

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



**“EVALUACIÓN DEL MODELO “QUARTER CAR” PARA LA
ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL
(IRI) DEL TRAMO HUANCAVELICA - SANTA INÉS”**

TESIS

PRESENTADO POR:

ALMANZA MENDOZA DIEGO ARTHUR

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO - PERÚ

2014

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

TESIS

**“EVALUACIÓN DEL MODELO “QUARTER CAR” PARA LA
ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)
DEL TRAMO HUANCVELICA - SANTA INÉS”**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:
ALMANZA MENDOZA, Diego Arthur

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

Aprobado por:

Presidente del Jurado:


Ing. Douglas Arturo QUINTANILLA ANYAIPOMA

Primer Miembro :


Ing. Cesar Edwin GUERRA RAMOS

Segundo Miembro :


Ing. Zenón MELLADO VARGAS

Director de Tesis :


Ing. Emilio CASTILLO ARONI

Asesor de Tesis :


Ing. Walter Hugo LIPA CONDORI

TEMA: CAMINOS
ÁREA: TRANSPORTES

DEDICATORIA.

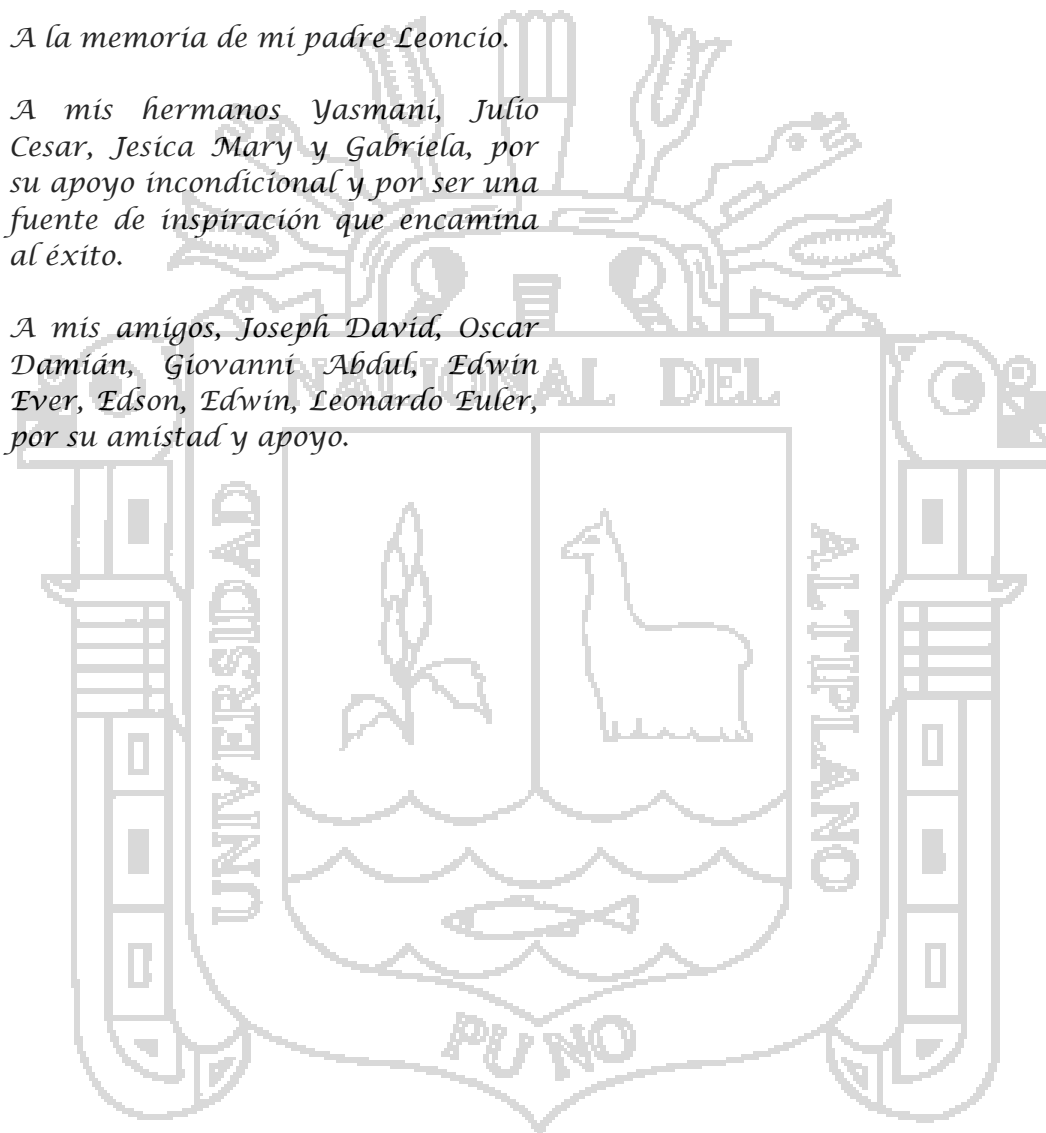
A Dios por su infinito amor y sabiduría.

A Mi madre Marina, por su ejemplo de vida, dedicación y apoyo incondicional para la culminación de esta digna profesión.

A la memoria de mi padre Leoncio.

A mis hermanos Yasmani, Julio Cesar, Jessica Mary y Gabriela, por su apoyo incondicional y por ser una fuente de inspiración que encamina al éxito.

A mis amigos, Joseph David, Oscar Damián, Giovanni Abdúl, Edwin Ever, Edson, Edwin, Leonardo Euler, por su amistad y apoyo.



Agradecimiento

Primeramente agradezco a Dios por todas las cosas maravillosas que me ha dado en la vida, en el momento justo y en el momento exacto.

A mi madre, por estar en cada momento conmigo y brindarme todo su amor, su apoyo desinteresado, sus sabias enseñanzas que me permiten lograr mis objetivos.

A mis hermanos y hermanas por brindarme todo su amor y apoyo, en cada momento de mi vida.

Al Ingeniero Miguel Vilca, por su apoyo en la conclusión de este trabajo de investigación.

A mi amigo el Ingeniero Leonardo Chura, por mostrarme nuevos conocimientos que trazaron el camino para la consecución del presente trabajo de Investigación.

A los Ingenieros Arturo Quintanilla, Cesar Guerra, Emilio Castillo, Zenón Mellado, quienes con sus conocimientos y experiencia profesional me motivaron a esforzarme para realizar cada vez un trabajo mejor, y así lograr captar más conocimientos.

A todos mis amigos Giovanni Abdul, Jhossep David, Edwin Ever, Edson Zapana, Edwin Cruz, Elvis Bravo, por demostrarme una amistad sincera y desinteresada.

Un agradecimiento especial a Maritza Medina por su apoyo desinteresado.

A todos mis amigos y compañeros con los que compartí diversas experiencias y vivencias en mi vida universitaria.

INDICE	
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE FOTOGRAFÍAS.....	12
RESUMEN	13
PALABRAS CLAVE	14
ABSTRACT	15

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES.	16
1.1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2.1. ANTECEDENTES.....	19
1.2.2. ESTADO DEL ARTE.....	21
1.2.3. JUSTIFICACIÓN.....	26
1.2.4. HIPÓTESIS.....	27
1.2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	27
1.2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO.....	27
1.2.5. OBJETIVOS.....	28
1.2.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	28
1.2.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28

CAPÍTULO II

2. PAVIMENTOS	29
2.1. LOS PAVIMENTO ECONÓMICOS.....	29
2.1.1. OTTA SEAL.....	30
2.1.2. MÉTODO DE DISEÑO Y EJECUCIÓN.....	31

2.1.2.1.	TIPOS DE OTTA SEAL.....	31
2.1.2.2.	SELECCIÓN DEL TIPO DE OTTA SEAL.....	32
2.1.2.3.	DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO.	34
2.1.2.4.	DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BITUMINOSO.....	37
2.1.2.5.	TASA DE ROCIADO DEL AGLUTINANTE.	38
2.1.2.6.	TASA DE ROCIADO DEL AGREGADO.....	39
2.1.3.	EXPERIENCIAS EN SU UTILIZACIÓN.....	40
2.1.4.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN SU APLICACIÓN Y USO.....	41
2.2.	INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	42
2.2.1.	DEFINICIÓN DEL IRI.....	44
2.2.2.	FACTORES QUE AFECTAN LA RUGOSIDAD DE LOS PAVIMENTOS.....	45
2.2.3.	BONDADES DE UN PAVIMENTO SIN IRREGULARIDADES.....	45
2.2.4.	EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL IRI.....	46
2.2.5.	CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL IRI.	53
2.2.6.	LA ESCALA DE VALORES DE IRI DEL BANCO MUNDIAL.....	55
2.2.7.	VALORES DEL IRI EN ENTIDADES PÚBLICAS INTERNACIONALES.	58
CAPITULO III		
3.	EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL CON EL RUGOSIMETRO DE MERLÍN.....	60
3.1.	INTRODUCCIÓN AL RUGOSIMETRO MERLÍN.....	60
3.2.	METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DEL IRI CON RUGOSIMETRO DE MERLIN.....	61
3.2.1.	HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS.....	62
3.3.	CORRELACIONES D VERSUS IRI.	63
3.4.	RUGOSIMETRO MERLÍN.....	64

3.4.1.	ESQUEMA Y REPRESENTACIÓN DE LAS PARTES DE UN EQUIPO MERLÍN.....	64
3.5.	MÉTODO DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	66
3.5.1.	EL TABLERO DEL MERLÍN.....	66
3.5.2.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.	67
3.6.	MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD.....	69
3.6.1.	CALCULO DEL RANGO “D”	69
3.7.	FACTOR DE CORRECCIÓN PARA EL AJUSTE DE “D”.	70
3.8.	DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD EN LA ESCALA DEL IRI. ..	70
3.9.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL CÁLCULO DEL IRI CON EL MERLÍN. .	71
3.10.	APLICACIÓN NUMÉRICA DEL CÁLCULO DEL IRI CON EL MERLÍN.....	73

CAPÍTULO IV

4.	EL MODELO MATEMÁTICO CUARTO DE VEHÍCULO “QUARTER CAR”.....	76
4.1.	ANTECEDENTES Y ORIGEN DEL MODELO “QUARTER CAR”.....	76
4.1.1.	ANTECEDENTES DE MODELO “QUARTER CAR”.....	76
4.1.2.	ORIGEN DEL MODELO “QUARTER CAR”	77
4.2.	MODELAMIENTO FÍSICO DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN CUARTO DE VEHÍCULO “QUARTER CAR”.....	78
4.3.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN CUARTO DE VEHÍCULO “QUARTER CAR”.....	80
4.4.	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DEL IRI MEDIANTE EL MODELO MATEMÁTICO “QUARTER CAR”.....	85
4.5.	APLICACIÓN NUMÉRICA.....	86
4.6.	ROUGHOMETER III.....	89
4.6.1.	COMPONENTES DEL ROUGHOMETER III.....	90

4.7.	INSTALACIÓN Y CALIBRACIÓN.....	91
4.7.1.	INSTALACIÓN DE LOS COMPONENTES.	91
4.7.2.	CALIBRACIÓN DE LOS COMPONENTES.....	94
4.8.	OPERACIÓN DEL EQUIPO Y TRANSFERENCIA DE DATOS.	94
4.8.1.	OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	94
4.8.2.	TRABAJO DE GABINETE.....	95

CAPÍTULO V

5.	ANÁLISIS E INTERPRETACION DE DATOS.....	97
5.1.	IDENTIFICACIÓN DE LA RUTA A EVALUAR.	97
5.1.1.	TRAMO CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL OTTA SEAL.....	97
5.1.2.	TRAMO CON SELLO DE ARENA.....	98
5.2.	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL.....	99
5.2.1.	EVALUACIÓN DEL IRI CON EL RUGOSIMETRO MERLIN.....	99
5.2.2.	EVALUACIÓN DEL IRI CON ROUGHOMETER III.	101
5.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.....	104
5.4.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DEL IRI CON EL MERLÍN Y EL ROUGHOMETER III.....	107
5.5.	CORRELACIÓN DE RESULTADOS.....	110
5.5.1.	CALCULO DE LA ECUACIÓN DE REGRESIÓN.....	110
5.5.2.	ECUACIÓN DE CORRELACIÓN DE IRI.....	112
5.6.	APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CORRELACIÓN.	116
5.7.	CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.	119

CAPÍTULO VI

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
6.1.	CONCLUSIONES.....	121
6.2.	RECOMENDACIONES.	125
	BIBLIOGRAFIA.	127
	ANEXOS	131

LISTA DE TABLAS

TABLA 01.	RECOMENDACIONES TIPO DE OTTA SEAL EN RELACIÓN CON LOS NIVELES DE TRÁFICO.	34
TABLA 02.	RECOMENDACIONES TIPO DE OTTA SEAL EN RELACIÓN CON LOS NIVELES DE TRÁFICO.	37
TABLA 03.	GRADACIÓN CONVENIENTE PARA DIFERENTES TIPOS DE TRÁFICO.	37
TABLA 04.	TIPO DE BITUMEN SEGÚN EL TRÁFICO Y EL AGREGADO.	38
TABLA 05.	TASA DE ROCIADO DEL AGLUTINANTE.	39
TABLA 06.	TASA DE APLICACIÓN DEL AGREGADO.	39
TABLA 07.	ALGUNOS EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL IRI (ADAPTADO DE FHWA, 2006).	47
TABLA 08.	CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL IRI (SAYERS ET AL., 1986B Y ASTM E-950-98).	55
TABLA 09.	ESCALAS DE IRI EN ENTIDADES PÚBLICAS INTERNACIONALES.	59
TABLA 10.	DATOS DE MEDICIÓN DEL IRI.	73
TABLA 11.	EVALUACIÓN DEL IRI CON EL MERLIN (TRAMO I).	99
TABLA 12.	EVALUACIÓN DEL IRI CON EL MERLIN (TRAMO II).	100
TABLA 13.	EVALUACIÓN DEL IRI CON EL ROUGHOMETER III (TRAMO I).	102
TABLA 14.	EVALUACIÓN DEL IRI CON EL ROUGHOMETER III (TRAMO II).	103
TABLA 15.	EVALUACIÓN DE LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN (TRAMO I).	110
TABLA 16.	EVALUACIÓN DE LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN (TRAMO II).	111
TABLA 17.	APROXIMACIÓN DEL IRI (MERLIN) A PARTIR DE IRI (ROUGHOMETER III) (TRAMO I).	116

TABLA 18. APROXIMACIÓN DEL IRI (MERLIN) A PARTIR DE IRI (ROUGHOMETER III)

(TRAMO II). 119

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LOS PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE OTTA SEALS.	33
FIGURA 02. CONDICIONES GENERALES DE GRADACIÓN DE LOS AGREGADOS.	35
FIGURA 03. CONDICIONES PARA UNA GRADACIÓN ABIERTA.	35
FIGURA 04. CONDICIONES PARA UNA GRADACIÓN MEDIA.	36
FIGURA 05. CONDICIONES PARA UNA GRADACIÓN DENSA.	36
FIGURA 06. PERFILOGRAFO (FHWA, 2006).	48
FIGURA 07. EQUIPO TIPO RESPUESTA (RESPONSE TYPE ROAD ROUGHNESS METERS, RTRRM).	50
FIGURA 08. NIVEL Y MIRA (ROD AND LEVEL).....	51
FIGURA 09. DIPSTICK. (FHWA, 2006).	52
FIGURA 10. PERFILÓMETRO INERCIAL (INERTIAL PROFILOMETER).....	53
FIGURA 11. PERFILÓMETRO INERCIAL (FHWA, 2006).....	53
FIGURA 12. ESCALA DE RUGOSIDAD IRI.....	56
FIGURA 13. ESCALAS EN LA ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD EN PAVIMENTOS.....	56
FIGURA 14. ESCALAS EN LA ESTIMACIÓN DEL IRI EN PAVIMENTO ASFALTICO Y TRATAMIENTO SUPERFICIAL.	57
FIGURA 15. DESVIACIÓN DEL PAVIMENTO RESPECTO A LA CUERDA PROMEDIO.	62
FIGURA 16. HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS.....	63
FIGURA 17. ESQUEMA DEL RUGOSIMETRO MERLIN.	65
FIGURA 18. CONFIGURACIÓN DE TABLERO DEL MERLIN.	67
FIGURA 19. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.	68
FIGURA 20. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE IRI CON EL MERLIN.....	72
FIGURA 21. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE DATOS DE RUGOSIDAD EN 400M DE CARRETERA.....	74
FIGURA 22. REPRESENTACIÓN DEL CUARTO DE CARRO.....	78
FIGURA 23. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL SISTEMA AMORTIGUADO Y No AMORTIGUADO.	79
FIGURA 24. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DEL IRI.....	86

FIGURA 25. EL CONTROLADOR DEL EQUIPO ROUGHOMETER III.	90
FIGURA 26. COMPONENTES DEL EQUIPO ROUGHOMETER III.	91
FIGURA 27. VENTANA PRINCIPAL.	96
FIGURA 28. SOFTWARE ROUGHMETER III.	96
FIGURA 29. SOFTWARE ROUGHMETER III.	96
FIGURA 30. SOFTWARE ROUGHMETER III.	96
FIGURA 31. UBICACIÓN DE LA RUTA PE-26.	98
FIGURA 32. UBICACIÓN DE LA RUTA PE-28D.	98
FIGURA 33. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN CON EL ROUGHOMETER III (TRAMO I).	105
FIGURA 34. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN CON EL ROUGHOMETER III (TRAMO I).	105
FIGURA 35. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN CON EL ROUGHOMETER III (TRAMO II).	106
FIGURA 36. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN CON EL ROUGHOMETER III (TRAMO II).	106
FIGURA 37. RESULTADOS DE MEDICIÓN CON EL RUGOSIMETRO MERLIN Y IRI PROMEDIO (TRAMO I).	107
FIGURA 38. RESULTADOS DE MEDICIÓN CON EL RUGOSIMETRO MERLIN Y IRI PROMEDIO (TRAMO I).	108
FIGURA 39. RESULTADOS DE MEDICIÓN CON EL RUGOSIMETRO MERLIN Y IRI PROMEDIO (TRAMO II).	109
FIGURA 40. RESULTADOS DE MEDICIÓN CON EL RUGOSIMETRO MERLIN Y IRI PROMEDIO (TRAMO II).	109
FIGURA 41. ECUACIONES DE REGRESIÓN PARA LAS MEDICIONES DEL IRI (TRAMO I).	112
FIGURA 42. ECUACIONES DE REGRESIÓN PARA LAS MEDICIONES DEL IRI (TRAMO II).	115

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 01. TRABAJOS DE OTTA SEAL EN TRAMO CALAPUJA – PUCARA (39 Km).	40
FOTOGRAFÍA 02. TRABAJOS DE OTTA SEAL EN TRAMO HUANCAMELICA – SANTA INÉS (62 Km).....	41
FOTOGRAFÍA 03. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD CON QUIPO MERLIN.....	61
FOTOGRAFIA 04. COMPONENTES DEL EQUIPO ROUGHOMETER III (SENSOR).	92
FOTOGRAFÍA 05. INSTALACIÓN DEL ODÓMETRO.....	92
FOTOGRAFÍA 06. GPS EN LA PARTE SUPERIOR DEL VEHÍCULO.....	93
FOTOGRAFÍA 07. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL EQUIPO.....	94
FOTOGRAFÍA 08. VEHÍCULO NECESARIO.....	95
FOTOGRAFÍA 09. EQUIPO ROUGHOMETER EN TRAYECTO.....	95



RESUMEN

La presente investigación titulada “Evaluación del modelo “Quarter Car” para la estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del tramo Huancavelica - Santa Inés”, está constituido por 6 capítulos:

Capítulo I: Se describe el ante proyecto en forma resumida y también los comentarios de algunas investigaciones similares al presente.

Capítulo II: Se describe el tratamiento superficial realizado al pavimento que se evaluará, los tipos existentes, los métodos de diseño, los requisitos para su diseño, utilización y el proceso constructivo. También se define el índice de rugosidad internacional, las bondades en su utilización y describe algunos equipos existentes en el mercado para la medición de IRI, presentando la clasificación del Manco Mundial de los equipos, en 4 clases y las más utilizadas.

Capítulo III: Se hace la descripción del equipo MERLIN, los orígenes de su fabricación, como también una descripción detallada de la metodología de medición con este equipo.

Capítulo IV: En este capítulo se describe el Modelo “Quarter Car”, pasando por el análisis dinámico y la solución matemática usando un método de aproximación numérica, se describe el equipo Roughometer III, como un equipo de tipo respuesta y la técnica y metodología para la obtención del IRI.

Capítulo V: Se presenta los resultados de evaluación de la superficie de rodadura con los equipos seleccionados, para analizar, comparar y correlacionar mediante ecuaciones de regresión

Capítulo VI: Como capítulo final se presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación realizado.

PALABRAS CLAVE

IRI: Índice de rugosidad internacional.

QUARTER CAR: Modelo matemático basado en un cuarto de carro.

MERLIN: Machine for Evaluating Roughness using low-cost Instrumentation.

RUGIMETRO: Equipo que mide la regularidad superficial de los pavimentos.

MASA AMORTIGUADA: Masa que se encuentra por en suspendida.

MASA NO AMORTIGUADA: Masa que descansa en el eje de la llanta del vehículo.

ECUACIÓN DINÁMICA: Sistema de ecuaciones diferenciales de orden superior.

DIAGRAMA DE FLUJO: Esquema del procedimiento de un evento.

PERFIL LONGITUDINAL: La configuración longitudinal de alineamiento seleccionado.

CALIBRACIÓN: Puesta a punto de un equipo con respecto a otro equipo patrón.

GPS: Sistema de navegación por satélite.

SENSOR: Dispositivo que detecta acciones o estímulos externos.

RECUBRIMIENTO BITUMINOSO: Tratamiento superficial con algún tipo de asfalto.

ABSTRACT

This research entitled "Model Evaluation" Quarter Car "for estimating the International Roughness Index (IRI) of section Huancavelica - St. Agnes," consists of six chapters:

Chapter I: describes the project to summarize and comments from some similar research to this.

Chapter II: surface treatment performed to evaluate pavement that is described, the existing types, and design methods, the requirements for their design, use and construction process. International roughness index is also defined, the benefits in its use and describes some on the market for measuring IRI teams, presenting the classification of the World Bank teams in 4 classes and the most used.

Chapter III: MERLIN computer description is made, the origins of manufacture, as well as a detailed description of the methodology for measuring this equipment.

Chapter IV: This chapter describes the Model "Quarter Car" through dynamic analysis and mathematical solution using a numerical approximation method, the Roughometer III: equipment is described as a response type equipment, technique, and methodology for obtaining IRI.

Chapter V: Results of evaluation of the tread with the selected equipment is presented to analyze, compare and correlate by regression equations

Chapter VI: As the final chapter the conclusions and recommendations of the research work done is presented.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES.

1.1. Introducción.

En los años 80's el Banco Mundial patrocinó investigaciones para la estandarización de la medida de la rugosidad, a consecuencia de la existencia de muchos métodos de medición y esto conlleva a la existencia de muchas escalas de medición que se diferencian unas de otras.

Como consecuencia de las investigaciones, se estableció el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), basado en el comportamiento físico del modelo "Quarter Car", el cual simula la dinámica del funcionamiento de un cuarto de carro, esto generó la fabricación de diferentes tipos de equipos para la medición de la rugosidad basados en el principio del comportamiento dinámico del modelo cuarto de vehículo.

El Banco Mundial clasifica en 4 clases los equipos para medir la rugosidad tomando en consideración la exactitud de los datos obtenidos, en la actualidad existen equipos que tienen muchas bondades como la velocidad de toma de datos pero esta a su vez no garantiza que los datos levantados sean también exactos en comparación con otros.

Los equipos de clase 1 como el MERLIN (Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation), son más exactos que los equipos de tipo respuesta (clase 3), pero la gran desventaja en el uso del MERLIN es el rendimiento ofrecido, cuando se trata de medir la rugosidad de grandes distancias de carretera su uso se hace improductivo, es cuando es necesario aprovechar las bondades de los equipos de tipo Respuesta aun sabiendo que sus datos no serán más exactos que los del MERLÍN.

Considerando lo anterior mencionado existe la necesidad de encontrar una correlación entre los datos obtenidos con un equipo MERLIN y uno de tipo Respuesta (Roughometer III), para poder proyectar el IRI del MERLIN a partir de datos levantados con un equipo de clase 3.

En la actualidad el Perú mediante el Ministerio de Transportes y Comunicaciones y a través el Proyecto Especial de Infraestructura del Transporte Nacional (PROVIAS NACIONAL) gestiona las redes viales mediante contratos de conservación por niveles de servicio con la empresa privada donde uno de los indicadores del nivel de servicio de la vía es la rugosidad del pavimento.

El fin que sigue este trabajo de investigación es el análisis del modelo cuarto de carro, la evaluación de un tramo carretero con dos equipos de diferentes clases (1 y 3), su análisis y la posible correlación existente entre ambos equipos. Se considera como tramos de prueba superficies de rodadura con tratamientos superficiales Otta Seal, el cual consiste en una protección bituminosa.

1.2. Planteamiento del Problema.

En la actualidad la evaluación de la rugosidad de los pavimentos es de suma importancia para la toma de decisiones en lo referente a la conservación, mantenimiento y/o rehabilitación de las redes viales del Perú, en este sentido los equipos de medición con sistemas de tipo respuesta (Clase 3) proporcionan un buen coeficiente de medida de la regularidad superficial, la diversidad de modelos y modos de aplicación que existen en la actualidad y sus características mecánicas variables con el tiempo, complican su aplicación como sistemas de referencia de la regularidad superficial y a su vez esto nos lleva a la Pregunta: ¿los resultados obtenidos en la medición del IRI con equipos de tipo respuesta son confiables?.

El Ministerio de Transportes y comunicaciones (MTC), prioriza la conservación de las redes viales del Perú a través de contratos de conservación por niveles de servicio. Además el Índice Rugosidad Internacional es un parámetro de mucha importancia para el cálculo del nivel de servicio del pavimento, considerando que las carreteras a evaluar son de tramos considerables y que la mejor manera de levantar la información de rugosidad es usando equipos de Clase 3 (Tipo Respuesta). Pero también debemos tener presente que los equipos de la Clase 1 (MERLIN) dan resultados más exactos.

Es por esta razón que es necesario la verificación y análisis de los resultados obtenidos tras la utilización de estos equipos Tipo Respuesta cuyo

funcionamiento y su comparación con un equipo de clase 1 (MERLIN) para obtener rugosidad MERLIN a partir de datos de un equipo Tipo Respuesta.

1.2.1. Antecedentes.

La regularidad es la característica que más influye en las sensaciones de confort y seguridad que experimenta un usuario al circular por una carretera. Cabe destacar que la regularidad superficial es mucho más valorada por el conductor que la capacidad portante en sí y que esta última tan sólo le interesa en cuanto incide en la primera por la aparición de baches y otras deformaciones¹.

Motivados por estas y otras causas, muchos técnicos e investigadores han desarrollado en los últimos 20 o 30 años una diversidad de aparatos y técnicas para medir la regularidad superficial.

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

¹ De Solminihac, Hernán: Revista de Ingeniería de Construcción N° 6. Santiago: Chile, UC, 1989.

debido a que los datos, aun de un mismo país, eran poco confiables, ya que las mediciones estaban basadas en métodos diferentes.

La gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial y los numerosos índices y escalas existentes para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de adoptar un "índice único". Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un solo equipo a todos y tampoco se podía cortar las futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevos equipos.

En 1982, el Banco Mundial inició un experimento en Brasil para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes es posible relacionarlos. Una vez establecido este punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar un índice de referencia al que posteriormente se denominó "Índice Internacional de Rugosidad".

EL Índice Internacional de Rugosidad es el primer índice de perfil ampliamente utilizado, donde el método de análisis está adaptado para trabajar con diferentes tipos de equipos de medición de rugosidad y se puede decir que es una propiedad del perfil de un camino. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y ensayadas para minimizar los efectos de algunos parámetros de mediciones de perfil, tales como el intervalo de muestreo.

El cálculo del Índice Internacional de Rugosidad se basa en un modelo matemático llamado Cuarto de Carro (Quarter-Car)². El sistema del Cuarto de Carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero, Los desplazamientos de la suspensión del modelo son acumulados y divididos entre la distancia recorrida para dar el Índice Internacional de Rugosidad, en unidades de m/km.

El impacto económico del estado superficial de los pavimentos sobre la economía del transporte ha sido reconocido sobre la economía del transporte ha sido reconocido a todos los niveles de las estructuras sociales y productivas de las naciones³. Por esta razón, instituciones financieras internacionales, tales como el Banco Mundial, apoyado proyectos para el establecimiento de políticas efectivas de conservación de la infraestructura vial terrestre⁴.

1.2.2. Estado del Arte.

Predicción del Índice De Rugosidad Internacional en Pavimentos Flexibles Usando Redes Neuronales Artificiales Por Camilo Andrés Cardona Villa, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil, Medellín, 2007:

² W. Sayers, Thomas Gillespie, William Paterson: Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurement, Washington. DC: USA. Banco Mundial. 1986.

³ BANCO MUNDIAL: El deterioro de los caminos en los países en desarrollo. Causas y soluciones. Estudio del Banco Mundial. Washington: USA. Banco Mundial, 1988. P.40.

⁴ CHARLES: Programas de capacitación de educación continua y de investigación. Conferencia presentada en el panel capacitación e intercambio tecnológico. México: México. 1994.

“Esta investigación presenta la predicción del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en pavimentos flexibles de vías urbanas de la ciudad de Medellín, usando la técnica de las redes neuronales artificiales partiendo de datos de campo tomados por el Sistema de Administración Vial (SAV) de la ciudad, ante la ausencia de equipos para la medición de este índice por parte de la administración local. Las variables de entrada utilizadas en el modelo neuronal para la predicción del IRI fueron el número estructural, la longitud y los daños de los pavimentos que genera deformaciones verticales como el parcheo por extensión y reposición de redes de servicios públicos, el parcheo de fallos, el ahuellamiento, las corrugaciones, el abultamiento y los huecos. El modelo desarrollado fue capaz de predecir satisfactoriamente el IRI con un coeficiente de correlación (R^2) del 0.81 en la etapa de validación, mostrando que éste refleja las condiciones de falla de los pavimentos en término de sus deformaciones”.

Comentario: “Es una investigación que aplica las técnicas de la Inteligencia Artificial para la predicción del Índice de Rugosidad internacional (IRI), usando como datos de entrada aquello que se tienen en los archivos de la administración local, sin ser estas datos de IRI, pero si del estado del pavimento, la importancia esta investigación radica en el aporte brindado, en el sentido de dar solución a la falta de equipos para la medición del IRI puesto que no es necesario equipo de medición en campo directamente, solo siendo necesario datos de otros estudios realizados en el pavimento”

Análisis y Criterios Para El Cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) En Vías Urbanas Colombianas Que Orienten La Elaboración de Una Especificación Técnica, F. Caro, G. Peña:

“Este artículo resume el desarrollo y resultados de la investigación sobre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para pavimentos en vías urbanas, a partir de recopilación de experiencias nacionales e internacionales, mediciones de campo, evaluaciones de IRI en diferentes tipos de perfiles y análisis de resultados obtenidos en vías de Bogotá, correlacionando lo obtenido en cada fase de la investigación, planteando conclusiones y recomendaciones. Incluye aspectos relacionados con el origen del IRI, escalas de medición, alcance en pavimentos urbanos, equipos para medición y verificación de su calibración, umbrales y tratamiento de singularidades”.

