las posiciones del puntero, se dispone un rugosímetro sobre una superficie plana y se lee la lectura en el tablero que refiere a la posición del puntero cuando el patín móvil está sobre el piso. Posterior, se levanta el patín y se apoya sobre el piso la pastilla de calibración. Y la lectura se lleva a cabo en el punto final del puntero.

En el presente equipo son los siguiente los datos:

$$EP = 6.05 \text{ mm}$$

$$Li = 25$$

$$LF = 14$$

Reemplazando los datos en la formula (4) se tiene:

$$F.C. = \frac{(6.05 \times 10)}{[(25 - 14) \times 5]}$$

$$F.C. = 1.09$$

#### b) Cálculo del Rango “D” corregido

Considerando el Factor de Corrección (FC=1.09) y la Relación de Brazos utilizada en los ensayos (RB=1), el valor D calculado debe modificarse.

El valor D corregido será:



$$D \times FC \times RB$$

donde,

D: Rango "D"

FC: Factor de Corrección

RB: Relación de Brazos

$$34.373 \text{ mm} \times 1.09 \times 1 = 37.466 \text{ mm}.$$

**c) Determinación de la rugosidad en la escala del IRI**

Para convertir la rugosidad que está en unidades Merlín a la escala del IRI, se usa las expresiones (i) y (ii).

i) Cuando  $2.4 < IRI < 15.9$  ó  $D > 50\text{mm}$ , entonces

$$IRI = 0.593 + 0.0471 D \quad \dots \dots (1)$$

ii) Cuando  $IRI < 2.4$  ó  $D < 50\text{mm}$ , entonces

$$IRI = 0.0485 D \quad \dots \dots (2)$$

Se aplica la ecuación para el  $IRI < 2.4$ , y se obtiene un IRI de 1.8657 m/km:

**Figura 24**

*Histograma para cálculo de Rango “D” de datos obtenidos con equipo de Rugosímetro de Merlín.*

F. C	<b>1.09</b>	E=	5.0 mm
minimo	21		
maximo	34		

EP = Espesor de la Pastilla	6.1
Li = Pos inicial del puntero	25
LF = Pos final del puntero	14

$$FC = \frac{EP \times 10}{(LI - LF) \times 5} \quad FC = 1.09$$

RANGO D		
V. ENTERO	V. FRACCIONARIO	
	EXTR. IZQ	EXTR. DER
5	<b>0.93</b>	<b>0.94</b>

$$D = 6.87$$

$$D = 34.373 \text{ mm}$$

$$D_{corr} = 37.466 \text{ mm}$$

**CALCULO DEL IRI**

$$IRI = 0.593 + 0.0471 * D; \quad D > 50$$

$$IRI = 0.0485 * D; \quad D < 50$$

$$IRI = 1.81710 \text{ m/Km}$$

Fuente: Elaboración Propia

Del ensayo realizado entre el KM 1326+000 - KM 1327+600 se ha obtenido los siguientes valores.

**Tabla 4**

*Resultado de ensayo con equipo de Rugosímetro de Merlín*

<b>N°</b>	<b>Inicio Km</b>	<b>Final Km</b>	<b>IRI</b>	
1	1326+000	1326+400	1.82	m/Km
2	1326+400	1326+800	1.66	m/Km
3	1326+800	1327+200	1.37	m/Km
4	1327+200	1327+600	1.38	m/Km

Fuente: Elaboración Propia

#### **4.1.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) método de Mira y Nivel**

##### **4.1.2.1 Levantamiento topográfico de los tramos de prueba**

1.- Se realiza el levantamiento topográfico de los tramos Km 1326+000 al Km 1326+600, para poner introducir los valores al programa del Banco Mundial.

2.- El levantamiento topográfico del perfil longitudinal se lleva a cabo en las marcas del camino y/o en los ahuellamientos por los que el equipo de medición de rugosidad pasó. Se toma las medidas de seguridad necesarias para el estudio, ya que el levantamiento se realiza con nivel y mira a cada 50 cm.

3.- Se incorporan los datos del perfil al programa del Banco Mundial. Se determina el Índice Internacional de Rugosidad de cada rodada utilizando los coeficientes correspondientes a la distancia de levantamiento (50 cm). El valor del IRI para cada una de las huellas se promedia para obtener el valor del IRI en ese intervalo.

### Figura 25

*Fotografía tomada del levantamiento topográfico del tramo km 1326 + 000*

*hasta km 1327 + 600 huella derecha, carretera Puno-Juliaca*



Nota: Corresponde a la toma de datos cada 0.50 metros



**Tabla 5**

*Muestra corta de toma de datos topográficos del tramo km 1326 + 000 hasta km 1327 + 600 huella derecha, carretera Puno-Juliaca*

<b>Levantamiento topográfico km 1326+000 hasta 1327+600</b>						
<b>N°</b>	<b>Estación</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Vista atrás</b>	<b>Altura del instrumento</b>	<b>Vista adelante</b>	<b>Cota</b>
1	<b>BM</b>		1.105			3817.869
2		0		3818.974	0.891	3818.083
3		0.5			0.892	3818.082
4		1			0.892	3818.082
5		1.5			0.893	3818.081
6		2			0.892	3818.082
7		2.5			0.894	3818.080
8		3			0.895	3818.079
9		3.5			0.896	3818.078
10		4			0.897	3818.077
11		4.5			0.896	3818.078
12		5			0.896	3818.078
13		5.5			0.896	3818.078
14		6			0.896	3818.078
15		6.5			0.894	3818.080
16		7			0.895	3818.079
17		7.5			0.892	3818.082
18		8			0.895	3818.079
19		8.5			0.895	3818.079
20		9			0.896	3818.078
21		9.5			0.900	3818.074
22		10			0.899	3818.075
23		10.5			0.898	3818.076
24		11			0.895	3818.079
25		11.5			0.897	3818.077
26		12			0.896	3818.078
27		12.5			0.895	3818.079
28		13			0.892	3818.082
29		13.5			0.892	3818.082
30		14			0.891	3818.083
31		14.5			0.890	3818.084
32		15			0.890	3818.084
33		15.5			0.891	3818.083

Nota: Elaboración propia



#### 4.1.2.2. Cálculo de IRI

Se realizó el programa en Excel para tener mayor trabajabilidad con los datos, se tomaron los datos para el programa para un  $dx=0.5m$ , los cuales son los siguientes.

**Tabla 6**

*Valores iniciales para un  $dx=0.5m$  en el funcionamiento del programa*

VALORES				VALORES	
	0.9881727	0.02128394	-0.02520931	0.00099232	0.03703847
<b>ST</b>	-0.928516	0.9001616	-3.391369	0.06280167	<b>PR</b> 4.319885
	0.06386326	0.00661545	0.2402896	0.00986268	0.6958473
	3.743294	0.4186779	-46.67883	-0.1145251	42.93555

Adaptado de: Sayers, M.; Gillespie, T. & Queiroz, C. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. *World Bank Technical Paper Number 46*.

Seguidamente se prosiguió a adecuar el programa al Excel, de la siguiente manera.

**Figura 26**

*Modelo del Programa del Banco Mundial en el Programa Excel*

<b>N°</b>	<b>Dist</b>	<b>Cota</b>	<b>Y'</b>
1	0.00	3818.083	
2	0.50	3818.082	-2.00
3	1.00	3818.082	0.00
4	1.50	3818.081	-2.00
5	2.00	3818.082	2.00
6	2.50	3818.080	-4.00
7	3.00	3818.079	-2.00
8	3.50	3818.078	-2.00
9	4.00	3818.077	-2.00
10	4.50	3818.078	2.00
11	5.00	3818.078	0.00
12	5.50	3818.078	0.00
13	6.00	3818.078	0.00
14	6.50	3818.080	4.00
15	7.00	3818.079	-2.00
16	7.50	3818.082	6.00
17	8.00	3818.079	-6.00
18	8.50	3818.079	0.00
19	9.00	3818.078	-2.00
20	9.50	3818.074	-8.00
21	10.00	3818.075	2.00
22	10.50	3818.076	2.00
23	11.00	3818.079	6.00

Nota: Corresponde al Excel realizado para el cálculo de esta investigación.

Figura 27

Modelo del Programa del Banco Mundial en el Programa Excel

IRI 2.1659

$$y_a = \cotan N \cdot 23$$

$$y_1 = \cotan N \cdot 1$$

$$z_1' = z_3' = (y_a - y_1) / |N| = -0.3636363636$$

$$z_2' = z_4' = 0$$

$$a = 111d + 1 = 0.5$$

$$y' = (y_1 - y_{j-1}) / dx = \text{slope input}$$

and

$$z_j' = z_j \text{ from previous position, } j=1,4$$

$$(8)$$

$$(9)$$

$$RS_i = |z_3 - z_1|$$

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n z_i \cdot RS_i$$

	z1	z2	z3'	z2'	z3'	z4'	y'	resultado	RS1 =	IRI =
<b>1ra Iteracion</b>	0.988173	-0.35934	0.02128394	0	-0.02521	0.009167022	0.000992	-0.07407694	1.07805	1.07805
	-0.92852	0.337642	0.9001616	0	-3.39137	1.233225091	0.062802	-8.63977		
	0.063863	-0.02322	0.006615445	0	0.24029	-0.087378036	0.009863	-1.3916946		
	3.743234	-1.3612	0.4186779	0	-46.6788	16.97412	-0.11453	-85.8711		
								-70.2581778		
<b>2da Iteracion</b>	0.988173	-0.41923	0.02128394	-0.15045	-0.02521	0.037871836	0.000992	-0.06372	0.526249	0.80215
	-0.92852	0.393919	0.9001616	-6.36315	-3.39137	5.094838861	0.062802	-4.41233		
	0.063863	-0.02709	0.006615445	-0.04676	0.24029	-0.360986018	0.009863	-0.69293		
	3.743234	-1.58806	0.4186779	-2.95959	-46.6788	70.12540277	-0.11453	8.046325		
								0		
								-0.601528381		
								-5.286728139		
								-1.127777578		
								73.62405883		
<b>3ra Iteracion</b>	0.988173	-0.59441	0.02128394	-0.11252	-0.02521	0.028430495	0.000992	-0.07407694	0.330423	0.644907
	-0.92852	0.558529	0.9001616	-4.75891	-3.39137	3.824709916	0.062802	4.623714		
	0.063863	-0.03842	0.006615445	-0.03497	0.24029	-0.270993223	0.009863	0.726131		
	3.743234	-2.2517	0.4186779	-2.21344	-46.6788	52.64333763	-0.11453	-8.4316		
								-85.8711		
								-46.12469871		
<b>4ta Iteracion</b>	0.988173	-0.67149	0.02128394	-0.09347	-0.02521	0.025460065	0.000992	-0.07407694	1.332846	0.816892
	-0.92852	0.630949	0.9001616	-3.95326	-3.39137	3.425102654	0.062802	-2.69671		
	0.063863	-0.0434	0.006615445	-0.02905	0.24029	-0.24267974	0.009863	-0.45491		
	3.743234	-2.54366	0.4186779	-1.83872	-46.6788	47.14314028	-0.11453	5.282436		
								85.87110002		
								133.9142973		
<b>5ta Iteracion</b>	0.988173	-0.70278	0.02128394	0.124423	-0.02521	-0.015671414	0.000992	-0.14815388	0.710705	0.795655
	-0.92852	0.660355	0.9001616	5.262209	-3.39137	-2.108250791	0.062802	8.410042		
	0.063863	-0.04542	0.006615445	0.036673	0.24029	-0.149378473	0.009863	-1.320754		
	3.743234	-2.66221	0.4186779	2.447528	-46.6788	-23.01796073	-0.11453	-15.3365		
								-171.7422		
								-0.609239728		
								-5.055164863		
								-1.320005137		
								-216.3114093		

Nota: Corresponde al Excel realizado para el cálculo de esta investigación.



- a) Para poder calcular el IRI en el formato del Excel se tomaron los datos cada 11 metros para tener un número limitado de iteraciones, las cuales serán 23 iteraciones, dando como resultado el IRI del intervalo de cotas trabajadas, cada 11 metros.
- b) Como datos de entrada se colocaron las cotas obtenidas en el levantamiento topográfico, separándolas estas cada 11 metros o cada 23 números de datos, teniendo siempre en cuenta que el dato número 23 será el dato número 1 del siguiente bloque de 11 metros.
- c) Cada 23 datos que equivalen a 11 metros el conjunto de fórmulas elaboradas en el Excel nos entregaran un IRI, como muestra la imagen anterior, y se agrupara cada 11 metros hasta hallar la totalidad de IRI's del levantamiento topográfico realizado.
- d) Al pasar el total de datos obtenidos en el levantamiento topográfico se obtendrá la siguiente tabla.

**Tabla 7**

*IRI obtenido del programa del banco mundial con datos del levantamiento topográfico realizado.*

N°	Datos			Datos			Datos		
	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°
<b>1</b>	0-11	2.16593226	<b>26</b>	275-286	2.60321245	<b>51</b>	550-561	1.73643628	
<b>2</b>	11-22	2.49927264	<b>27</b>	286-297	3.03225628	<b>52</b>	561-572	2.82296675	
<b>3</b>	22-33	2.15128709	<b>28</b>	297-308	3.59325245	<b>53</b>	572-583	1.56458759	
<b>4</b>	33-44	2.9936683	<b>29</b>	308-319	4.19616703	<b>54</b>	583-594	2.53999764	
<b>5</b>	44-55	2.36479827	<b>30</b>	319-330	2.57753533	<b>55</b>	594-605	1.33764414	
<b>6</b>	55-66	2.06361854	<b>31</b>	330-341	1.96438705	<b>56</b>	605-616	2.08693133	
<b>7</b>	66-77	2.74206522	<b>32</b>	341-352	3.97132915	<b>57</b>	616-627	2.29422604	
<b>8</b>	77-88	2.91404478	<b>33</b>	352-363	2.88254134	<b>58</b>	627-638	2.11104135	
<b>9</b>	88-99	2.10973792	<b>34</b>	363-374	2.82051976	<b>59</b>	638-649	2.80592552	
<b>10</b>	99-110	2.20632505	<b>35</b>	374-385	3.21844187	<b>60</b>	649-660	2.0067101	
<b>11</b>	110-121	2.78934013	<b>36</b>	385-396	2.02972673	<b>61</b>	660-671	1.57832995	
<b>12</b>	121-132	2.55177072	<b>37</b>	396-407	1.79389026	<b>62</b>	671-682	1.79178603	
<b>13</b>	132-143	2.4560514	<b>38</b>	407-418	2.53302525	<b>63</b>	682-693	2.51879837	
<b>14</b>	143-154	2.86571333	<b>39</b>	418-429	3.07706791	<b>64</b>	693-704	1.91788728	

Datos			Datos			Datos		
N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI
15	154-165	1.95861486	40	429-440	2.65158606	65	704-715	1.35047095
16	165-176	3.17138565	41	440-451	2.54186619	66	715-726	1.61880555
17	176-187	1.53852935	42	451-462	2.62029217	67	726-737	2.42592072
18	187-198	3.72042562	43	462-473	1.98379394	68	737-748	2.29901488
19	198-209	3.26747422	44	473-484	2.12681566	69	748-759	1.68440436
20	209-220	3.21323668	45	484-495	1.94551854	70	759-770	2.08460004
21	220-231	2.22553244	46	495-506	2.6635738	71	770-781	1.43824324
22	231-242	3.31976588	47	506-517	2.55845328	72	781-792	1.01787484
23	242-253	2.10449772	48	517-528	2.80395215	73	792-803	1.24842795
24	253-264	1.692928	49	528-539	1.78048148	74	803-814	1.29718679
25	264-275	1.79279941	50	539-550	1.69064588	75	814-825	1.60002672

Nota: Datos obtenidos posterior al cálculo, agrupados cada 11 metros.

**Tabla 8**

*IRI obtenido del programa del banco mundial con datos del levantamiento topográfico realizado.*

N°	Datos			Datos				
	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI
<b>76</b>	825-836	2.67508249	<b>101</b>	1100-1111	2.64705776	<b>126</b>	1375-1386	2.57057222
<b>77</b>	836-847	2.4206365	<b>102</b>	1111-1122	1.02277497	<b>127</b>	1386-1397	2.21084559
<b>78</b>	847-858	2.66564059	<b>103</b>	1122-1133	0.71450317	<b>128</b>	1397-1408	1.44975466
<b>79</b>	858-869	1.95804793	<b>104</b>	1133-1144	1.14832604	<b>129</b>	1408-1419	1.45789199
<b>80</b>	869-880	1.18338509	<b>105</b>	1144-1155	1.0700591	<b>130</b>	1419-1430	1.24246921
<b>81</b>	880-891	2.20673155	<b>106</b>	1155-1166	1.09474668	<b>131</b>	1430-1441	1.10312553
<b>82</b>	891-902	2.14092496	<b>107</b>	1166-1177	1.35178786	<b>132</b>	1441-1452	1.87985938
<b>83</b>	902-913	2.0734703	<b>108</b>	1177-1188	2.55055833	<b>133</b>	1452-1463	1.46173569
<b>84</b>	913-924	1.64694674	<b>109</b>	1188-1199	1.14761765	<b>134</b>	1463-1474	1.84893056
<b>85</b>	924-935	2.58605242	<b>110</b>	1199-1210	2.78757222	<b>135</b>	1474-1485	1.71414059
<b>86</b>	935-946	2.32182377	<b>111</b>	1210-1221	1.10062436	<b>136</b>	1485-1496	1.66055313
<b>87</b>	946-957	1.77421616	<b>112</b>	1221-1232	1.86126137	<b>137</b>	1496-1507	1.65808225
<b>88</b>	957-968	1.53843217	<b>113</b>	1232-1243	2.34036719	<b>138</b>	1507-1518	1.40488888
<b>89</b>	968-979	5.54568591	<b>114</b>	1243-1254	1.3218277	<b>139</b>	1518-1529	1.78549966



Datos			Datos			Datos		
N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI
<b>90</b>	979-990	0.94715305	<b>115</b>	1254-1265	1.45193646	<b>140</b>	1529-1540	1.22535779
<b>91</b>	990-1001	1.3792376	<b>116</b>	1265-1276	2.12041691	<b>141</b>	1540-1551	3.03392277
<b>92</b>	1001-1012	1.09064245	<b>117</b>	1276-1287	1.98491647	<b>142</b>	1551-1562	1.07836387
<b>93</b>	1012-1023	1.26803772	<b>118</b>	1287-1298	2.28135645	<b>143</b>	1562-1573	2.28624176
<b>94</b>	1023-1034	1.08090377	<b>119</b>	1298-1309	4.68768991	<b>144</b>	1573-1584	1.69278591
<b>95</b>	1034-1045	2.48398024	<b>120</b>	1309-1320	2.11270345	<b>145</b>	1584-1595	1.5094707
<b>96</b>	1045-1056	1.82892947	<b>121</b>	1320-1331	3.18053301	<b>146</b>	1595-1606	1.23543533
<b>97</b>	1056-1067	1.32588786	<b>122</b>	1331-1342	2.11720841			
<b>98</b>	1067-1078	1.44232096	<b>123</b>	1342-1353	2.19298773			
<b>99</b>	1078-1089	0.99372445	<b>124</b>	1353-1364	2.19110647			
<b>100</b>	1089-1100	1.58960728	<b>125</b>	1364-1375	1.43599486			

Nota: Datos obtenidos posterior al cálculo, agrupados cada 11 metros.

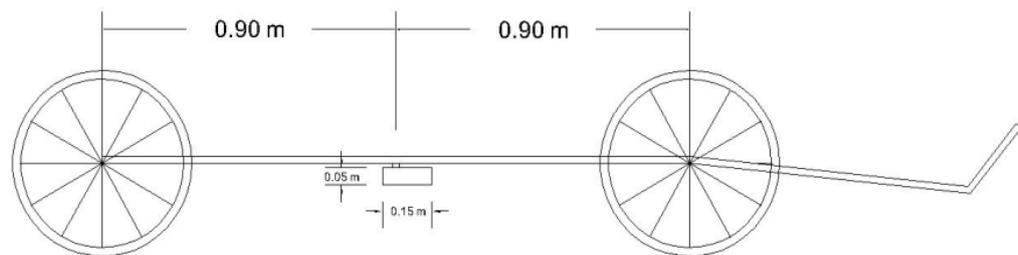
#### 4.1.3. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el equipo basado en el sensor de distancia vl5310x

Se utiliza el equipo para medir la rugosidad en los tramos a 1600 metros, realizando al menos tres ciclos sobre cada tramo a velocidades requeridas para comparar con el IRI.

Debido a la necesidad de obtener un método alternativo para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad, se utilizó el equipo con sensor vl5310x con un equipo móvil que se asemeja al rugosímetro de merlín, jalado por un vehículo.

#### Figura 28

*Modelo de equipo que llevara el sensor para la toma de muestras*



Nota: La gráfica fue realizada previa a la fabricación del equipo.

Para la medición del IRI con el equipo se realiza por el método del valor promedio el cual consiste en calcular las elevaciones y degradaciones del camino a medir, cuyo valor lo calcula el sensor, de la siguiente manera:

- a) Se realiza una medición en una superficie plana libre de elevaciones o degradaciones, que al momento de prender el sensor este nos bota una distancia a la cual está ubicada de la superficie. El cual en este ensayo está ubicado a 214 mm o 21.4 cm.
- b) Seguidamente se lleva el equipo al lugar donde se va a realizar la toma de datos con el sensor.

### Figura 29

*Equipo previo al inicio del montaje*



Nota: Se muestra a los tesisistas previa a la toma de datos en campo

### Figura 30

*Equipo montado en el vehículo*



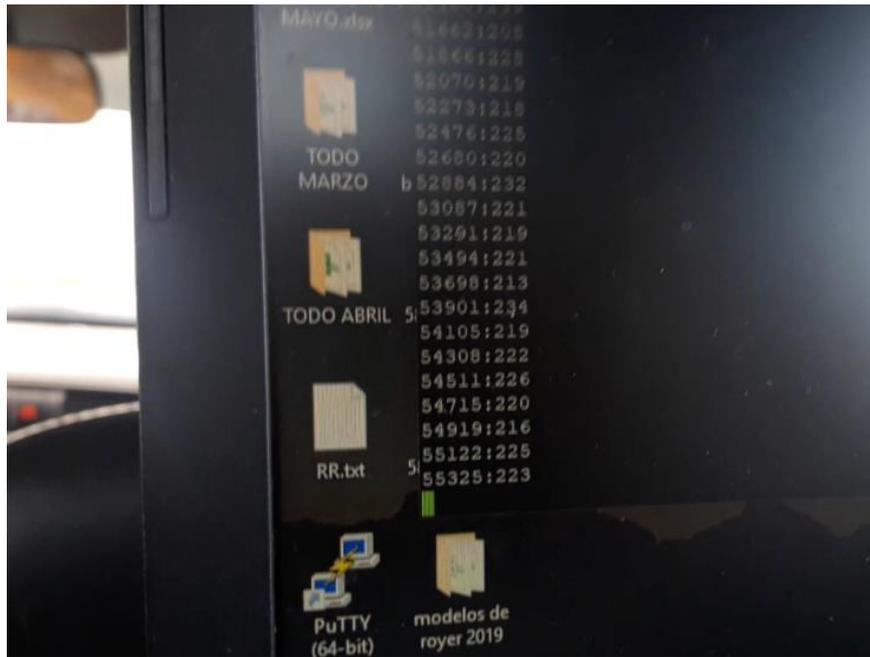
Nota: Se muestra el equipo basado en el sensor de distancia vl5310x en la parte posterior del vehículo el cual a una velocidad de 18 km/hora, procederá a tomar los datos.

c) Se prosigue a realizar la conexión del sensor al equipo que decepcionara los datos en esta oportunidad la laptop.

d) Una vez configurado el equipo y con el sensor activado se prosigue a recepcionar los datos, yendo el vehículo con una velocidad constante de 18km/hora, para que el sensor tome datos cada metro.