Comentario: “Esta investigación desarrolla la evaluación de los pavimentos urbanos cuyo objetivo es orientar la elaboración de especificaciones técnicas para la evaluación de pavimentos urbanos, considerando que los pavimentos urbanos a diferencia de las carreteras muestran singularidades en su superficie ya sea por el proceso constructivo o la construcción de elementos ajenos al pavimento pero que son muy necesarios para la configuración de las arterias de una ciudad la importancia de esta investigación está en el aporte y/o orientación brindado para la elaboración de las especificaciones técnicas para la evaluación de la regularidad de los pavimentos urbanos”.

Redondo Quintero, Omaider. “Diseño de un Equipo en Base al Equipo Merlín que Permita Evaluar Las Condiciones de Rugosidad Existente En

**Un Pavimento”. Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería,
Enero 2006:**

“La presente investigación tiene como objetivo principal diseñar un equipo que permita evaluar las condiciones de rugosidad en un pavimento basado en el equipo MERLIN. La investigación se sustentó en analizar las características del equipo MERLIN, especialmente en aquellas en las que repercute las desventajas del equipo, a fin de obtener un diseño en el que se logre mejorar dichas condiciones y obtener así un nuevo equipo más eficiente. Como conclusión de éste proyecto se logró desarrollar un diseño en el que se observa que el nuevo instrumento podrá ser utilizado de diversas maneras y con un costo de fabricación accesible”.

Comentario: “La única desventaja del Rugosímetro Merlín es el rendimiento como consecuencia de su operación que es manual, limitándose así la medición a distancias pequeñas lo cual incide en la eficiencia del equipo, es por esta razón que se realiza esta investigación tomando como base la precisión, accesibilidad y bajo costo de operación del equipo, el equipo que se pretende construir es a diferencia del Rugosímetro Merlín un equipo cuya eficiencia es mucho mayor manteniendo las características de precisión, accesibilidad y bajo costo de operación ”.

Determinación de Umbrales de Rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos Edgardo Townsend Pinto, Dirección de Vialidad de Coquimbo, Christian E. Veliz Varas:

“El presente trabajo tiene por finalidad, analizar una base de datos de determinaciones de rugosidad, en contratos que cuentan con controles receptivos de dicho parámetro a lo largo del país. Para los fines indicados, fue necesario conformar una base de datos de valores de rugosidad en contratos con superficies de asfalto, hormigón y doble tratamiento. Posteriormente, toda la información catastrada fue analizada en forma estadística, determinándose los estadígrafos necesarios que permitieron derivar a los umbrales a exigir en futuras obras viales, definiéndose de igual forma los criterios de aceptación y rechazo que debieran exigirse en futuras obras viales que tengan como exigencia el Índice de Rugosidad Internacional (IRI)”.

Comentarios: “Esta investigación tiene como pretensión principal desarrollar los umbrales y los rangos de aceptación y rechazo en la medición del índice de rugosidad internacional IRI para la recepción en la construcción de nuevas carreteras, conservación de obras viales así como también la evaluación de la superficie de rodadura de un pavimento, a partir de una base de datos de medición del IRI en todo el territorio chileno en tres tipos de pavimentos, asfálticos, de concreto y tratamiento superficial doble capa, su importancia está en el hecho de que con una base de datos más amplia se obtiene rangos de aceptación más reales a los de las especificaciones técnicas existentes en el momento”.

Procesamiento de datos, diseño y construcción de un analizador electrónico de rugosidad de pavimentos. Br. Carlos Alberto Cárdenas Cruz. Universidad Nacional de Ingeniería.

“Para la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI), hay normas que cumplir dados por MTC, la información de la rugosidad del pavimento es abundante dado que se toman varias veces los datos del mismo pavimento de longitudes en el orden de los cientos de kilómetros, lo cual requiere el manejo de equipo electrónico preciso y de programas para dar resultados inmediatos del análisis, donde está puesto los requerimientos que los especialistas y usuarios han denotado en el transcurso de su asesoramiento.

El presente trabajo de investigación ha logrado implementar y probar el correcto funcionamiento de un sistema analizador de rugosidad de pavimentos, contando con diseños de hardware y software para la facilidad de adquisición de datos, fácil manejo del equipo, portabilidad, bajo costo para su reproducción, y sobre todo que se adecua a los requerimientos de las empresas que analizan la rugosidad y transitabilidad de un pavimento”.

Comentarios: “El trabajo de investigación desarrollado es un aporte de importancia en el sentido de la innovación tecnológica ya que se desarrolla el diseño un medidor de rugosidad de pavimentos con la calidad de un equipo electrónico que existe en el mercado, además de ser una propuesta para la fabricación de equipos de medición del IRI en el Perú”.

1.2.3. Justificación.

En la actualidad, en el Perú, el ministerio de transportes y comunicaciones, mediante el Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte - Nacional (PROVIAS NACIONAL), gestiona la conservación y el mantenimiento de las

carreteras del Perú mediante la medición del nivel de servicio de dichas carreteras, para lo cual se tiene como uno de los indicadores el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), para lo cual es necesario tener equipos y métodos adecuados para la obtención de este parámetro de manera confiable y eficiente.

La gran variedad de equipos existentes en el mercado, para la medición de la regularidad superficial de una carretera, nos ofrecen resultados óptimos a un alto costo, ya que estos equipos son muy costosos y necesitan equipos adicionales para su operación (camioneta), es por ello que es necesario el análisis de los modelos que gobiernan el funcionamiento del modelo de cuarto de carro y su aplicación en nuevas investigaciones y generación de nuevas tecnologías en nuestro país.

1.2.4. Hipótesis.

1.2.4.1. Hipótesis General

Es posible analizar y evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos en la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con un equipo basado en el modelo QUARTER CAR, con respecto al obtenido con el Rugosímetro Merlín.

1.2.4.2. Hipótesis Específico.

- Se determinar un Índice de Rugosidad Internacional (IRI) usando un equipo electrónico cuyo procesamiento de datos es mediante el modelo "QUARTER CAR".CAR".

- Se determina un Índice de Rugosidad Internacional (IRI) usando el Rugosímetro Merlín.
- Existe una diferencia en los resultados obtenidos en la medición del Índice de rugosidad Internacional (IRI), usando un equipo electrónico basado en el modelo QUARTER CAR, respecto del obtenido al usar el Rugosímetro Merlín.

1.2.5. Objetivos.

1.2.5.1. Objetivo General

Analizar, Evaluar y Correlacionar los resultados del Equipo ROUGHOMETER III en la estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la carretera Huancavelica – Santa Inés., con respecto al resultado obtenido con el equipo MERLIN.

1.2.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la carretera Huancavelica – Santa Inés usando un equipo de Tipo Respuesta (ROUGHOMETER III).
- Determinar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la carretera Huancavelica – Santa Inés utilizando el equipo Merlín.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos en la estimación del índice de rugosidad internacional (IRI), con los dos equipos seleccionados para la medición de la rugosidad de la superficie de rodadura.

CAPÍTULO II

2. PAVIMENTOS

2.1. Los Pavimentos Económicos.

Los revestimientos o protecciones bituminosas cumplen varias funciones en la carretera y al mismo tiempo ofrecen muchas ventajas sobre las carreteras afirmadas.

Estas ventajas son:

La provisión de una superficie durable, impermeable, sellar y proteger las capas de pavimento de la entrada de humedad y la consiguiente pérdida de la resistencia estructural y el deterioro del pavimento.

La provisión de una superficie resistente al deslizamiento, que puede resistir las fuerzas abrasivas y perturbadoras de tráfico y el medio ambiente.

La prevención de la formación de ondulaciones (baches, encalaminado), la formación del polvo y el barro.

Estas ventajas permiten viajar relativamente seguro a velocidades más altas y menores costos de operación y mantenimiento de vehículos.

Tipos de pavimentos económicos.

Algunos tipos de protección bituminosa o pavimento básico se mencionan a continuación:

- Sello de arena.
- Surface dressings (chip seal).
- Cape seal.
- Otta seal.
- Slurry seal.

2.1.1. Otta Seal.

Otta Seal es una carpeta de rodadura asfáltica que se usa en caminos de bajo volumen de tránsito. Esta técnica fue desarrollada en Noruega y se ha aplicado en sus inicios en Suecia, Islandia, Kenya, Zimbabwe, Bangladesh, Australia y Sudáfrica. Consiste en una superficie bituminosa de 16 o 32 mm de espesor (una o dos capas dependiendo de los factores de diseño) y su ejecución incluye el riego de un asfalto en caliente, seguido del riego de un agregado integral que es compactada dentro del asfalto usando un rodillo o en el peor de los casos camiones cargados.

2.1.2. Método de Diseño y Ejecución.

Teniendo en cuenta que existen tres tipos de Otta seal los factores que influyen en la elección y diseño del tipo de Otta seal a utilizar son:

- Propiedades de los áridos disponibles.
- Volumen de tráfico.
- Los costos de construcción.
- La vida de servicio requerido.

2.1.2.1. Tipos de Otta Seal.

Simple Otta Seals

Es el tipo de Otta seal más económico puesto que no se aplica ninguna capa adicional de protección bituminosa las recomendaciones para su diseño dependen por lo general del tráfico vehicular. Sin embargo, las recomendaciones que se dan son flexibles y depende del proyecto.

Simple Otta Seal con cubierta de sello de arena

La combinación de un simple Otta Seal seguido por una cubierta de arena es una opción más económica que un doble Otta Seal. La vida de servicio sin embargo, será más corto, pero el primero ofrece una solución muy rentable para las carreteras con IMD en general, menos de 500.

Los beneficios de utilizar una cubierta de arena son lo siguiente:

- Mejorar retención de gravilla en capa de Otta seal.
- Mayor durabilidad, debido al incremento del espesor de la carpeta y la formación de una superficie de textura más densa.
- La protección de los áridos en el Otta seal en el caso de la mala calidad de los materiales.
- Reducción del riesgo de daños en el caso de las imperfecciones en el sello subyacente.

Doble Otta Seal

El doble Otta Seal es la más duradera, pero también el más anti económico y es recomendada para las principales carreteras los cuales tienen grandes volúmenes de tráfico. Doble Otta Seals con una cubierta de sello de arena rara vez se especifica debido a sus alto costos y beneficios escasos ya que la segunda capa ya cumple esa función de un sello de arena.

2.1.2.2. Selección del Tipo de Otta seal.

Para la selección del tipo de Otta seal a utilizar se debe tener en consideración el tráfico vehicular y el agregado disponible con estos podemos elegir el tipo de bitumen a utilizar. Para lo cual el siguiente diagrama de flujo explica el procedimiento ara selección del tipo de Otta seal.

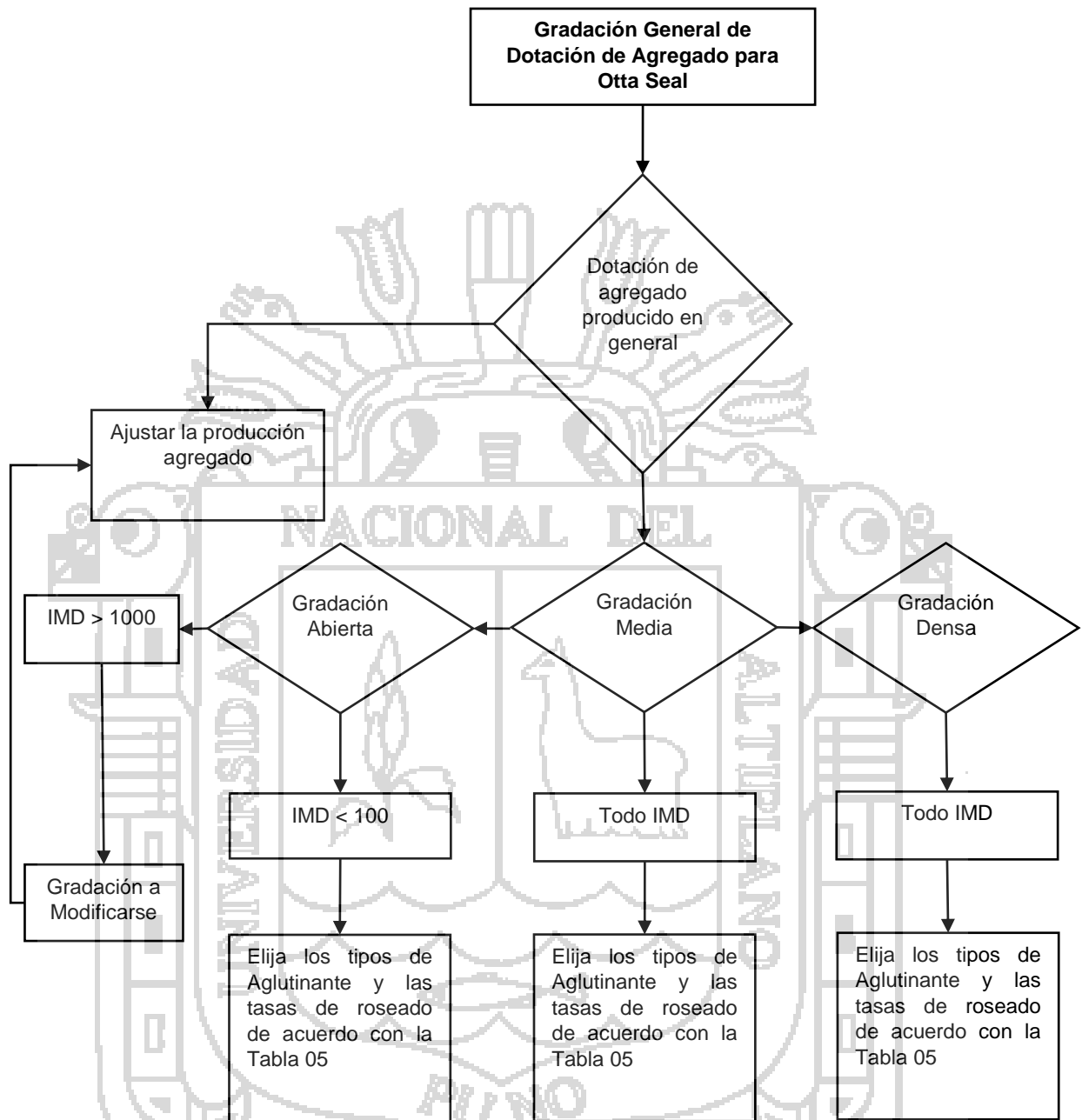


Figura 01. Diagrama de flujo para los procedimientos de diseño de Otta Seals.

Las recomendaciones para la selección del tipo de Otta seal cuando se sabe el tipo de trabajo y el nivel de tráfico vehicular se debemos considerar el siguiente cuadro:

Niveles de tráfico y tipo de trabajo	Tipos Otta Seal
Sello temporal (desvíos, vías de transporte, accesos temporales, etc.)	Simple Otta Seal
Mantenimiento Resellado (todas las clases de tráfico para que los pavimentos rociado sean aplicables.	Simple Otta Seal
IMD inferior a 500	Simple Otta Seal + cubierta de sello de arena
IMD de más de 500	Doble Otta Seal

Tabla 01. Recomendaciones Tipo de Otta Seal en relación con los niveles de tráfico.

2.1.2.3. De las Características del Agregado.

El diseño de Otta Seals permite una variedad de gradación en los agregados que se utilizara siempre y cuando la curva de gradación caiga dentro del área designada de la dotación de gradación general y va como "suave" y en paralelo a la dotación como sea posible.

Como guía para el diseñador de Otta Seals, tres dotaciones de gradación, en función al tráfico, se han elaborado para permitir un diseño más racional. Sin embargo, el diseñador debe tener siempre en cuenta que en general todo tipo de agregado que cae dentro de las especificaciones generales de dotación puede ser utilizado siempre que la viscosidad del ligante y las tasas de rociado estén diseñadas en acuerdo.

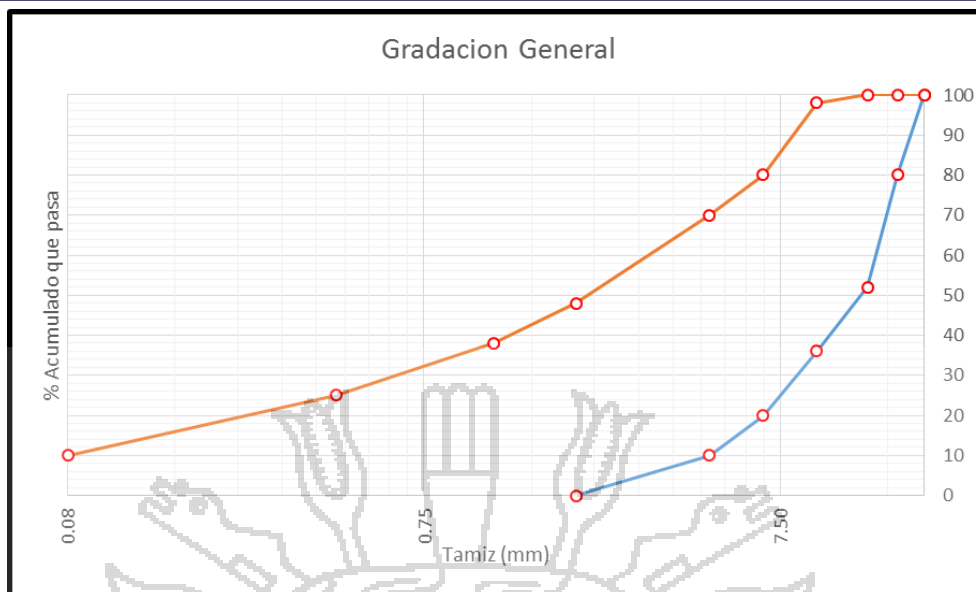


Figura 02. Condiciones generales de Gradación de los agregados.

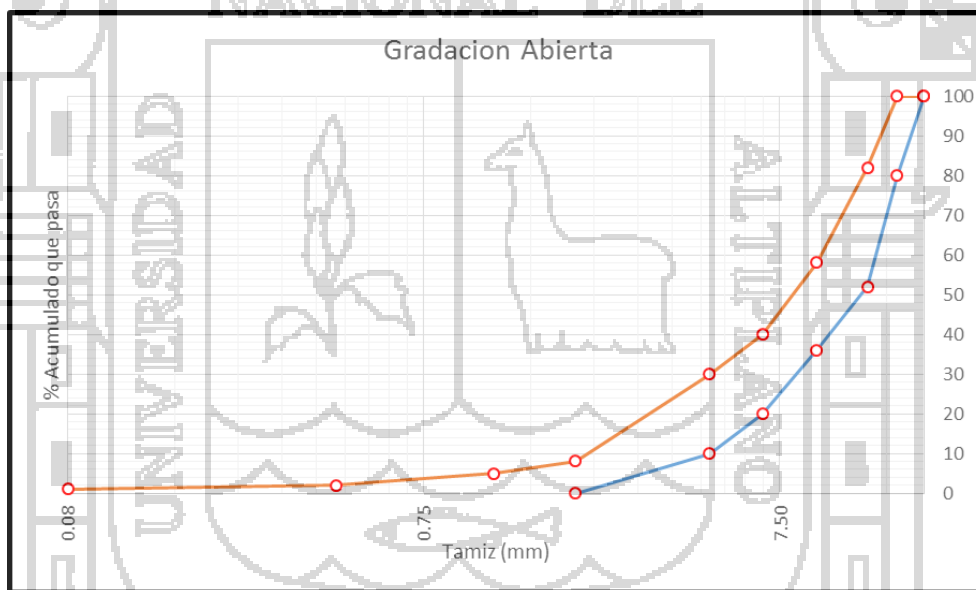


Figura 03. Condiciones para una gradación Abierta.

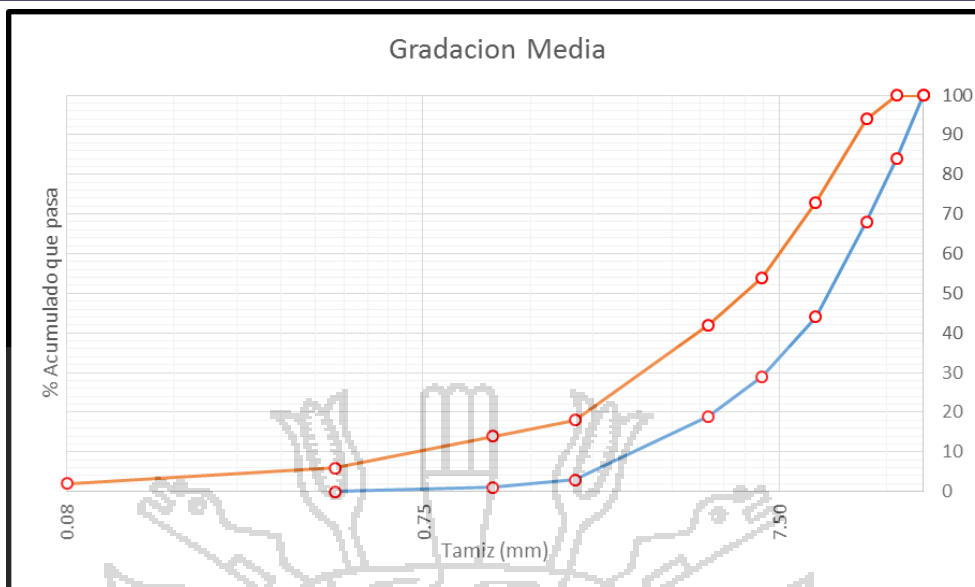


Figura 04. Condiciones para una gradación Media.

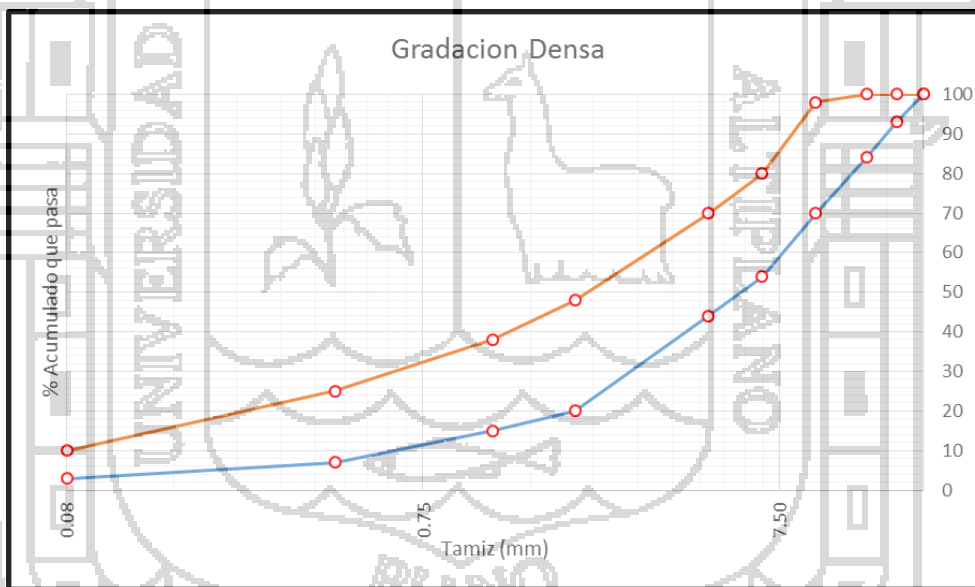


Figura 05. Condiciones para una gradación Densa.

Alternativas de dotación de agregado				
Tamiz tamaño (mm)	Gradación Abierta (% pasa)	Gradación Media (% pasa)	Gradación Densa (% pasa)	AASHTO o BS Designación de la prueba
19.00 - 3/4"	- 100	- 100	- 100	T 146-49
16.00 - 5/8"	80 - 100	84 - 100	93 - 100	BS 1377
13.20 - 0.53"	52 - 82	68 - 94	84 - 100	
9.50 - 3/8"	36 - 58	44 - 73	70 - 98	
6.70 - 1/4"	20 - 40	29 - 54	54 - 80	
4.75 - No. 4	10 - 30	19 - 42	44 - 70	
2.00 - No. 10	0 - 8	3 - 18	20 - 48	
1.18 - No. 16	0 - 5	1 - 14	15 - 38	
0.425 - No. 40	0 - 2	0 - 6	7 - 25	
0.075 - No. 200	0 - 1	0 - 2	3 - 10	

Tabla 02. Recomendaciones Tipo de Otta Seal en relación con los niveles de tráfico.

La única limitación respecto a la gradación de agregado utilizado en un Otta Seal es con respecto a la opción gradación abierta que no se debe utilizar para el tráfico con volúmenes por encima de IMD 1000.

IMD	MEJOR CLASIFICACIÓN ADECUADA
Menos que 100	"abierto"
100-1000	"medio"
Más que 1000	"denso"

Tabla 03. Gradación conveniente para diferentes tipos de tráfico.

2.1.2.4. De las Características del Material Bituminoso.

El bitumen a utilizar depende del tráfico vehicular presente y el tipo de agregado disponible para la ejecución del proyecto.

En la tabla que sigue se muestra los tipos de aglutinante que se deben utilizar según el tráfico y el tipo de gradación del agregado.

Elección del Tipo Bitumen Según la Clasificación de Trafico			
IMD en el momento de la construcción	Tipo de Asfalto		
	Gradación Abierta	Gradación Media	Gradación Densa
> 1000	No aplicable	150/200 PEN	MC 3000 MC 800 en clima frio
100-1000	150/200 PEN	150/200 PEN en clima frio	MC 3000 MC 800 en clima frio
< 100	150/200 PEN	MC 3000	MC 800

Tabla 04. Tipo de Bitumen según el tráfico y el agregado.

2.1.2.5. Tasa de Rociado del Aglutinante.

Los tipos de aglutinante requerido rociado para Otta Seal varía en función de la los siguientes parámetros:

- Del tráfico (IMD).
- Granulometría (abierta / media / densa).
- La capacidad de absorción de las partículas de agregado.
- Si la capa de base está preparado o no.

Tasas de rociado en caliente inferior a 1,5 l/m² no se debe permitir.

Para los agregados con una absorción de agua de más de 2%, la tasa de roseado en caliente se debe aumentar en un 0,3 l/m².

En el caso de que se ha imprimado la base la tasa de roseado en caliente deberá reducirse en un 0,2 l/m² de la primera capa.

Tasa de Rociado de Material Bituminoso					
Tasa de rociado de asfalto caliente en la capa base No imprimada (l/m ²)					
Tipo de Otta Seal		Gradación Abierta	Gradación Media	Gradación Densa	
				IMD<100	IMD>100
Doble	1ra Capa	1.6	1.7	1.8	1.7
	2da Capa	1.5	1.6	2.0	1.9
Simple con un sello de arena	Arena fina	0.7	0.7		0.6
	Triturado de polvo o arena gruesa de río	0.9	0.8		0.7
	1ra capa	1.6	1.7	2.0	1.9
Simple (*)		1.7	1.8	2.0	1.9
Sello de mantenimiento (simple)		1.5	1.6	1.8	1.7

Tabla 05. . Tasa de rociado del aglutinante.

2.1.2.6. Tasa de Rociado del Agregado.

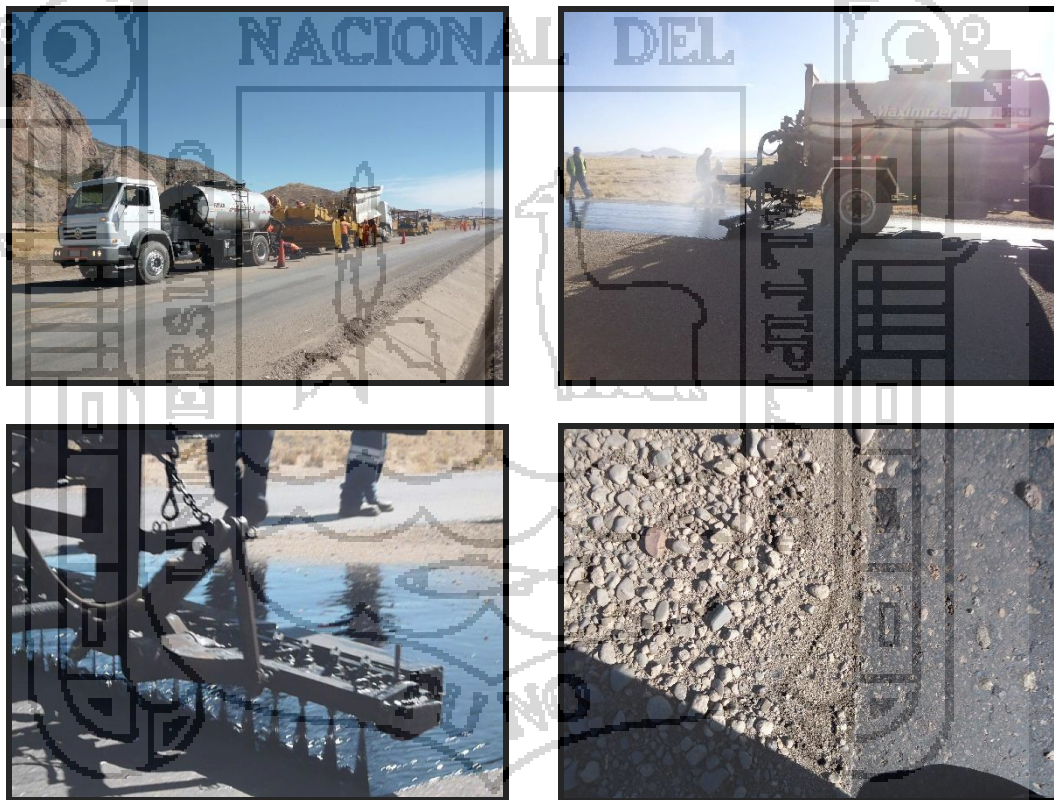
Es importante aplicar una cantidad suficiente de agregado para asegurarse de que hay algo de material sobrante durante el neumatizado y durante el período inicial de curado del sello. El empotramiento del agregado normalmente tarda alrededor de 2 a 3 semanas para lograr que agregado triturado se use, después de lo cual cualquier exceso de agregado puede ser barrido. Donde se utilice la grava natural el período de curado inicial será considerablemente más larga.

Tasa de aplicación de agregado			
Tipo de Sello	Tasas de expandido de agregado (m ³ /m ²)		
	Gradación Abierta	Gradación Media	Gradación Densa
Otta Seal	0.013 - 0.016	0.013 - 0.016	0.016 - 0.020
Sello de Arena	0.010 - 0.012		

Tabla 06. Tasa de Aplicación del agregado.

2.1.3. Experiencias en su Utilización.

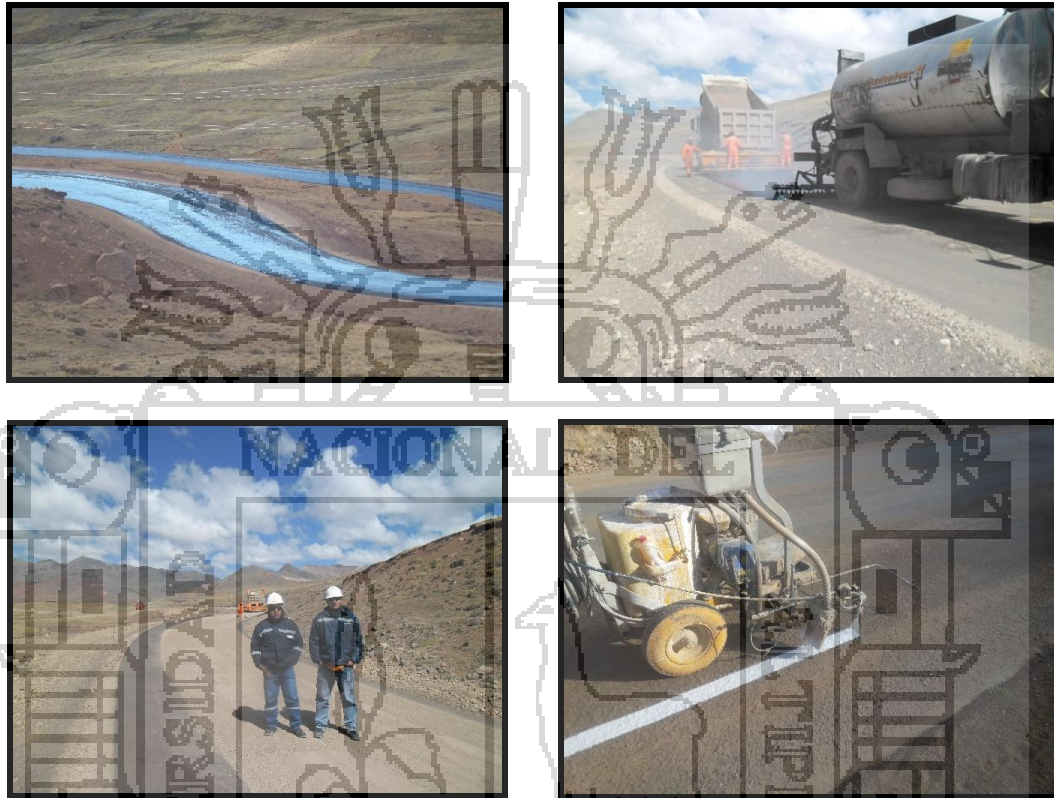
El Ministerio de Transportes y Comunicaciones por medio del Proyecto Especial de Infraestructura del Transporte Nacional (PROVIAS NACIONAL), Realiza la conservación de las vías por medio de contratos de conservación por niveles de servicio, estos proyectos se ejecutan en las diferentes regiones del territorio Peruano, es así que en la región Puno se utilizó la técnica del Otta seal en el tramo carretero Calapuja - Pucara (39 Km), el tipo de Otta seal que se aplicó a la vía en mantenimiento es de Doble Otta Seal.



Fotografía 01. Trabajos de Otta seal en tramo Calapuja – Pucara (39 Km).

También se utilizó esta técnica en la región Huancavelica en el tramo Huancavelica – Santa Inés con un total de 62 Km, en este caso se utilizó el Simple Otta seal en algunos tramos y el Simple Otta seal con sello de arena en

otros tramos, bajo la consideración de que en esta vía el tráfico vehicular es mucho menor al que se presenta en el tramo de la región Puno mencionado en el párrafo anterior.



Fotografía 02. Trabajos de Otta seal en tramo Huancavelica – Santa Inés (62 Km).

2.1.4. Ventajas y Desventajas en su Aplicación y Uso.

Ventajas.

- La ventaja con respecto a otros tipos de pavimento es el aspecto económico.
- No es necesario contar con una gran cantidad de maquinaria pesada.
- Se puede trabajar con el material disponible en la zona de trabajo, ríos cercanos y canteras que cumplan con la gradación general.
- La gradación general admite casi todo tipo de material.

- La aplicación es muy sencilla y a su vez rápida.
- Se puede abrir el tránsito después de horas de su aplicación a mayor tránsito se reducirá el tiempo de curado del Otta seal.

Desventajas.

- No cumple una función estructural de transmisión de esfuerzos.
- Al mezclar el material bituminoso con el agregado se forma un material muy maleable, lo cual provoca que se reflejen las imperfecciones en las capas inferiores.
- Cuando el agregado contiene mucho fino el tráfico vehicular puede provocar polvaredas que podrían traer como consecuencia accidentes que lamentar.
- En los primeros días es necesario la vigilancia de la exudación del bitumen para su posterior arenado ya que si no se procede de esa forma el material bituminoso se pegara a los neumáticos de los vehículos desprendiéndose del pavimento.
- Es necesario un mantenimiento rutinario de la capa de tratamiento superficial para evitar daños en las capas inferiores del pavimento.

2.2. Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

La funcionalidad de la superficie de una carretera es de suma importancia porque de esto depende la comodidad y seguridad que experimentan los usuarios y a su vez la funcionalidad determina los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de la carretera. Además de la regularidad superficial de la carretera depende la velocidad de circulación, consumo de las

llantas y el consumo de combustible y esto se traduce en el costo para el usuario.

Es muy importante conocer el estado de vía regularidad superficial de la carretera en cualquier momento de la operación de la misma, para tomar acciones de reversión y corrección correspondientes, las investigaciones del Banco Mundial han demostrado que corregir los defectos y deterioros superficiales de una carretera resultan más económicos que la rehabilitación de la misma.

Para determinar evaluar la regularidad superficial de una vía está el parámetro denominado Índice de Regularidad Superficial (IRI), el cual refleja la comodidad que tiene el usuario al transitar por la carretera.

Los antecedentes se remontan a la década de los 70's cuando El Banco Mundial patrocinó algunos programas de investigación para analizar algunas decisiones que debían adoptar los países desarrollados: ¿deberían los gobiernos prestar dinero para construir carreteras de calidad con altos costos o deberían ahorrar dinero con vías de menor calidad y más baratas? La rugosidad de las vías fue identificada con el factor más importante en cuanto a la calidad y el costo. El estudio encontró que los datos de rugosidad medidos en diferentes partes del mundo eran diferentes y no comparables debido a que los métodos utilizados no eran estables en el tiempo (Sayers et al. 1986a).

2.2.1. Definición del IRI.

La sociedad americana de ensayos y materiales (ASTM) en la norma E-867 define la rugosidad como la desviación de la superficie del pavimento respecto a una superficie plana que afecta la dinámica de los vehículos, la calidad de los viajes, las cargas dinámicas y el drenaje. La rugosidad también puede ser definida como la distorsión de la superficie de la vía que causa aceleraciones verticales indeseables contribuyendo a la incomodidad del viaje (Perera & Kohn, 2002).

El IRI es una escala de la regularidad superficial de una vía, propuesta por el Banco Mundial como estadística estándar de la rugosidad que determina la influencia del perfil longitudinal de la carretera en la calidad de la rodadura, se expresa en metros por kilómetros (Sayers y Karamihas, 1996).

El cálculo del índice de rugosidad internacional IRI está basado en el comportamiento del modelo matemático "Quarter Car", que simula la función y las masas de la cuarta parte de un vehículo que circula por la vía a una velocidad promedio de 80 Km/h, la acumulación de los desplazamientos de vertical de la masas dividido entre la distancia recorrida, da como resultado el IRI en dimensiones de pendiente. (m/Km).

Factores que Afectan la Rugosidad de los Pavimentos.

Las investigaciones han demostrado que existen muchos factores que afectan la regularidad superficial del pavimento de estos lo más relevantes son:

- Edad del pavimento.
- Niveles de tráfico vehicular.
- Espesores del pavimento.
- El numero estructural.
- Las propiedades del concreto asfáltico utilizado: vacíos con aire, gravedad específica y el contenido de asfalto.
- Las características del medio ambiente: Temperatura promedio, precipitaciones pluviales (días de lluvia), índice de congelamiento, días con temperatura superior a 32°C.
- Propiedades de la base granular como el contenido de humedad y el porcentaje de material que pasa la malla 200.
- Propiedades de la sub rasante como el índice de plasticidad, contenido de humedad, contenido de limos y arcillas, y porcentaje de material que pasa la malla 200.
- Extensión y severidad de las fallas en el pavimento.

2.2.2. Bondades de un Pavimento Sin Irregularidades.

Los pavimentos sin irregularidades brindan al usuario la comodidad al transitar y a su vez un pavimento sin irregularidades trae como consecuencia positiva en

comparación con un pavimento con superficie irregular:

- Disminución de las cargas dinámicas en os pavimentos.
- La regularidad de un pavimento se conserva por más tiempo.
- La vida de servicio aumenta.
- Disminuye el consumo de combustible y el costo de mantenimiento del vehículo
- Disminuye el costo de mantenimiento del pavimento.

2.2.3. Equipos Para la Medición del IRI.

A la actualidad se han desarrollado una variedad de equipos para la medición del IRI, en el Perú estos equipos son utilizados para la evaluación de pavimentos de la red vial nacional a través de las entidades públicas y privadas Nacional, Regional y Local.

Los equipos para la medición de la Regularidad superficial del Pavimento, difieren uno del otro por la precisión de los resultados obtenidos, la rapidez en la obtención de los datos y la complejidad del sistema que gobierna su funcionamiento.

EQUIPO	GRADO DE PRESICION	IMPLEMENTACION	COMPLEJIDAD DEL EQUIPO	OBSERVACIONES
Perfilografos (Profilographs)	Media	Control de calidad y recepción de obras	Simple	Estos equipos no son prácticos para la evaluación de las redes viales
Tipo Respuesta para medir la regularidad de las carreteras (Response - Type Road Roughness measuring Sytems, RTRRMS)	Media	Monitoreo de red vial	Compleja	los resultados obtenidos entre estos equipos no son comparables, ya que dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo y no son estables en el tiempo
Nivel y Mira	Muy alta	Mediciones de perfil de pavimento y calibraciones	Simple	el uso de estos equipos para proyectos largos no es práctico y los costos son elevados
Dipstick	Muy alta	Mediciones de perfil de pavimento y calibraciones	Muy Simple	se utiliza para mediciones del perfil de pavimento en longitudes pequeñas
Perfilometro Inercial (inertial profilometer)	Muy alta	Monitoreo y recepción de proyectos viales	Muy compleja	Equipos con alta precisión permiten la comparación de resultados y son estables en el tiempo. Pueden ser utilizados para la calibración de los equipos Tipo Respuesta.

Tabla 07. Algunos equipos para la medición del IRI (adaptado de FHWA, 2006).

A continuación la descripción de los equipos presentados en la tabla anterior.

Perfilógrafos (Profilographs).

Numerosos modelos de perfilógrafos han sido usados desde 1900 y han existido en una variedad de formas, configuraciones, y marcas. Debido a su diseño éstos no son prácticos. Un perfilógrafo consiste en una viga o cercha (marco) con un sistema de soporte de ruedas al principio y al final, y una rueda en el centro, que sirve para medir las desviaciones.

En la actualidad es utilizado el Perfilógrafo de California, en el cual su uso más común es para la inspección de construcciones de pavimentos rígidos, control de calidad, y aceptación de proyectos. Existen diferencias entre perfilógrafos, los cuales están relacionados con la configuración de las ruedas, el funcionamiento y procedimientos de medida de los dispositivos.

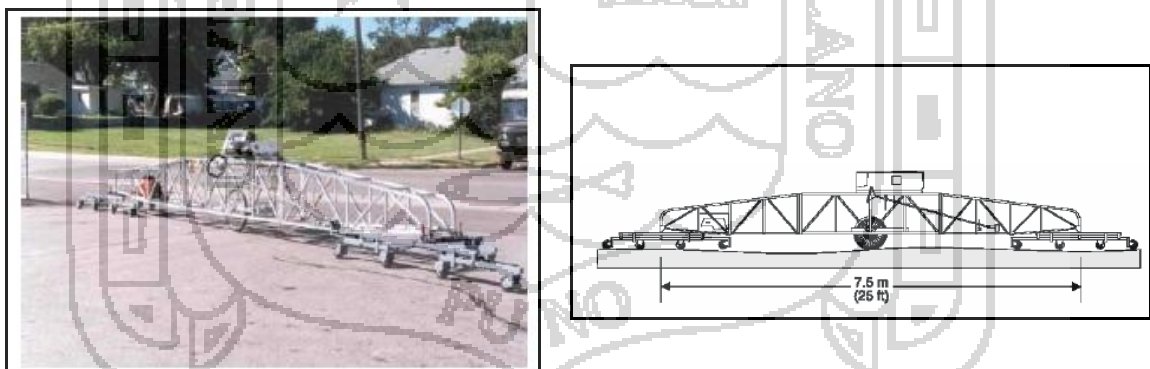


Figura 06. Perfilógrafo (FHWA, 2006).

Equipos Tipo Respuesta (RTRRM).

La recolección de datos de regularidad, también es realizada a través de

equipos Tipo respuesta (Response Type Road Roughness Meters, RTRRM), “medidores de caminos”. Estos son adecuados para el monitoreo rutinario de una red pavimentada y para proporcionar una visión global de la condición y el mantenimiento necesario.

Lo equipos RTRRM miden los movimientos verticales del eje trasero de un automóvil o el eje de un remolque relativo al marco del vehículo. Los medidores se instalan en los vehículos con un transductor de desplazamiento localizado entre la mitad del eje y el cuerpo del automóvil o remolque el transductor detecta pequeños incrementos de movimiento relativo entre el eje y el cuerpo del vehículo. La ASTM en la norma E 1082 “Standard test method for measurement of vehicle response to aveled surface roughness” especifica los procedimientos para la medición de la rugosidad con equipos tipo respuesta.

La desventaja de un RTRRM es que el movimiento del eje del vehículo vs tiempo depende de la dinámica de un vehículo particular, lo que produce efectos no deseados tales como:

- Las medidas de regularidad no son estables con el tiempo. Las medidas realizadas recientemente con un RTRRM, no pueden ser comparadas con aquellas mediciones realizadas en años anteriores.
- Las medidas de regularidad no son transportables. Las mediciones realizadas por un RTRRM que utiliza un determinado sistema son raramente reproducibles por otro aún si el vehículo es

estandarizado.

- La velocidad del viaje afecta las mediciones. La velocidad de viaje del vehículo afecta la respuesta del sistema. Si en la misma sección se toman medidas de rugosidad con el mismo equipo y diferentes velocidades, los resultados obtenidos serán diferentes.

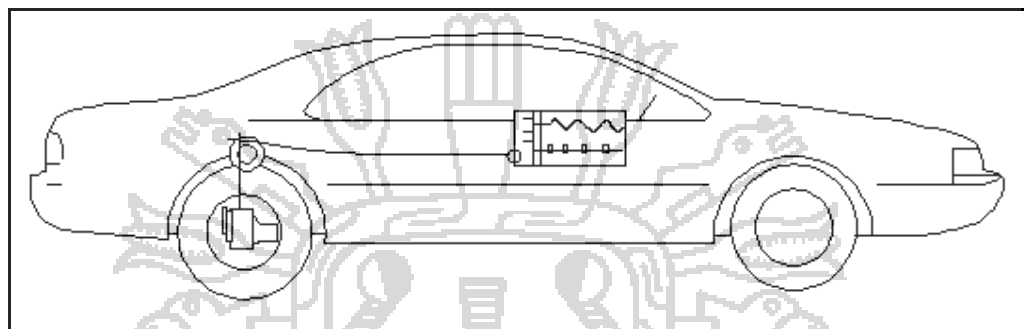


Figura 07. Equipo Tipo respuesta (Response Type Road Roughness Meters, RTRRM).

Nivel y Mira (Rod and Level).

Es conocido como perfilómetro manual y es quizás el método más preciso para obtener las elevaciones reales de la superficie del pavimento, es considerado de bajo rendimiento debido a que el proceso de recolección de datos es relativamente lento en comparación con otros equipos. Se considera que para la evaluación de la regularidad de la superficie de rodadura de proyectos de gran magnitud es impráctico y de alto costo. Sin embargo, este tipo de equipo tiene una gran precisión y puede obtener una medida exacta del perfil del pavimento. (Sayers et al. 1986b).

La especificación E1364 de la ASTM "Test method for measuring road roughness by static level method" presenta una guía para la medición el perfil de las vías con este equipo. El parámetro más importante para la toma de

datos por este método es que la resolución del nivel cumpla con los requerimientos dados por la ASTM.

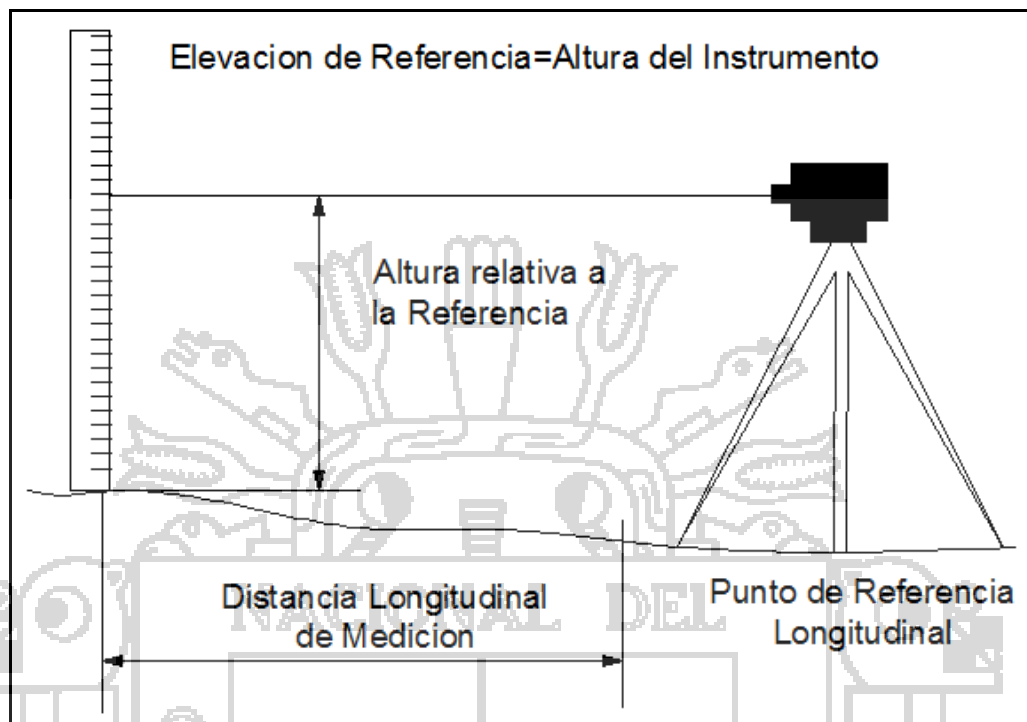


Figura 0 8. Nivel y Mira (Rod and Level).

Dipstick.

Los equipos Dipstick pueden usarse para obtener una cantidad relativamente pequeña de medidas del perfil de pavimento. El Dipstick consiste en un inclinómetro soportado en dos apoyos separados por 305 mm (12”), los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro. El operador conduce el Dipstick sobre una sección de pavimento pre marcada, rotando el instrumento alternadamente sobre cada apoyo. Se registran las lecturas secuencialmente mientras el operador recorre la sección. El dispositivo registra 10 a 15 lecturas por minuto. El software de análisis es capaz de proporcionar un perfil exacto a ± 0.127 mm (± 0.005 ”). El Dipstick comúnmente es usado para medir un perfil para la calibración de instrumentos más complejos, tal

como el RTRRM, así mismo para la verificación de resultados obtenidos con los Perfilómetros Inerciales.

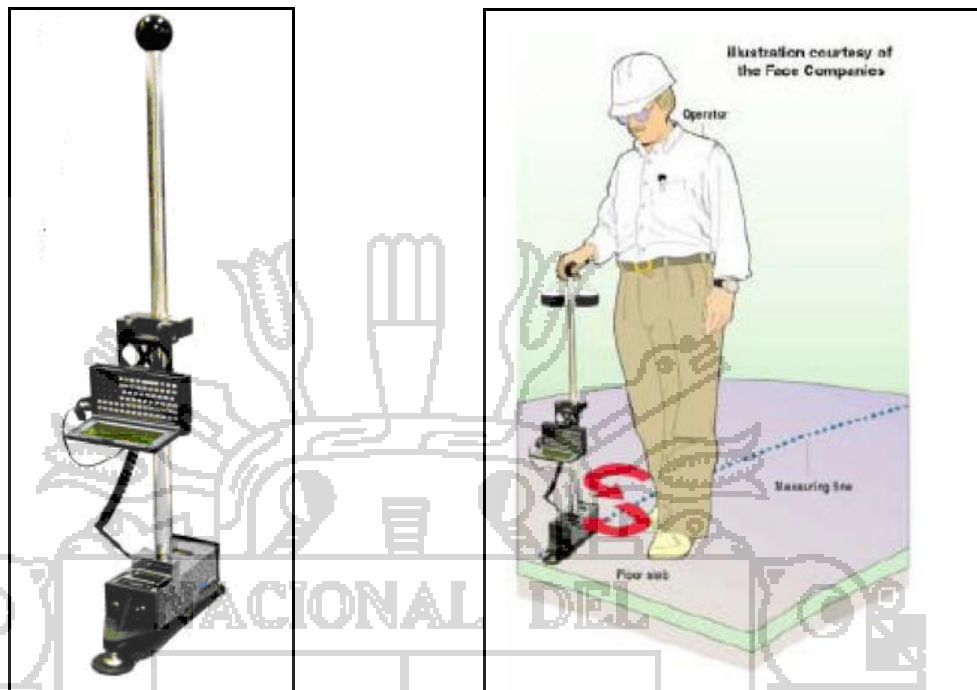


Figura 0 9. Dipstick. (FHWA, 2006).

Perfilómetro Inercial (Inertial Profilometer).

Los equipos de referencia inercial son equipos que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil de la carretera. Estos equipos producen medidas continuas del perfil longitudinal a altas velocidades a través de una creación de una referencia inercial integrada por acelerómetros colocados en un vehículo para obtener el movimiento vertical del mismo (aceleración vertical) y sensores que no son de contacto, tipo láser, que miden el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. Generalmente son llamados perfilómetros de alto rendimiento ya que son muy precisos y generan el perfil longitudinal de la vía en real. Sus principales componentes son: Sensores de altura, acelerómetros, sistema medidor de distancia, y un

computador con su respectivo software para el cómputo del perfil de la calzada.

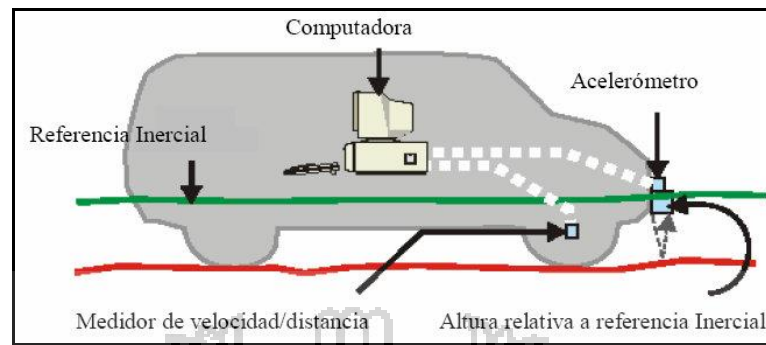


Figura 10. . Perfilómetro Inercial (Inertial Profilometer).



Figura 11. Perfilómetro Inercial (FHWA, 2006).

2.2.4. Clasificación de Equipos Para la Medición del IRI.

Para la clasificación de los equipos para la medición de la regularidad superficial de caminos tanto el Banco Mundial en su documento técnico N° 46 “Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements”, como la norma ASTM E-950-98 consideran el intervalo de almacenamiento y la resolución de la medida que los diferentes equipos pueden ofrecer para su clasificación. La siguiente tabla muestra la comparación de la clasificación del Banco Mundial y la norma ASTM.

Clasificación del equipo	Clasificación según el Banco Mundial Documento técnico N° 46 (Sayers et al., 1986)	Clasificación según ASTM E-950-98	
		Intervalos de almacenamiento	Resolución de las medidas verticales
CLASE 1	Perfilómetros de precisión. Requiere que el perfil longitudinal sea medido como una serie de puntos de elevación equidistantes a través de la huella de la vía para calcular el IRI. Esta medida no debe sobrepasar los 0.25 m y la recisión de medición de la elevación debe ser superior 0.5 mm para pavimentos con IRI entre 1 y 3 m/km y de 3 mm para valores del IRI entre 10 y 20 m/km	Menor o igual a 25 mm	Menor o igual a 0.1 mm
CLASE 2	Otros métodos. Requieren una frecuencia de puntos del perfil no superior a 0.5 m y una precisión en la medida de elevación de 1 mm para IRI entre 1 y 3 m/km y 6 mm para valores de IRI entre 10 y 20 m/km	Mayor que 150 mm hasta 300 mm	Mayor que 0.1 mm hasta 0.2 mm
CLASE 3	IRI estimado mediante ecuaciones de correlación. La obtención del perfil longitudinal se hace mediante equipo tipo respuesta (RTRRM), los cuales han sido previamente calibrados con perfilómetros de precisión mediante ecuaciones de correlación	Mayor que 25 mm hasta 150 mm	Mayor que 0.2 mm hasta 0.5 mm
CLASE 4	Estimaciones subjetivas y mediciones no calibradas. Incluyen mediciones realizadas con equipos no calibrados, estimaciones subjetivas con base en la experiencia en la calidad del viaje o inspecciones visuales a las vías	Mayor que 300	Mayor que 0.5 mm

Tabla 08. Clasificación de equipos para la medición del IRI

2.2.5. La Escala de Valores de IRI del Banco Mundial.

El Banco Mundial en 1986 propuso las escalas de medición del IRI en pavimentos de concreto asfáltico y aquellos con tratamientos superficial así como también para aquellas carreteras cuya superficie de rodadura es a nivel de afirmado y/o trochas carreteras.

Además de estas escalas de medición propuestas por el Banco Mundial, la norma ASTM E 1926, también presenta una escala de medición de la regularidad superficial del pavimento.

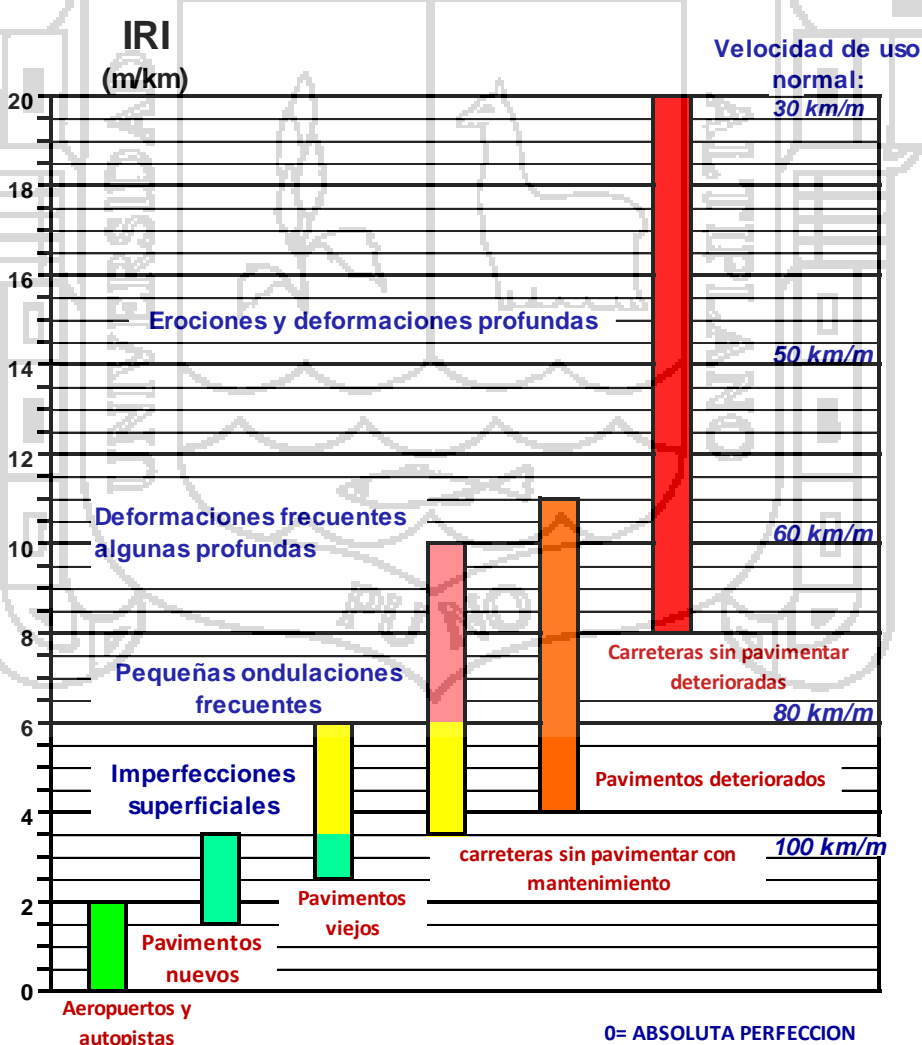


Figura 12. Escala de rugosidad IRI.

IRI (m/km)	
0	Manejo confortable arriba de 120 km/h. Ondulación levemente perceptible a 80 km/h en rango entre 1.3 y 1.8. Depresiones, baches o corrugaciones no son fácilmente visibles; depresiones < 2mm/3m.
3	Manejo confortable entre 100 y 120 km/h. A 80 km/h, movimientos moderadamente perceptibles o largas ondulaciones pueden ser percibidos. Superficie defectuosa: depresiones ocasionales, parches o baches (por ejemplo 5-15 mm/3 m o 10-20mm/5m con frecuencia.
6	Manejo confortable entre 70 y 90 km/h, grandes movimientos perceptibles y oscilaciones. Usualmente asociados con defectos: frecuentes depresiones moderadas y variables o parches (por ejemplo 15-20mm/3m o 20-40mm/5m con frecuencia 5-3 en 50 m) o baches.
9	Manejo confortable entre 50-60 km/h, frecuentes movimientos puntuales u oscilaciones. Asociados con severos defectos: frecuentes depresiones profundas y variables o parches (por ejemplo 20-40 mm/3m o 40-80mm/5m con frecuencia de 5- en 50 m) o frecuente.
11	Necesario reducir velocidad por debajo de 50 km/h. Muchas depresiones profundas, baches y desintegración severa (por ejemplo 40-80mm de profundidad con frecuencia entre 8-16 en 50 m).

Figura 13. Escalas en la estimación de la rugosidad en pavimentos.