### Figura 31

*Recepción de datos del sensor vl53l0x*



Nota: Durante el proceso de recolección de datos en campo, el sensor va recolectando la data mediante su propia programación en un block de notas, donde nos brinda la distancia que va registrando, mediante el disparo de luz.

e) Una vez obtenidas los datos del ensayo en la laptop y estos se guardan en un block de notas gracias a la aplicación puTTY.

### Figura 32

*Modelo de recepción de datos del programa en block de notas por parte de la aplicación puTTY*

```
datos 1er recorrido: Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
197632: 210
197836: 215
198041: 214
198246: 208
198451: 219
198656: 198
198860: 207
199064: 218
199269: 216
199474: 222
199678: 214
199883: 221
200088: 211
200293: 221
200498: 213
200701: 209
200906: 208
201111: 208
201316: 211
201521: 202
201725: 211
201930: 211
202134: 220
202339: 214
202544: 211
202748: 223
202953: 216
203158: 220
203363: 217
203568: 220
203772: 216
203976: 215
204181: 208
204386: 224
204591: 214
204795: 204
205000: 203
205205: 216
205410: 223
205614: 214
205818: 209
206023: 209
206228: 216
```

Nota: Acorde a las variaciones encontradas en cada disparo, el sensor procede a registrarlas, estos datos fueron tomados cada 1.00 metros.



f) Se prosigue a realizar varias pasadas para poder obtener la mayor cantidad de datos posible y menor el margen de error.

g) Se llevan los datos a un Excel donde se prosigue a sacar un promedio de los 3 valores resultantes de las 3 pasadas con el sensor a la huella derecha de la vía en el tramo Km 1326+000 - Km 1327+600 De La Carretera Puno – Juliaca., se prosigue a restar el valor inicial del sensor obtenido en un principio que es de 21.4cm al promedio obtenido de las 3 tomas de datos obtenidos con el sensor.

**Tabla 9**

*Modelo de procesamiento de datos*

Distancia (M)	Datos						$\frac{\sum ABS(V)}{11}$
	1ra	2da	3ra	V. Prom	V. Inicial = V. Inicial - V. prom	214 ABS (V)	
1	218	214	209	213.667	0.367	0.367	
2	221	216	210	215.667	-1.633	1.633	
3	218	212	210	213.333	0.700	0.700	
4	205	218	215	212.667	1.367	1.367	
5	211	219	214	214.667	-0.633	0.633	
6	217	213	210	213.333	0.700	0.700	
7	211	216	217	214.667	-0.633	0.633	
8	215	211	216	214.000	0.033	0.033	
9	221	213	212	215.333	-1.300	1.300	
10	224	202	208	211.333	2.700	2.700	
11	222	218	211	217.000	-2.967	2.967	1.184848
12	218	210	208	212.000	2.033	2.033	
13	220	210	218	216.000	-1.967	1.967	
14	219	207	216	214.000	0.033	0.033	
15	220	213	214	215.667	-1.633	1.633	
16	222	210	213	215.000	-0.967	0.967	
17	225	215	210	216.667	-2.633	2.633	
18	208	219	216	214.333	-0.300	0.300	
19	221	208	215	214.667	-0.633	0.633	
20	224	216	210	216.667	-2.633	2.633	
21	218	202	213	211.000	3.033	3.033	
22	213	216	211	213.333	0.700	0.700	1.506061
23	205	220	216	213.667	0.367	0.367	
24	215	219	213	215.667	-1.633	1.633	



<b>Datos</b>							
<b>Dista ncia (M)</b>	<b>1ra</b>	<b>2da</b>	<b>3ra</b>	<b>V. Prom</b>	<b>V. Inicial = V. Inicial - V. prom</b>	<b>214 ABS (V)</b>	<b><math>\frac{\sum ABS(V)}{11}</math></b>
25	213	217	218	216.000	-1.967	1.967	
26	205	210	215	210.000	4.033	4.033	
27	211	216	218	215.000	-0.967	0.967	
28	218	220	207	215.000	-0.967	0.967	
29	220	210	211	213.667	0.367	0.367	
30	210	215	213	212.667	1.367	1.367	
31	217	213	210	213.333	0.700	0.700	
32	218	210	216	214.667	-0.633	0.633	
33	213	216	211	213.333	0.700	0.700	1.245455

Nota: Datos obtenidos dentro de la salida a campo

h) Al resultado de la resta del Valor Inicial del sensor al Valor promedio obtenido, sacaremos valor absoluto para poder trabajar con todos los datos tanto negativos como positivos.

i) Finalmente realizaremos una sumatoria de los valores obtenidos cada 11 metros para poder realizar una comparación con los valores de IRI obtenidos con el programa acorde a la guía N° 46 de Sayers et al. (1986).

#### **4.1.4. Procedimientos para la comparación del IRI con un equipo**

##### **4.1.4.1. Comparación de datos obtenidos con el programa del Banco Mundial y el Sensor VI5310x**

a) Para hallar una fórmula la cual transforme el valor promedio obtenido con el sensor y este nos dé el IRI, realizaremos una comparación, con los 2 valores obtenidos anteriormente el IRI con el programa y el valor promedio del sensor.



**Tabla 10**

*Tabla para el cálculo del IRI*

N°	Datos		
	Distancia (metros)	Sensor Valor Promedio	Programa IRI
1	0.00	0.00000	0.00000
2	0-11	1.18485	2.16593
3	11-22	1.50606	2.49927
4	22-33	1.24545	2.15129
5	33-44	1.63333	2.99367
6	44-55	1.37273	2.36480
7	55-66	1.27576	2.06362
8	66-77	1.51212	2.74207
9	77-88	1.53636	2.91404
10	88-99	1.28182	2.10974
11	99-110	1.39697	2.20633
12	110-121	1.45152	2.78934
13	121-132	1.48788	2.55177
14	132-143	1.57273	2.45605
15	143-154	1.51212	2.86571
16	154-165	1.15455	1.95861
17	165-176	1.71818	3.17139
18	176-187	0.97879	1.53853
19	187-198	1.85152	3.72043
20	198-209	1.51818	3.26747
21	209-220	1.43333	3.21324
22	220-231	1.27576	2.22553
23	231-242	1.73030	3.31977
24	242-253	1.26970	2.10450
25	253-264	1.00303	1.69293
26	264-275	0.88788	1.79280
27	275-286	1.58485	2.60321
28	286-297	1.72424	3.03226
29	297-308	1.90606	3.59325
30	308-319	1.96667	4.19617
31	319-330	1.71212	2.57754
32	330-341	1.26970	1.96439
33	341-352	1.96667	3.97133
34	352-363	2.09394	2.88254
35	363-374	1.22727	2.82052
36	374-385	1.90606	3.21844
37	385-396	0.94848	2.02973
38	396-407	0.82727	1.79389



N°	Distancia (metros)	Datos	
		Sensor Valor Promedio	Programa IRI
39	407-418	1.01515	2.53303
40	418-429	1.65758	3.07707
41	429-440	1.36667	2.65159
42	440-451	1.62121	2.54187
43	451-462	1.52424	2.62029
44	462-473	1.04545	1.98379
45	473-484	1.08788	2.12682
46	484-495	1.00303	1.94552
47	495-506	1.39697	2.66357
48	506-517	1.39697	2.55845
49	517-528	1.36061	2.80395
50	528-539	0.93636	1.78048
51	539-550	0.98485	1.69065
52	550-561	0.97879	1.73644
53	561-572	1.63333	2.82297
54	572-583	1.02121	1.56459
55	583-594	1.37879	2.54000
56	594-605	0.79697	1.33764
57	605-616	0.98485	2.08693
58	616-627	1.11818	2.29423
59	627-638	1.40909	2.11104
60	638-649	1.50606	2.80593
61	649-660	0.90606	2.00671
62	660-671	0.81515	1.57833
63	671-682	0.82121	1.79179
64	682-693	1.33636	2.51880
65	693-704	1.00909	1.91789
66	704-715	0.82121	1.35047
67	715-726	1.01515	1.61881
68	726-737	1.34848	2.42592
69	737-748	1.28182	2.29901
70	748-759	0.81515	1.68440
71	759-770	1.19091	2.08460
72	770-781	0.93636	1.43824
73	781-792	0.75455	1.01787
74	792-803	1.00303	1.24843
75	803-814	0.78485	1.29719
76	814-825	0.76061	1.60003
77	825-836	1.28182	2.67508
78	836-847	1.39091	2.42064
79	847-858	1.39091	2.66564
80	858-869	0.94848	1.95805



N°	Distancia (metros)	Datos	
		Sensor Valor Promedio	Programa IRI
81	869-880	0.64545	1.18339
82	880-891	0.94848	2.20673
83	891-902	0.99091	2.14092
84	902-913	1.09394	2.07347
85	913-924	0.76667	1.64695
86	924-935	1.16061	2.58605
87	935-946	1.05758	2.32182
88	946-957	0.62121	1.77422
89	957-968	1.08182	1.53843
90	968-979	2.06364	5.54569
91	979-990	0.40909	0.94715
92	990-1001	0.76667	1.37924
93	1001-1012	0.47576	1.09064
94	1012-1023	0.51818	1.26804
95	1023-1034	0.66970	1.08090
96	1034-1045	0.99697	2.48398
97	1045-1056	0.75455	1.82893
98	1056-1067	0.53030	1.32589
99	1067-1078	0.73030	1.44232
100	1078-1089	0.55455	0.99372
101	1089-1100	0.82121	1.58961
102	1100-1111	1.02121	2.64706
103	1111-1122	0.62121	1.02277
104	1122-1133	0.19697	0.71450
105	1133-1144	0.50000	1.14833
106	1144-1155	0.46364	1.07006
107	1155-1166	0.43333	1.09475
108	1166-1177	0.58485	1.35179
109	1177-1188	0.97273	2.55056
110	1188-1199	0.58485	1.14762
111	1199-1210	1.37879	2.78757
112	1210-1221	0.82727	1.10062
113	1221-1232	0.98485	1.86126
114	1232-1243	0.77273	2.34037
115	1243-1254	0.54848	1.32183
116	1254-1265	0.98485	1.45194
117	1265-1276	1.28788	2.12042
118	1276-1287	0.83333	1.98492
119	1287-1298	1.27576	2.28136
120	1298-1309	1.85152	4.68769
121	1309-1320	0.93030	2.11270
122	1320-1331	1.43333	3.18053



N°	Distancia (metros)	Datos	
		Sensor Valor Promedio	Programa IRI
123	1331-1342	0.92424	2.11721
124	1342-1353	1.03939	2.19299
125	1353-1364	1.10606	2.19111
126	1364-1375	0.74242	1.43599
127	1375-1386	1.04545	2.57057
128	1386-1397	1.12424	2.21085
129	1397-1408	0.76667	1.44975
130	1408-1419	0.58485	1.45789
131	1419-1430	0.40909	1.24247
132	1430-1441	0.46970	1.10313
133	1441-1452	0.99697	1.87986
134	1452-1463	0.68182	1.46174
135	1463-1474	1.17273	1.84893
136	1474-1485	0.94242	1.71414
137	1485-1496	0.53636	1.66055
138	1496-1507	0.76667	1.65808
139	1507-1518	0.40909	1.40489
140	1518-1529	0.83333	1.78550
141	1529-1540	0.63939	1.22536
142	1540-1551	1.36667	3.03392
143	1551-1562	0.40909	1.07836
144	1562-1573	1.13030	2.28624
145	1573-1584	0.96667	1.69279
146	1584-1595	0.61515	1.50947
147	1595-1606	0.52667	1.23544

Nota: Datos obtenidos posterior al cálculo, agrupados cada 11 metros.