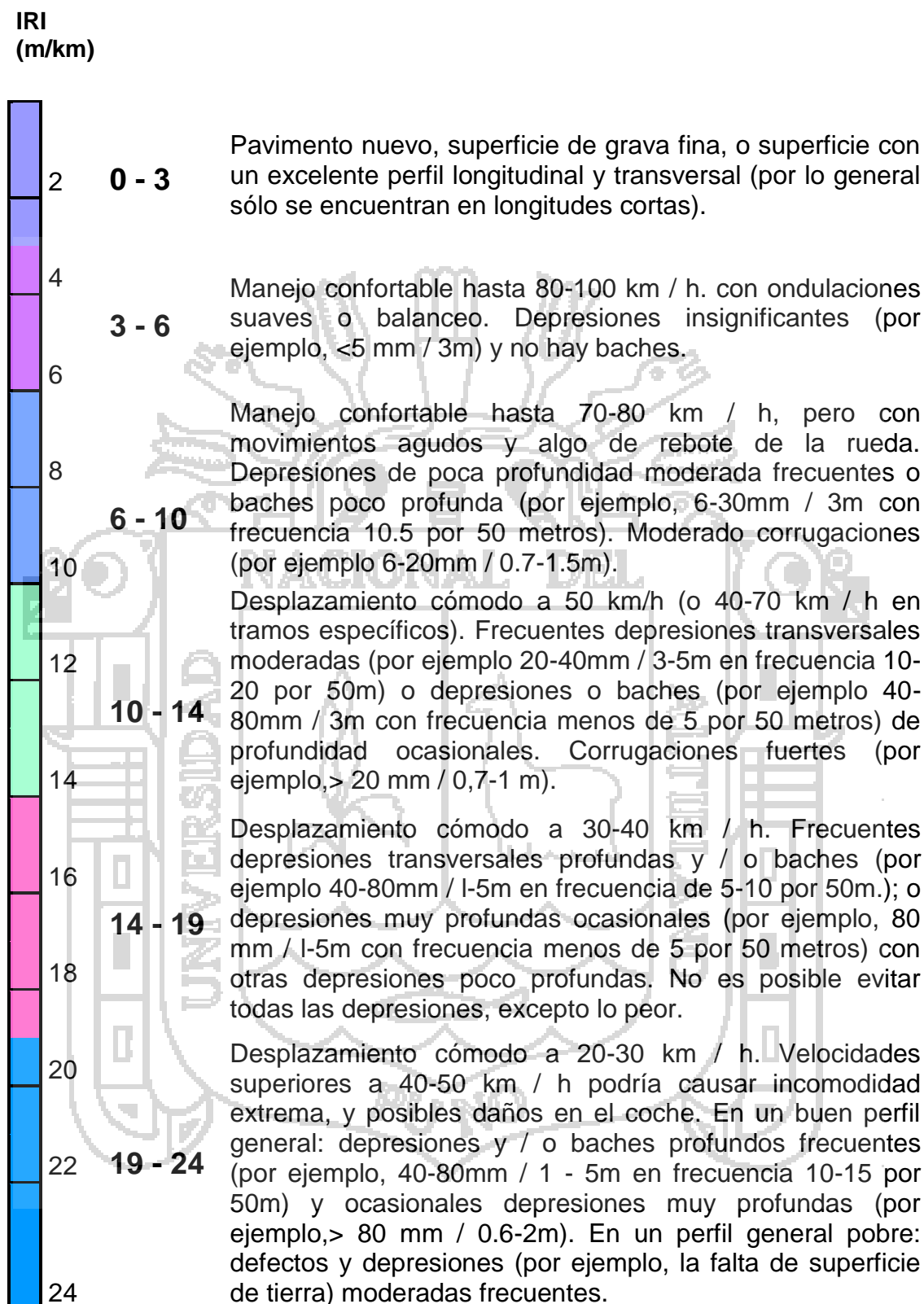


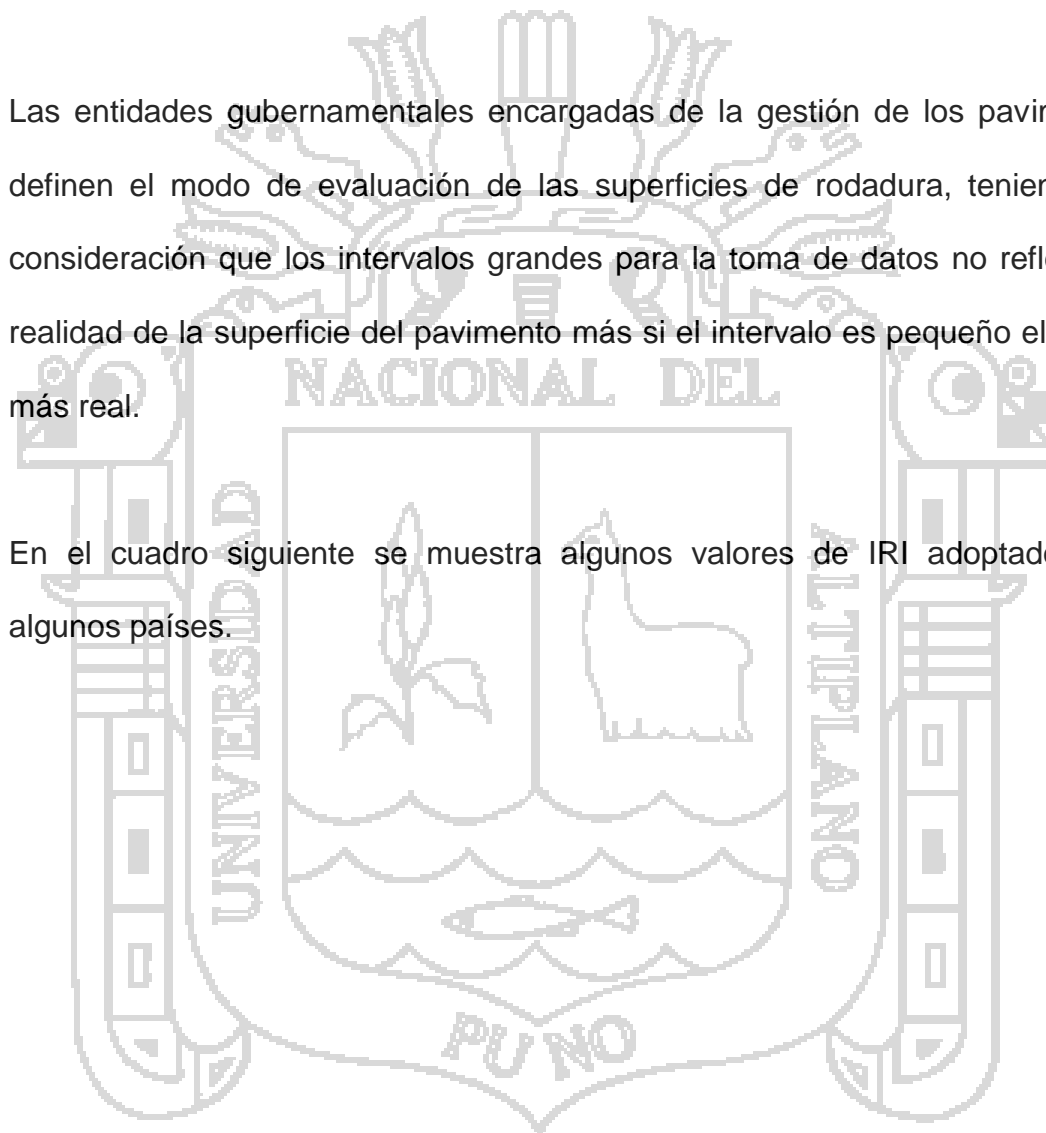
Figura 14. Escalas en la estimación del IRI en pavimento asfaltico y tratamiento superficial.

2.2.6. Valores del IRI en Entidades Públicas Internacionales.

La medición del IRI es de suma importancia para la toma de decisiones por parte de las entidades del estado y/o privadas (contratistas) que traen como consecuencia un mantenimiento, rehabilitación y/o reconstrucción.

Las entidades gubernamentales encargadas de la gestión de los pavimentos definen el modo de evaluación de las superficies de rodadura, teniendo en consideración que los intervalos grandes para la toma de datos no reflejan la realidad de la superficie del pavimento más si el intervalo es pequeño el IRI es más real.

En el cuadro siguiente se muestra algunos valores de IRI adoptados por algunos países.



Institución Pública	Requerimientos del IRI según el tipo de pavimento			
	Procedimiento general	Asfáltico	Hidráulico	Tratamientos superficiales
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos de 200m de secciones homogéneas	Promedio de 5 tramos ≤ 2 m/km Promedio individual ≤ 2.8 m /km		Promedio de 5 tramos ≤ 3 m/km Promedio individual ≤ 4 m /km
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI < 1.5 m/km en el 50% de los tramos del proyecto IRI < 2 m/km en el 80% de los tramos del proyecto IRI < 2.5 m/km en el 100% de los tramos del proyecto		
Estados Unidos (Estado de Wisconsin)	IRI obtenido en tramos de 160 (1 milla)	IRI m/km	Años	
		<1.1	0	
		<1.17	1	
		<1.29	2	-----
		<1.33	3	-----
		<1.37	4	
Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 1.2 m / km para el 70% de los tramos		-----
		IRI ≤ 1.4 m / km para el 100% de los tramos		-----
Suecia	IRI en tramos de 20 m	IRI ≤ 1.4 m/km		-----
	IRI en tramos de 200 m	IRI ≤ 2.4 m/km		-----

Tabla 09. Escalas de IRI en entidades públicas internacionales.

CAPITULO III

3. EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL CON EL RUGOSIMETRO DE MERLÍN.

3.1. Introducción al Rugosímetro Merlín.

El Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL) desarrolló el Rugosímetro MERLIN (acrónimo de la terminología inglesa Machine for Evaluating Roughness using low-cost Instrumentation), basándose en el principio del perfilómetro estático, con el objetivo de obtener un equipo de bajo costo, fácil manejo y un método de análisis simple con resultados confiables.⁵

La gran ventaja en el uso del MERLIN es la exactitud en los resultados que solo puede ser superada por el método de Mira Y Nivel. Pero también tiene la desventaja de que el rendimiento ofrecido por este equipo es muy bajo comparado con los equipos electrónicos y/o dinámicos y el problema es mayor aun cuando es necesario evaluar grandes distancias de carretera y si los

⁵ CUNDILL, M.A. MERLIN. A Low Cost Machine for Measuring Road Roughness in Developing Countries". Transportation Research Record 1291. Crowthorne, 1990.

resultados son necesarios con prontitud la utilización del MERLIN se hace improductivo⁶.

El Ing. Pablo del Águila en sus diferentes publicaciones sobre la utilización del equipo MERLIN hace hincapié en las bondades del equipo como son: la gran exactitud en los resultados obtenidos, en comparación con cualquier método dinámico y como también en el aspecto económico, siendo solamente necesario dos personas para su operación, lo cual resulta barato en comparación a los equipos dinámicos que necesitan para su operación de vehículos adicionales y el costo mantenimiento y calibración de estos su vez es relativamente alto.



Fotografía 03. Medición de rugosidad con equipo MERLIN.

3.2. Metodología Para Determinación del IRI con Rugosímetro de Merlín.

La determinación de la rugosidad de un pavimento se basa en el concepto de

⁶ DEL AGUILA, PABLO. Estado del Arte sobre la Medición de la Rugosidad de Pavimentos en el Perú. Trabajo presentado al II Congreso Nacional del Asfalto. Lima, 1998

usar la distribución de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio. El MERLIN mide el desplazamiento vertical entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante. El desplazamiento es conocido como “la desviación respecto a la cuerda promedio”⁷.

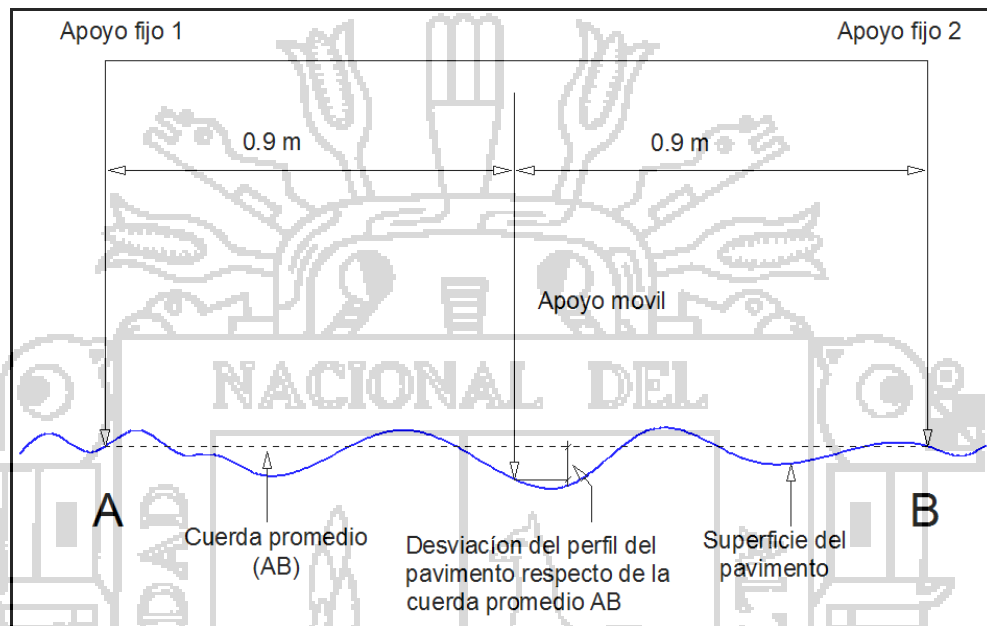


Figura 15. Desviación del pavimento respecto a la cuerda promedio.

3.2.1. Histograma de la Distribución de Frecuencias.

Se debe medir 200 desviaciones en forma continua para poder obtener el histograma de distribución de frecuencias, en el histograma existe la posibilidad de medir dispersión de las desviaciones, en la figura que sigue se muestra el parámetro estadístico “D” que representa la rugosidad del pavimento en escala MERLIN, luego de hacer la depuración de 5% (10 datos) a cada lado (cola) del histograma, el máximo rango “D” debe ser convertido a unidades IRI mediante ecuaciones de correlación.

⁷ DEL AGUILA, PABLO. Metodología para la Determinación de La Rugosidad de los Pavimentos, Lima. Perú, 1999.

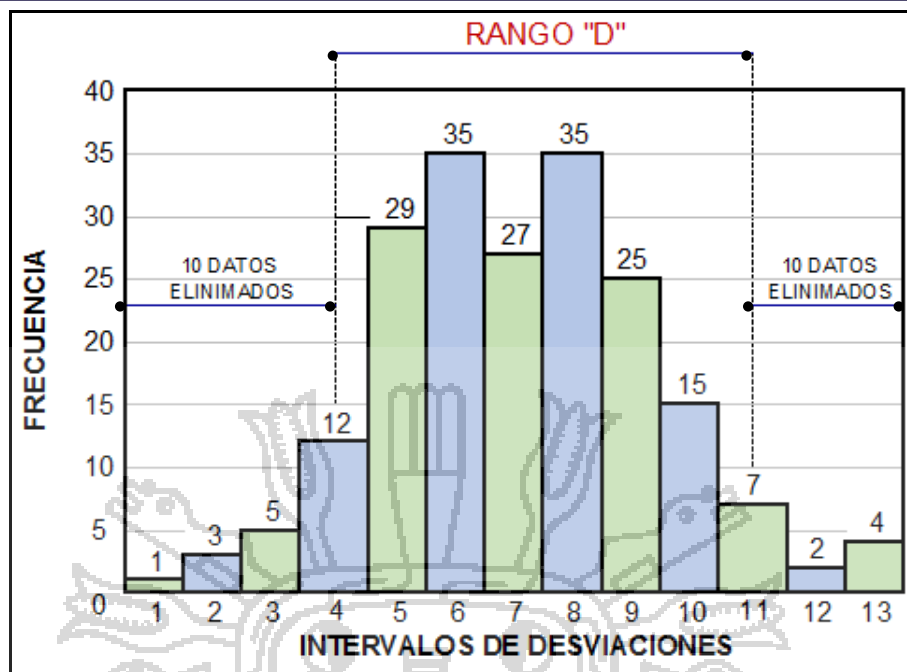


Figura 16. Histograma de la distribución de frecuencias.

3.3. Correlaciones D versus IRI.

A partir de las investigaciones por encargo del Banco Mundial en la década de los 80's se estableció como parámetro patrón para relacionar los resultados obtenidos con la gran variedad de equipos medidores del IRI.

Para relacionar la rugosidad obtenida con el MERLIN con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se deben usar las siguientes ecuaciones de correlación.

$$\text{Cuando } 2.4 < \text{IRI} < 15.9, \text{ entonces } \text{IRI} = 0.593 + 0.0471 D \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Cuando } \text{IRI} < 2.4, \text{ entonces } \text{IRI} = 0.0485 \dots\dots\dots (2)$$

La primera ecuación es una ecuación primigenia del TRRL, resultado de las investigaciones del Banco Mundial en el año 1982, la segunda ecuación es el

resultado de las investigaciones en el Perú, el cual debe ser aplicado a pavimentos nuevos o en buen estado, tal como indica la condición de su utilización en la expresión segunda.

3.4. Rugosímetro Merlín.

El Rugosímetro MERLIN, es un instrumento versátil, sencillo y económico, pensado especialmente para uso en países en vías de desarrollo⁸.

Según la clasificación de equipos para medición de la regularidad superficial de pavimentos, propuesta por el Banco Mundial, el MERLIN pertenece a la Clase 1, por obtener resultados muy exactos solo superado por el método de Mira y Nivel y además de ser una variación del perfilometro estático.

3.4.1. Esquema y Representación de las Partes de un Equipo MERLIN.

El MERLIN es un equipo sencillo y fácil operación, lo cual hace que su utilización resulte completamente económica cuando se trate de evaluar tramos cortos de carretera.

⁸ DEL AGUILA, P.M. “Proyecto de Rehabilitación de la Carretera Central, Sector Huayre-Huánuco. Estudio de Evaluación de la Rugosidad”. Informe técnico presentado a la Asociación EICA-HOB Ingenieros Consultores. Lima, octubre 1993.

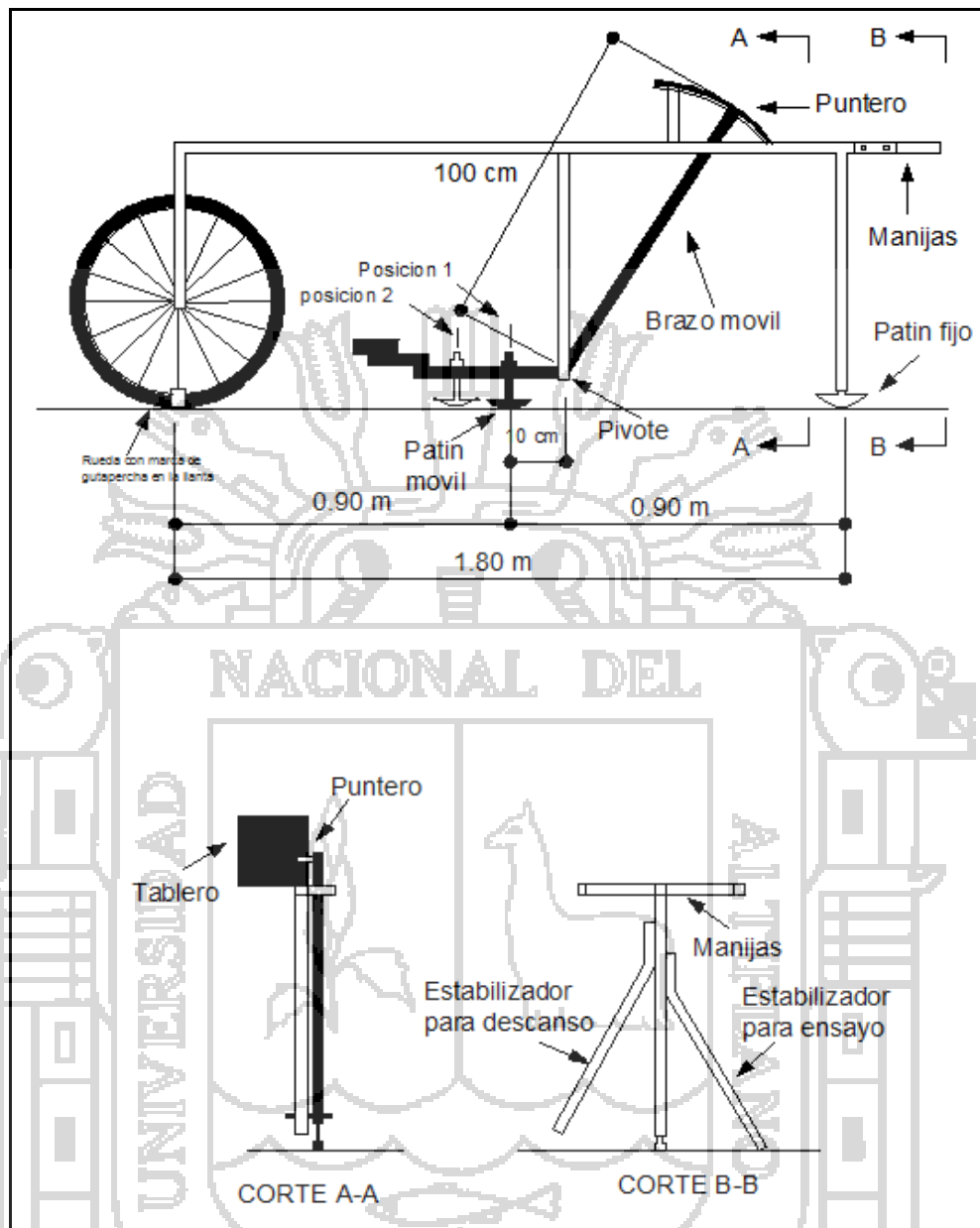


Figura 17. Esquema del Rugosímetro MERLIN.

La figura muestra las parte de un equipo MERLIN.

- Rueda con arca de gutapercha.
- Patín móvil.
- Pivote.
- Brazo móvil.
- Puntero.

- Manijas.
- Patín fijo.
- Tablero.
- Estabilizador para descanso
- Estabilizador para ensayo.

3.5. Método de Ejecución de los Ensayos.

3.5.1. El Tablero del Merlín.

La relación entre el patín móvil – pivot y pivot – puntero es de 1 a 10, lo cual da a entender que un movimiento en la parte inferior del patín móvil produce un desplazamiento de 1cm (10 mm) en el puntero.

Para registrar los movimientos del puntero, se utiliza una escala gráfica con 50 divisiones, de 5 mm de espesor cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cual se desliza el puntero.

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

Figura 18. Configuración de tablero del MERLIN.

3.5.2. Procedimiento de Ensayo.

Se debe seleccionar una longitud de tramo de carretera de aproximadamente 400m, para la ejecución del ensayo es necesario dos personas uno que opera el equipo y el otro que anota las desviaciones.

Las desviaciones detectadas por el patín móvil son indicadas en el tablero, se realizan las observaciones cada 2m, hasta completar las 200 lecturas, la velocidad de recorrido aproximado es de 2 km /h.

Las anotaciones de las observaciones realizadas deben ser hechas en un formato como el que se muestra en la figura siguiente:

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

PROYECTO : _____ OPERADOR : _____
 SECTOR : _____ SUPERVISOR : _____
 TRAMO : _____ FECHA : _____
 CARRIL : _____

ENSAYO N° KM + HORA

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

OBSERVACIONES: _____

Figura 19. Formato de recolección de datos.

Los datos recolectados se deben representar en un histograma como parte del trabajo de gabinete de la evaluación de la rugosidad del pavimento.

3.6. Método para el Cálculo de la Rugosidad

3.6.1. Calculo del Rango “D”

La dispersión de los datos obtenidos con el MERLIN se analiza calculando la distribución de frecuencias de las lecturas o posiciones adoptadas por el puntero, la cual puede expresarse, para fines didácticos, en forma de histograma. Posteriormente se establece el Rango de los valores agrupados en intervalos de frecuencia (D), luego de descartarse el 10% de datos que correspondan a posiciones del puntero poco representativas o erráticas. En la práctica se elimina 5% (10 datos) del extremo inferior del histograma y 5% (10 datos) del extremo superior. Efectuado el descarte de datos, se calcula el “ancho del histograma” en unidades de la escala, considerando las fracciones que pudiesen resultar como consecuencia de la eliminación de los datos⁹.

Debemos de tener en cuenta que cuando en el tablero el puntero indica valores cercanos a 25, el pavimento es menos rugoso y si en cambio está muy alejado de 25, indica que el pavimento presenta muchas imperfecciones.

El rango obtenido del histograma debe ser convertido a milímetros (mm), para lo cual se multiplica con el valor de cada unidad (5mm), cuando se llega a este punto se ha calculado la rugosidad en escala MERLIN en cual debe ser convertido a escala IRI.

⁹ DEL AGUILA, PABLO. Metodología para la Determinación de La Rugosidad de los Pavimentos, Lima. Perú, 1999.

3.7. Factor de Corrección para el Ajuste de “D”.

La condición de relación de los brazos del Rugosímetro de 1 a 10 en ocasiones se cambia, como consecuencia del desgaste del patín del brazo móvil, lo cual debe ser ajustado con el factor de corrección “FC”. El procedimiento de obtención de “FC” se encuentra en: “Metodología para la Determinación de La Rugosidad de los Pavimentos, Pablo del Águila Rodríguez.”

La ecuación a utilizar para el ajuste de “D” es:

$$F.C. = \frac{EP \times 10}{[(LI - LF) \times 5]} \dots \dots \dots (3)$$

Donde.

EP: Espesor de la pastilla

LI: Posición inicial del puntero

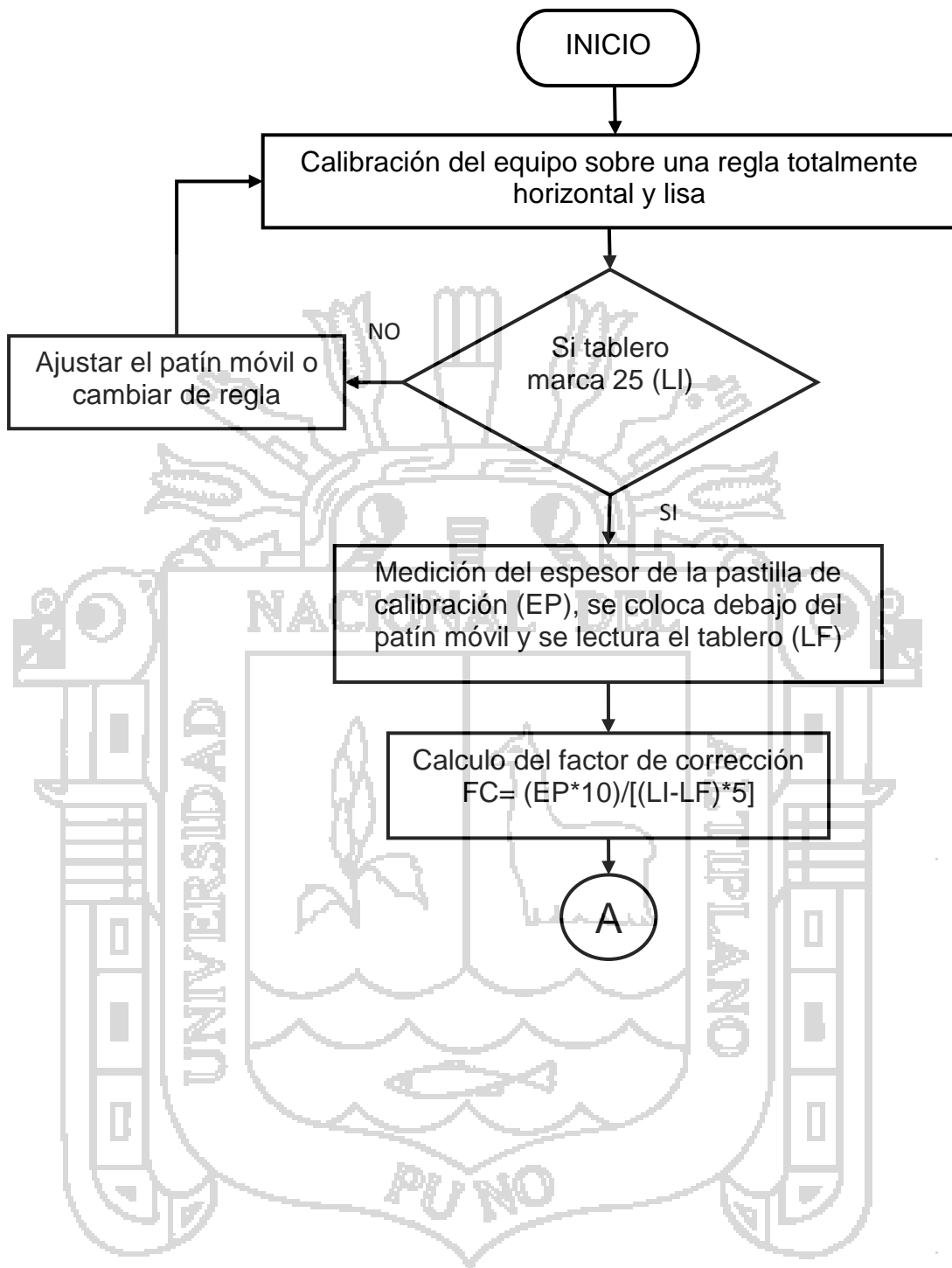
LF: Posición final del puntero

Al multiplicar el rango “D” por el F.C. se obtiene el valor de la rugosidad en “unidades MERLIN”.

3.8. Determinación de la Rugosidad en la Escala del IRI.

Mediante las ecuaciones de correlación del punto 3.3 calculamos la rugosidad del pavimento en escala “Índice de Rugosidad Internacional” IRI, teniendo presente las condiciones de ambas expresiones.