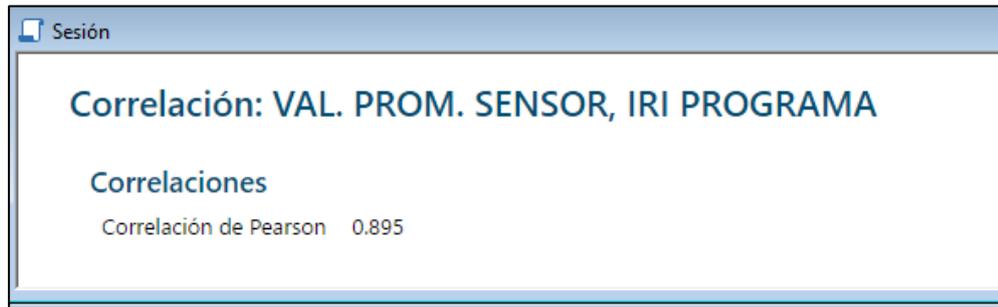
b) Se realiza una correlacionen en Excel obteniéndose un grado de correlación de 0.89 siendo este una correlación **FUERTE**.

Coeficiente de correlación de Pearson =	0.89
---	------

c) También se utiliza el programa Minitab, en la cual se calcula el grado de correlación de Pearson. Dándonos como resultado una correlación de 0.895. siendo este una correlación fuerte.

### Figura 33

Imagen de valor obtenido en programa Minitab de la correlación entre el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl5310x y el IRI del método de mira y nivel.

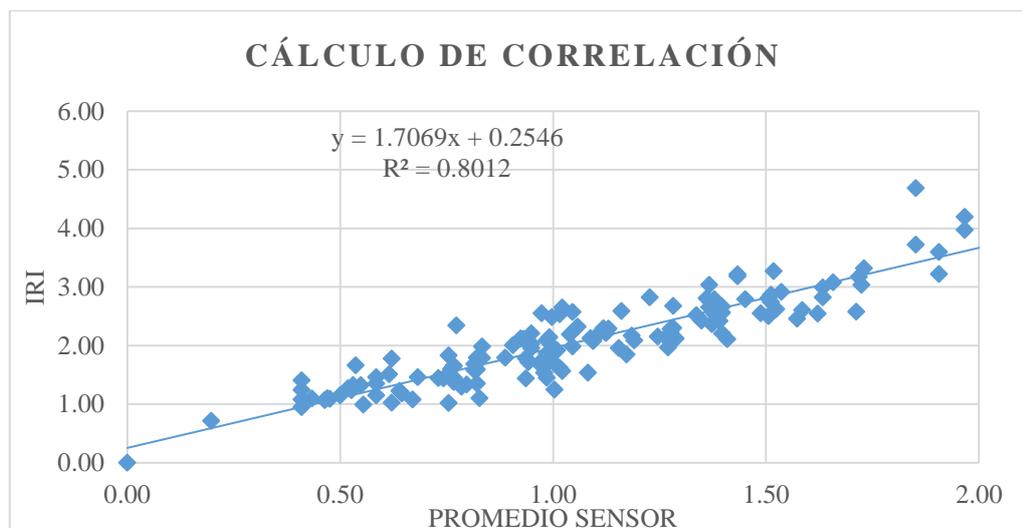


Nota: Se corrobora lo calculado previamente en Excel mediante el Minitab

d) Seguidamente al determinar que existe una relación entre las dos variables que realiza la gráfica de dispersión entre ambas, para poder obtener una ecuación de regresión con el cual hallaremos el IRI con el valor promedio obtenido con el sensor de distancia vl5310x.

### Figura 34

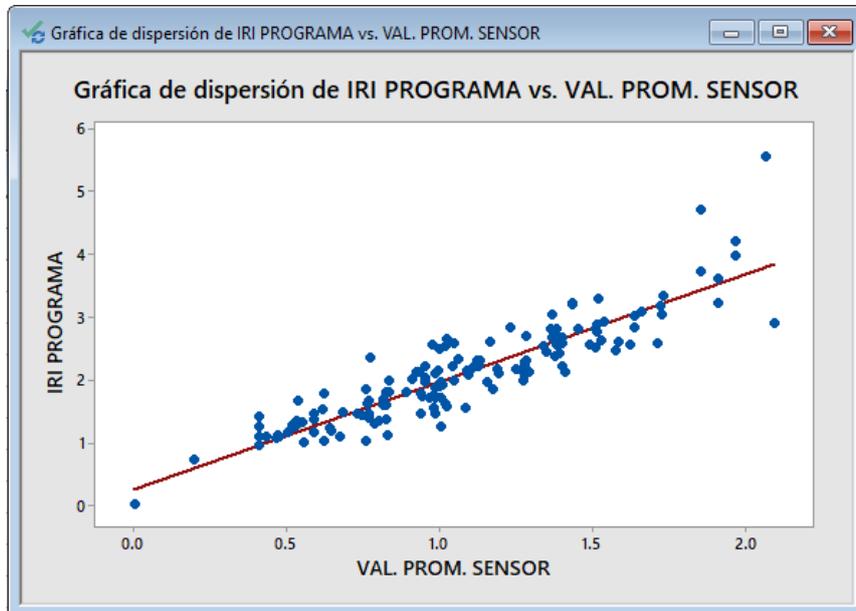
Gráfica de dispersión en Excel entre IRI del método de mira y nivel Vs el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl5310x.



Nota: Se realiza el cálculo de correlación de 147 datos obtenidos del sensor de distancia vl5310x

### Figura 35

*Grafica de dispersión en el programa Minitab entre IRI del método de mira y nivel Vs el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl5310x*



Nota: Se corrobora lo calculado en Excel mediante el Minitab.

### Figura 36

*Ecuación de regresión obtenida en el programa Minitab entre IRI del método de mira y nivel Vs el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia vl5310x*



Nota: El software Minitab, nos muestra la ecuación de regresión.

e) Obtenida la ecuación de regresión siguiente:

$$Y = 1.7069X + 0.2546$$

Donde:

X = valor promedio obtenido por el sensor de distancia vl5310x



Y= valor de IRI m/km.

f) Se ingresarán los datos del valor promedio a la formula hallada

**Tabla 11**

*Modelo de tabla de cálculo de IRI con la formula hallada con los datos del valor promedio del sensor vl53l0x*

N°	Distancia (m)	Datos	
		Sensor Valor promedio	IRI m/km $Y = 1.7069X + 0.2546$
1	0-11	1.18485	2.277017879
2	11-22	1.50606	2.825294848
3	22-33	1.24545	2.380466364
4	33-44	1.63333	3.042536667
5	44-55	1.37273	2.597708182
6	55-66	1.27576	2.432190606
7	66-77	1.51212	2.835639697
8	77-88	1.53636	2.877019091
9	88-99	1.28182	2.442535455
10	99-110	1.39697	2.639087576
11	110-121	1.45152	2.732191212
12	121-132	1.48788	2.794260303
13	132-143	1.57273	2.939088182
14	143-154	1.51212	2.835639697
15	154-165	1.15455	2.225293636
16	165-176	1.71818	3.187364545
17	176-187	0.97879	1.92529303
18	187-198	1.85152	3.414951212
19	198-209	1.51818	2.845984545
20	209-220	1.43333	2.701156667
21	220-231	1.27576	2.432190606
22	231-242	1.73030	3.208054242
23	242-253	1.26970	2.421845758
24	253-264	1.00303	1.966672424
25	264-275	0.88788	1.770120303
26	275-286	1.58485	2.959777879
27	286-297	1.72424	3.197709394
28	297-308	1.90606	3.508054848
29	308-319	1.96667	3.611503333
30	319-330	1.71212	3.177019697
31	330-341	1.26970	2.421845758
32	341-352	1.96667	3.611503333



N°	Distancia (m)	Datos	
		Sensor Valor promedio	IRI m/km $Y = 1.7069X + 0.2546$
33	352-363	2.09394	3.828745152
34	363-374	1.22727	2.349431818
35	374-385	1.90606	3.508054848
36	385-396	0.94848	1.873568788
37	396-407	0.82727	1.666671818
38	407-418	1.01515	1.987362121
39	418-429	1.65758	3.083916061
40	429-440	1.36667	2.587363333
41	440-451	1.62121	3.02184697
42	451-462	1.52424	2.856329394
43	462-473	1.04545	2.039086364
44	473-484	1.08788	2.111500303
45	484-495	1.00303	1.966672424
46	495-506	1.39697	2.639087576
47	506-517	1.39697	2.639087576
48	517-528	1.36061	2.577018485
49	528-539	0.93636	1.852879091
50	539-550	0.98485	1.935637879
51	550-561	0.97879	1.92529303
52	561-572	1.63333	3.042536667
53	572-583	1.02121	1.99770697
54	583-594	1.37879	2.60805303
55	594-605	0.79697	1.614947576
56	605-616	0.98485	1.935637879
57	616-627	1.11818	2.163224545
58	627-638	1.40909	2.659777273
59	638-649	1.50606	2.825294848
60	649-660	0.90606	1.801154848
61	660-671	0.81515	1.645982121
62	671-682	0.82121	1.65632697
63	682-693	1.33636	2.535639091
64	693-704	1.00909	1.977017273
65	704-715	0.82121	1.65632697
66	715-726	1.01515	1.987362121
67	726-737	1.34848	2.556328788
68	737-748	1.28182	2.442535455
69	748-759	0.81515	1.645982121
70	759-770	1.19091	2.287362727
71	770-781	0.93636	1.852879091
72	781-792	0.75455	1.542533636
73	792-803	1.00303	1.966672424
74	803-814	0.78485	1.594257879



N°	Distancia (m)	Datos	
		Sensor Valor promedio	IRI m/km $Y = 1.7069X + 0.2546$
75	814-825	0.76061	1.552878485
76	825-836	1.28182	2.442535455
77	836-847	1.39091	2.628742727
78	847-858	1.39091	2.628742727
79	858-869	0.94848	1.873568788
80	869-880	0.64545	1.356326364
81	880-891	0.94848	1.873568788
82	891-902	0.99091	1.945982727
83	902-913	1.09394	2.121845152
84	913-924	0.76667	1.563223333
85	924-935	1.16061	2.235638485
86	935-946	1.05758	2.059776061
87	946-957	0.62121	1.31494697
88	957-968	1.08182	2.101155455
89	968-979	2.06364	3.777020909
90	979-990	0.40909	0.952877273
91	990-1001	0.76667	1.563223333
92	1001-1012	0.47576	1.066670606
93	1012-1023	0.51818	1.139084545
94	1023-1034	0.66970	1.397705758
95	1034-1045	0.99697	1.956327576
96	1045-1056	0.75455	1.542533636
97	1056-1067	0.53030	1.159774242
98	1067-1078	0.73030	1.501154242
99	1078-1089	0.55455	1.201153636
100	1089-1100	0.82121	1.65632697
101	1100-1111	1.02121	1.99770697
102	1111-1122	0.62121	1.31494697
103	1122-1133	0.19697	0.590807576
104	1133-1144	0.50000	1.10805
105	1144-1155	0.46364	1.045980909
106	1155-1166	0.43333	0.994256667
107	1166-1177	0.58485	1.252877879
108	1177-1188	0.97273	1.914948182
109	1188-1199	0.58485	1.252877879
110	1199-1210	1.37879	2.60805303
111	1210-1221	0.82727	1.666671818
112	1221-1232	0.98485	1.935637879
113	1232-1243	0.77273	1.573568182
114	1243-1254	0.54848	1.190808788
115	1254-1265	0.98485	1.935637879
116	1265-1276	1.28788	2.452880303



N°	Distancia (m)	Datos	
		Sensor Valor promedio	IRI m/km $Y = 1.7069X + 0.2546$
117	1276-1287	0.83333	1.677016667
118	1287-1298	1.27576	2.432190606
119	1298-1309	1.85152	3.414951212
120	1309-1320	0.93030	1.842534242
121	1320-1331	1.43333	2.701156667
122	1331-1342	0.92424	1.832189394
123	1342-1353	1.03939	2.028741515
124	1353-1364	1.10606	2.142534848
125	1364-1375	0.74242	1.521843939
126	1375-1386	1.04545	2.039086364
127	1386-1397	1.12424	2.173569394
128	1397-1408	0.76667	1.563223333
129	1408-1419	0.58485	1.252877879
130	1419-1430	0.40909	0.952877273
131	1430-1441	0.46970	1.056325758
132	1441-1452	0.99697	1.956327576
133	1452-1463	0.68182	1.418395455
134	1463-1474	1.17273	2.256328182
135	1474-1485	0.94242	1.863223939
136	1485-1496	0.53636	1.170119091
137	1496-1507	0.76667	1.563223333
138	1507-1518	0.40909	0.952877273
139	1518-1529	0.83333	1.677016667
140	1529-1540	0.63939	1.345981515
141	1540-1551	1.36667	2.587363333
142	1551-1562	0.40909	0.952877273
143	1562-1573	1.13030	2.183914242
144	1573-1584	0.96667	1.904603333
145	1584-1595	0.61515	1.304602121
146	1595-1606	0.52667	1.153567333

Nota: Datos obtenidos posterior al cálculo, agrupados cada 11 metros.

#### 4.1.4.2. Correlación IRI obtenido entre sensor vl53l0x y Rugosímetro de

##### Merlín

- a) Se tiene los cálculos del IRI con el Rugosímetro de Merlín en un tramo de 1600 metros, calculados individualmente cada 400 metros.

b) Se prosigue a sacar promedio a los valores de IRI del sensor cada 400m para poder correlacionar con los valores resultantes del rugosímetro de merlín y se agrupa como la tabla siguiente.

**Tabla 12**

*Resumen de valores de IRI (sensor VL53LOX) vs IRI (rugosímetro)*

N°	Distancia (m)	DATOS	
		IRI (SENSOR)	IRI (Rugosímetro)
1	0-400	2.74	1.82
2	400-800	2.21	1.66
3	800-1200	1.68	1.37
4	1200-1600	1.77	1.38

Nota: Datos obtenidos por cada método aplicado.

c) Se realiza una correlacionen en Excel obteniéndose un grado de correlación de 0.99 siendo este una correlación **FUERTE**.

<b>Coefficiente de correlación de Pearson =</b>	<b>0.99</b>
---	-------------

d) También se utiliza el programa Minitab, en la cual se calcula el grado de correlación de Pearson. Dándonos como resultado una correlación de 0.985. siendo este una correlación fuerte.

**Figura 37.**

*Imagen de valor obtenido en programa Minitab de la correlación entre el IRI del sensor de distancia vl53l0x y el IRI del Rugosímetro de Merlín*

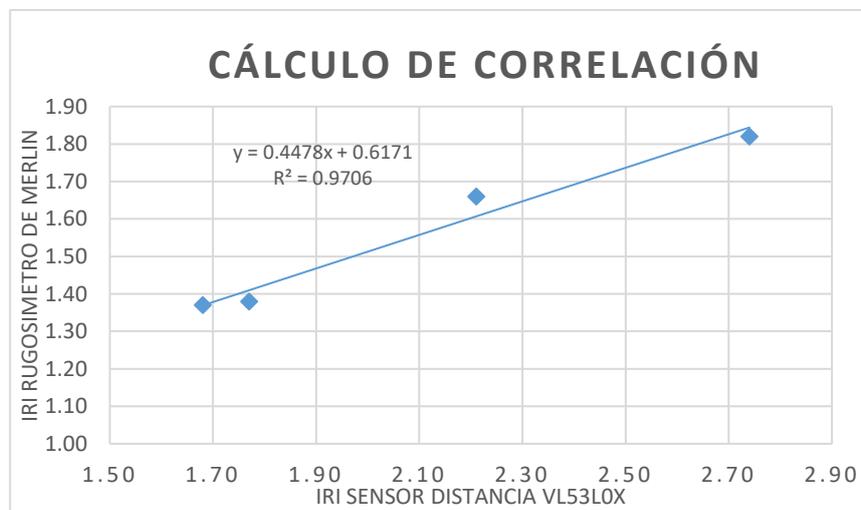


Nota: El Minitab comprueba los datos obtenidos por el Excel previamente.

e) Seguidamente al determinar que existe una relación entre estas dos variables se realiza la gráfica de dispersión entre ambas, para poder obtener una ecuación de regresión para poder ajustar los valores de IRI obtenidos con el sensor de distancia vl53l0x.

### Figura 38

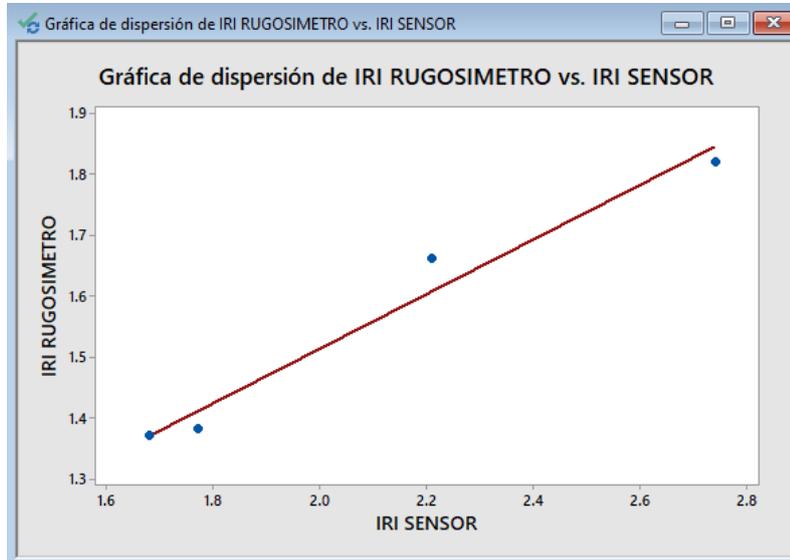
*Grafica de dispersión en Excel entre IRI del Sensor de distancia vl53l0x Vs el IRI del Rugosímetro de Merlín.*



Nota: Se realiza el cálculo en Excel y el Minitab.

### Figura 39

*Grafica de dispersión obtenido en programa Minitab entre IRI del rugosímetro de Merlín Vs el IRI del sensor de distancia vl5310x*



Nota: Se realiza el cálculo en Excel y el Minitab.

### Figura 40

*Ecuación de regresión obtenida en programa Minitab entre IRI del rugosímetro de Merlín Vs el IRI del sensor de distancia vl5310x.*



Nota: El software Minitab, nos muestra la ecuación de regresión.

f) Obtenida la ecuación de regresión siguiente:

$$Y = 0.4478X + 0.617$$

Donde:

X = IRI del sensor (m/km).



Y= valor de IRI (m/km).

- g) Se ingresarán los datos de IRI del sensor de distancia vl53l0x en la formula hallada.

### Tabla 13

*Modelo de tabla de cálculo de IRI con la formula hallada con los datos del valor promedio del sensor vl53l0x*

<b>Datos</b>			
<b>N°</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>IRI (sensor)</b>	<b>IRI <math>Y = 0.4478X + 0.6171</math></b>
1	0-400	2.74	1.84
2	400-800	2.21	1.61
3	800-1200	1.68	1.37
4	1200-1600	1.77	1.41

Nota: Elaboración Propia

## 4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla siguiente se encuentran los valores obtenidos del IRI mediante el método de Mira y Nivel los cuales al ser un ensayo estático se considera que los resultados son de precisión.

**Tabla 14**

*IRI obtenido con el método de Mira y Nivel (de 00 a 825 metros)*

N°	Datos				Datos			
	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI
<b>1</b>	0-11	2.16593226	<b>26</b>	275-286	2.60321245	<b>51</b>	550-561	1.73643628
<b>2</b>	11-22	2.49927264	<b>27</b>	286-297	3.03225628	<b>52</b>	561-572	2.82296675
<b>3</b>	22-33	2.15128709	<b>28</b>	297-308	3.59325245	<b>53</b>	572-583	1.56458759
<b>4</b>	33-44	2.99366683	<b>29</b>	308-319	4.19616703	<b>54</b>	583-594	2.53999764
<b>5</b>	44-55	2.36479827	<b>30</b>	319-330	2.57753533	<b>55</b>	594-605	1.33764414
<b>6</b>	55-66	2.06361854	<b>31</b>	330-341	1.96438705	<b>56</b>	605-616	2.08693133
<b>7</b>	66-77	2.74206522	<b>32</b>	341-352	3.97132915	<b>57</b>	616-627	2.29422604
<b>8</b>	77-88	2.91404478	<b>33</b>	352-363	2.88254134	<b>58</b>	627-638	2.11104135
<b>9</b>	88-99	2.10973792	<b>34</b>	363-374	2.82051976	<b>59</b>	638-649	2.80592552
<b>10</b>	99-110	2.20632505	<b>35</b>	374-385	3.21844187	<b>60</b>	649-660	2.0067101
<b>11</b>	110-121	2.78934013	<b>36</b>	385-396	2.02972673	<b>61</b>	660-671	1.57832995
<b>12</b>	121-132	2.55177072	<b>37</b>	396-407	1.79389026	<b>62</b>	671-682	1.79178603
<b>13</b>	132-143	2.4560514	<b>38</b>	407-418	2.53302525	<b>63</b>	682-693	2.51879837
<b>14</b>	143-154	2.86571333	<b>39</b>	418-429	3.07706791	<b>64</b>	693-704	1.91788728

N°	Datos			Datos		
	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°
15	154-165	1.95861486	40	429-440	2.65158606	65
16	165-176	3.17138565	41	440-451	2.54186619	66
17	176-187	1.53852935	42	451-462	2.62029217	67
18	187-198	3.72042562	43	462-473	1.98379394	68
19	198-209	3.26747422	44	473-484	2.12681566	69
20	209-220	3.21323668	45	484-495	1.94551854	70
21	220-231	2.22553244	46	495-506	2.6635738	71
22	231-242	3.31976588	47	506-517	2.55845328	72
23	242-253	2.10449772	48	517-528	2.80395215	73
24	253-264	1.692928	49	528-539	1.78048148	74
25	264-275	1.79279941	50	539-550	1.69064588	75

Nota: Datos obtenidos posterior al cálculo, agrupados cada 11 metros.





N°	Datos				Datos			
	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI	N°	Distancia (m)	IRI
<b>90</b>	979-990	0.94715305	<b>115</b>	1254-1265	1.45193646	<b>140</b>	1529-1540	1.22535779
<b>91</b>	990-1001	1.3792376	<b>116</b>	1265-1276	2.12041691	<b>141</b>	1540-1551	3.03392277
<b>92</b>	1001-1012	1.09064245	<b>117</b>	1276-1287	1.98491647	<b>142</b>	1551-1562	1.07836387
<b>93</b>	1012-1023	1.26803772	<b>118</b>	1287-1298	2.28135645	<b>143</b>	1562-1573	2.28624176
<b>94</b>	1023-1034	1.08090377	<b>119</b>	1298-1309	4.68768991	<b>144</b>	1573-1584	1.69278591
<b>95</b>	1034-1045	2.48398024	<b>120</b>	1309-1320	2.11270345	<b>145</b>	1584-1595	1.5094707
<b>96</b>	1045-1056	1.82892947	<b>121</b>	1320-1331	3.18053301	<b>146</b>	1595-1606	1.23543533
<b>97</b>	1056-1067	1.32588786	<b>122</b>	1331-1342	2.11720841			
<b>98</b>	1067-1078	1.44232096	<b>123</b>	1342-1353	2.19298773			
<b>99</b>	1078-1089	0.99372445	<b>124</b>	1353-1364	2.19110647			
<b>100</b>	1089-1100	1.58960728	<b>125</b>	1364-1375	1.43599486			

Nota: Datos obtenidos posterior al cálculo, agrupados cada 11 metros.