3.9. Diagrama de Flujo del Cálculo del IRI con el Merlín.



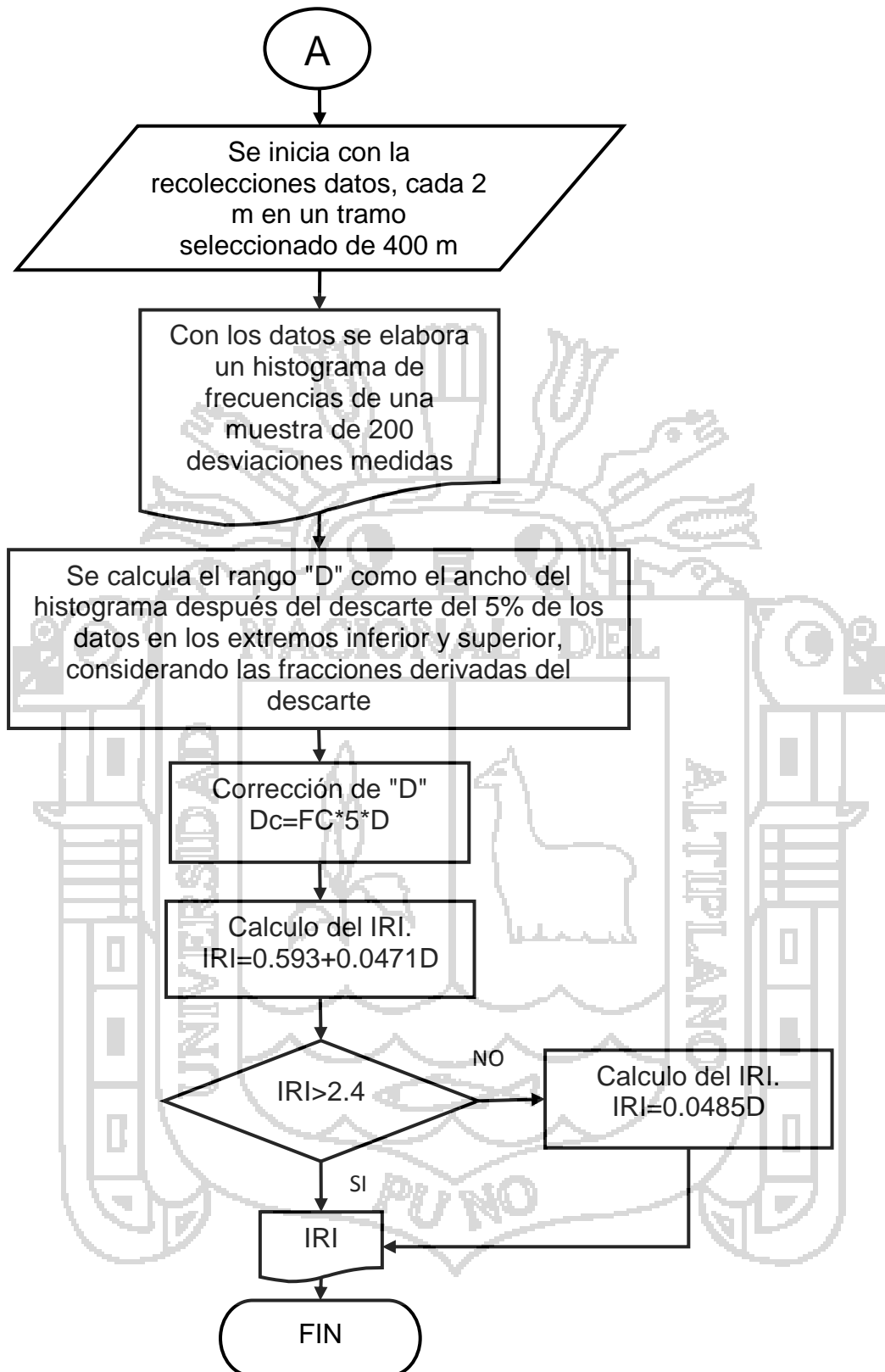


Figura 20. Diagrama de flujo para el cálculo de IRI con el MERLIN.

3.10. Aplicación Numérica del Cálculo del IRI con el Merlín.

Primero: Cálculo del Factor de Corrección.

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

EP: Espesor de la pastilla = 5

LI: Posición inicial del puntero = 25

LF: Posición final del puntero = 12

$$F.C. = (5 \times 10) / [(25 - 12) \times 5]$$

$$F.C. = 0.76923$$

Segundo: Recolección de datos en campo.

LECTURAS CAMPO																			
26	27	29	29	24	29	22	26	31	24	29	22	23	28	24	27	25	26	27	30
23	23	28	22	27	28	27	23	27	29	32	29	29	32	24	27	25	32	22	21
28	27	28	23	31	21	34	27	26	21	31	23	31	25	28	28	29	21	30	29
27	22	28	31	28	33	27	30	30	24	25	24	20	25	22	31	24	30	26	21
21	29	25	28	32	26	32	24	26	30	27	24	32	25	32	24	21	29	28	21
25	25	31	24	24	27	28	24	33	25	21	23	21	21	25	26	31	24	30	23
28	31	32	29	30	21	23	28	28	27	30	29	23	26	25	27	26	25	26	26
26	30	25	26	27	25	27	33	21	27	30	25	26	29	26	29	30	22	27	23
28	22	28	32	22	22	25	23	33	28	25	22	24	26	26	21	25	30	23	31
25	24	25	32	32	31	21	21	26	25	31	32	28	27	21	30	29	31	23	31

Tabla 10. Datos de medición del IRI.

Tercero: Graficar el histograma de frecuencias de los datos de campo.

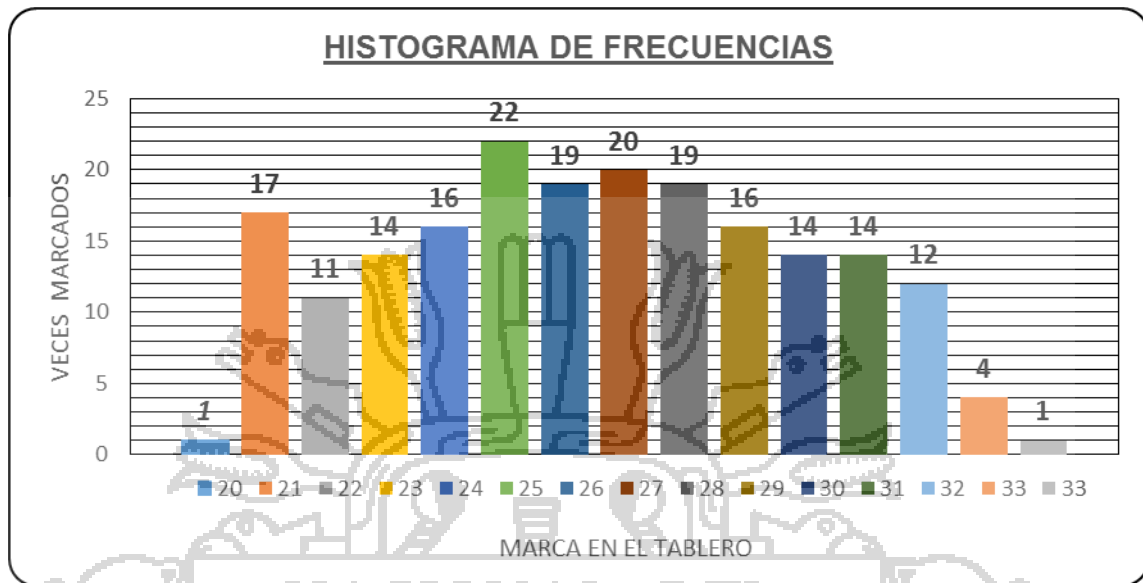


Figura 21. Histograma de frecuencias de datos de rugosidad en 400m de carretera.

Cuarto: Calcular el Rango “D”.

Para el cálculo del rango “D” eliminamos 10 datos de cada lado del histograma de frecuencias y lo restante es el rango buscado:

Lado Izquierdo: En la barra (21) quedara.

$$(17 - 9) / 17 = 0.47058$$

Lado Izquierdo: En la barra (32) quedara.

$$(12 - 5) / 12 = 0.58333$$

Entonces el rango “D” = $0.47058 + 10 + 0.58333 = 11.053$

Quinto: Corrección del rango “D”.

Para corregir el rango “D” multiplicamos por el factor de corrección (F.C.) y por

5 porque el tablero tiene 50 divisiones de 5mm cada una.

$$D_{cor} = 11.053 \times 0.76923 \times 5$$

$$D_{cor} = 42.51499$$

Sexto: Cálculo del IRI.

$$IRI = 0.593 + 0.0471 \times 42.51499$$

$$IRI = 2.595456 \text{ m/km}$$



CAPÍTULO IV

4. EL MODELO MATEMÁTICO CUARTO DE VEHÍCULO “QUARTER CAR”.

4.1. Antecedentes y Origen del Modelo “Quarter Car”.

4.1.1. Antecedentes de Modelo “Quarter Car”.

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indicarán las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino, surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de un camino, que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. Se trató de unificar los criterios de evaluación con los equipos de medición de rugosidad a nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos del tipo respuesta, que permite calificar la condición superficial de un camino no sólo en forma subjetiva. El Índice Internacional de Rugosidad, fue propuesto por el Banco Mundial en 1986, como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino.

4.1.2. Origen del Modelo “Quarter Car”.

El IRI tiene sus orígenes en un programa Norteamericano llamado National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, por sus siglas en inglés) y está basado en un modelo llamado "Golden Car", descrito en el reporte 228 del NCHRP. El cálculo matemático del IRI está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo cuarto de carro, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/h. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc.

Así, el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino. El IRI sirve como estándar para calibrar los equipos de medición de la regularidad superficial de un camino.

El modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta. El programa que propone el Banco Mundial para el cálculo del IRI a partir del levantamiento topográfico de un tramo carretero, se describe en la publicación técnica número 884 de la ASMT: Sayers, M.W., “Development, Implementation, and Application of The Referente Quarter-Car Simulation”.

4.2. Modelamiento Físico de la Respuesta Dinámica de un Cuarto de Vehículo “Quarter Car”.

El modelo de Cuarto de Carro utilizado en el algoritmo del IRI, debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda.

En la Figura siguiente se observa una llanta representada con un resorte vertical, la masa del eje sostenida por la llanta, el resorte de suspensión y el amortiguador, y la masa de la carrocería del vehículo sostenida por la suspensión de esa llanta. (Ventura, 2005)

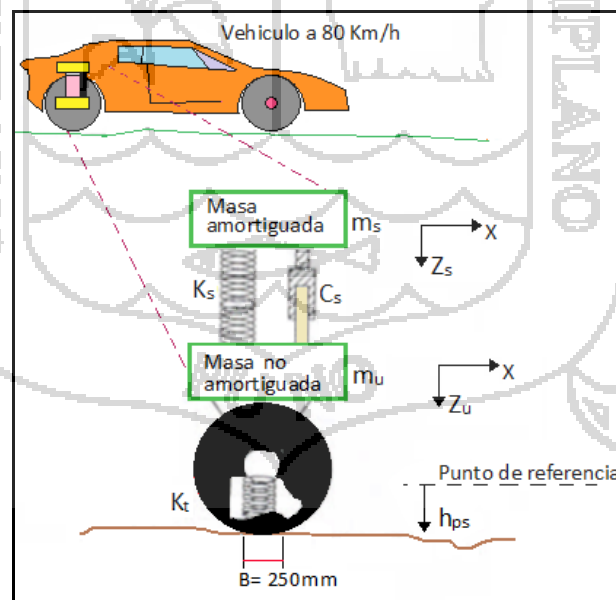


Figura 22. Representación Del Cuarto De Carro.

El llamado modelo de cuarto de coche, simula que al avanzar este coche a una velocidad determinada (80 Km/h) e ir siguiendo las irregularidades del camino, las masas se mueven en vertical (simulando el asiento del conductor).

Por lo tanto se define como el “Movimiento vertical (desplazamiento) de las diferencias acumuladas de las masas superior e inferior divididos por el incremento de longitud del camino recorrido”.

El IRI representa el efecto sobre el vehículo del usuario del camino que tienen las desviaciones de la superficie del pavimento (causa) respecto a una superficie plana teórica con dimensiones suficientes para afectar la dinámica del vehículo y la calidad al manejar.

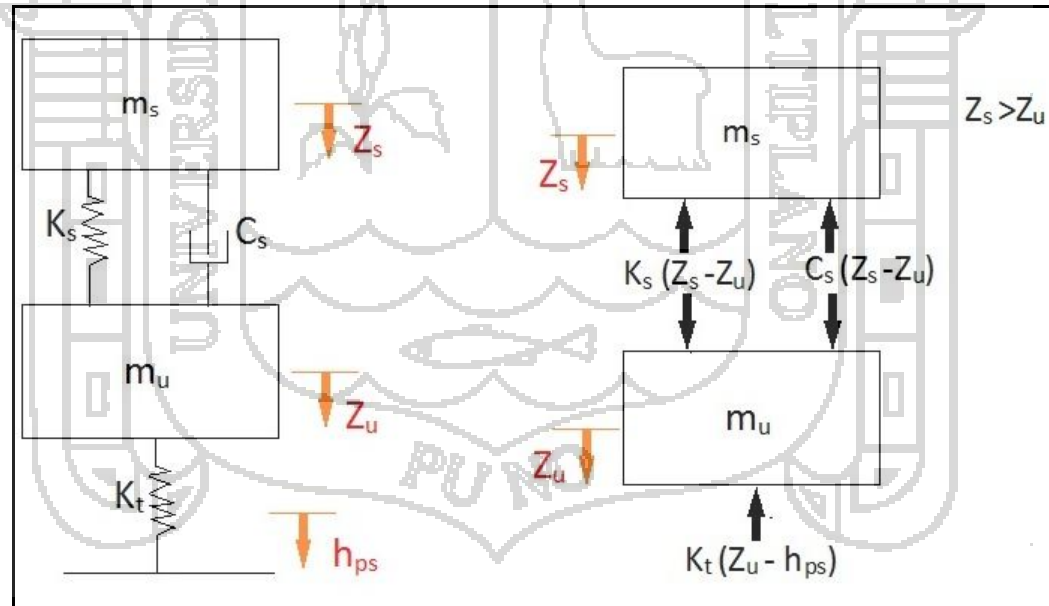


Figura 23. Diagrama De Cuerpo Libre Del Sistema Amortiguado Y No Amortiguado.

4.3. Modelamiento Matemático de la Respuesta Dinámica de un Cuarto de Vehículo “Quarter Car”.

De acuerdo a los diagramas de cuerpo libre mostrados, las ecuaciones de movimiento (aplicando segunda ley de Newton) para el sistema mostrado, tenemos:

Masa amortiguada

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{Z}_s &= -k_s(Z_s - Z_u) - C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) \\
 m_s \ddot{Z}_s &= k_s(Z_u - Z_s) + C_s(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) \dots\dots\dots(1.1)
 \end{aligned}$$

Masa no amortiguada

$$\begin{aligned}
 m_u \ddot{Z}_u &= k_s(Z_s - Z_u) + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - k_t(Z_u - h_{ps}) \\
 m_u \ddot{Z}_u &= k_s(Z_s - Z_u) + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + k_t(h_{ps} - Z_u) \dots\dots\dots(1.2)
 \end{aligned}$$

Sean:

$$K_1 = \frac{k_t}{m_s}; \quad K_2 = \frac{k_s}{m_s}; \quad C = \frac{C_s}{m_s}; \quad U = \frac{m_u}{m_s}$$

Parámetros del modelo (cuya convención se encuentra en el documento: “WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER 45, THE INTERNACIONAL ROAD ROUGHNESS EXPERIMENT, 1986”), reemplazando dichos valores en las ecuaciones (1.1) y (1.2) tenemos:

$$\begin{aligned}
 (1.1): \quad \ddot{Z}_s &= \frac{k_s}{m_s}(Z_u - Z_s) + \frac{C_s}{m_s}(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) \\
 \ddot{Z}_s &= K_2(Z_u - Z_s) + C(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) \dots\dots\dots(1.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1.2): \quad \ddot{Z}_u &= \frac{k_s}{m_u}(Z_s - Z_u) + \frac{C_s}{m_u}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + \frac{k_t}{m_s}(h_{ps} - Z_u) \\
 \ddot{Z}_u &= K_2 \frac{m_s}{m_u}(Z_s - Z_u) + C \frac{m_s}{m_u}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_1 \frac{m_s}{m_u}(h_{ps} - Z_u) \\
 \ddot{Z}_u &= \frac{K_2}{u}(Z_s - Z_u) + \frac{C}{u}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + \frac{K_1}{u}(h_{ps} - Z_u) \dots\dots\dots(1.4)
 \end{aligned}$$

Por tanto; de (1.3) y (1.4) obtenemos el sistema:

$$\ddot{Z}_s = K_2(Z_u - Z_s) + C(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) \dots\dots\dots(1.3)$$

$$\ddot{Z}_u = \frac{K_2}{u}(Z_s - Z_u) + \frac{C}{u}(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + \frac{K_1}{u}(h_{ps} - Z_u) \dots\dots\dots(1.4)$$

Sea:

$$x_1 = Z_s ; x_2 = \dot{Z}_s ; x_3 = Z_u ; x_4 = \dot{Z}_u$$

$$\dot{x}_1 = \dot{Z}_s ; \dot{x}_2 = \ddot{Z}_s ; \dot{x}_3 = \dot{Z}_u ; \dot{x}_4 = \ddot{Z}_u$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \dots\dots\dots (1.5)$$

En (1.3) tenemos:

$$\dot{x}_2 = K_1(x_3 - x_1) + C(x_4 - x_2) \dots\dots\dots(1.6)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \dots\dots\dots (1.7)$$

En (1.4) tenemos:

$$\dot{x}_4 = \frac{K_2}{u}(x_1 - x_3) + \frac{C}{u}(x_2 - x_4) + \frac{K_1}{u}(h_{ps} - x_3) \dots\dots\dots (1.8)$$

Ordenando y reagrupando términos, obtenemos el siguiente sistema:

$$\dot{x}_1 = x_2 \dots\dots\dots (1.5)$$

$$\dot{x}_2 = -K_2x_1 - Cx_2 + K_2x_3 + Cx_4 \dots\dots\dots (1.6)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \dots\dots\dots (1.7)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{K_2}{u}x_1 + \frac{C}{u}x_2 - \left(\frac{K_1 + K_2}{u}\right)x_3 - \frac{C}{u}x_4 \dots\dots\dots (1.8)$$

Que en su forma matricial se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -c & -K_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{u} & \frac{c}{u} & -\left(\frac{K_1 + K_2}{u}\right) & -\frac{c}{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_1}{u} \end{bmatrix} h_{ps} \dots\dots\dots (1.9)$$

De (*), reemplazando obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_s \\ \ddot{Z}_s \\ \dot{Z}_u \\ \ddot{Z}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -c & K_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{u} & \frac{C}{u} & -(\frac{K_1 + K_2}{u}) & -\frac{C}{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s \\ \dot{Z}_s \\ Z_u \\ \dot{Z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_1}{u} \end{bmatrix} h_{ps} \dots\dots\dots (1.10)$$

Que es una ecuación matricial de la forma:

$$\{Z'(t)\} = [A]\{Z(t)\} + [F] \dots\dots\dots (1.11)$$

Donde:

$$Z'(t) = \begin{pmatrix} \dot{Z}_s \\ \ddot{Z}_s \\ \dot{Z}_u \\ \ddot{Z}_u \end{pmatrix};$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{u} & \frac{c}{u} & -(\frac{k_1 + k_2}{u}) & -\frac{c}{u} \end{bmatrix};$$

$$[F] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{c}{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_1 h_{ps}}{u} \end{bmatrix}$$

⇒ $DZ - AZ = F$ Multiplicando por e^{-At} :

$$e^{-At} DZ - e^{-At} Z = e^{-At} F$$

$$D(e^{-At} Z) = e^{-At} F$$

$$\int_0^t D(e^{-At} Z) = \int_0^t e^{-At} F dt$$

$$e^{-At} Z(t) - e^0 Z(0) = \int_0^t e^{-At} F(t) dt$$

$$Z(t) = e^{At} Z(0) + e^{At} \int_0^t e^{-At} F(t) dt \dots\dots\dots (1.12)$$

Si el momento de tiempo es At , desde el instante inicial $t = 0$ hasta el instante t habrán pasado n incrementos:

$$\Rightarrow Z_n = Z_{(n\Delta T)}$$

La solución iterativa es dada por Reid y Passin, se encuentra calculando la diferencia:

$$Z_{n+1} - e^{A\Delta t} Z_n$$

Por tanto de 1.12, tenemos:

$$\begin{aligned} Z_{n+1} - e^{A\Delta t} Z_n &= e^{A(n+1)\Delta t} Z(0) + e^{A(n+1)\Delta t} \int_0^{(n+1)\Delta t} e^{-An} F(t) dt \\ &\quad - e^{A\Delta t} \left[e^{An\Delta t} Z(0) + e^{An\Delta t} \int_0^{n\Delta t} e^{-An} F(t) dt \right] \\ Z_{n+1} - e^{A\Delta t} Z_n &= e^{A(n+1)\Delta t} \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} e^{-An} F(t) dt \\ Z_{n+1} &= e^{A\Delta t} Z_n + e^{A(n+1)\Delta t} \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} e^{-An} F(t) dt \end{aligned} \tag{1.13}$$

Relación de Recursión

Considerando F constante en el intervalo Δt , tenemos:

$$\begin{aligned} e^{A(n+1)\Delta t} \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} e^{-An} F(t) dt &= e^{A(n+1)\Delta t} F(t) \int_t^{t+\Delta t} e^{-An} dt \\ &= e^{A(n+1)\Delta t} F(t) (-A^{-1} e^{-At} + k) \Big|_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} \\ &= e^{A(n+1)\Delta t} F(t) [-A^{-1} e^{-A(n+1)\Delta t} + A^{-1} e^{-An\Delta t}] \\ &= e^{A(n+1)\Delta t} F(t) A^{-1} e^{-An\Delta t} [e^{A\Delta t} - 1] \\ &= A^{-1} F(t) [e^{A\Delta t} - 1] \end{aligned}$$

En 1.13

$$Z_{n+1} = e^{A\Delta t} Z_n + A^{-1} [e^{A\Delta t} - 1] F(t)$$

Sea $ST = e^{A\Delta t}$ (Matriz de transición de estado)

$$Z_{n+1} = ST Z_n + A^{-1}[ST - 1]F_{n+1} \dots \dots \dots (1.14)$$

Sea

$$P = A^{-1}[ST - 1]F_{n+1} \text{ (Matriz uk respuesta parcial)}$$

$$Z_{n+1} = ST Z_n + PR \dots \dots \dots (1.15)$$

$$ST = e^{A\Delta t} = 1 + A\Delta t + \frac{A^2\Delta t^2}{2!} + \frac{A^3\Delta t^3}{3!} + \dots$$

Los parámetros de los modelos de cuarto de carro son:

$$K_1 = \frac{k_t}{m_s} = 653 \text{ S}^{-2};$$

$$K_2 = \frac{k_s}{m_s} = 63.3 \text{ S}^{-2};$$

$$C = \frac{C_s}{m_s} = 6 \text{ S}^{-1};$$

$$U = \frac{m_u}{m_s} = 0.15$$

Con estos valores se obtiene la matriz A.

Δt Se calcula "n" cada caso, depende del intervalo de muestreo del perfil longitudinal.

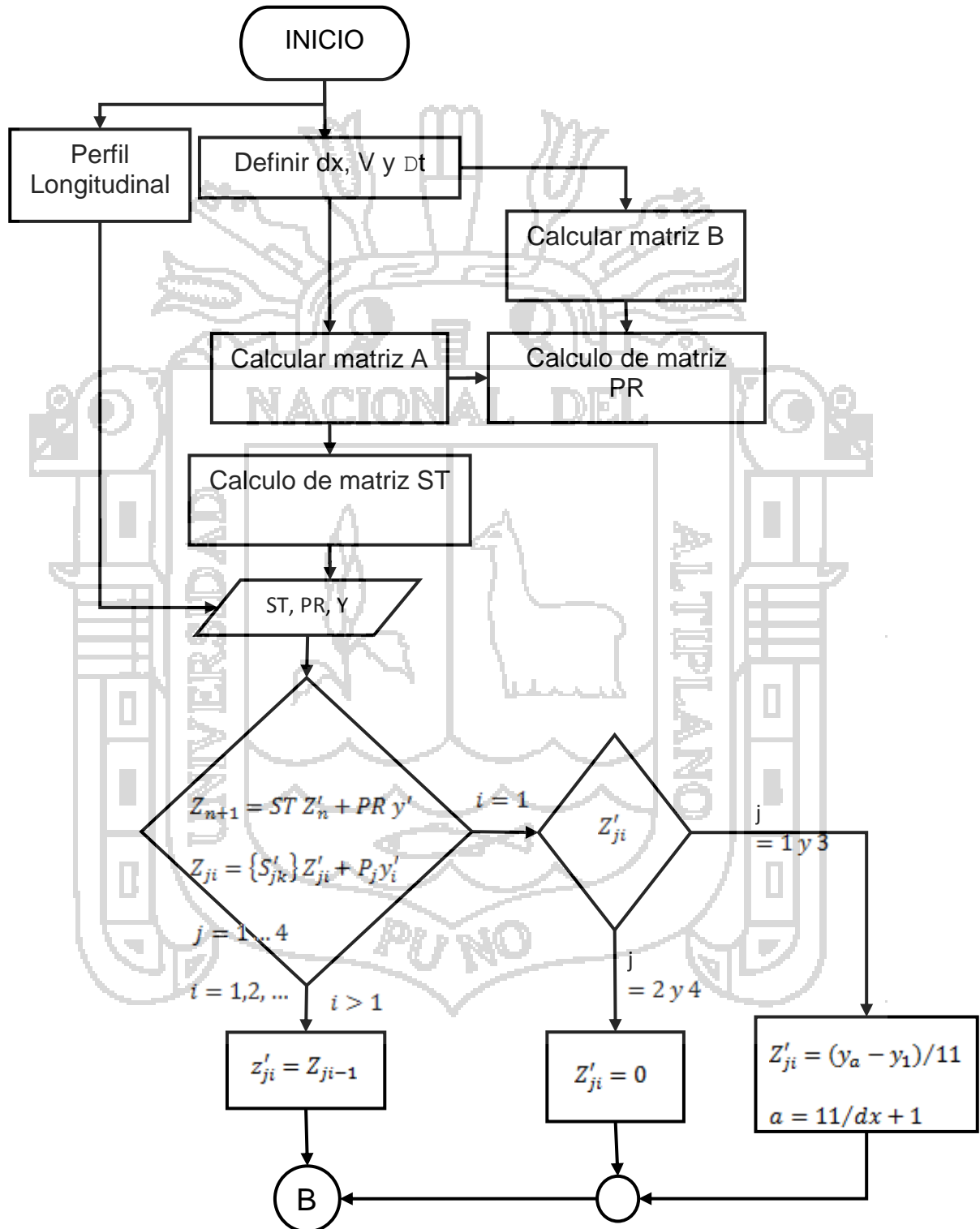
Puesto que la velocidad considerada es 80km/h, y un espaciamiento de muestreo o superior a 300 mm (e); obtenemos $\Delta t = \frac{e}{80km/h}$; con lo que obtenemos la matriz ST.

La matriz PR se calcula a partir de la matriz ST; ya que $PR = A^{-1}[ST - 1]$.

Con ello, podemos obtener $(h_{pi}; h_{pi+1}; h_{pi+2}; \dots)$, para cada tramo usando (1.15).

4.4. Diagrama de Flujo para el Cálculo del IRI Mediante el Modelo Matemático “Quarter Car”.

El diagrama de flujo que calcula el IRI es el que sigue:



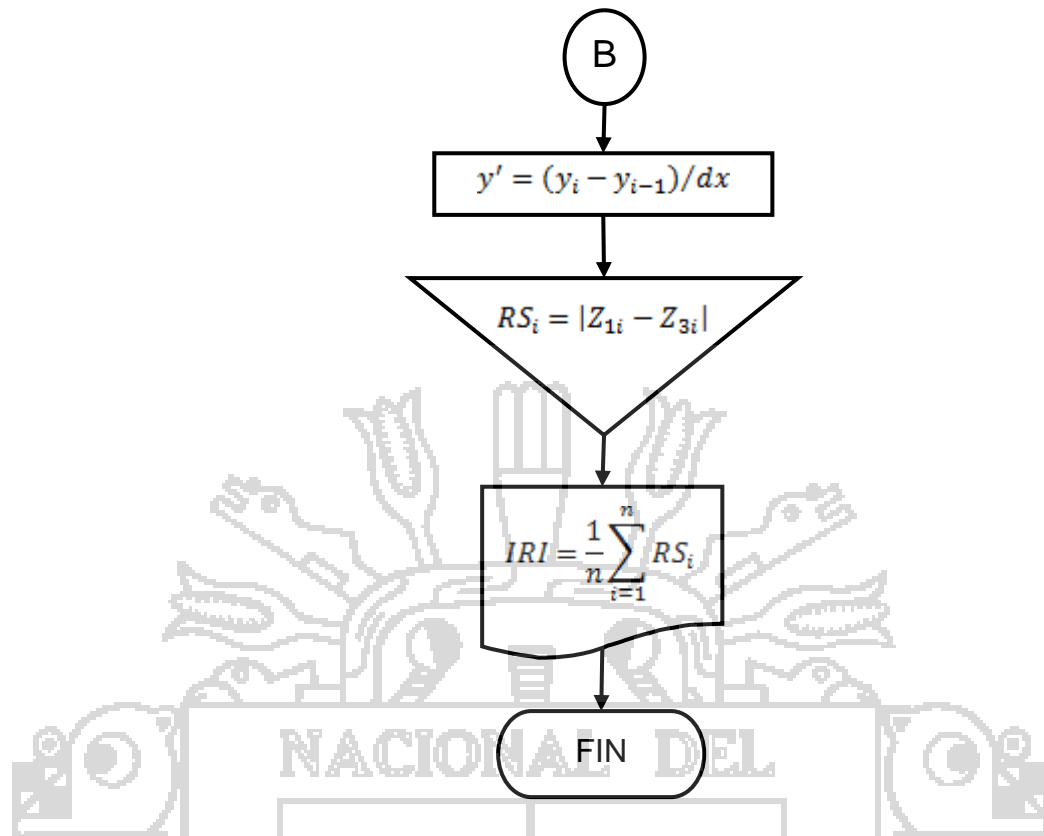


Figura 24. Diagrama de flujo para el cálculo del IRI.

4.5. Aplicación Numérica.

Usando un programa de computadora y la implementación mediante un programa de computación se puede obtener la matriz A, ST y PR usando un algoritmo adecuado además se puede incluir en este programa el cálculo del IRI tal como recomienda el Banco Mundial en el documento:, también se puede hacer los cálculos de forma manual, pero resulta demasiado tedioso.