En la tabla siguiente se encuentran los valores obtenidos del IRI mediante el Rugosímetro de Merlín los cuales al ser un ensayo estático se considera que los resultados son de precisión.

**Tabla 16**

*Resultado de ensayo con equipo de Rugosímetro de Merlín*

N°	Inicio KM	Final KM	IRI	
1	1326+000	1326+400	1.82	m/Km
2	1326+400	1326+800	1.66	m/Km
3	1326+800	1327+200	1.37	m/Km
4	1327+200	1327+600	1.38	m/Km

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla siguiente se encuentran los valores obtenidos del IRI mediante el equipo basado en el sensor de distancia v15310x, cuyos datos fueron correlacionados con los dos métodos anteriores obteniéndose una confiabilidad que supera el 90%, siendo los dos métodos anteriores de precisión, se considera que los resultados obtenidos con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x son también de precisión.

**Tabla 17**

*Resultado de ensayo con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x*

Datos		
N°	Distancia (m)	IRI (m/km)
1	0-400	2.64
2	400-800	2.09
3	800-1200	1.80
4	1200-1600	1.89

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.1. Comprobación De Hipótesis

- a) El nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia vl5310x comparado con el método de Mira y Nivel tienen una relación de confiabilidad de 90 %, lo cual indica que es una relación fuerte. Y al obtener el IRI con la ecuación de la regresión se tiene datos hallados con el sensor de distancia vl5310x con una confiabilidad del 90%, luego al comparar los IRI obtenidos con el sensor de distancia vl5310x y los IRI obtenidos con el Rugosímetro de Merlín se tiene una relación de confiabilidad del 99%, del pavimento flexible en el tramo de la carretera Puno-Juliaca de KM 1326+000 hasta KM 1327+600.
- b) El nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia vl5310x se halla al comparar los valores en tiempo y costo de los tres métodos de medición del IRI.

**Tabla 18**

*Cuadro comparativo para hallar la eficiencia de los métodos de medición de IRI por costo y tiempo de 1.6 km*

N°	Método de medición IRI	% de Confiabilidad	Costo	Tiempo
01	Rugosímetro de merlín	100%	S/. 1,600.00	02:30 horas
02	equipo basado en el sensor de distancia vl5310x	89%	S/. 150.00	00:10 horas
03	el método de mira y nivel	100%	S/. 100.00	15:00 horas

Fuente: Elaboración Propia

Según la tabla anterior y teniendo datos de confiabilidad alta al utilizar el equipo basado en el sensor de distancia vl5310x, podemos ver que el tiempo utilizado para hallar los resultados son mínimos y esto se vería mucho más en distancias que son largas.



Porcentaje de eficiencia obtenida en comparación a los valores obtenidos por los otros dos métodos.

$$eficiencia = \frac{RA}{CA * TA} * 100$$

RA: Resultado alcanzado

CA: Costo alcanzado

TE: Tiempo esperado

Resultado

> 1 Muy Eficiente

= 1 Eficiente

< 1 Ineficiente

$$eficiencia_{\text{sensor de distancia v15310x}} = \frac{0.89}{150 * 0.1} * 100$$

$$eficiencia_{\text{sensor de distancia v15310x}} = 5.93$$

$$eficiencia_{\text{rugosimetro de merlin}} = \frac{1}{1600 * 2.3} * 100$$

$$eficiencia_{\text{rugosimetro de merlin}} = 0.0271$$

$$eficiencia_{\text{metodo de mira y nivel}} = \frac{1}{100 * 15} * 100$$

$$eficiencia_{\text{metodo de mira y nivel}} = 0.066$$

De los resultados se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 19**

*Cuadro de resultado de eficiencia de los métodos de medición de IRI*

N°	Método de medición IRI	Eficiencia
01	Equipo basado en el sensor de distancia v15310x	5.93
02	Rugosímetro de merlín	0.0271
03	el método de mira y nivel	0.066

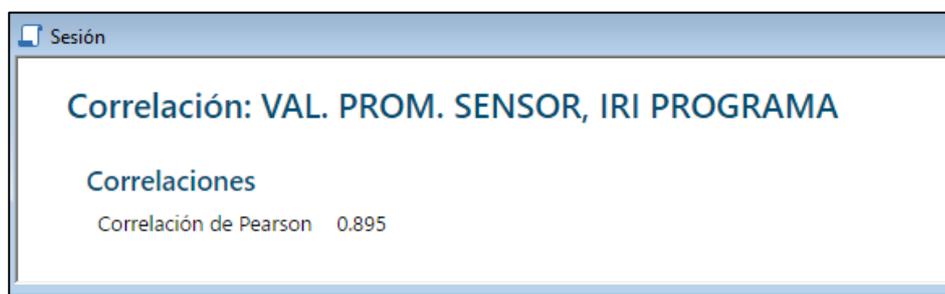
Nota: Elaboración Propia

Se puede notar que el nivel de eficiencia del sensor de distancia v15310x es la más alta con respecto a los otros dos métodos. Siendo el resultado positivo, por lo cual se considera **MUY EFICIENTE**.

a) El IRI correspondiente a la carretera Puno-Juliaca utilizando el método de mira y nivel presenta valores de precisión y existe relación con los datos obtenidos con el sensor distancia v15310x teniendo una relación de confiabilidad del 90%, con el cual se realiza el cálculo del IRI con el equipo basado en el sensor de distancia v15310x.

**Figura 41**

*Imagen de porcentaje de confiabilidad obtenido entre el Valor Promedio de los datos del sensor de distancia v15310x y el IRI del método de mira y nivel*



Nota: Correlación obtenida mediante Minitab

b) El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) correspondiente al pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el Rugosímetro Merlín presenta valores de

precisión y existe relación con el IRI obtenidos con el sensor distancia v15310x teniendo una relación de confiabilidad del 99%.

#### **Figura 42**

*Imagen de porcentaje de confiabilidad obtenido entre el IRI del sensor de distancia v15310x y el IRI del rugosímetro de merlín.*



Nota: Correlación obtenida mediante Minitab

c) El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible Puno-Juliaca utilizando el equipo basado en el sensor de distancia v15310x, al comprobarse que tienen una confiabilidad mayor al 90% con los otros dos métodos de cálculo del IRI, se afirma que también presenta valores de precisión.

### **4.3. DISCUSIÓN**

Con respecto a los resultados encontrados por Goicochea & Ibáñez (2020), mediante el aplicativo Roadroid y el procedimiento fotogramétrico, se demostró la eficacia de cada uno de ellos encontrando un eficiencia del 81%, esto comparado con el sensor de distancia v15310x, difiere en el porcentaje de similitud debido a los diferentes equipos utilizados. Considerando que el sensor es mantiene una similitud mayor al aplicativo Roadroid.

Con respecto a los resultados obtenidos por Chayña (2022), se vio la evaluación del pavimento flexible para lograr una comparación entre la aplicación de EvalPav y el método tradicional del Rugosímetro de Merlín. Y aunque el software EvalPav muestra un



resultado de Serviciabilidad es “Regular” al igual que con el Merlín. No es comparable con esta investigación por el criterio de medición utilizado.

Bong & Servan (2022), con respecto a los resultados, encontraron que los valores con el aplicativo Roadbump tienen un 85.85% y 83.04% de similitud sobre los resultados de cada carril del Rugosímetro de Merlín, este aplicativo muestra una menor comparación al del sensor de distancia v15310x.

Los resultados de Lanado (2021), mediante el método PCI obtenidos con el dron son cercanos al método Mira y Nivel, según su investigación, sin embargo, al no mostrar resultados porcentuales en sus resultados, no es comparable con la presente investigación.

De lo investigado por Chambilla & Ramos (2021), se tienen los resultados de la comparación de similitudes entre valores de IRI con el Merlín y el aplicativo IRI-Calc-Free, donde se puede apreciar que la similitud promedio de 83.16 % considerándose menor a la similitud encontrada en la presente investigación, ya que se tienen porcentajes del 89% y 99%.

Con respecto a los resultados obtenidos por Bustamante & Cayo (2019), se tiene que, con el Smartphone tienen una menor dificultad de recolección de datos que las mediciones obtenidas con el RPAS, sin embargo, esta investigación se basa en los tiempos de medición, más no en la calidad de la recolección de datos, por lo cual no es comparable con la presente investigación.

Los hallazgos de Lloclla & Sánchez (2019), permitieron llegar a la conclusión de que el aplicativo Roadroid mantiene un porcentaje de similitud del 73.02% en comparación con el rugosímetro de Merlín, siendo este un porcentaje menor al ser comparado con el sensor de distancia v15310x y el rugosímetro Bump Integrator b1-100a



dispone de un porcentaje de variación del 0.0032% siendo este método más confiable con la comparación de datos, con respecto al Rugosímetro de Merlín.

Con respecto a los resultados de Angarita & Sánchez (2017), se tiene que el método Nivel y Mira tiene un grado de precisión muy alta, el Escáner laser también tiene grado de precisión muy alta y el Sistema aéreo no tripulado con un grado de precisión alta, sin embargo, no muestra los porcentajes por los cuales se considera alta o muy alta, además, al utilizar equipos diferentes en su investigación, no es comparable con esta investigación.

Ramírez (2017), con respecto a los resultados, evidencia que hay una cierta correlación entre los valores de IRI estimado y calculado mediante el acelerómetro de smartphone, logrando coeficientes de 56.23% en el tramo 1, 64.81% en el tramo 2, 66.97% en el tramo 3, 70.91% en el tramo 4 y 69.80% en el tramo 5. Siendo estos datos menores a los obtenidos por el sensor de distancia V15310x

Los resultados de Hirpahuanca (2016) permitieron concluir los resultados de la evaluación del IRI de la carretera Cusco – Urcos; usando la aplicación Roadroid con respecto al Merlín es de 90%, sin embargo, en investigaciones más actuales, se descarta el porcentaje de comparación debido a que se obtuvieron similitudes menores, por lo cual se considera que el aplicativo Roadroid, es menor eficiente que el sensor V15310x.

Asencios (2016), presenta unos resultados que indican que el Roadroid proporciona valores parecidos a los que se obtiene usando mira y nivel, pero de manera mucho menos compleja. Sin embargo, no muestra una correlación entre ambos métodos, por lo cual no es posible tener un porcentaje de comparación entre ambas investigaciones.



Almanza (2014), con respecto a su investigación, indica que existe una diferencia entre los métodos utilizados entre el Rugosímetro Merlín y el Roughmeter III, esta diferencia está asociada a la técnica de toma de datos de cada equipo, mientras que el equipo Merlín toma los datos directamente midiendo las deformaciones, el Roughmeter III toma los datos indirecta mediante sensores que calculan los desplazamientos verticales del eje del vehículo. Lo cual se confirma acorde a la clasificación de medición de IRI, establecido por el Sayers et al (1986).

Onofre et al. (2008), con respecto a los resultados de su investigación, obtuvieron que el Perfilómetro Romdas Z-250, es un equipo que permite hacer mediciones de perfil con precisión de 0.1 mm, lo cual lo convierte en un Perfilómetro de Clase 1, lo que garantiza obtener valores de IRI bastante precisos. Con respecto a esta investigación, se consideraría que tanto el Perfilómetro Romdas Z-250 y el Sensor de distancia V15310x, cumplen con la clase 1.