Los valores de las primeras matrices mencionadas para cuando el espaciamiento es de 0.25 m y la velocidad en de 80 k/h son los siguientes:

$$dx = 0.25m$$

$$V = 80 \text{ Km/h}$$

$$ST = e^{A\Delta t} = I + A\Delta t + \frac{A^2(\Delta t)^2}{2!} + \frac{A^3(\Delta t)^3}{3!} + \dots$$

$$e^{A\Delta t} = I + \sum_{i=1}^n \frac{A^i(\Delta t)^i}{i!}$$

$$PR = A^{-1}(ST - I)B$$

Donde:

$$Z_{n+1} = (ST)Z_n + (PR)Y'$$

Que toma la forma:

$$Z_1 = S'_{11}Z'_1 + S'_{12}Z'_2 + S'_{13}Z'_3 + S'_{14}Z'_4 + P_1Y'$$

$$Z_2 = S'_{21}Z'_1 + S'_{22}Z'_2 + S'_{23}Z'_3 + S'_{24}Z'_4 + P_2Y'$$

$$Z_3 = S'_{31}Z'_1 + S'_{32}Z'_2 + S'_{33}Z'_3 + S'_{34}Z'_4 + P_3Y'$$

$$Z_4 = S'_{41}Z'_1 + S'_{42}Z'_2 + S'_{43}Z'_3 + S'_{44}Z'_4 + P_4Y'$$

Calculando:

$$\Delta t = \frac{E}{V} = \frac{0.25 \text{ m}}{80 \text{ Km/h}} = 0.01125 \text{ seg}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{u} & \frac{C}{u} & \frac{(K_1 + K_2)}{u} & \frac{C}{u} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -63.3 & -6 & 63.3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 422 & 40 & -4775.3 & -40 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -4353.3 \end{bmatrix}$$

Por las recomendaciones del Banco Mundial para la aproximación de ST tomar 10 términos para obtener una buena aproximación cuando (n=10).

$$ST = I + \sum_{i=1}^n \frac{A^i(\Delta t)^i}{i!}$$

$$= I + A(\Delta t) + \frac{A^2(\Delta t)^2}{2!} + \dots + \frac{A^{10}(\Delta t)^{10}}{10!}$$

$$ST = \begin{bmatrix} 0.9966 & 0.0109 & -0.0021 & 0.0003 \\ -0.5563 & 0.9439 & -0.8325 & 0.0506 \\ 0.0215 & 0.0021 & 0.7509 & 0.0082 \\ 3.3350 & 0.3376 & -39.1276 & -0.4348 \end{bmatrix}$$

$$A^{-1}(ST - I) = \begin{bmatrix} 0.0112 & 0.0001 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0034 & 0.0109 & -0.0021 & 0.0003 \\ 0.0001 & 0.0000 & 0.0103 & 0.0001 \\ 0.0215 & 0.0021 & -0.2491 & 0.0082 \end{bmatrix}$$

$$PR = A^{-1}(ST - I)B = \begin{bmatrix} -0.0055 \\ -1.3888 \\ -0.2276 \\ -35.7926 \end{bmatrix}$$

$$Z_1 = 0.9966Z'_1 + 0.0109Z'_2 - 0.0021Z'_3 + 0.0003Z'_4 - 0.0055Y'$$

$$Z_2 = -0.5563Z'_1 + 0.9439Z'_2 - 0.8325Z'_3 + 0.0506Z'_4 - 1.3888Y'$$

$$Z_3 = 0.0215Z'_1 + 0.0021Z'_2 + 0.07509Z'_3 + 0.0082Z'_4 - 0.2276Y'$$

$$Z_4 = 3.3350Z'_1 + 0.3376Z'_2 - 39.1276Z'_3 - 0.4348Z'_4 - 35.7926Y'$$

Donde Y' es el perfil de carretera, el sistema de ecuaciones anterior es para un punto del recorrido, para el siguiente punto los Z'_i serán reemplazados por los Z_{i-1} (en el punto anterior).

Para inicializar las variables se parte del hecho que:

$$Z'_1 = Z'_3 = (Y_a - Y_1)/11$$

$$a = \frac{11}{\Delta x} + 1 = 45$$

$$Z'_2 = Z'_4 = 0$$

Donde el perfil longitudinal

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1})/\Delta x$$

Y el IRI está dado por:

$$RS_i = |Z_1 - Z_3|$$

Es el perfil rectificad para un punto.

$$IRI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_1 - Z_3|$$

El cálculo del IRI como parte de la aplicación continúa en el anexo 05.

4.6. Roughometer III.

El Roughometer III es clasificado por el Banco Mundial como de Clase 3, aunque en realidad supera las especificaciones de la categoría. Si bien es un dispositivo de medición del tipo respuesta, este Rugosímetro elimina las incertidumbres asociadas al vehículo, como la suspensión o el peso del pasajero, al medir directamente el movimiento del eje con un acelerómetro de precisión.

El Roughometer III, es un dispositivo portátil, fácil de instalar y económico que ofrece resultados altamente confiables.

El sistema puede utilizarse tanto en carreteras pavimentadas como sin pavimentar y es capaz de recopilar hasta 13,000 km de datos. De uso fácil y práctico, el Roughometer III proporciona una técnica sencilla para la evaluación

de la calidad de las carreteras que cuenta además con la ventaja de una unidad GPS integrada.

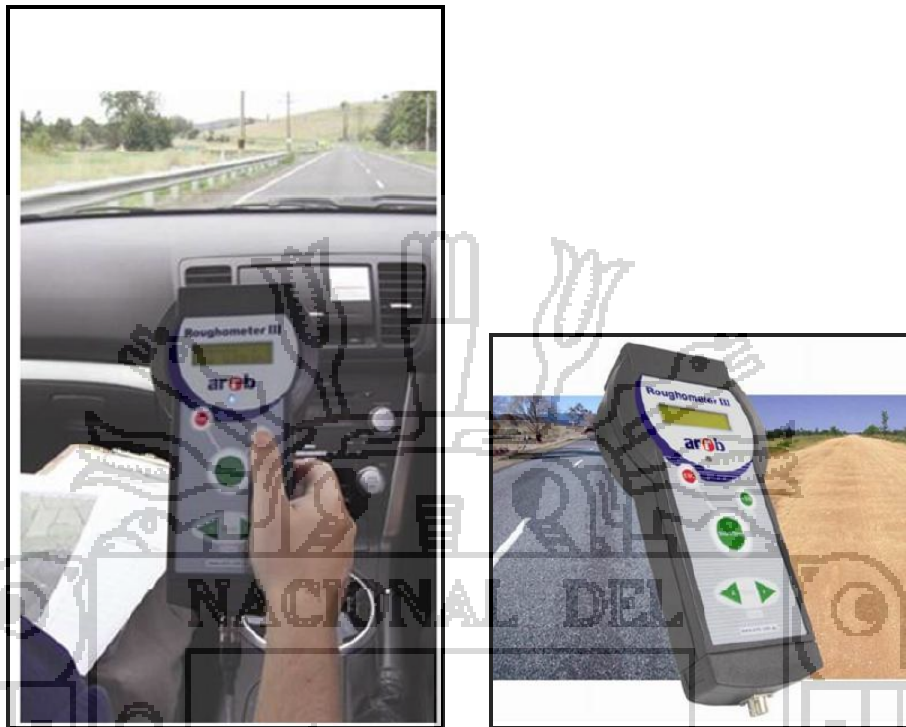


Figura 25. El controlador del Equipo Roughometer III.

4.6.1. Componentes del Roughometer III.

Este equipo cuenta con varios componentes ensamblables al momento de la evaluación del pavimento previa calibración:

- Interface module.
- Optional GPS.
- Cable de Poder de 12V dc
- Optional DMI
- Controler
- Roughness sensor.

Estos componentes del equipo deben ser ensamblados para la auscultación de camino.

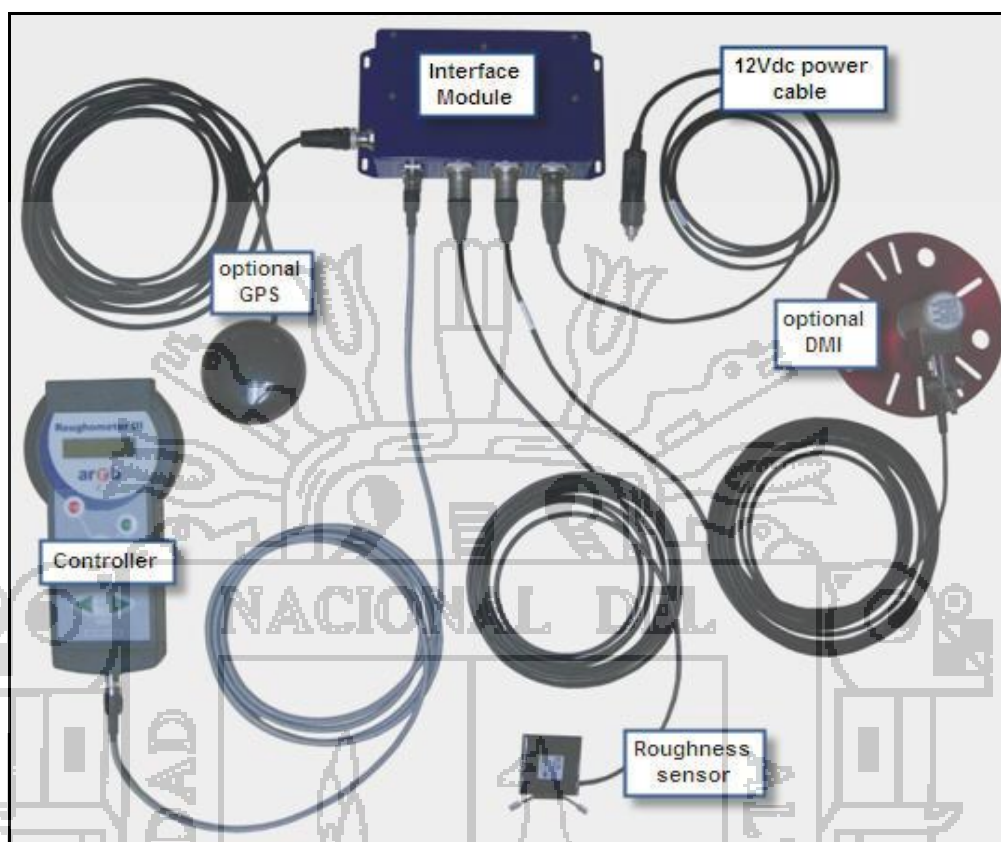


Figura 26. Componentes del Equipo Roughometer III.

4.7. Instalación y Calibración.

4.7.1. Instalación de los Componentes.

Los componentes deben ser instalados en vehículos adecuados para el recorrido del tipo de camino a evaluar.

Instalación del sensor de rugosidad (Roghness sensor).

Debe ser instalado en el eje trasero del vehículo para el registro de los desplazamientos verticales de la masa amortiguada.



Fotografía 04. Componentes del Equipo Roughometer III (sensor).

Instalación del odómetro (Optional DMI).

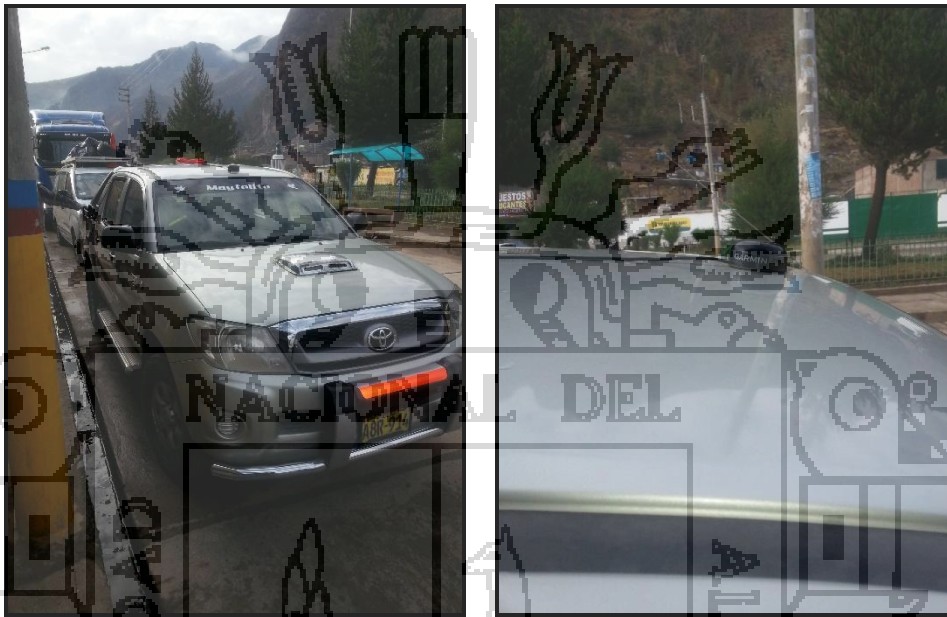
Su instalación es de suma importancia para el registro de la distancia recorrida por el vehículo, considerando que uno de los datos necesarios para el cálculo del IRI es la distancia recorrida, debe ser instalado en el eje posterior de vehículo.



Fotografía 05. Instalación del Odómetro.

Instalación del GPS (Optional GPS).

De la misma forma debe ser instalado en el vehículo, en una parte visible para la recepción de la señal satelital y la obtención de dato confiables.



Fotografía 06. GPS en la parte superior del vehículo.

Todos los componentes instalados al vehículo deben ser conectados a una fuente de poder para su funcionamiento, incluyendo el controlador y esta fuente a su vez debe ser alimentado por la batería de 12 V dc que bien podría ser la batería del vehículo.



Fotografía 07. Fuente de alimentación del Equipo.

4.7.2. Calibración de los Componentes.

Antes de proceder con la operación del equipo se debe calibrar este el modo y técnica de calibración se encuentran detallados en el User Manual - Roughometer III, tanto el odómetro como el sensor se deben calibrar por separado.

4.8. Operación del Equipo y Transferencia de Datos.

4.8.1. Operación del Equipo.

Una vez instalado los componentes del equipo Roughometer III al vehículo acondicionado para tal fin, el cual estaba adicionalmente implementado con GPS y un sistema de cámaras.

Procediéndose a evaluar el sector de pavimento de concreto asfáltico y tratamiento superficial Otta Seal, obteniéndose una data continúa por día a una

velocidad promedio de 40 a 60km/h. Para este trabajo se debe considera como mínimo el siguiente personal:

- 01 Ingeniero
- 01 Asistente
- 01 Ayudante



Fotografía 08. Vehículo necesario.



Fotografía 09. Equipo Roughometer en trayecto.

4.8.2. Trabajo de Gabinete.

Una vez levantado todos los datos de campo y terminado el recorrido vehicular, se procede a descargar la información obtenida durante el proceso de medición, inmediatamente en un computador se ejecuta el Software Roughmeter III, el cual arroja los resultados por cada sección de carretera evaluada y en función a las fechas del recorrido.

Estos trabajos están dirigidos por un Ingeniero Especialista en Evaluación de Pavimentos, el mismo que en función a las anotaciones de campo depura los resultados obtenidos, los cuales son valores correspondientes a eventos únicos

en la vía tales como gibas, puentes, etc.

Finalmente, la información es representada en rugogramas que a primera vista permiten ver la tendencia de los valores de rugosidad por sección evaluada; asimismo, el IRI obtenido es insumo fundamental para la posterior selección de las secciones homogéneas de la carretera.

Section	SubDist	TotDist	IRI	Speed	Events
1	0.100	0.100	0,6	28,3	UnderSpeed x 1
1	0.127	0.127	1,8	32,9	UnderSpeed x 1
2	0.100	0.227	2,4	29,0	UnderSpeed x 1
2	0.140	0.267	2,3	38,6	UnderSpeed x 1
2	0.100	0.367	3,3	37,4	UnderSpeed x 1
3	0.200	0.567	4,1	56,1	
3	0.300	0.567	3,9	53,7	
3	0.400	0.567	2,1	53,8	
3	0.500	0.767	2,2	48,0	UnderSpeed x 1
3	0.586	0.923	4,8	38,6	UnderSpeed x 1
4	0.100	0.875	2,9	23,4	UnderSpeed x 1 EventA1
4	0.200	0.975	3,2	39,4	UnderSpeed x 1
4	0.300	1,075	1,6	63,0	
4	0.399	1.174	2,3	34,0	UnderSpeed x 1
5	0.100	1.274	3,6	87,2	Stopped x 1 UnderSpeed x 2
5	0.101	1.276	1,4	10,6	UnderSpeed x 1
6	0.100	1.376	4,4	47,3	UnderSpeed x 1
6	0.200	1.476	2,9	70,4	
6	0.300	1.576	2,8	70,4	
6	0.400	1.676	2,9	71,3	
6	0.500	1.776	2,1	72,1	
6	0.600	1.876	2,7	67,4	
6	0.700	1.976	3,3	85,2	
6	0.800	2.076	2,2	65,6	
6	0.900	2.176	2,6	65,9	
6	1.000	2.276	2,8	69,4	EventB1

Figura 27. Ventana Principal.



Figura 28. Software Roughmeter III.

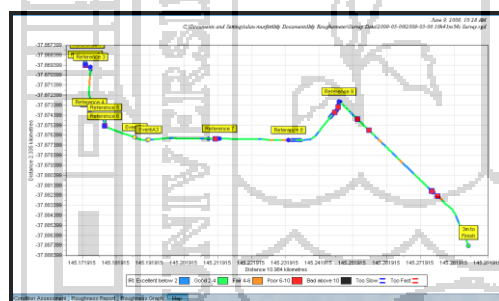


Figura 29. Software Roughmeter III.

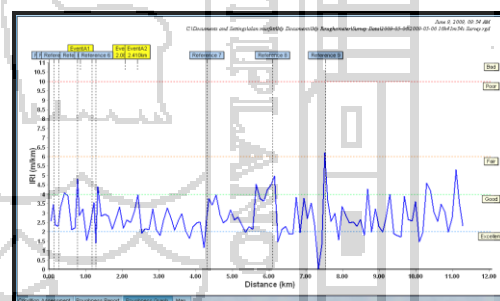


Figura 30. Software Roughmeter III.

Finalmente ya se tiene el índice de Rugosidad Internacional IRI evaluado con el equipo “Roughmeter III”, el cual servira para la toma de desiciones por parte de las entidades del estado sobre la red de careteras en este caso en el Peru.

CAPÍTULO V

5. ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS.

5.1. Identificación de la Ruta a Evaluar.

Para la presente investigación, se han considerado dos tramos de estudio, diferenciados por el tipo de superficie de rodadura, el primer tramo con un tratamiento superficial Otta Seal y el segundo con un Sello de Arena sobre un Otta seal deteriorado.

5.1.1. Tramo con Tratamiento Superficial Otta Seal.

El tramo Lachoj – Huancavelica perteneciente a la Ruta PE-26, se ubica entre las progresivas 96+015 al 78+961 (17+054km) de longitud, de la red vial de la región Huancavelica de la provincia de Huancavelica, cuya superficie de rodadura es de tratamiento superficial Otta Seal, la aplicación de la protección bituminosa se realizó entre los meses finales del año 2013.

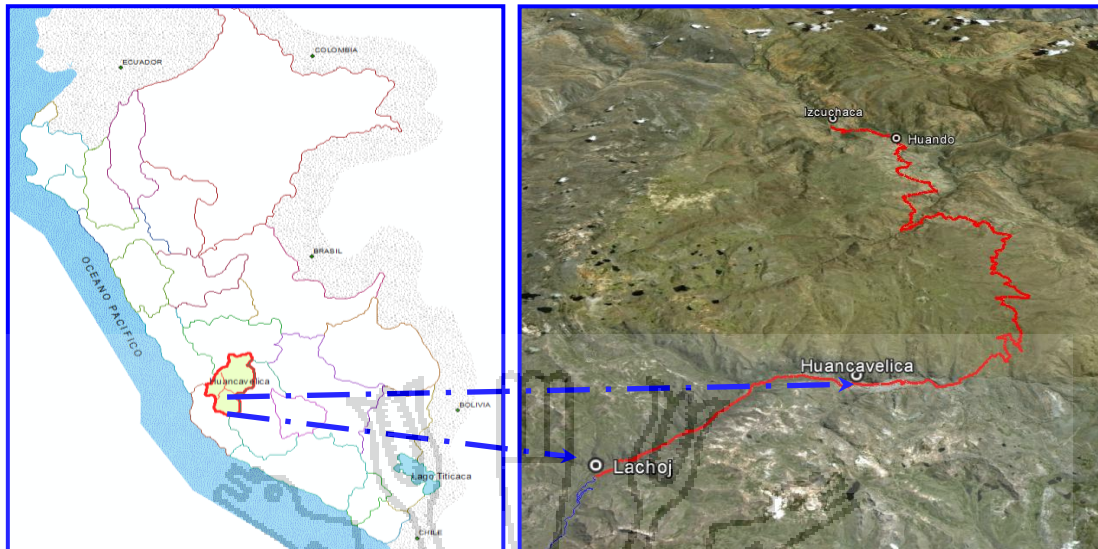


Figura 31. Ubicación de la Ruta PE-26.

5.1.2. Tramo con Sello de Arena.

El tramo Santa Inés – Lachoj, perteneciente a la Ruta PE-28D, se ubica entre las progresivas 108+019 al 166+419 (58+400m) de longitud, de la red vial de la región Huancavelica entre la provincias de Huancavelica y Rumichaca, cuya superficie de rodadura es de un sello de arena sobre un Otta Seal deteriorado, la aplicación de la protección bituminosa se realizó entre los meses finales del año 2013 lo cual incidirá en los resultados del IRI.

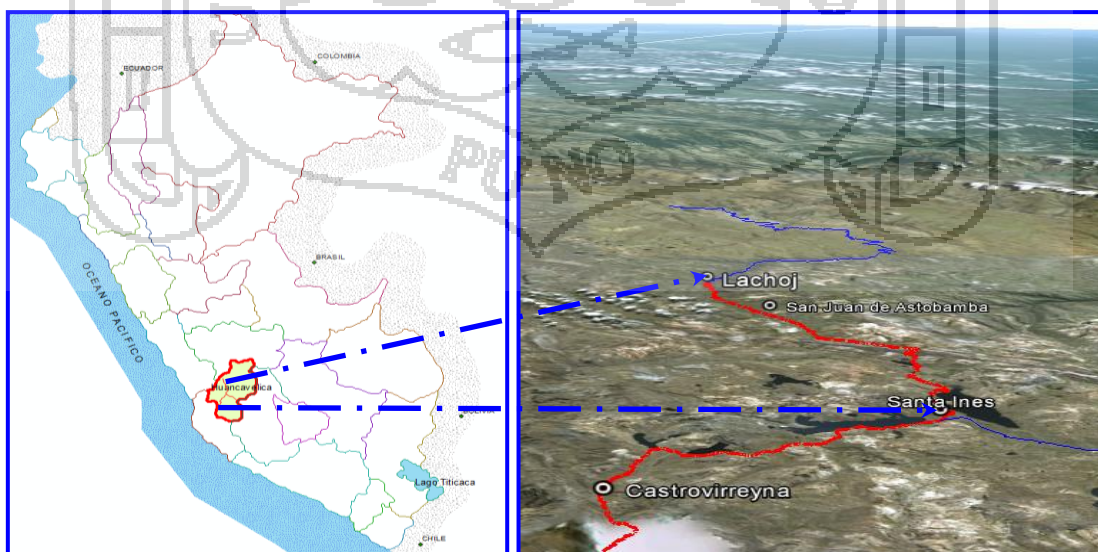


Figura 32. Ubicación de la Ruta PE-28D.

5.2. Determinación del Índice de Rugosidad Internacional.

5.2.1. Evaluación del IRI Con el Rugosímetro MERLIN.

Tramo I

Se realizó la evaluación del primer tramo de estudio con el equipo MERLIN, tomado como tramo de muestra el comprendido entre las progresivas 09+054 al 17+054 (8.00 km) del tramo I (Huancavelica - Lachoj). Los resultados de la evaluación se muestran en cuadro siguiente y formatos de cálculo del IRI en los sub tramos de 400m como lo indica la guía de evaluación de rugosidad con el MERLIN se encuentran en los anexos.

Progresiva		IRI MERLIN
17+054	16+654	2.62
16+654	16+254	2.51
16+254	15+854	2.80
15+854	15+454	3.07
15+454	15+054	2.46
15+054	14+654	2.60
14+654	14+254	2.74
14+254	13+854	3.08
13+854	13+454	3.49
13+454	13+054	3.31
13+054	12+654	2.74
12+654	12+254	3.81
12+254	11+854	3.31
11+854	11+454	2.36
11+454	11+054	2.61
11+054	10+654	2.67
10+654	10+254	2.46
10+254	9+854	4.15
9+854	9+454	3.91
9+454	9+054	3.82

Tabla 11. Evaluación del IRI con el MERLIN (Tramo I).

Tramo II

En el Segundo tramo, las evaluaciones se realizaron entre las progresivas de muestra 166+419 al 158+419 (8km) del tramo Santa Inés – Lachoj.

El criterio para considerar la evaluación de 8km como tramo de muestra es debido al rendimiento diario del equipo MERLIN que es aproximadamente de 8km/día.

Progresiva		IRI MERLIN
166+419	166+019	3.39
166+019	165+619	3.99
165+619	165+219	3.80
165+219	164+819	4.56
164+819	164+419	4.92
164+419	164+019	7.02
164+019	163+619	4.71
163+619	163+219	3.71
163+219	162+819	5.35
162+819	162+419	4.91
162+419	162+019	5.01
162+019	161+619	5.25
161+619	161+219	3.45
161+219	160+819	5.32
160+819	160+419	7.84
160+419	160+019	5.24
160+019	159+619	3.91
159+619	159+219	5.49
159+219	158+819	3.78
158+819	158+419	4.35

Tabla 12. Evaluación del IRI con el MERLIN (Tramo II).

5.2.2. Evaluación del IRI con Roughometer III.

Tramo I

Para la evaluación de la rugosidad con el equipo Roughometer III sean considerados los mismos tramos de muestra evaluados con el MERLIN. Se realizaron tres pruebas a diferentes velocidades 40 km/h, 50kmh y 60km/h, con el objetivo de identificar si la velocidad de medición tiene incidencia en los resultados de la rugosidad, además el equipo fue configurado par que el equipo tome datos cada 100m, pero los resultados sean mostrados a cada 400m.





Tramo I (superficie con Otta Seal)

Progresiva	Prueba 01 (Vel. 40 km/h)		Prueba 02 (Vel. 50 km/h)		Prueba 03 (Vel. 60 km/h)		IRI Promedio
	IRI (m/km)	velocidad (km/h)	IRI (m/km)	velocidad (km/h)	IRI (m/km)	velocidad (km/h)	
17+054	2.90	39.30	2.80	48.90	3.00	62.30	2.90
16+654	2.80	37.60	2.70	52.40	2.80	62.00	2.77
16+254	3.00	37.60	3.00	51.90	2.90	62.80	2.97
15+854	3.20	40.70	3.20	49.50	3.10	62.80	3.17
15+454	2.50	39.10	2.60	52.30	2.60	60.20	2.57
15+054	2.50	38.50	2.60	49.20	2.70	61.90	2.60
14+654	2.90	39.40	3.00	51.10	3.10	60.70	3.00
14+254	3.40	39.40	3.10	50.20	3.30	60.90	3.27
13+854	3.50	37.10	3.60	51.50	3.60	59.30	3.57
13+454	3.50	39.20	3.40	52.40	3.40	59.60	3.43
13+054	3.10	41.10	3.00	48.10	2.90	62.00	3.00
12+654	3.80	40.10	3.90	48.00	3.90	60.80	3.87
12+254	3.50	39.50	3.50	50.00	3.60	61.90	3.53
11+854	2.40	40.50	2.40	50.20	2.50	61.80	2.43
11+454	2.80	39.80	2.60	49.30	2.80	61.60	2.73
11+054	2.80	38.30	2.70	48.00	2.60	60.50	2.70
10+654	2.60	38.30	2.40	48.70	2.50	60.80	2.50
10+254	4.30	40.30	4.30	51.70	4.30	61.90	4.30
9+854	3.80	37.20	3.90	50.70	4.00	61.40	3.90
9+454	3.70	40.00	3.90	49.90	3.90	59.60	3.83

Tabla 13. Evaluación del IRI con el Roughometer III (Tramo I).

Tramo II (superficie con sello de arena)

Progresiva	Prueba 01 (Vel. 40 km/h)		Prueba 02 (Vel. 50 km/h)		Prueba 03 (Vel. 60 km/h)		IRI Promedio
	IRI (m/km)	velocidad (km/h)	IRI (m/km)	velocidad (km/h)	IRI (m/km)	velocidad (km/h)	
166+419	3.60	39.30	3.50	48.90	3.60	62.30	3.57
166+019	4.00	37.60	3.90	52.40	4.10	62.00	4.00
165+619	4.10	37.60	3.90	51.90	4.10	62.80	4.03
165+219	4.50	40.70	4.70	49.50	4.80	62.80	4.67
164+819	4.90	39.10	5.20	52.30	5.10	60.20	5.07
164+419	7.00	38.50	7.20	49.20	7.00	61.90	7.07
164+019	4.90	39.40	5.20	51.10	4.80	60.70	4.97
163+619	3.80	39.40	3.90	50.20	3.90	60.90	3.87
163+219	5.30	37.10	5.60	51.50	5.50	59.30	5.47
162+819	5.10	39.20	4.80	52.40	4.90	59.60	4.93
162+419	5.00	41.10	5.10	48.10	5.20	62.00	5.10
162+019	5.50	40.10	5.50	48.00	5.50	60.80	5.50
161+619	3.60	39.50	3.60	50.00	3.60	61.90	3.60
161+219	5.30	40.50	5.20	50.20	5.50	61.80	5.33
160+819	8.20	39.80	8.00	49.30	8.20	61.60	8.13
160+419	5.30	38.30	5.50	48.00	5.30	60.50	5.37
160+019	4.10	38.30	4.10	48.70	4.10	60.80	4.10
159+619	5.80	40.30	5.70	51.70	5.80	61.90	5.77
159+219	3.80	37.20	3.90	50.70	3.90	61.40	3.87
158+819	4.40	40.00	4.70	49.90	4.50	59.60	4.53

Tabla 14. Evaluación del IRI con el Roughometer III (Tramo II).

Tramo II

En el tramo II se hizo las mediciones de rugosidad con los mismos criterios del tramo I, cabe mencionar que las velocidades de medición no se mantienen constantes en todo el recorrido, debido a la topografía del terreno y el tramo en planta que obligan al conductor a disminuir la velocidad de recorrido, detectando así el odómetro cualquier variación de la velocidad que sea de ± 3 a la velocidad deseada.

Podemos apreciar en los cuadros de medición que medida de Rugosidad entre un pavimento con tratamiento superficial nuevo y uno deteriorado son diferentes, obteniéndose mejores resultados en el primer caso, lo cual era de esperarse (a menos rugosidad menos IRI).

5.3. Análisis de Resultados de la Evaluación de la Regularidad Superficial.

Tramo I

En los cuadros siguientes se presenta los resultados de la medición del IRI con el equipo Roughometer III, a las velocidades de 40,50 y 60 km/h.

Se puede apreciar que el comportamiento del resultado no cambia cuando la velocidad de medición cambia de lo cual podemos concluir que el sistema con el cual fue diseñado el equipo Roughometer III elimina las incertidumbres asociadas a la velocidad de medición.

También debemos señalar que la diferencia entre una medición y otra en el

mismo tramo, es debido a que el equipo es del Tipo Respuesta y una de las características de estos equipos es que no conservan los resultados a través de tiempo y varían los resultados de una a otra medición en el mismo tramo.

Y además debemos señalar que los resultados son independientes del tipo de superficie de rodadura, como para este caso un recubrimiento bituminoso denominado Otta Seal.

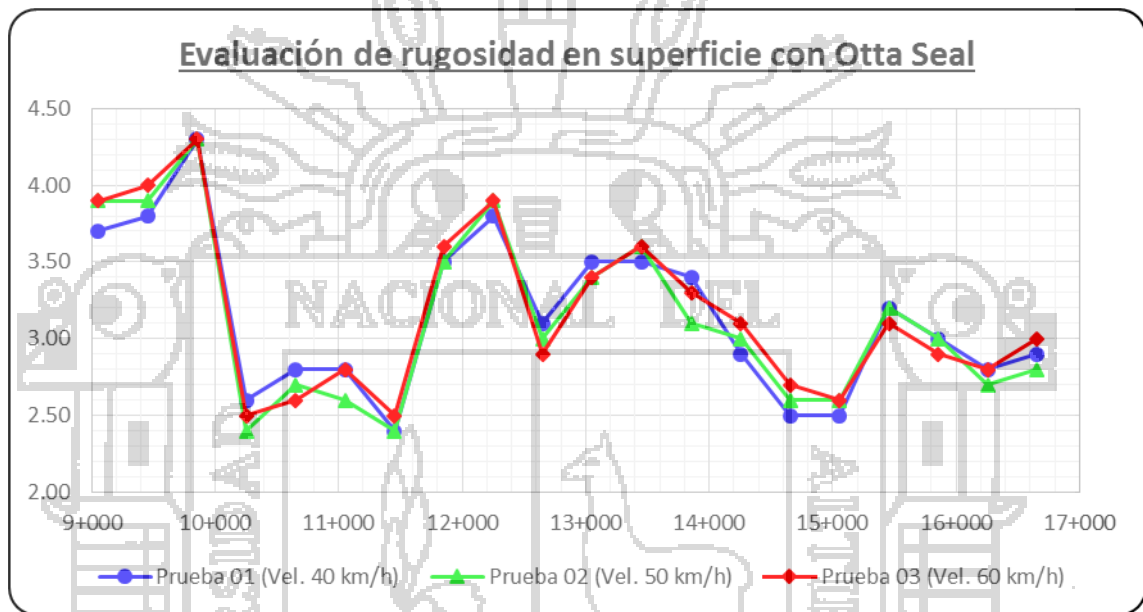


Figura 33. Resultados de la medición con el Roughometer III (Tramo I).

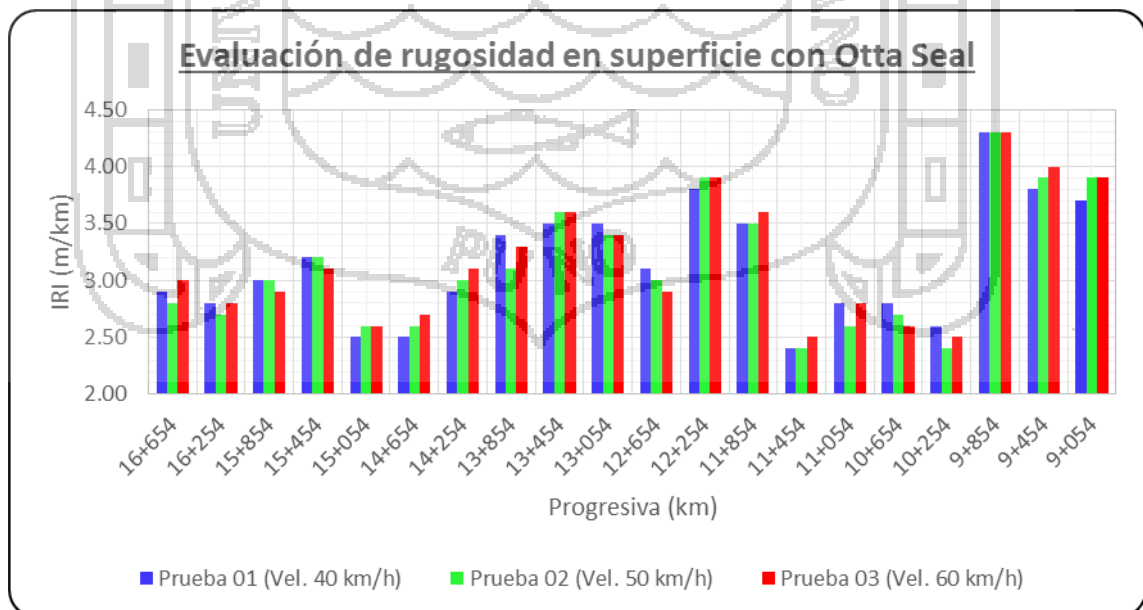


Figura 34. Resultados de la medición con el Roughometer III (Tramo I).

Tramo II

El tramo II de superficie de rodadura; Sello de arena sobre un Otta Seal deteriorado, presenta los resultados de evaluación del IRI así como se muestra en el siguiente cuadro.

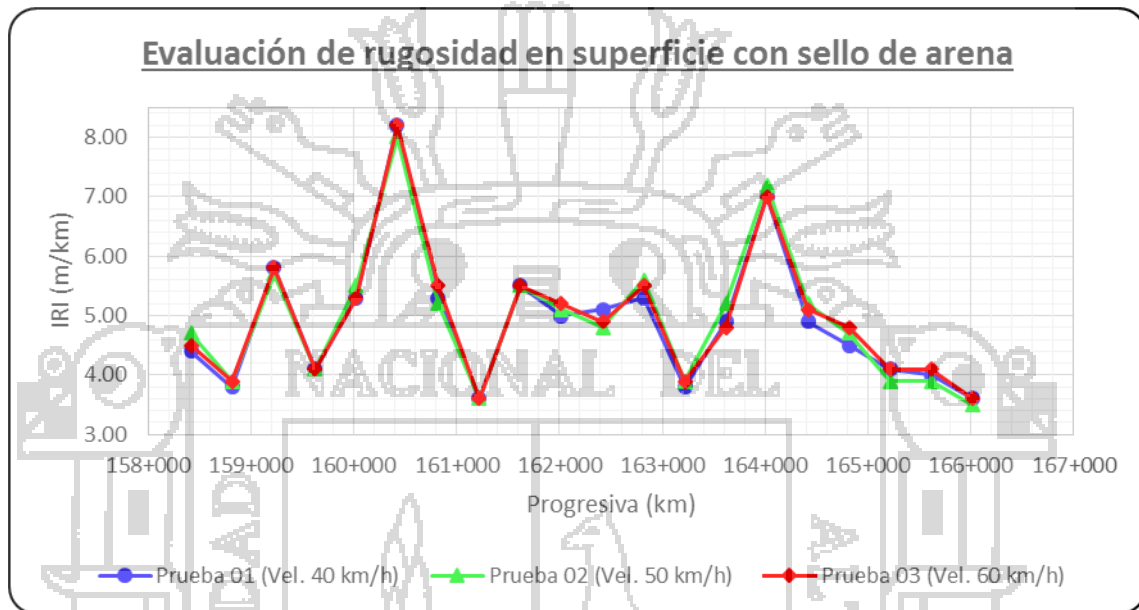


Figura 35. Resultados de la medición con el Roughometer III (Tramo II).

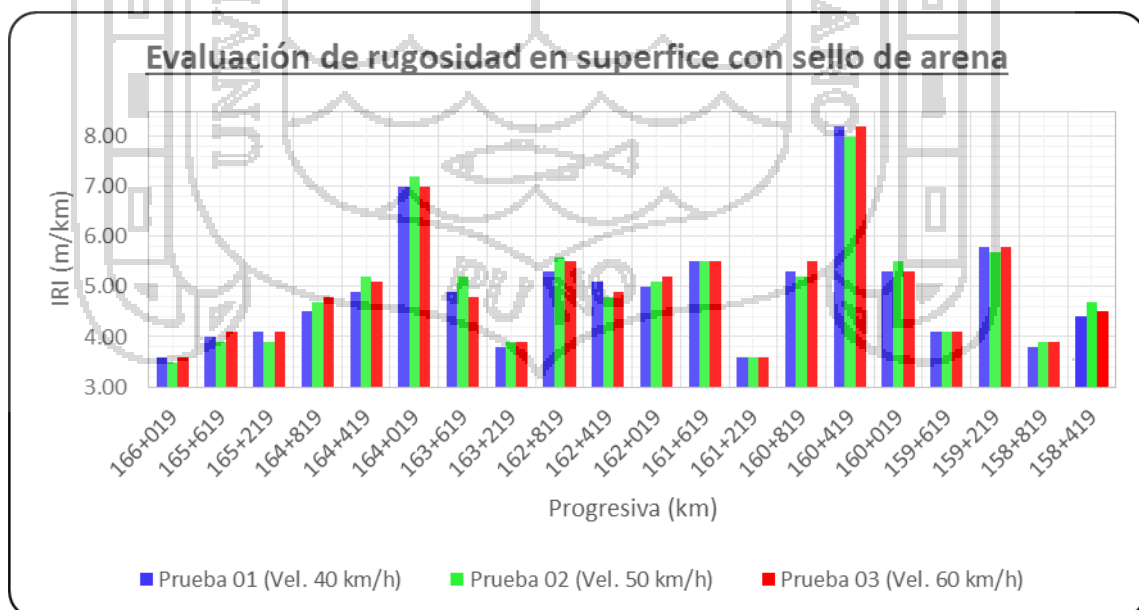


Figura 36. Resultados de la medición con el Roughometer III (Tramo II).

Vemos que los resultados así como para los resultados del tramo II no

dependen de la velocidad de medición, porque el sistema implementado en el equipo de medición Roughometer III corrige las incertidumbres asociadas a la velocidad del vehículo.

El modelo “cuarto de carro” depende de la velocidad de recorrido pero como ya se explicó este equipo posee un sistema que corrige cuando las velocidades varían.

5.4. Comparación y Análisis de los Resultados Obtenidos en la Medición Del IRI con el Merlín y el Roughometer III.

Tramo I

El objetivo de este trabajo de investigación es la comparación de los resultados de medición con los equipos MERLIN y Roughometer III. En el siguiente cuadro podemos apreciar la configuración de dicha comparación.

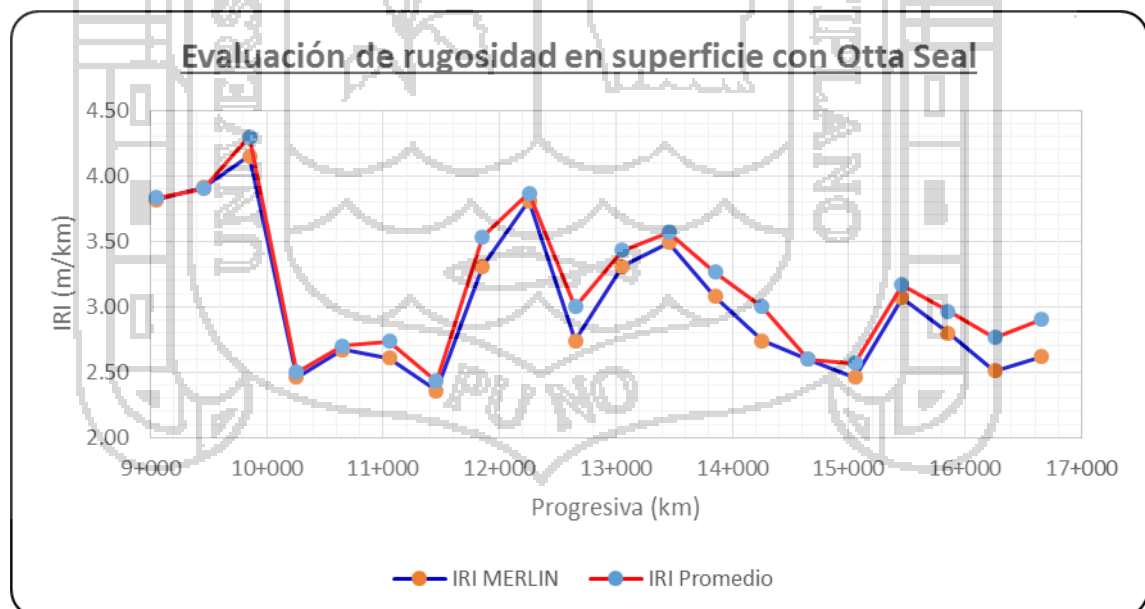


Figura 37. Resultados de medición con el Rugosímetro MERLIN y IRI promedio (Tramo I).

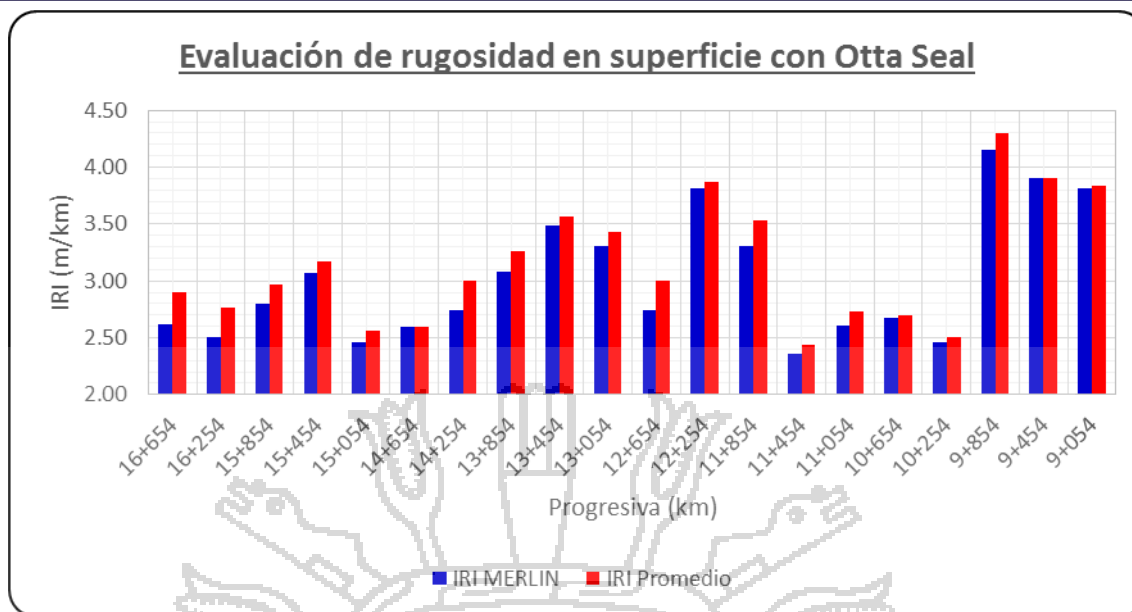


Figura 38. Resultados de medición con el Rugosímetro MERLIN y IRI promedio (Tramo I).

Podemos notar que el IRI obtenido con el MERLIN se mantiene por debajo de los obtenidos al hacer las mediciones con el Roughometer III, lo cual nos hace pensar que existe una relación entre estos valores para cada sub tramo evaluado.

Tramo II

Así como en el tramo I los valores de IRI obtenidos con el merlín se mantienen menores en todo el tramo lo cual nos indica que existe una correlación entre estos valores.

Considerando que los equipos de la clase 1 como el MERLIN que es una modificación de los perfilómetros estáticos, son más exactos que los de clase III a donde pertenece el Roughometer III que es un equipo de Tipo Repuesta. Podemos obtener valores aproximados de IRI MERLIN a partir del IRI de Roughometer III.

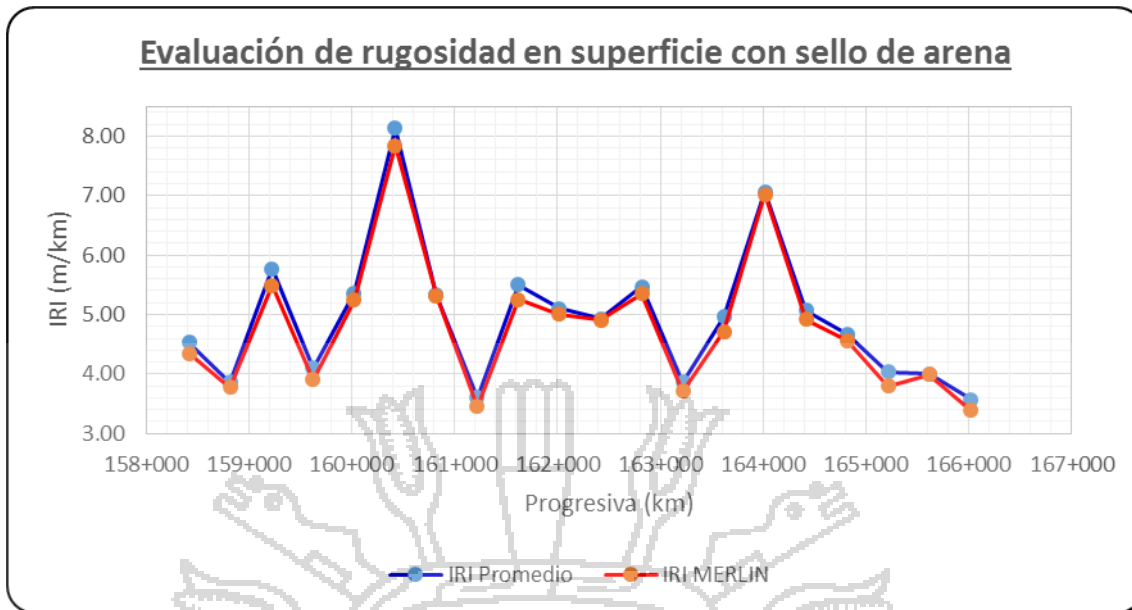


Figura 39. Resultados de medición con el Rugosímetro MERLIN y IRI promedio (Tramo II).

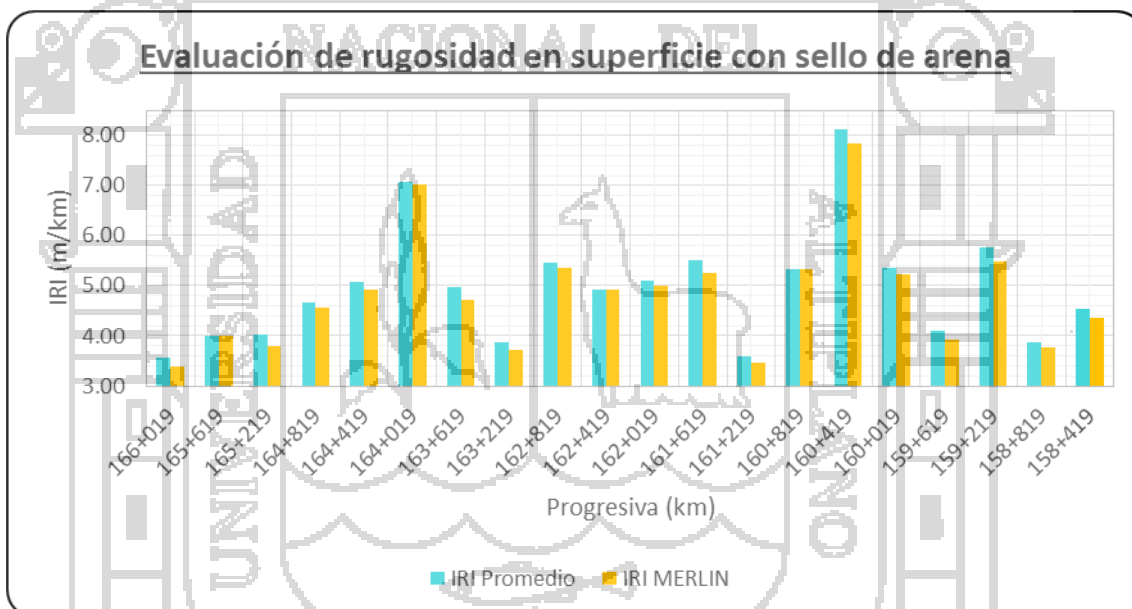


Figura 40. Resultados de medición con el Rugosímetro MERLIN y IRI promedio (Tramo II).

Para correlacionar los valores de las mediciones con los dos equipos usaremos regresiones lineales, con el objetivo de obtener ecuaciones de correlación para luego calcular los valores de rugosidad que se aproximen a los obtenidos con el MERLIN a partir de valores de IRI obtenidos con el Roughometer III

5.5. Correlación de Resultados.

5.5.1. Calculo de la Ecuación de Regresión.

Las ecuaciones de regresión que usaremos para la correlación de datos de IRI serán:

- Regresión Lineal.
- Regresión exponencial.
- Regresión logarítmica.
- Regresión potencial.

Tramo I

Prog.	IRI		Ecuaciones de Regresión			
	IRI Promedio	IRI MERLIN	Lineal	Exponencial	Logarítmica	Potencial
16+654	2.90	2.62	2.77	2.75	2.80	2.77
16+254	2.77	2.51	2.63	2.63	2.65	2.64
15+854	2.97	2.80	2.84	2.81	2.87	2.84
15+454	3.17	3.07	3.04	2.99	3.09	3.04
15+054	2.57	2.46	2.43	2.47	2.40	2.44
14+654	2.60	2.60	2.46	2.49	2.44	2.47
14+254	3.00	2.74	2.87	2.84	2.91	2.87
13+854	3.27	3.08	3.14	3.09	3.19	3.14
13+454	3.57	3.49	3.45	3.41	3.47	3.44
13+054	3.43	3.31	3.31	3.26	3.35	3.30
12+654	3.00	2.74	2.87	2.84	2.91	2.87
12+254	3.87	3.81	3.75	3.76	3.73	3.74
11+854	3.53	3.31	3.41	3.37	3.44	3.40
11+454	2.43	2.36	2.30	2.36	2.23	2.31
11+054	2.73	2.61	2.60	2.60	2.61	2.61
10+654	2.70	2.67	2.57	2.57	2.57	2.57
10+254	2.50	2.46	2.36	2.41	2.32	2.38
9+854	4.30	4.15	4.19	4.32	4.08	4.17
9+454	3.90	3.91	3.79	3.80	3.76	3.77
9+054	3.83	3.82	3.72	3.72	3.71	3.70
IRI tramo	3.1517	3.0260	3.0259	3.0249	3.0260	3.0239

Tabla 15. Evaluación de las ecuaciones de regresión (Tramo I).

Observamos en el cuadro anterior como en el siguiente que la ecuación que mejor correlaciona los pares ordenados es la regresión logarítmica, obteniéndose un valor promedio de IRI igual al obtenido con el MERLIN.

Las ecuaciones que se obtuvieran es un tramo no son aplicable para otro tramo, se debe obtener una ecuación para cada tramo y seleccionar el que mejor represente en cada tramo así como en el caso del TRAMO I y II las ecuaciones son diferentes, pero en este caso el tipo de ecuación son iguales.

Tramo II

Prog.	IRI		Ecuaciones de Regresión			
	IRI Promedio	IRI MERLIN	Lineal	Exponencial	Logarítmica	Potencial
166+019	3.57	3.39	3.44	3.61	3.22	3.43
165+619	4.00	3.99	3.87	3.91	3.82	3.86
165+219	4.03	3.80	3.90	3.94	3.86	3.89
164+819	4.67	4.56	4.52	4.44	4.62	4.52
164+419	5.07	4.92	4.92	4.79	5.04	4.92
164+019	7.07	7.02	6.89	7.01	6.78	6.91
163+619	4.97	4.71	4.82	4.70	4.94	4.82
163+219	3.87	3.71	3.74	3.82	3.64	3.73
162+819	5.47	5.35	5.31	5.17	5.44	5.31
162+419	4.93	4.91	4.79	4.67	4.91	4.78
162+019	5.10	5.01	4.95	4.82	5.08	4.95
161+619	5.50	5.25	5.35	5.21	5.47	5.35
161+219	3.60	3.45	3.47	3.63	3.27	3.47
160+819	5.33	5.32	5.18	5.04	5.31	5.18
160+419	8.13	7.84	7.94	8.58	7.51	7.97
160+019	5.37	5.24	5.21	5.07	5.34	5.21
159+619	4.10	3.91	3.97	3.99	3.94	3.96
159+219	5.77	5.49	5.61	5.48	5.72	5.61
158+819	3.87	3.78	3.74	3.82	3.64	3.73
158+419	4.53	4.35	4.39	4.33	4.47	4.39
IRI tramo	4.9467	4.8000	4.7997	4.8023	4.8000	4.7997

Tabla 16. Evaluación de las ecuaciones de regresión (Tramo II).

5.5.2. Ecuación de Correlación de IRI.

Tramo I

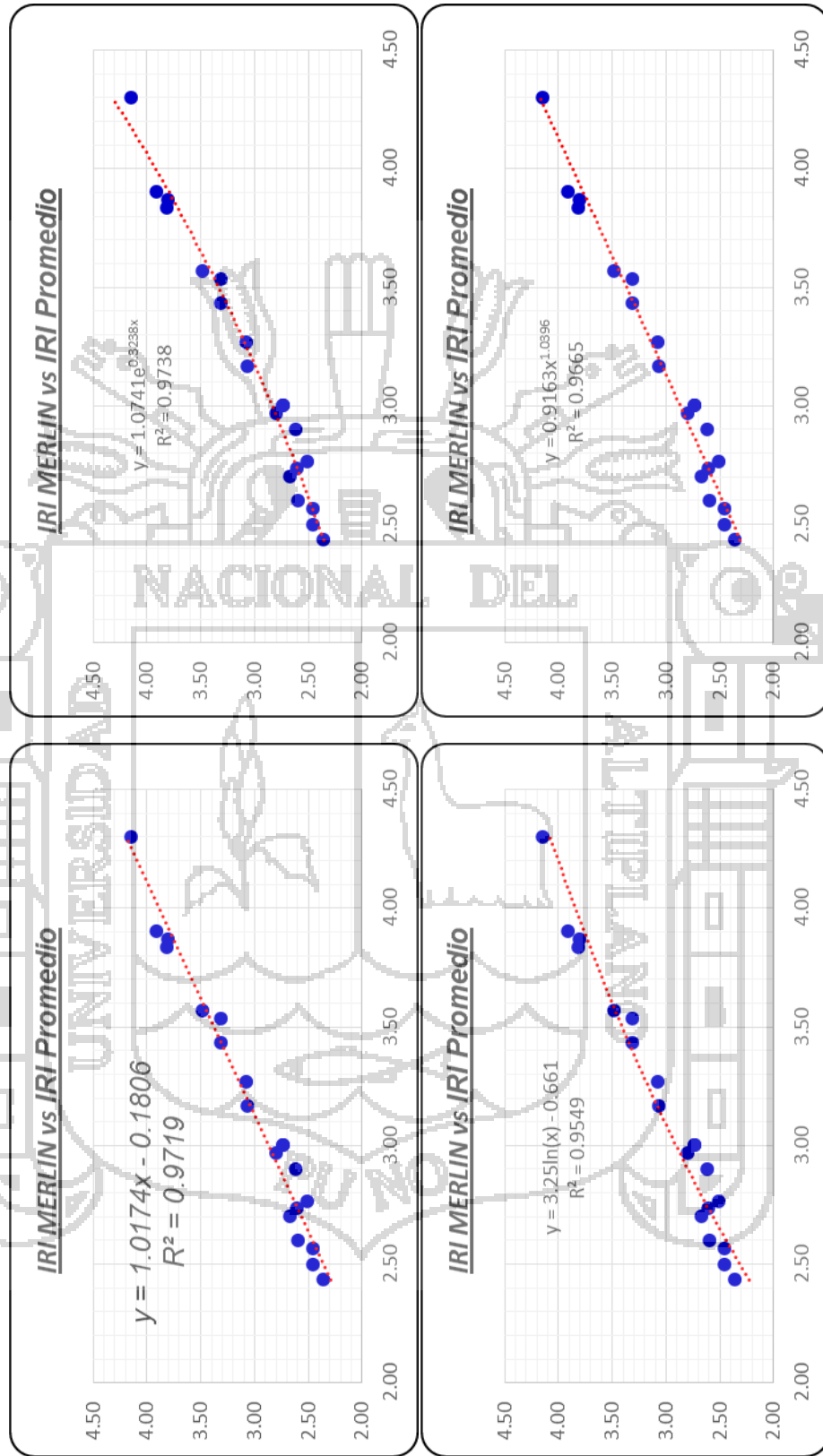


Figura 41. Ecuaciones de regresión para las mediciones del IRI (Tramo I).

Tramo I.

Las ecuaciones de correlación de datos de mediciones del IRI con el equipo MERLIN y Roughometer III son los que se muestran:

- Regresión lineal. $y = -0.1806 - 1.0174x$
- Regresión exponencial. $y = 1.0741 * e^{0.3238x}$
- Regresión Logarítmica. $y = 3.25 * \ln(x) - 0.661$
- Regresión Potencial. $y = 0.9163 * x^{1.0396}$

La ecuación logarítmica es la que mejor correlaciona los datos y por lo tanto será la ecuación que usaremos para convertir los datos obtenidos con el Roughometer III para aproximar a resultados MERLIN, que es el objetivo de este trabajo de investigación.

Tramo I.

De la misma manera para el Tramo II.

- Regresión lineal. $y = -0.0762 - 0.9857x$
- Regresión exponencial. $y = 1.8316 * e^{0.1899x}$
- Regresión Logarítmica. $y = 5.2013 * \ln(x) - 3.3954$
- Regresión Potencial. $y = 0.9367 * x^{1.0217}$

La regresión logarítmica representa de mejor manera la correlación de los datos de IRI, de igual manera usaremos esta ecuación para calcular la rugosidad en el tramo II y de esta manera obtener resultados de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mediante ecuaciones de correlación.

Debemos aclarar que las ecuaciones encontradas para ambos casos (Tramos) no se pueden aplicar a otros tramos, para cada tramo a evaluar se debe verificar y calcular las respectivas ecuaciones de correlación y escoger la que mejor correlacione los datos medidos con los diferentes equipos, considerando que los equipos de la clase 1 como es el MERLIN son más confiables y exactos que algunos equipos de dinámicos y con sistemas automáticos para el recojo de datos.



TRAMO II

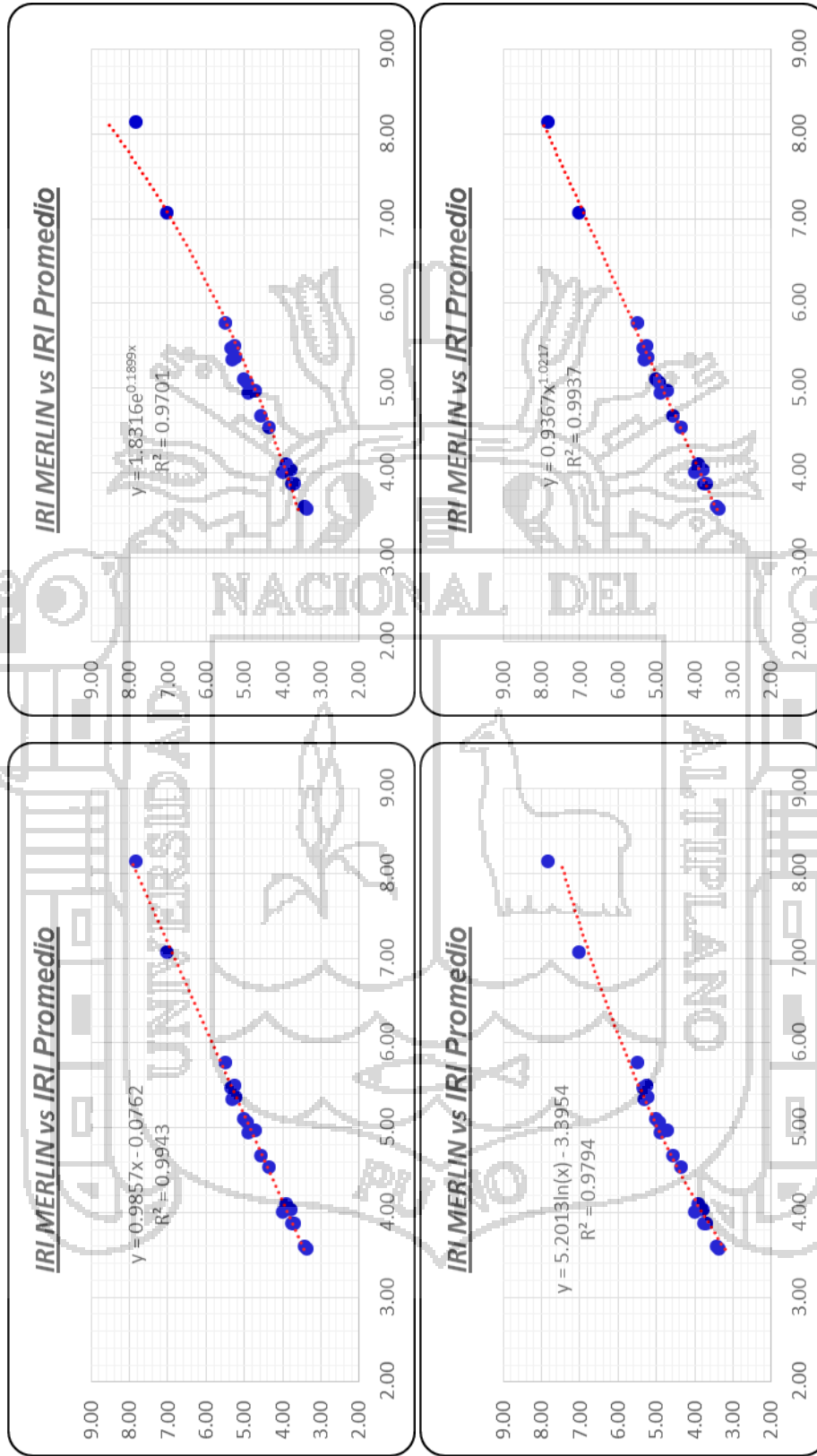


Figura 42. Ecuaciones de regresión para las mediciones del IRI (Tramo II).

5.6. Aplicación de la Ecuación de Correlación.

Tramo I

Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km
1	16+654	3.0	2.91	16	10+654	2.9	2.80	31	4+654	6.5	5.42
2	16+254	3.0	2.91	17	10+254	2.4	2.18	32	4+254	5.5	4.88
3	15+854	3.0	2.91	18	9+854	4.2	4.00	33	3+854	3.3	3.22
4	15+454	3.4	3.32	19	9+454	3.8	3.68	34	3+454	3.4	3.32
5	15+054	2.5	2.32	20	9+054	3.7	3.59	35	3+054	6.2	5.27
6	14+654	2.8	2.69	21	8+654	2.8	2.69	36	2+654	4.1	3.92
7	14+254	3.1	3.02	22	8+254	3.8	3.68	37	2+254	4.8	4.44
8	13+854	3.4	3.32	23	7+854	3.2	3.12	38	1+854	4.3	4.08
9	13+454	3.5	3.41	24	7+454	3.7	3.59	39	1+454	4.9	4.50
10	13+054	3.3	3.22	25	7+054	3.7	3.59	40	1+054	4.4	4.15
11	12+654	2.9	2.80	26	6+654	5.6	4.94	41	0+654	5.2	4.70
12	12+254	3.9	3.76	27	6+254	4.6	4.30	42	0+254	2.8	2.69
13	11+854	3.6	3.50	28	5+854	4.6	4.30	43	0+000	3.3	3.22
14	11+454	2.6	2.44	29	5+454	3	2.91				
15	11+054	2.8	2.69	30	5+054	4.5	4.23				

Tabla 17. Aproximación del IRI (MERLIN) a partir de IRI (Roughometer III) (Tramo I).



Tramo II

Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km
1	166+019	3.7	3.41	21	158+019	4.8	4.76	41	150+019	4.0	3.82
2	165+619	4.0	3.82	22	157+619	4.8	4.76	42	149+619	3.7	3.41
3	165+219	4.1	3.94	23	157+219	3.8	3.55	43	149+219	3.7	3.41
4	164+819	4.7	4.65	24	156+819	3.5	3.12	44	148+819	4.0	3.82
5	164+419	5.0	4.98	25	156+419	3.4	2.97	45	148+419	3.2	2.65
6	164+019	7.0	6.73	26	156+019	3.3	2.81	46	148+019	3.8	3.55
7	163+619	5.0	4.98	27	155+619	4.0	3.82	47	147+619	3.7	3.41
8	163+219	4.0	3.82	28	155+219	4.4	4.31	48	147+219	4.5	4.43
9	162+819	5.5	5.47	29	154+819	3.1	2.49	49	146+819	3.6	3.27
10	162+419	5.0	4.98	30	154+419	2.6	1.57	50	146+419	4.8	4.76
11	162+019	5.2	5.18	31	154+019	3.7	3.41	51	146+019	2.6	1.57
12	161+619	5.5	5.47	32	153+619	3.9	3.68	52	145+619	3.0	2.32
13	161+219	3.7	3.41	33	153+219	3.2	2.65	53	145+219	3.4	2.97
14	160+819	5.4	5.38	34	152+819	2.9	2.14	54	144+819	4.4	4.31
15	160+419	8.1	7.49	35	152+419	3.1	2.49	55	144+419	3.2	2.65
16	160+019	5.4	5.38	36	152+019	3.4	2.97	56	144+019	3.4	2.97
17	159+619	4.2	4.07	37	151+619	3.6	3.27	57	143+619	3.5	3.12
18	159+219	5.7	5.66	38	151+219	3.9	3.68	58	143+219	4.1	3.94
19	158+819	3.8	3.55	39	150+819	4.7	4.65	59	142+819	4.1	3.94
20	158+419	4.6	4.54	40	150+419	3.8	3.55	60	142+419	3.9	3.68



Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km
61	142+019	3.8	3.55	81	134+019	5.2	5.18	101	126+019	4.9	4.87
62	141+619	3.9	3.68	82	133+619	4.4	4.31	102	125+619	4.0	3.82
63	141+219	3.3	2.81	83	133+219	3.8	3.55	103	125+219	4.3	4.19
64	140+819	2.8	1.96	84	132+819	4.1	3.94	104	124+819	3.4	2.97
65	140+419	3.1	2.49	85	132+419	4.6	4.54	105	124+419	3.7	3.41
66	140+019	3.1	2.49	86	132+019	4.1	3.94	106	124+019	3.5	3.12
67	139+619	3.5	3.12	87	131+619	3.3	2.81	107	123+619	3.5	3.12
68	139+219	3.4	2.97	88	131+219	3.3	2.81	108	123+219	4.0	3.82
69	138+819	3.4	2.97	89	130+819	3.8	3.55	109	122+819	3.3	2.81
70	138+419	3.6	3.27	90	130+419	3.3	2.81	110	122+419	4.2	4.07
71	138+019	3.0	2.32	91	130+019	4.5	4.43	111	122+019	4.3	4.19
72	137+619	4.1	3.94	92	129+619	7.3	6.94	112	121+619	3.8	3.55
73	137+219	4.4	4.31	93	129+219	6.0	5.92	113	121+219	3.2	2.65
74	136+819	3.8	3.55	94	128+819	4.4	4.31	114	120+819	5.1	5.08
75	136+419	4.0	3.82	95	128+419	4.1	3.94	115	120+419	3.9	3.68
76	136+019	4.5	4.43	96	128+019	3.5	3.12	116	120+019	4.1	3.94
77	135+619	4.5	4.43	97	127+619	3.4	2.97	117	119+619	3.3	2.81
78	135+219	4.8	4.76	98	127+219	3.6	3.27	118	119+219	4.2	4.07
79	134+819	4.7	4.65	99	126+819	3.4	2.97	119	118+819	5.0	4.98
80	134+419	4.5	4.43	100	126+419	5.1	5.08	120	118+419	3.7	3.41

Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km	Ítem	Progresiva	IRI m/km	IRI (MERLIN) m/km
121	118+019	2.9	2.14	141	110+019	3.0	2.32
122	117+619	3.3	2.81	142	109+619	3.0	2.32
123	117+219	5.2	5.18	143	109+219	3.5	3.12
124	116+819	4.2	4.07	144	108+819	2.7	1.77
125	116+419	3.6	3.27	145	108+419	2.7	1.77
126	116+019	3.7	3.41	146	108+019	4.4	4.31
127	115+619	3.0	2.32				
128	115+219	3.4	2.97				
129	114+819	3.5	3.12				
130	114+419	3.0	2.32				
131	114+019	2.4	1.16				
132	113+619	2.7	1.77				
133	113+219	3.5	3.12				
134	112+819	3.7	3.41				
135	112+419	4.5	4.43				
136	112+019	4.2	4.07				
137	111+619	3.6	3.27				
138	111+219	3.1	2.49				
139	110+819	3.3	2.81				
140	110+419	3.6	3.27				

Tabla 18. Aproximación del IRI (MERLIN) a partir de IRI (Roughometer III) (Tramo II).

5.7. Contratación de Hipótesis.

- Al correlacionar los resultados obtenidos con los dos equipos utilizados para este trabajo de investigación, se puede ver que la regresión que mejor representa los pares ordenados de rugosidad es la Logarítmica, esto no necesariamente indica que en todos los casos deba usarse la ecuación encontrada, más por el contrario se debe evaluar y buscar un ecuación de correlación que represente los datos obtenidos.

- Existe una diferencia entre los resultados de IRI, en la medición de rugosidad, con dos equipos diferentes, como son: el Rugosímetro MERLIN y el Roughometer III, esta diferencia está asociada a la técnica de toma de datos de cada equipo, mientras que el equipo MERLIN toma los datos directamente midiendo las deformaciones, el Roughometer III toma los datos indirecta mediante sensores que calculan los desplazamientos verticales del eje del vehículo.
- Se hizo la medición del IRI con el Roughometer III en dos tramos con diferentes superficies de rodadura: Otta Seal y sello de Arena sobre un Otta Seal deteriorado.
- Se hizo la medición con el Rugosímetro MERLIN de los tramos seleccionados para su comparación, obteniendo un IRI promedio diferente para estos tramos.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

- Al realizar la medición del IRI con los equipos seleccionados para la presente investigación, se corrobora el planteamiento hipotético “existe una diferencia en los resultados”, obteniéndose resultados de rugosidad mayores al medir con el equipo Roughometer III en comparación con el Rugosímetro Merlín.
- Los equipos de la Clase 3 como el Roughometer III, ofrecen menos confiabilidad en cuanto a resultados. Como por ejemplo para la recepción de tramos de pavimentación. Para salvar esta diferencia de resultados y considerando que el Merlín es más confiable, se puede hacer tramos de evaluación para encontrar ecuaciones que correlacionen los valores de diferentes equipos. Para hacer una comparación de estos resultados, se tuvo como base la recomendación del banco mundial, donde indica que los equipos de la Clase 1 son más exactos que los de Clase 3.
- El tratamiento superficial Otta seal, es un método económico para

proteger la estructura del pavimento, pero no cumple ninguna función estructural de distribución de esfuerzos, en ese sentido la rugosidad de la vía dependerá de la calidad de las capas inferiores y del sistema de drenaje del pavimento.

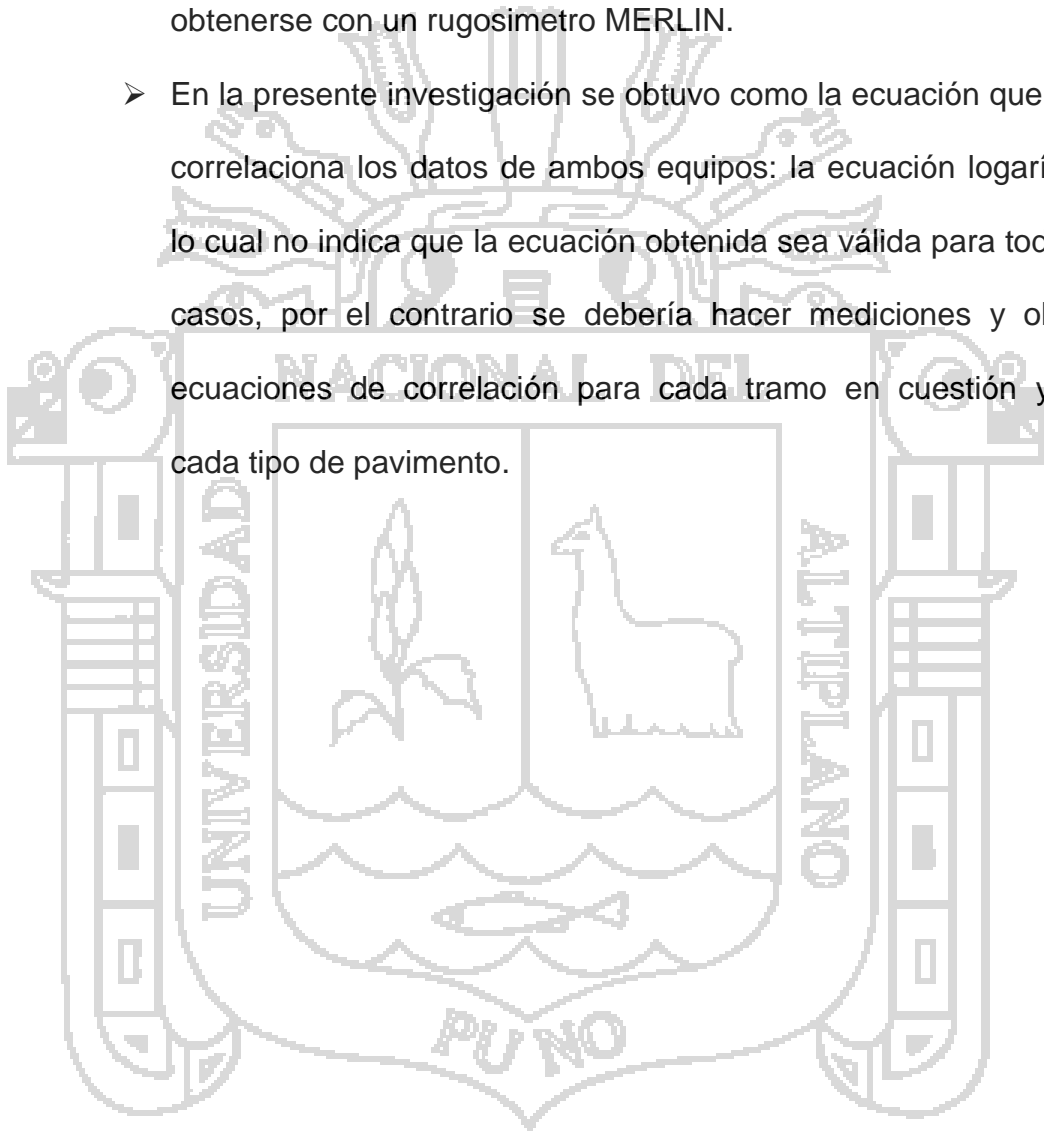
- La gran ventaja que posee este tipo de tratamiento superficial es en cuanto a la economía, ya que no es necesario gran cantidad de equipo mecánico, se puede trabajar con agregado disponible en la zona y su aplicación es sencilla y rápida.
- Las desventajas más considerables en la utilización del Otta Seal son en cuanto a la seguridad (control de emisión de polvos) y el aspecto de una brigada encargada exclusiva para mantenimiento rutinario del mismo.
- Existen una gran variedad de equipos para la evaluación de la rugosidad de los pavimentos, la elección depende del usuario y sus fines ya que en la actualidad los equipos existentes ofrecen muchas ventajas sobre otras y no necesariamente un equipo costoso ofrece resultados más exactos que uno de menor precio.
- La elección del equipo a usar depende de dos aspectos muy importantes como son: la exactitud de los resultados obtenidos y el rendimiento del equipo.
- Los equipos del tipo Mira y Nivel y Perfilómetros Estáticos y sus derivados son los que mejores resultado ofrecen, pero su rendimiento es bajo, cuando se compara con equipos de tipo respuesta los cuales poseen su mayor ventaja en el rendimiento.
- El Rugosímetro MERLIN es un equipo de la Clase 1 derivado del

Perfilometro estático es por esta razón que los resultados obtenidos son muy exactos, solo superados por el método de Mira y Nivel.

- El cálculo del IRI a partir de los datos obtenidos en campo con el Equipo MERLIN es mediante ecuaciones de correlación.
- El equipo MERLIN por su exactitud puede ser usado inclusive para la calibración de otro equipo como los de tipo respuesta.
- La solución matemática del modelo “Cuarto de Carro”, es de suma importancia para el análisis del comportamiento físico y la generación de nuevas tecnologías para la medición del IRI.
- En la presente investigación la solución obtenida de las ecuaciones dinámicas que gobiernan el modelo cuarto de carro es mediante una aproximación numérica.
- Para el análisis y cálculo del IRI usando el modelo Cuarto de Carro es necesario la implementación en un lenguaje de programación puesto que las ecuaciones que lo representan son un sistema de ecuaciones diferenciales.
- El Roughometer III, es un equipo de la clase 3, de tipo respuesta lo cual indica que los resultados obtenidos son de forma indirecta, mediante sensores que miden los desplazamientos verticales de la masa suspendida y no suspendida del vehículo.
- El Roughometer III como todos los equipos de tipo respuesta poseen su gran ventaja en el rendimiento del equipo y son ideales para la evaluación de grandes distancias de carretera.
- Al comparar los resultados de evaluación del IRI, se encuentra una diferencia entre estos lo cual indica que uno de los resultados debe

ser corregido, considerando que los equipos de la Clase 1 (MERLIN) ofrecen mejores resultados concluimos que los resultados del Roughometer III deben ser corregidos.

- Mediante ecuaciones de correlación se puede aproximar los resultados obtenidos con el Roughometer III a los que deberían obtenerse con un rugosímetro MERLIN.
- En la presente investigación se obtuvo como la ecuación que mejor correlaciona los datos de ambos equipos: la ecuación logarítmica, lo cual no indica que la ecuación obtenida sea válida para todos los casos, por el contrario se debería hacer mediciones y obtener ecuaciones de correlación para cada tramo en cuestión y para cada tipo de pavimento.



6.2. Recomendaciones.

- Se recomienda hacer investigaciones sobre el uso del Otta Seal, las ventajas y desventajas económicas en comparación a otros tipos de tratamiento superficial.
- Se recomienda hacer trabajos de investigación sobre las técnicas constructivas y de seguridad para mejorar el control de los polvos generado por la utilización de este método de tratamiento bituminoso.
- Se recomienda hacer la comparación de los resultados de varios equipos y realizar un análisis del comportamiento y la diferencia de los resultados obtenidos al evaluar la superficie del pavimento.
- Se recomienda hacer trabajos de investigación para mejorar el rendimiento del equipo Merlín o diseñar equipos basados en este.
- Se recomienda evaluar los resultados obtenidos con equipo de tipo respuesta confrontándolos y/o comparándolos con un equipo de la Clase 1 al ser considerados de más exactitud.
- Se recomienda hacer una investigación similar al presente, pero considerando como superficie de evaluación, carreteras con carpeta asfáltica, ya que en estos se tienen superficies más regulares, y poca variación de los resultados, esto puede ser aprovechado para la comparación de los resultados de evaluación con otros equipos, obteniendo un análisis más riguroso por la pequeña diferencia que se obtendrá.
- Se recomienda hacer una investigación de la durabilidad de los pavimentos con tratamiento superficial, considerando como método

de control el IRI, y finalmente hacer una comparación de la evolución del deterioro de las superficies de estos tratamientos, para la toma de decisiones, de cuál de los tratamientos se debe usar en determinadas condiciones.

- Se recomienda hacer la evaluación de los pavimentos de todos los tipos de superficie de rodadura, ya que este control nos ayudará en la toma de decisiones para la prevención, mitigación y mantenimiento de estos en el momento adecuado.
- En la presente investigación se evaluó una carretera con tratamiento superficial Otta Seal, de un solo carril, razón por la cual la evaluación solo se hizo en un solo sentido, cuando sea necesario la evaluación de carreteras con superficie de rodadura diferente al Otta Seal se debe tener en consideración otros factores como: el motivo de medición, número de carriles, clasificación vial.
- En carreteras con tratamientos superficiales de cualquier tipo de debe medir la rugosidad dependiendo del número de carriles como mínimo una medición por carril.
- En pavimentos con carpeta de concreto asfáltico y/o hidráulico se debe realizar una evaluación como mínimo por carril, siendo lo recomendable dos por carril (uno en cada huella del vehículo)
- Para la recepción de nuevos pavimentos se debe realizar dos mediciones como mínimo por carril, siendo lo ideal cuatro mediciones por carril.
- En otros tipos de pavimentos, como de los aeropuertos y otros se debe evaluar con más rigurosidad.

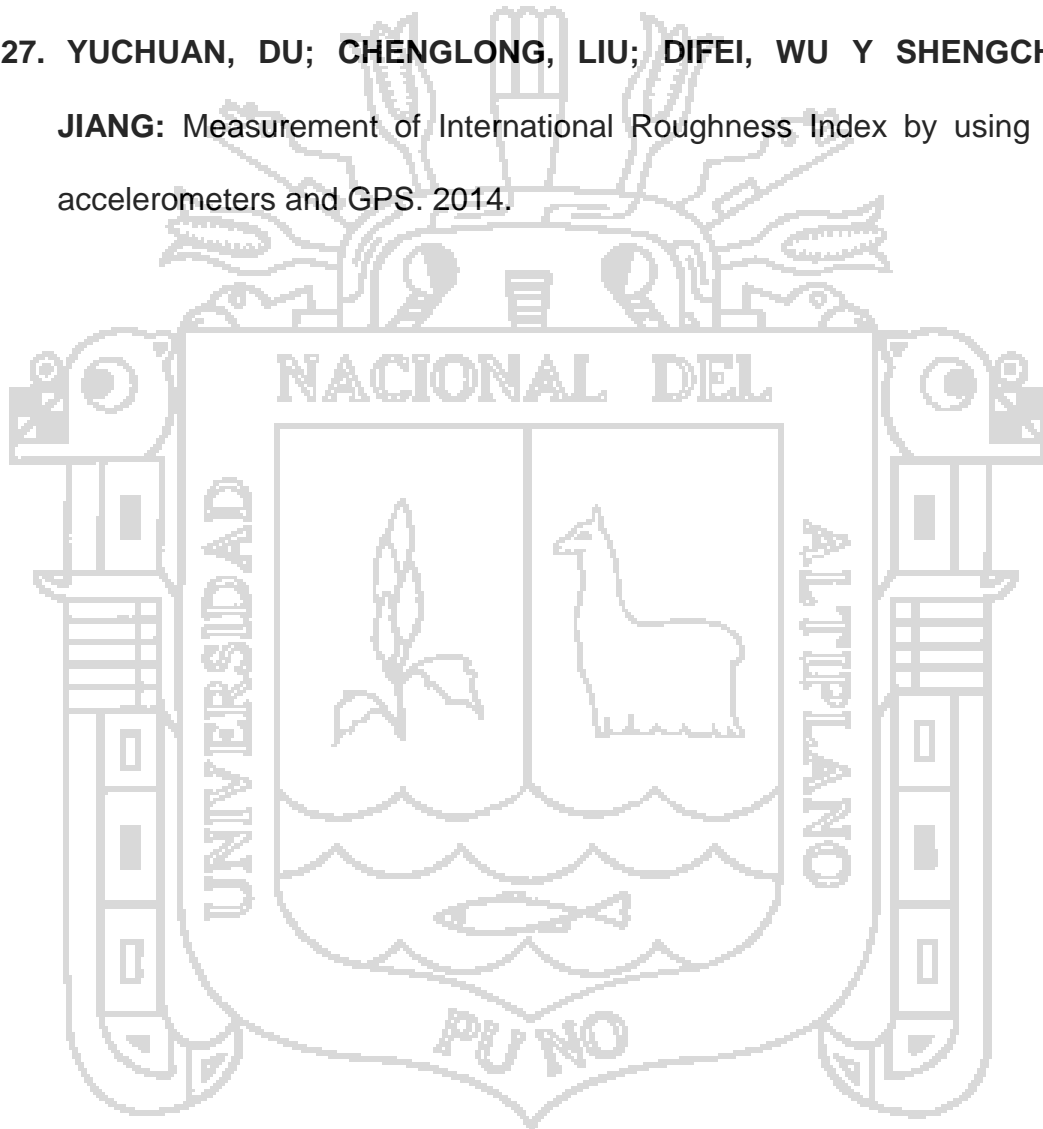
BIBLIOGRAFIA.

1. **ANDRONIC, FLORIN; RUSU MANOLACHE AND PATULEANU LILIANA:**
Pasive suspension modeling using Matlab, Quarter Car model, input signal step type. University Of Suceava, Romania.
2. **ARRB GROUP:** User Manual Roughometer III, Australia. ARRB Group Ltd 2009.
3. **ARRIAGA, MARIO; GARNICA, PAUL y RICO, ALFONSO:** Índice Internacional de rugosidad en la red carretera de México, publicación técnica No. 108, Sanfandilla: México. 1998.
4. **BADILLA, GUSTAVO:** Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del índice de regularidad internacional. (IRI), San José. Costa Rica, 2008.
5. **CARO, F. Y PEÑA, G.:** Análisis y criterios para el caculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica. Colombia, 2012.
6. **CHAVEZ, VICTOR:** Manual del diseño geométrico de vías urbanas. Lima. Perú. ICG, 2005.
7. **CUNDILL, M:** The MERLIN Road Roughness Machine: User Guide. Transport Research Laboratory, Overseas Development administration. TRL Report 229. Crowthorne. 1996.

8. **DEL AGUILA, PABLO:** Desarrollo de la Ecuación de Correlación para la determinación del IRI en pavimentos asfálticos nuevos, utilizando el Rugosímetro MERLIN. Sevilla, 1999.
9. **DEL AGUILA, PABLO:** Estado del Arte sobre la Medición de la Rugosidad de Pavimentos en el Perú. Lima, 1998.
10. **DEL AGUILA, PABLO:** Metodología Para La Determinación De Rugosidad De Los Pavimentos. Lima. Perú, 2000.
11. **DYER STEPHEN:** Boyd Ryan y Dyer Justin. Refinement of measurement techniques of road profile and International Roughness Index (IRI) to Support the KDOT Pavement Management System annual Road-condition survey Research. Kansas State University, Manhattan, Kansas. 2005.
12. **GERMAN, VIVAR:** Comentarios sobre la Medición e Interpretación de Rugosidad en los Pavimentos del Perú. Lima: Perú. 1998.
13. **MORROW GREGORY:** Comparison of Roughness Measuring Instruments. Department of Civil and environmental engineering, University of Auckland, New Zealand. 2006.
14. **MTC:** "PLAN DE ACCIÓN 2011". Ministerio De Transportes Y Comunicaciones – MTC, Proyecto Especial De Infraestructura De Transporte Nacional, Lima: Perú. 2011.
15. **MTC:** Especificaciones Técnicas Generales Para Carreteras. EG 2013, Lima. Perú, MTC, 2013.
16. **MTC:** Especificaciones Técnicas Generales Para La Conservación de Carreteras, Aprobado por Resolución Directoral N°051-2007- MTC/14. Lima: Perú. 2007.

17. **MTC:** Manual de Ensayos de Materiales Para Carreteras (EM 2000) Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Lima, Perú. 2003.
18. **MTC:** Manual Para El Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Lima: Perú, 2008.
19. **MTC:** Manual Técnico de Mantenimiento Rutinario Para La Red Vial Departamental No Pavimentada, Provías Departamental, Programa de Caminos Departamentales. Aprobado por la Resolución Directoral N° 015-2006-MTC/14. Lima: Perú. 2014.
20. **NLT – 330/98:** Cálculo de índice de Regularidad Internacional IRI en pavimentos de carretera, 1998.
21. **OVERBY CHARLES:** A Guide to the Use of Otta Seals. Norway. NRRL, 1999.
22. **REDONDO, OMAIDER:** Diseño de un equipo con base al equipo MERLIN que permita evaluar las condiciones de rugosidad existente en un pavimento. Universidad Rafael Urdaneta, Escuela de Ingeniería Civil. Maracaibo, 2006.
23. **SAYERS MICHAEL Y KARAMIHAS STEVEN:** The Little book of profiling. Basic information about measuring and interpreting road profiles. September 1998.
24. **SAYERS, MICHAEL. GILLESPIE THOMAS y QUEIROZ CESAR:** World Bank Technical paper number 46. The international road roughness experiment, Washington. D.C. USA, 1986.

25. **SAYERS, MICHAEL. GILLESPIE, THOMAS y QUEIROZ, CESAR:** World Bank Technical paper number 45. The international road roughness experiment, Washington. D.C. USA, 1985.
26. **VASQUEZ, LUIS:** Para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Manizales. Colombia, 2002.
27. **YUCHUAN, DU; CHENGLONG, LIU; DIFEI, WU Y SHENGCHUAN, JIANG:** Measurement of International Roughness Index by using Z-axis accelerometers and GPS. 2014.



28.

ANEXOS**ANEXO 01.**

- ❖ PANEL FOTOGRÁFICO - MERLIN.
- ❖ PANEL FOTOGRÁFICO - ROUGHOMETER III.

ANEXO 02.

- ❖ CARTA DE CARACTERÍSTICAS DEL PEN 120/150.
- ❖ CARACTERÍSTICAS GRANULOMETRICAS DEL AGREGADO PARA OTTA SEAL.
- ❖ RESUMEN ESTUDIO DE TRÁFICO.
- ❖ DISEÑO DE OTTA SEAL.

ANEXO 03.

- ❖ CONSTANCIA DE CERTIFICACIÓN DE TRABAJOS.

ANEXO 04.

- ❖ TABLA DE APLICACIÓN NUMÉRICA.

ANEXO 05.

- ❖ DATOS DE EVALUACIÓN DEL IRI CON EL ROUGHOMETER III – TRAMO I.
- ❖ DATOS DE EVALUACIÓN DEL IRI CON EL ROUGHOMETER III – TRAMO II.

ANEXO 06.

- ❖ DATOS DE EVALUACIÓN DEL IRI CON EL MERLÍN – TRAMO I.
- ❖ DATOS DE EVALUACIÓN DEL IRI CON EL MERLÍN – TRAMO II.

ANEXO 07.

- ❖ DATOS DE APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN SELECCIONADA.

ANEXO 08.

- ❖ EVALUACION DEL IRI PRESENTADO A LA ENTIDAD (PROVIAS NACIONAL) – TRAMO I.
- ❖ EVALUACION DEL IRI PRESENTADO A LA ENTIDAD (PROVIAS NACIONAL) – TRAMO II.

ANEXO 09.

- ❖ PLANO UBICACIÓN.
- ❖ PLANO CLAVE.