En resumen, os diferentes métodos utilizados muestras diferentes porcentajes de correlación con respecto a los métodos convencionales, como son el Rugosímetro de Merlín y el método Mira y Nivel, donde podemos concluir que el equipo con mayor similitud en resultados es el Perfilómetro Romdas Z-250, ya que acorde a la investigación de Onofre et al. (2008), cumple con una clasificación clase 1.



## V. CONCLUSIONES

- Al realizar los ensayos del IRI con el método de Mira y Nivel y relacionarlo con los valores del equipo basado en el sensor de distancia vl5310x se obtuvo una confiabilidad de 90%, hallamos una ecuación para el cálculo del IRI con los datos del sensor y al IRI del obtenido relacionarlo con el IRI del Rugosímetro de Merlín se obtuvo una confiabilidad del 99%. Logrando así determinar que los datos de IRI obtenidos con del equipo basado en el sensor de distancia vl5310x superan el 90% de confiabilidad y también que es muy eficiente respecto a los otros dos métodos al medir el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible en el tramo de la carretera Puno-Juliaca de KM 1326+000 hasta KM 1327+600.
- El cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el método de mira y nivel es de es de forma estática, debido a que se hace una nivelación topográfica cada 0.5m en una de las huellas dejados por los vehículos que transitan el pavimento. Debido a esta forma de recolección de datos, se tiene una mejor precisión al momento de recolectar los datos para el cálculo del IRI, pero también baja su eficiencia en el tiempo invertido al realizar esta forma de toma de datos.

**Tabla 20**

*IRI con el método de Mira y Nivel*

<b>Datos</b>		
<b>N°</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
1	0-400	2.64
2	400-800	2.09
3	800-1200	1.80
4	1200-1600	1.89

Nota: Elaboración Propia

- El cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con el método del rugosímetro de merlín es de forma estática, debido a que se hace una recolección de datos cada 2m en una de las huellas dejados por los vehículos que transitan el pavimento. Debido a esta forma de recolección de datos, se tiene precisión al momento de recolectar los datos para el cálculo del IRI, pero también baja su eficiencia en el tiempo invertido al realizar esta forma de toma de datos.

**Tabla 21**

*IRI con el Rugosímetro de Merlín.*

<b>Datos</b>		
<b>N°</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
1	0-400	1.82
2	400-800	1.66
3	800-1200	1.37
4	1200-1600	1.38

Nota: Elaboración Propia

- El cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) utilizando el equipo basado en el sensor de distancia vl5310x, presenta una recolección de datos cada 1m en una de las huellas dejados por los vehículos que transitan el pavimento, tiene una alta eficiencia y presenta una confiabilidad superior al 90% respecto a los otros 2 métodos de cálculo del IRI.



**Tabla 22**

*IRI con el equipo basado en el sensor de distancia vl5310x*

<b>Datos</b>		
<b>N°</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>IRI (m/km)</b>
1	0-400	1.84
2	400-800	1.61
3	800-1200	1.37
4	1200-1600	1.41

Nota: Elaboración Propia



## VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la utilización del equipo basado en el sensor de distancia vl5310x, debido a su bajo costo en la hora de su utilización, ya que el resultado obtenido es EFICIENTE y de BAJO COSTO, y ayudará en la toma de decisiones anticipadas, para el mantenimiento oportuno de las vías de pavimentos de la Región de Puno.
- Se recomienda profundizar el mejoramiento del código fuente del sensor de distancia vl5310x, para futuras investigaciones multidisciplinarias, a fin de que se puedan tomar datos de manera más rápida.
- Se recomienda para futuras investigaciones que de continúan con esta línea de investigación, se pueda realizar un programa para el mejoramiento del procesamiento de datos para el sensor vl5310x, a fin de que sea más amigable con los usuarios.
- Se recomienda para posteriores investigaciones multidisciplinarias, el uso de sensores ya que el costo es bajo y pueden ser utilizados en diferentes tipos de ensayos de construcción como, pavimentos flexibles, rígidos, deflexión en puentes e incluso estructuras.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almanza, D. A. (2014). *Evaluación del modelo “Quarter Car” para la estimación del índice de Rugosidad Internacional (IRI) del tramo Huancavelica - Santa Inés*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la UNAP. [http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/1681/Almanza\\_Mendoza\\_Diego\\_Arthur.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/1681/Almanza_Mendoza_Diego_Arthur.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Angarita, L. & Sánchez, J. (2017). *Comparación del índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos*. [Tesis de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la UDFJC. [https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6912/1/AngaritaAriasLiliana\\_Fernanda\\_SanchezArchilaJuanCarlos2017.pdf](https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6912/1/AngaritaAriasLiliana_Fernanda_SanchezArchilaJuanCarlos2017.pdf)
- Arriaga, M.; Garnica, P. & Rico, A. (1998). *Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México*. Publicación Técnica - Instituto Mexicano del Transporte. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>
- Asencios, David (2016). *Medición y comparación de la rugosidad en pavimentos de la ciudad de Huánuco: mediante smartphone y un método tradicional*. [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6623>
- Badilla, G. (2009). Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). *Infraestructura Vial N° 21*.
- Badilla, G. (2011). Determinación de la Regularidad Superficial de Pavimentos mediante el cálculo del Índice Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes. *Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP*, 1–10. [https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/517/IBP2277\\_11%20Determinacion%20de%20Regularidad%20Superficial%20con%20IRI%20VF%2010102011.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/517/IBP2277_11%20Determinacion%20de%20Regularidad%20Superficial%20con%20IRI%20VF%2010102011.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



- Batanero, Carmen; Díaz, Carmen (2008). *Estadística con Proyectos*. Universidad de Granada. <https://www.ugr.es/~batanero/pages/ARTICULOS/Libroproyectos.pdf>
- Camacho, Jorge (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Acta médica costarricense volumen n° 5. San José, jun. 2008*. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-60022008000200005](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-60022008000200005)
- Bong, Diego & Servan, Frei (2022). *Evaluación de la carretera Banda de Shilcayo – Tres de Octubre Km. 625+000 - 629+000, mediante el rugosímetro de Merlín y Roadbump, San Martín 2022*. [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/106060>
- Bustamante, Milagros & Cayo, Jean (2019). *Contraste del índice de rugosidad internacional mediante mediciones de RPAS y smartphone en la carretera Enaco – Pumamarca, Cusco 2019*. [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional de la UAC. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/3598>
- Campbell, S., Greenwood, M., Prior, S., Shearer, T., Walkem, K., Young, S., Bywaters, D., & Walker, K. (2020). Purposive sampling: complex or simple? Research case examples. *Journal of research in Nursing*, 25(8), 652-661. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1744987120927206>
- Castaño, F.; Herrera, J.; Gómez, J. & Reyes, F. (2009). Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C. *Infraestructura Vial agosto 2009. N° 22*. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/download/1730/1703/2666>
- Chambilla, Edwin & Ramos, Yssam (2021). *Evaluación de pavimento flexible mediante método del rugosímetro de Merlín y el aplicativo IRI-Calc Free en la avenida Simón Bolívar, Puno*. [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75230>



- Chayña, Omar (2022). *Estudio comparativo de la condición superficial del pavimento flexible aplicando el Software Evalpav y Método de Rugosidad de Merlín en la Av. Argentina de la Ciudad de Arequipa*. [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/112133>
- Del Águila Rodríguez, P. (1993). *Metodología para la determinación de los Pavimentos - Manual de usuario Merliner*. Camineros S.A.C.
- Del Águila, P. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión. *Ponencia Presentada al X Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto, Sevilla, España, 1999*, 1–11. <https://pdfcoffee.com/metodologia-para-la-determinacion-de-la-rugosidad-de-los-pavimentos-con-equipo-de-bajo-costo-y-gran-precision-1-pdf-free.html>
- Del Águila, P. (2019). *Evaluación estructural de pavimentos*. Recuperado el 03 de enero del 2024, de <https://www.linkedin.com/pulse/evaluación-estructural-de-pavimentos-pablo-del-aguila/?originalSubdomain=es>
- Delgado, M. (2019). *Factibilidad para controlar el desplazamiento y el esfuerzo para troquelaría en prensado*. [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Metropolitano]. Repositorio Institucional de la ITM.
- Duarte, J.; Fernández, F. & Moreno, M. (2005). *Caracterización de microactuadores mediante técnicas ópticas*. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Año 15, 59. 35 – 38. 2005.
- Duarte, J.; Fernández, F. & Moreno, M. (2008). *Técnicas de medida para pequeños desplazamientos*. *Dyna rev. fac. nac. minas* vol.72 no.158 Medellín May/Aug. 2009. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532009000200016](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000200016)
- Electricity & Magnetism (2023). *Sensor de proximidad de tiempo de vuelo*. Recuperado el 01 de enero del 2024. <https://www.electricity-magnetism.org/es/sensor-de-proximidad-de-tiempo-de-vuelo/>
- Faraldo, Pedro & Pateiro, Beatriz (2012). *Estadística Descriptiva*. Universidad de Santiago de Compostela - España.



- Ferrovial – Recursos (2023). *Partes de una carretera*. Recuperado el 03 de enero del 2024, de <https://www.ferrovial.com/es/recursos/partes-de-una-carretera/>
- Galarza, C. (2020). Los alcances de una Investigación. *CienciAmérica (2020) Vol. 9 (3)*  
ISSN 1390-9592 ISSN-L 1390-681X.  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7746475.pdf>
- Garzón, A. & Hernandez, L. (2018). Cartilla-guía ilustrativa del proceso constructivo de un pavimento flexible para bajos volúmenes de tránsito. Universidad Piloto de Colombia.  
<http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5711/CARTILLA.pdf?sequence=2>
- Goicochea, Anthony & Ibáñez, Juan (2022). *Análisis comparativo entre el sistema Roadroid y el procedimiento fotogramétrico para realizar el diagnóstico IRI de la Av. Enrique Meiggs, Chimbote – 2020*. [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la UCV.  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61251>
- Hanco, R. (2023). *Diagnóstico de brechas de infraestructura o de accesos a servicios PMI 2025-2027*. Gobierno Regional de Puno.  
<https://www.regionpuno.gob.pe/descargas/pmi/2023/DIAGNÓSTICO%20DE%20BRECHAS%20DE%20INFRAESTRUCTURA%20O%20DE%20ACCESOS%20A%20SERVICIOS%20PMI%202025-2027.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill.
- Hirpahuanca, Deyse (2016). *Determinación y comparación de la Regularidad Superficial del Pavimento de la carretera Cusco-Urcos, usando teléfonos inteligentes y el Rugosímetro de Merlín – 2016*. [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional de la UAC.  
[https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/711/Deyse\\_Tesis\\_bachiller\\_2016\\_P\\_1.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/711/Deyse_Tesis_bachiller_2016_P_1.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Instituto Peruano de Economía (2017). ¿Hacia dónde va la infraestructura del Transporte en el Perú? Recuperado el 01 de enero del 2024.



<https://www.ipe.org.pe/portal/hacia-donde-va-la-infraestructura-del-transporte-en-el-peru/>

La Cámara de Comercio de Lima (2022). *Sector construcción acumula crecimiento de 0,74% entre enero y mayo 2022*. La Cámara. Recuperado el 01 de enero del 2024.

<https://lacamara.pe/sector-construccion-acumula-crecimiento-de-074-entre-enero-y-mayo-2022/>

Lanado, Luis (2021). *Determinación del Índice de Serviciabilidad e Índice de Condición del pavimento de la ruta CU-100 tramo Izcuchaca - Huarrocondo, utilizando el Rugosímetro de Merlín y dron*. [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional de la UAC.

[https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/4084/Luis\\_Tesis\\_bachiller\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/4084/Luis_Tesis_bachiller_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Laura, D. (2016). *Determinación y comparación de la regularidad superficial del pavimento de la carretera Cusco-Urcos, usando teléfonos inteligentes y el Rugosímetro de Merlín - 2016*. [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional de la UAC.

Leibson, S. (2018). *Principios básicos sobre la medición a distancia y el reconocimiento de gestos al usar los sensores ToF*. Digikey. Recuperado el 01 de enero del 2024.

<https://www.digikey.com/es/articles/fundamentals-distance-measurement-gesture-recognition-tof-sensors>

Lloclla, Anderson & Sánchez, Kevin (2019). *Análisis comparativo del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento de la av. La Cultura de la Ciudad del Cusco mediante el aplicativo para smartphone Roadroid, Rugosímetro Electrónico Bump Integrator b1-100a y Rugosímetro de Merlín*. [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional de la UAC.

[https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/3155/Anderson\\_Kevin\\_Tesis\\_bachiller\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/3155/Anderson_Kevin_Tesis_bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Lluncor, R.; Salcedo, R. (2015). *Propuesta de gestión para mantener la rugosidad dentro de los niveles de servicio del contrato de concesión*. [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la URP.



[https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/2242/lluncor\\_rasalcedo\\_rg.pdf?sequence=1](https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/2242/lluncor_rasalcedo_rg.pdf?sequence=1)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, (2013). *Manual de carreteras - Suelos, geología, geotecnia y pavimentos*, Lima - Perú.  
[http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/P\\_recientes/4515.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf)

Moreno, L. (2016). Influencia de la velocidad en la medición de IRI con el equipo perfilómetro láser.  
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7659/Paper%20IRI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Onofre, J.; Sánchez, J. & Santiago, W. (2008). *Determinación del Índice de Rugosidad Internacional de pavimentos usando el Perfilómetro Romdas Z-250*. [Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional de la UES.  
<https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4385/1/Determinaci%C3%B3n%20del%20indice%20de%20rugosidad%20internacional%20de%20pavimentos%20usando%20el%20perfilometro%20ROMDAS%20Z-250.pdf>

Ortiz, Jorge & Ortiz, Andrés (2021). ¿Pearson y Spearman, coeficientes intercambiables? *Comunicaciones en Estadística febrero 2021, Vol. 14, No. 1, pp. 53 –63*. Universidad de Santo Tomas – Colombia.

Páez, Jose (2009). La interpolación lineal en la distribución T: valores y errores. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente – Venezuela*, 21(3), 261-268.  
<https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739442008.pdf>

Pagola, M.; Giovanon, O. & Mañón, G. (2009). *Desarrollo de una metodología para el control y certificación de equipos perfilómetros inerciales para valorar la rugosidad en Argentina*. Universidad Nacional del Rosario.  
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/50625112500/500/CILA-05-09.%20DETERMINACI%C3%93N%20DE%20LA%20REGULARIDAD%20SUPERFICIAL%20DE%20PAVIMENTOS%20MEDIANTE%20EL%20C%C3%81LCULO%20DEL%20INDICE%20REGULARIDAD%20INTERNACION>



[AL%20\(IRI\)%20ASPECTOS%20Y%20CONSIDERACIONES%20IMPORTAN-  
TES.pdf?sequence=1](#)

- Pradena, M. (2006). *Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados*. *Revista de la Construcción - Pontificia Universidad Católica de Chile*.  
<https://www.redalyc.org/pdf/1276/127619380002.pdf>
- Ponce, M. (2015). *Indicadores de eficiencia*. *sena.edu.co*, 2015.  
<https://slideplayer.es/slide/12983473/>
- Ramírez, B. (2017), *Cálculo del IRI mediante acelerómetro de smartphone en el tramo Huarmey – Casma de la Carretera Panamericana Norte*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la PUCP.  
[https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/9714/RAMIREZ\\_CASTRO\\_BRIAN\\_CALCULO\\_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/9714/RAMIREZ_CASTRO_BRIAN_CALCULO_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ramos, L. (2018). *Estudio Del Índice De Regularidad Internacional En Vías Pavimentadas Mediante El Uso Del Perfilómetro Láser Romdas* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/11734>
- Rivera, L. (2017). *Efectos de la Regularidad Superficial (IRI) en el nivel de servicio de vías afirmadas – Carretera Chupuro – Lapa*. [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana los Andes]. Repositorio Institucional de la UPLA.  
<https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/275/Rivera%20Jara%20Leandro%20Irwin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sachún, E. (2016). *Estudio del Índice de Rugosidad Internacional de la Panamericana Norte - Zona Trujillo, para su mantenimiento*. [Tesis de maestría, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional de la UPAO.  
[https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/2548/1/REP\\_MAEST.IN-  
GE\\_JAIME.SACH%3%9AN\\_ESTUDIO.INDICE.RUGOSIDAD.INTERNAC-  
IONAL.PANAMERICANA.NORTE.ZONA.TRUJILLO.MANTENIMIENTO.p-  
df](https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/2548/1/REP_MAEST.IN-<br/>GE_JAIME.SACH%3%9AN_ESTUDIO.INDICE.RUGOSIDAD.INTERNAC-<br/>IONAL.PANAMERICANA.NORTE.ZONA.TRUJILLO.MANTENIMIENTO.p-<br/>df)
- Saldaña, David; Diaz, Rodrigo; Marquez, Waldo & Garrido, Ricardo (2017). Evaluación comparativa de la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)



empleando tecnología láser de tres dimensiones (LCMS) y perfilómetro laser. *Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017.*  
[http://www.apsa.cl/wp-content/uploads/2018/03/CILA\\_Texto\\_IRI\\_LCMS\\_PERFILOMETRO.pdf](http://www.apsa.cl/wp-content/uploads/2018/03/CILA_Texto_IRI_LCMS_PERFILOMETRO.pdf)

Salinas, Jose (1993). *Análisis estadístico para la toma de decisiones en administración y economía.* Universidad del Pacífico.  
<https://repositorio.up.edu.pe/bitstream/handle/11354/1610/BU12.pdf>

Sánchez S., I.; & Solmniac T., H. De. (1989). El IRI: un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción* N° 6, 1–16.  
<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10055>

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements.* The International Bank for Reconstruction.  
<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf?sequence>

Sayers, M.; Gillespie, T. & Queiroz, C. (1986). The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. *World Bank Technical Paper Number 45.*  
<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3134/72773.pdf?sequence=2>

Sayers, M.; Gillespie, T. & Queiroz, C. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. World Bank Technical Paper Number 46.*  
<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf?sequence>

Schwab, K. (2017). *The Global Competitiveness Report 2017–2018.* World Economic Forum.  
<https://www3.weforum.org/docs/GCR2017-2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2017–2018.pdf>

Ramírez, B. (2017), *Cálculo del IRI mediante acelerómetro de smartphone en el tramo Huarmey – Casma de la Carretera Panamericana Norte.* [Tesis de maestría,



- Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la PUCP.  
[https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/9714/RAMI  
REZ\\_CASTRO\\_BRIAN\\_CALCULO\\_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/9714/RAMI_REZ_CASTRO_BRIAN_CALCULO_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Recursos Educativos (2021), Clase digital 4. Definición del alcance de la investigación que se realizará: exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo. *Universidad de Guanajuato*, Recuperado el 01 de enero del 2024.  
[https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-4-definicion-del-alcance-de-la-  
investigacion-que-se-realizara-exploratorio-descriptivo-correlacional-o-  
explicativo/](https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-4-definicion-del-alcance-de-la-investigacion-que-se-realizara-exploratorio-descriptivo-correlacional-o-explicativo/)
- Tapia, W. (2018). *Evaluación del comportamiento funcional del pavimento rígido del Jr. Jose Sabogal cdra. 01-08 utilizando el Rugosímetro Merlín y las propuestas de técnicas de rehabilitación*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la UNC.  
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1997>
- Tingal, H. (2021). *Análisis del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la superficie del pavimento flexible de la vía Cajamarca – Baños del Inca, utilizando el Rugosímetro de Merlín* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la UNC.  
[https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4366/TESIS%20-  
%20Sustentacion%20Publica.pdf?sequence=1](https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4366/TESIS%20-%20Sustentacion%20Publica.pdf?sequence=1)
- Unifort, Pavimentos Especiales (2023). *Pavimentos flexibles y pavimentos rígidos*. Recuperado el 03 de enero del 2024, de [https://www.unifort.es/pavimentos-  
asfalto/pavimentos-flexibles-rigidos/](https://www.unifort.es/pavimentos-asfalto/pavimentos-flexibles-rigidos/)
- Universidad Latinoamericana (2017). Investigación Exploratoria: Fundamentos Básicos.  
[https://practicaprofesionales.ula.edu.mx/documentos/ULAONLINE/M  
aestria/MAN/HRM558/Publicación/Semana\\_3/Estudiante/HRM558\\_S3\\_E\\_Inv  
explo.pdf](https://practicaprofesionales.ula.edu.mx/documentos/ULAONLINE/Maestria/MAN/HRM558/Publicación/Semana_3/Estudiante/HRM558_S3_E_Inv_explo.pdf)
- Vargas, P. (2019). *Reconocimiento de gestos dinámicos de brazos en tiempo real para la implementación de un traductor de lengua de señas mediante cámaras de profundidad*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Marcos]. Repositorio Institucional de la UNSM.



- Vargas, Z. (2009). La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación* 33(1), 155-165, ISSN: 0379-7082, 2009. <https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf>
- Vergara, A. (2015). *"Evaluación del estado funcional y estructural del pavimento flexible mediante la metodología PCI tramo Quichuay -Ingenio del km 0+000 al km 1+000 2014"*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la UNCP.
- Zafra, O. (2006). Tipos de Investigación. *Revista Científica "General José María Córdova"*. <https://www.redalyc.org/pdf/4762/476259067004.pdf>



## ANEXOS

**ANEXO 1:** Documentos de laboratorio ensayos y calibración.

**ANEXO 2:** Levantamiento Topográfico De Km 1326+000 Hasta 1327+600.

**ANEXO 3:** Cálculo de IRI mediante el Programa del Banco Mundial.

**ANEXO 4:** Datos obtenidos por el Sensor v15310x.

**ANEXO 5:** Cálculo de IRI con Rugosímetro de Merlín.



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Keyla Pamela Alave Araca,  
identificado con DNI 70312879 en mi condición de egresado de:

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

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
"Determinar el nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia  
VL53LOX para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) aplicado al tramo  
KM 1326+000 - KM 1327+600 de la carretera PUNO - Juliaca"

Es un tema original.

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

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

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

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

Puno 24 de Enero del 2024

Pamela  
FIRMA (obligatoria)



Huella



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo GERMAN ARMANDO FLORES DUEÑAS  
identificado con DNI 70106356 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERIA CIVIL

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

" DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DEL EQUIPO BASADO EN EL SENSOR DE DISTANCIA  
VLS3LOX PARA EL (PLIG) DEL INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) APLICADO  
AL TRAMO KM 1326+000 -KM 1327+000 DE LA CARRETERA PUNO - JULIACA "

Es un tema original.

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

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

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

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

Puno 24 de ENERO del 20 24

FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo Keyla Pamela Abue Araca,  
identificado con DNI 70312879 en mi condición de egresado de:

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

Ingeniería Civil

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

“Determinar el nivel de eficiencia del equipo basado en el sensor de distancia VLS310X para el cálculo del índice de rugosidad internacional (IRI) aplicado al tramo KM 1326+000 - KM 1327+600 de la carretera Puno - Juliaca”

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

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 24 de Enero del 2024

Pamela

FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo CERDAS ARYARDO FLORES QUEZAS identificado con DNI 70106356 en mi condición de egresado de:

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

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

" DETERMINAR EL NIVEL DE EFICIENCIA DEL EQUIPO BASADO EN EL SENSOR DE DISTANCIA VL53LOX PARA EL CALCULO DEL INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) APLICADO AL TRAMO KM-1326+000 - KM 1327+600 DE LA CARRETERA PUNO - JULIACA "

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

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 24 de ENERO del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella