



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ANÁLISIS DEL IRI PARA UN PROYECTO DE CARRETERA SINUOSA CONCESIONADA EN EL PERÚ

Jorge Montoya-Goicochea

Lima, Septiembre de 2013

FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Ingeniería Vial

Montoya, J. (2013). *Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú*. Tesis de Master en Ingeniería Civil con Mención en Ingeniería Vial. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA MÁSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON
MENCIÓN EN INGENIERÍA VIAL**



**“ANÁLISIS DEL IRI PARA UN PROYECTO DE CARRETERA SINUOSA
CONCESIONADA EN EL PERÚ”**

Tesis para optar el Grado de Máster en Ingeniería Civil
con mención en Ingeniería Vial

Jorge Eduardo Montoya Goicochea

Asesor: Ing. Germán Gallardo

Lima, Septiembre 2013

A mis padres y abuelos, por el gran sacrificio realizado para hacer de mí un profesional.

A mi esposa Mónica y a mis hijos, a quienes agradezco y prometo dedicarles más tiempo.

Prólogo

La incertidumbre de conocer la magnitud de la incidencia de las variaciones geométricas del trazo de la vía en el cálculo de la rugosidad, surge a partir de un seguimiento a los resultados de IRI obtenidos por un tren de perfilado a base de pavimento, en cuya información se observaba una tendencia a obtener resultados mayores cuando el tren de perfilado trabajaba en zonas con curvas y pendientes constantes.

Inicialmente los valores altos de rugosidad, obtenidos durante los trabajos del tren perfilado de base, fueron asociados a la dificultad para trabajar y dar forma a las transiciones de bombeo a peralte, y viceversa, en las curvas horizontales y el cambio de pendiente en las curvas verticales. Sin embargo, gracias a cierta información encontrada, generalmente investigaciones chilenas ubicadas a través del internet, pudo obtenerse un sustento teórico relacionando que en cambios de alta montaña (en adelante “vías de penetración”), existen aspectos y consideraciones que deben tenerse en cuenta para la estimación, procesamiento e interpretación de sus valores obtenidos.

A partir de lo indicado en el párrafo anterior, se propuso determinar la incidencia de las condiciones geométricas por presencia de curvas horizontales, aprovechando la información disponible reportada de campo durante la ejecución de una rehabilitación de carretera, para luego ser revisada desde el punto de vista contractual e identificar si obligaciones establecidas en el contrato de concesión consideraban márgenes de tolerancia debido a que el trazo de la vía existente pudiera afectar los resultados de rugosidad; en todo caso a partir de dicho vacío, proponer un mecanismo a procedimiento para proponer una tolerancia al umbral admisible de la rugosidad media deslizando del contrato de concesión.

Resumen

La presente tesis resume el análisis del IRI en un proyecto, a partir del cual se propone un mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad media deslizante establecido en el contrato de las concesiones viales, aprovechando la información disponible reportada de campo durante la ejecución de una rehabilitación de carretera.

Para tal objetivo, se planteó como estrategia, relacionar el IRI de diseño de la vía con los datos geométricos de la misma vía en una determinada longitud del tramo vial, y así poder exportarlos a toda la red vial nacional asfaltada mediante la utilización de los datos de geometría y pendiente levantados en el inventario vial del año 2004. Dicha relación generaría una tolerancia que podría ser incluida al control de recepción o nivel de servicio de rugosidad media deslizante establecida en los contratos de concesión.

Como parte de la investigación, se analizan los efectos que la implementación de dicha propuesta puedan generar en el equilibrio económico dentro del marco de los contratos de concesión, analizando también los probables costos y beneficios que puedan generarse, tanto para los usuarios como para los concesionarios.

Asimismo, se desarrolla la metodología detallada utilizada para la obtención de los valores IRI de diseños a partir de la información de campo disponible, reportada durante la ejecución de una rehabilitación de carretera, así como la obtención de los datos a utilizar para representar la geometría de la vía, y finalmente, describen el procedimiento del mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad media deslizante.

Índice

Introducción	01
Capítulo 1: Índice de Rugosidad Internacional (IRI)	05
1.1 Definición	05
1.2 Reseña	07
1.3 Descripción de las clases de equipos de medición de rugosidad	09
1.4 Normativa de organismos internacionales para la medición del IRI	16
1.5 Normativa de otros países respecto a la metodología de control IRI	17
1.6 Antecedentes sobre las mediciones de IRI en el Perú	18
1.7 Especificaciones técnicas para las mediciones de IRI en el Perú	20
1.8 Normativa peruana respecto a la metodología de control IRI	21
Capítulo 2: De los contratos de concesión respecto al control de la rugosidad	23
2.1 Exigencias encontradas en los contratos de concesión respecto al control de la rugosidad	23
2.2 Problemática encontrada respecto a la falta de un factor de tolerancia dentro del mecanismo de control de la rugosidad	24
2.3 Incidencia de las tolerancias en el control de la rugosidad en los contratos de concesión	25
Capítulo 3: Factores que influyen en los resultados del IRI	33
3.1 Influencias en los resultados	33
3.2 Influencia del diseño geométrico	34
3.3 Singularidades	38
Capítulo 4: Determinación de la tolerancia	39
4.1 Sobre la recolección de datos en campo	39
4.2 Procesamiento para la obtención de perfiles de las huellas de circulación	43

4.3	Elaboración del archivo de análisis ERD	45
4.4	Cálculo de valores de IRI mediante el programa PROVAL 3.2	47
4.5	Margen de error del cálculo de valores de la rugosidad	50
4.6	Inventario de los valores de geometría	54
4.7	Análisis bidimensional IRI de diseño vs curvatura horizontal	56
4.8	Línea de tendencia y margen de error encontrado en el análisis bidimensional	59
4.9	Mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad media deslizante	61

Capítulo 5: Ejemplo de otras aplicaciones de la tolerancia en el control de la rugosidad media deslizante

65

5.1	Amenazas en el cumplimiento de los parámetros establecidos en una propuesta para la licitación del Tramo II IIRSA centro	65
-----	--	----

Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Introducción

El estado peruano, desde hace más de una década ha ingresado en una política de privatización de las redes viales; esta tercerización sostiene como objetivo el hacer frente al enorme déficit de infraestructura vial, con un menor riesgo fiscal y un desembolso mínimo de los fondos públicos.

En ese sentido, la concesión de redes viales, es un medio de privatización que tiene por objeto la administración de los bienes públicos mediante el uso, aprovechamiento, explotación de la infraestructura existente o construcción de obras nuevas de los bienes del dominio público por un plazo establecido.

Al respecto, uno de los puntos atribuibles al concesionario dentro de sus obligaciones contractuales es asegurar un determinado nivel de calidad y servicio de la vía. De esta forma, el estado asegura que las condiciones de mantención logren mejoras en los costos de operación de los usuarios y se proteja la infraestructura vial que es patrimonio del estado. Para tal fin el concesionario deberá cumplir con los parámetros, niveles, capacidad y otros asociados a la inversión.

Como vemos en el capítulo 1 del presente estudio, la rugosidad por su importancia es uno de los parámetros de control que normalmente se utiliza para evaluar la gestión del concesionario respecto a la conservación de la vía. La utilización de este parámetro de control es promovida por el Banco Mundial y cuantificada a través del “IRI: Índice de Rugosidad Internacional”, parámetro con el que se estandariza la medición de la rugosidad superficial.

El IRI constituye en la actualidad uno de los controles de serviciabilidad más importantes, debido a que puede relacionarse con el nivel de comodidad, seguridad y costos de operación y por lo tanto, facilita la cuantificación de los beneficios que obtiene el usuario. Existen diversas metodologías de control; todas ellas implementadas por diversas agencias de acuerdo a su necesidad y sus exigencias de control.

Es así que en el segundo capítulo, a partir del análisis de dicho parámetro en el Perú apreciamos que la utilización del IRI como parámetro de control, ha sido implementada aproximadamente desde 1992 en la recepción de obras de construcción y rehabilitación de vías, aplicando el IRI característico como metodología de control. Posteriormente, con el inicio de las concesiones Arequipa – Matarani y la red vial N° 5, se dio inicio a la utilización del IRI como mecanismo de control de redes concesionadas estableciendo como metodología de control el IRI promedio.

A partir de la implementación de las especificaciones técnicas generales para la construcción de las carreteras EG-2000, se establecieron para el país controles de recepción del IRI en función al tipo de superficie construido: 2.0 m/Km para mezcla asfáltica en caliente y lechadas asfálticas, 2.5 m/Km para tratamientos superficiales y 3,0 m/Km para pavimentos de concreto hidráulico.

A partir del año 2004, en algunas de las concesiones viales en el Perú tales como: IIRSA norte, IIRSA sur (tramos 1, 2, 3, 4 y 5), Buenos Aires – Canchaque, IIRSA centro tramo 2 (ejemplo planteado en nuestro último capítulo) y la autopista “Del Sol”, fue implementado como control de rugosidad la metodología conocida como rugosidad media deslizante calculada en intervalos de 1 Km. En relación a lo indicado se señala que la mayoría de los tramos viales concesionados mencionados anteriormente se caracterizan por clasificarse como vías de penetración y por ende, poseer un trazo sinuoso. Sin embargo, y pese a su característica geométrica similar, encontramos que solo para los contratos de las concesiones IIRSA norte e IIRSA sur Tramos 2, 3 y 4, al mecanismo de control de rugosidad se le adicionó una tolerancia; la cual no fue incluida dentro de los contratos de las otras concesiones viales anteriormente mencionadas.

En ese sentido, desde el punto de vista técnico y contractual, la carencia de tolerancias dentro de este mecanismo de control, tema que se desarrolla con más detalle en el capítulo 3 y 4, conlleva a una problemática al momento de controlar la rugosidad por las siguientes hipótesis:

- La ecuación matemática del cálculo del IRI se desarrolló considerando las desviaciones con respecto a una superficie plana teórica (llana y no sinuosa), en la cual un vehículo podría transitar a 80 km/h. En tal sentido, considerando el fuerte trazo sinuoso y los fuertes cambios en la pendiente longitudinal necesarios para poder atravesar las cadenas montañosas que caracterizan la geografía peruana, es notorio indicar que existe una influencia, la cual dificulta que los procesos constructivos aseguren que los valores de rugosidad estén por debajo de los umbrales admisibles.
- Si esta influencia depende mucho del trazo de la vía, queda claro que por defecto el IRI de diseño va a ser mayor que 0 m/km (considerando además que estas singularidades afectan la terminación de los caminos). Por esta razón, es que el umbral admisible de rugosidad debiera modificarse o flexibilizarse según el trazo de la vía.
- El obtener la rugosidad media deslizante a partir del promedio de 5 valores individuales (de 200 metros) consecutivos de IRI, la clasifica como una metodología mucho más susceptible a manifestar los valores altos que puedan haberse obtenido en una muestra individual de 200 metros, pudiendo sobrepasar con facilidad los umbrales máximos permisibles. Por esta razón, esta metodología de control es mucho más exigente que el IRI promedio en la cual (tal como su nombre lo indica) se promedian todos los valores del tramo y de esta forma se pueden disipar los valores altos que puedan obtenerse en los resultados de la medición.

Por lo tanto, la similitud geométrica de las vías de penetración en la mayoría de las redes viales anteriormente mencionadas aunado a la dificultad del mecanismo de control de rugosidad son una fuerte razón para considerar la inclusión de una tolerancia dentro

de los términos contractuales; pero quedando pendiente la problemática respecto al dimensionamiento de dicha tolerancia, puesto que no existe metodología alguna para establecerlo.

En tal sentido, el presente trabajo propone el análisis del IRI en un proyecto para contribuir a una solución a la problemática detallada, determinando dicha tolerancia en función del trazo de la vía de la concesión, y asignándola como un valor porcentual dentro del cuadro de control de parámetros y serviciabilidad o niveles de servicio de forma similar a como han sido asignados en algunos de los contratos de concesión vigentes mencionados anteriormente (ver cuadro 1.5). Para tal objetivo, se planteó como estrategia relacionar el IRI de diseño de la vía con los datos geométricos de la misma vía en una determinada longitud de tramo vial; y así poder exportarlos a toda la red vial nacional asfaltada mediante la utilización de los datos de geometría y pendiente levantados en el inventario vial del año 2004.

Capítulo 1

Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

1.1 Definición

El concepto de rugosidad está definido como la desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal. Así queda indicado en la norma de ensayo ASTM E 867-06 “*Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*”.

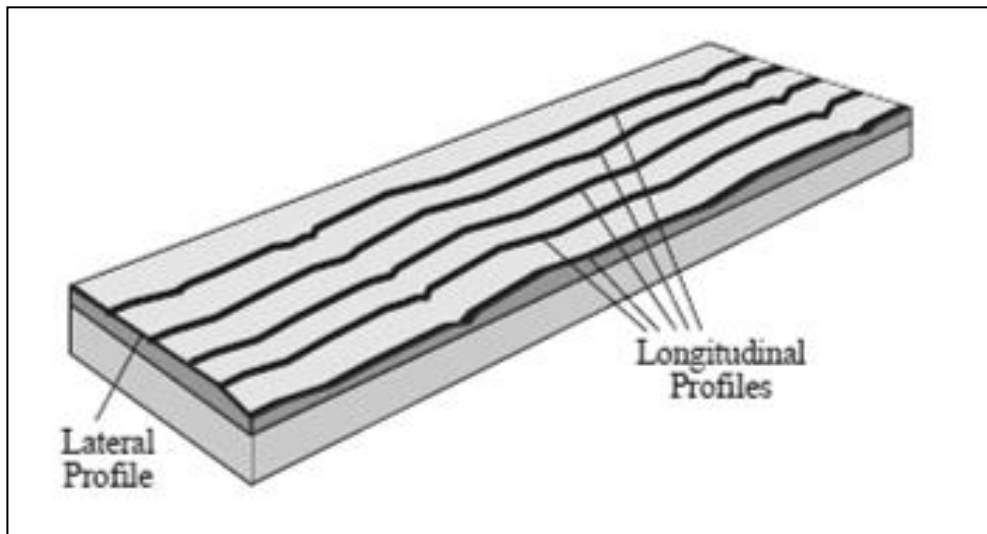


Figura 1.1: Perfil longitudinal real de una carretera¹

En la década de los 70's, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser

¹ ICC Laser y KJ Law., “*The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles*”, USA-University of Michigan, 1988.

comparados. Aún datos de un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

Con el objetivo de relacionar y unificar los parámetros que se utilizaban en ese entonces en diferentes países para determinar la regularidad superficial de las carreteras, se realizó en Brasil en 1982, el proyecto *International Road Roughness Experiment* (IRRE), promocionado por el Banco Mundial; en el cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. En este proyecto se realizó la medición controlada de la regularidad superficial de pavimentos para vías bajo diferentes condiciones y con una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto, se seleccionó un parámetro de medición de la regularidad superficial denominado Índice de Regularidad Internacional (IRI, *International Roughness Index*).

Al respecto, la definición teórica del IRI se estableció de la siguiente manera: “El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificada producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h”.

En tal sentido, podemos señalar que el IRI se estableció a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de los sistemas dinámicos, todo ello, en base a un modelo que simuló el movimiento de la suspensión acumulada por un vehículo al circular por una determinada longitud de perfil de la carretera, a una velocidad estándar de 80 km /hr.; esta hipótesis descrita es conocida como el “Modelo de cuarto de carro”.

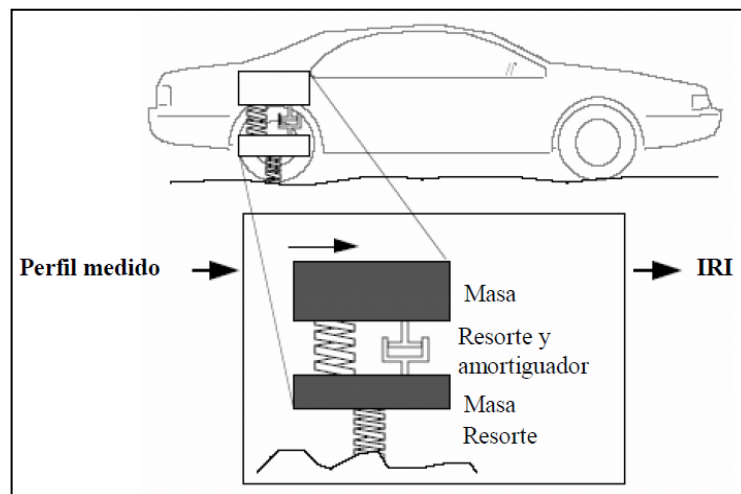


Figura 1.2: Modelo de cuarto de carro²

² Sayers, M. y Karamidas, S., “The Little Book of Profiling”. Michigan –USA, 1988

1.2 Reseña.

El grado de rugosidad de un pavimento, refleja de forma adecuada el grado de comodidad del usuario al manejar en la vía. Al respecto, la especificación ASTM E867 “*Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics*”, define la rugosidad como la desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al manejar.

Considerando que la rugosidad superficial de un pavimento es un factor importante para la comodidad, seguridad y economía del usuario, la *American Association of State Highway Officials* (AASHO), en el desarrollo del proyecto AASHO Road Test en 1962, introdujo el concepto de serviciabilidad, definido como la capacidad de un pavimento para proporcionar un recorrido seguro y confortable a los usuarios.

En el ensayo de AASHO, la serviciabilidad se cuantificó inicialmente a través del “*Present Serviciability Rating*” (PSR), el cual es obtenido mediante la evaluación de un grupo de conductores que manejaban en el pavimento y clasificaban su condición en una escala de 0 a 5, de “muy mala a muy buena”, Esta clasificación es presentada a continuación:

Cuadro 1.1: Clasificación de la condición superficial de pavimento³

PSR	Condición
0 - 1	Muy mala
1 - 2	Mala
2 - 3	Regular
3 - 4	Buena
4 - 5	Muy buena

En vista que dicha metodología contenía aspectos subjetivos, dentro del proyecto AASHO Road Test, se realizaron correlaciones entre el PSR y mediciones objetivas de la condición del pavimento, en las cuales se consideraban características de rugosidad, agrietamiento, baches y ahuellamiento, lo que contribuyó a determinar el PSI: *Present Serviciability Index*.

$$PSI = 5.03 - 1.91 * \log(1 - sv) - 0.01 * \sqrt{C + P} + 1.38 * RD^2$$

Figura 1.3: Fórmula del Índice de serviciabilidad según el AASHO Road Test⁴

³ Sayers, M., Karamidas, S.,” Adaptación de *The Little Book of Profiling*”. Michigan –USA, 1998.

⁴ De Solminihaç T., H.. “Gestión de Infraestructura Vial”, Chile, 2011.

Donde:

SV: Variación pendiente longitudinal

C: Porcentaje de grietas visible

P: Área de superficie bacheada

RD: Ahuellamiento promedio

En la década de 1970, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de rugosidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Es más, los datos proporcionados por un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron hechas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

Esta situación motivo al Banco Mundial a desarrollar el proyecto internacional *Road Roughness Experiment* (IRRE), en Brasil el año de 1982, en la cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, USA y Bélgica, donde se realizó la medición controlada de rugosidad superficial de pavimentos para un número de vías bajo diferentes condiciones y por una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un parámetro de medición de la rugosidad superficial, el cual satisface completamente los criterios de ser estable en el tiempo, transferible y relevante, denominado: “Índice de Rugosidad Internacional (IRI).”

Dicho parámetro constituye en la actualidad uno de los controles de recepción más importantes, relacionados con el nivel de rugosidad de los pavimentos, que se refleja en el nivel de comodidad y costos de operación para los usuarios.

La norma que hace referencia a la naturaleza y medición del IRI es la NLT-330/98.

Para el cálculo del valor del IRI, en grandes líneas, se procede en dos pasos: inicialmente se miden las cotas del terreno, lo que nos permite elaborar un perfil longitudinal de la carretera. Los datos de este perfil se someten a un primer filtro, que mediante adecuaciones matemáticas (media móvil), genera un nuevo perfil corregido. A este perfil corregido se le aplica un segundo filtro, consistente en la aplicación del modelo de cuarto de coche desarrollado anteriormente.

Finalmente, se define el IRI como la sumatoria de distancias medidas, en módulo sobre la horizontal, para la distancia considerada. En módulo quiere decir que computan tanto los aumentos como disminuciones de cota sobre la horizontal; al fin y al cabo ambos desplazamientos suponen una variación en la vertical de la masa suspendida.

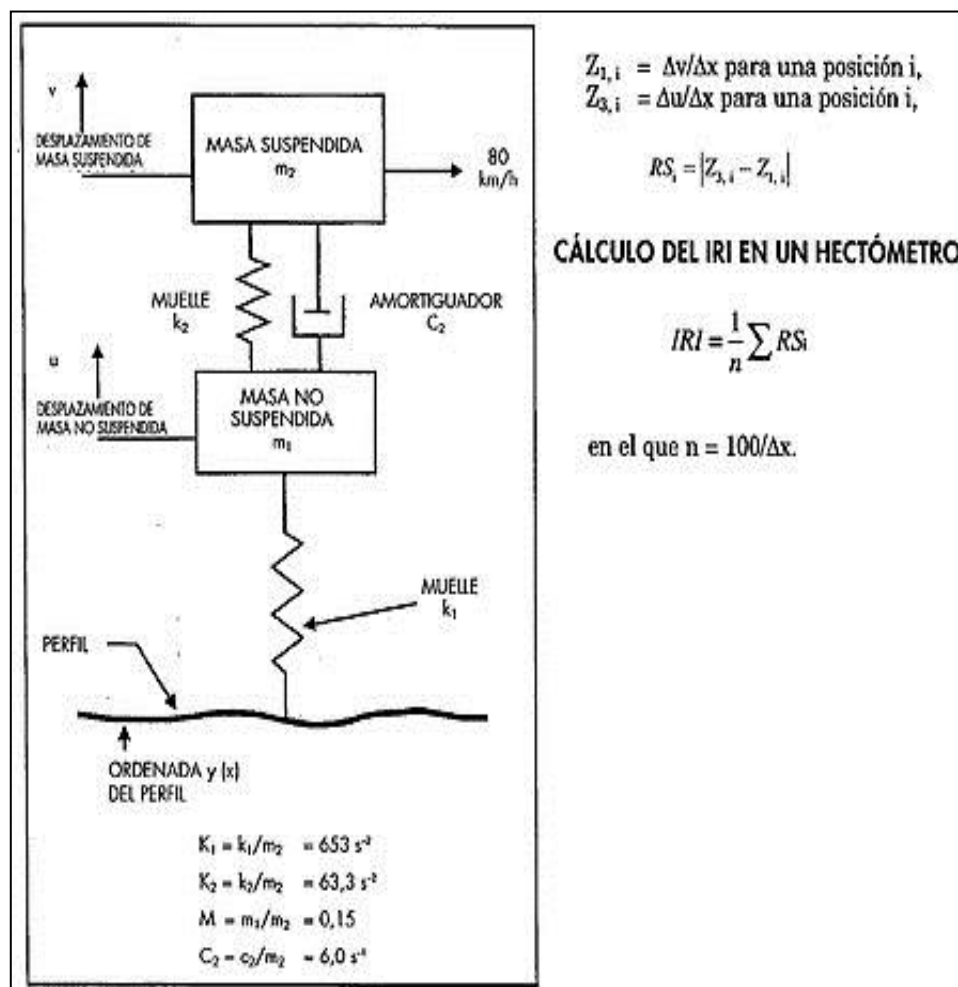


Figura 1.4: Detalle de parámetros para el cálculo del IRI en un hectómetro⁵

En definitiva, hemos llegado a la conclusión de que el IRI no es más que el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del conductor del vehículo a lo largo de una distancia dada. Resulta por ello instintivo pensar que a mayor irregularidad en el pavimento, los desplazamientos verticales sobre la horizontal teórica y consecuentemente el valor del IRI, serán mayores. Entonces, el valor del IRI será mejor cuanto más nos acerquemos a la superficie plana teórica, teniendo en cuenta que este concepto es utópico, ya que se necesita un mínimo de rugosidad para garantizar la adherencia rueda-pavimento.⁵

1.3 Descripción de las clases de equipos de medición de rugosidad.

Similar a la variedad de indicadores de rugosidad que existen, así también existen diversos equipos para la medición de rugosidad que mediante procedimientos llega a valores IRI.

Los diversos métodos existentes fueron agrupados en cuatro categorías, en base a cuan directamente sus mediciones se aproximan al IRI real:

⁵ **Wikipedia**, en línea internet. 04 de febrero 2011. Accesible en: www.es.wikipedia.org

Cuadro 1.2: Clasificación de equipos de medición de IRI de pavimento⁶

CLASIFICACIÓN DE EQUIPO	CLASIFICACIÓN SEGÚN BANCO MUNDIAL, BOLETÍN TÉCNICO N° 46	CLASIFICACIÓN SEGÚN ASTM E-950-98	
	REQUERIMIENTOS	REQUERIMIENTOS	
		INTERVALOS LONGITUDINALES DE ALMACENAMIENTO DE DATOS	RESOLUCIÓN DE MEDICIONES VERTICALES
Clase 1	Perfilómetros de precisión. Requiere que el perfil longitudinal de un camino sea medido como una serie de puntos de elevación equidistantes a través de la huella o rodadura de la vía para calcular el IRI. Esta distancia no debería superar los 0.25 mm y la precisión en la medición de la elevación debería de ser 0.5 mm para pavimentos que posean valores de IRI entre 1 y 3 m/km para pavimentos con valores de IRI entre 10 y 20 m/km.	Menor o igual a 25 mm.	Menor o igual a 0.1 mm.
Clase 2	Otros métodos perfilométricos. Requieren una frecuencia de puntos de perfil, no superior a 0.5 m y una precisión en la medición de la elevación comprendida entre 1.0 mm para pavimentos que posean valores de IRI entre 1 y 3 m/km y 6.0 mm para pavimentos con valores de IRI entre 10 y 20 m/km.	Mayor que 25 mm. hasta 150 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 equipos tipo respuesta (RTRRM), los cuales han sido calibrados previamente con perfilómetros de precisión mediante ecuaciones de correlación.	Mayor que 150 mm. hasta 300 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 de viaje o inspecciones visuales de las carreteras.	Mayor que 300 mm	Mayor que 0.5 mm

⁶ *Washington Department of Transportation*, en línea internet. 01 de mayo 2005. Accesible en: www.wsdot.wa.gov, 2011

Existen diversos equipos de medición de rugosidad, entre los cuales podemos mencionar los más comunes:

a) Perfilómetro láser.

El perfilómetro láser es un equipo basado en la medida de distancias por medio de láser y acelerómetros inerciales, preparado para registrar los perfiles longitudinales y transversales de las carreteras, así como para tomar simultáneamente datos de textura. Las mediciones se realizan con el vehículo circulando totalmente integrado en el tráfico. En la actualidad existen versiones que pueden realizar mediciones con velocidades de circulación menores a 20 km/h sin que pueda generarse alteración alguna de los resultados.

Estos equipos, dependiendo del modelo y proveedor permiten:

- Obtener distintos índices de rugosidad superficial de los firmes, haciendo posible la auscultación sistemática de la red de carreteras.
- Detectar problemas relacionados con la regularidad transversal de los firmes (ahuellamientos, zonas de posible formación de charcos, etc.).
- Determinar de manera continua la profundidad de textura.
- Obtener el perfil longitudinal del camino.
- Se pueden georeferenciar los resultados, puesto que también dispone de un equipo autónomo de posicionamiento global (GPS).

El perfil y la profundidad de textura se pueden obtener simultáneamente o cada uno por separado.



Figura 1.5: Equipo de Clase I: Perfilómetro Láser de la marca SSI.

b) Walking Profiler

El *walking profiler* es un equipo basado en la medida de distancias por medio de acelerómetros inerciales, preparado para registrar los perfiles longitudinales de las carreteras, o en todo caso el perfil longitudinal de cualquier superficie que se desee medir. La portabilidad del equipo, permite que las mediciones se realicen a paso de caminata, puesto que el dispositivo solo requiere ser empujado por una persona para que vaya acumulando información en función a su desplazamiento. En la actualidad existen versiones que integran una computadora portátil al dispositivo a fin de realizar los procesamientos en campo.

Estos equipos, dependiendo del modelo y proveedor permiten:

- Obtener distintos índices de rugosidad superficial de los firmes, haciendo posible la auscultación sistemática de la red de carreteras.
- Alta precisión en la obtención del perfil longitudinal de evaluación.
- Se pueden georeferenciar los resultados, puesto que también dispone de un equipo autónomo de posicionamiento global (GPS).



Figura 1.6: Equipo de clase I: *Walking Profiler* de la marca SSI

c) Merlín.

El Merlín o MERLÍN (acrónimo de la terminología *inglesa Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*) es un equipo desarrollado por el Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL), cuyo diseño se basa en el principio del perfilómetro estático.

En simples palabras, utiliza el concepto de usar la dispersión de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio, como una forma para evaluar la rugosidad de un pavimento lo cual no es nuevo ni original del TRRL. Varios parámetros de rugosidad precedentes, tal como el conocido *Quarter-Car Index* (QI), han sido propuestos por otros investigadores basándose en el mismo concepto.

El Merlín es un equipo que consta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. Uno de los elementos verticales es una rueda donde una vuelta de la rueda es 2.15 m. En la parte central del elemento horizontal se proyecta una barra vertical cuyo extremo inferior pivota un brazo móvil; en el extremo inferior, se ubica un patín empernado ajustable mientras que en el extremo superior se ubica el puntero, siendo la relación de brazo entre los segmentos pivote-extremo, de 1:10. En cada vuelta de la rueda se realiza una observación de acuerdo a la posición del puntero hasta completar las 200 observaciones.

Durante la recolección de datos, se va llenando un histograma de distribución de frecuencias con los resultados de 200 mediciones, posteriormente se eliminan los datos que corresponden a errores (10 datos de cada cola del histograma).

Para relacionar la rugosidad determinada con el Merlín con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que es el parámetro utilizado para uniformizar los resultados provenientes de la gran diversidad de equipos que existen en la actualidad, se utilizan las siguientes expresiones:

- a. Cuando $2.4 < \text{IRI} < 15.9$, entonces $\text{IRI} = 0.593 + 0.0471 D$
- b. Cuando el $\text{IRI} < 2.4$, entonces $\text{IRI} = 0.0485 D$



Figura 1.7: Equipo de clase II: Merlin (TRRL)

d) Perfilógrafo California.

El Perfilógrafo California permite obtener el perfilograma o perfil longitudinal de la superficie de rodadura y determinar a partir de él el índice de perfil de pavimento. El

equipo se encuentra formado por un arco metálico rígido, unos carros de carga ubicados en los extremos del marco, una llanta sensora neumática y una consola de registro.

Las pruebas consisten en medir las irregularidades en la superficie mediante el registro de datos de variaciones entre la rueda principal central respecto a las ruedas de apoyo que forman una línea recta referencial, estas variaciones son registradas dentro de un perfilograma; cabe indicar que los tramos de medición no deben de ser menores a 200 metros. Para calcular el índice de perfil de pavimento, se suman todas protuberancias mayores de 10 mm dividido sobre la longitud de evaluación y multiplicado por 1000; las unidades con las que se presenta el coeficiente obtenido serán en cm / Km.

La desventaja principal de este equipo es que mediante su utilización no se puede obtener valores IRI de superficies.



Figura 1.8: Equipo de clase II: Perfilógrafo California

e) *Bump Integrator.*

El *Bump Integrator* es uno de los diversos dispositivos disponibles en el mercado los cuales son conocidos también como dispositivos del tipo respuesta o *Response-type Road Roughness Measuring System* (RTRRMS). Estos, van montados sobre la carrocería de un vehículo con un dispositivo adherido al eje posterior y conectado a través de un cable. Las variaciones (movimientos hacia arriba y hacia abajo) entre el eje posterior y la carrocería son cuantificadas para un intervalo de longitud las cuales representan a las variaciones diferenciales de las masas m_1 y m_2 que forman parte de la teoría de la ecuación del cuarto de coche mencionado anteriormente.

Para la recolección de datos, el vehículo se desplaza sobre la superficie a evaluar a una velocidad constante de 40 km/h donde las irregularidades que puedan presentarse producirán movimientos perpendiculares, estos movimientos son interpretados y cuantificados mediante un dispositivo contador, cuyo valor es recolectado para una posterior conversión a unidades de IRI (m/Km) mediante una ecuación de correlación. Para esta correlación es necesaria la comparación de resultados entre el *Bump Integrator* y algún equipo de clase I o II en las conocidas pistas de calibración.

Por otro lado, los vehículos dependiendo del modelo y la marca poseen dinámicas particulares, por esta razón el *Bump Integrator* recolecta la información de las particularidades de cómo se mueve el vehículo y por lo tanto, las lecturas pueden

contaminarse con otros tipos de movimiento ajenos al desplazamiento en la pista. Es entonces que una desventaja aparece al momento de querer comparar dos sistemas vehículo –dispositivo para una misma pista; puesto que por las características anteriormente descritas, no pueden ser reproducibles (no son iguales). Asimismo y por esta razón, las medidas realizadas con equipos del tipo respuesta no pueden ser comparadas con los realizados años anteriores.



Figura 1.9: Equipo de clase III: *Bump Integrator*

f) *Roughometer II.*

El *Roughometer II* (así como el *Bump Integrator*) es un dispositivo clasificado dentro de la Clase III por poseer tecnología de funcionamiento calificado dentro de los dispositivos del tipo respuesta o *Response-Type Road Roughness Measuring System (RTRRMS)*.

El equipo está conformado por los siguientes dispositivos: uno portátil denominado controlador, mediante el cual se administra la ejecución de la medición y el almacenamiento digital de la información; este dispositivo está conectado con el sensor de rugosidad y el odómetro rotatorio mediante el módulo de interfaz. Tanto el controlador como el módulo de interfaz van instalados en la cabina, mientras que el sensor de rugosidad va instalado en el eje posterior del vehículo, cercano a la rueda izquierda. Conforme el vehículo recorre la vía a una velocidad uniforme entre 50 a 60 km/hr, el sensor de rugosidad percibe las vibraciones inducidas al eje, como consecuencia de la calidad de rodado, las cuales son enviadas mediante codificación al controlador, el que se encarga de almacenar la información.

La bondad de este dispositivo, es que posterior al procesamiento de los datos en un ordenador, entrega los resultados en escala IRI; sin embargo estos resultados deberán ser ajustados a una curva de ajuste mediante una ecuación de correlación, debido a que por norma todo resultado obtenido por un equipo de clase III, deberá ser correlacionado con los resultados de un dispositivo de clase mayor.



Figura 1.10: Equipo de clase III: *Roughometer II*

1.4 Normativa de organismos internacionales para la medición del IRI.

En la actualidad, existen diversas organizaciones que han normalizado las mediciones de rugosidad (IRI) entre ellas destacan AASHTO, ASTM y FWHA y el Banco Mundial quien finalmente, es el principal agente interesado en la implementación de la aplicación de IRI en la administración de carreteras.

Sin embargo, estas agencias solo llegaron a definir más que todos los procedimientos de medición o escalas de valores en los cuales debían compararse las mediciones en función a la clasificación de la vía o tipo de superficie. Sobre la metodología de medición, la FWHA y el Banco Mundial referencian al IRI promedio como el valor absoluto representativo de la medición en una vía determinada. Por lo indicado, hago énfasis en la falta de respaldo técnico que normalice metodologías de medición como el IRI característico o la rugosidad media móvil que actualmente viene siendo aplicada en el Perú.

A continuación se presenta un cuadro resumen de la normativa dada por los organismos internacionales para la medición de IRI:

Cuadro 1.3: Normativa de organizaciones para el control del IRI

NORMATIVA u ORGANIZACIÓN	Requerimientos de IRI según tipo de superficie				
	Descripción	Carpeta asfáltica	Carpeta asfáltica	Concreto hidráulico	Tratamiento superficial
ASTM E 1926-98	IRI obtenido en sub-lotes de 0.1 km		Presenta dos escalas de valores de IRI con descripción verbal, una para vías pavimentadas y otra para no pavimentadas.		
AASHTO PP-37-02	No especifica		No especifica		
FFWHA	Promedio de los valores de IRI determinado en cada huella cada 100 metros		No especifica		

NORMATIVA u ORGANIZACIÓN	Requerimientos de IRI según tipo de superficie				
	Descripción	Carpeta asfáltica	Carpeta asfáltica	Concreto hidráulico	Tratamiento superficial
Banco Mundial	Promedio global de toda la medición			Presenta una escala de rugosidad para diferentes tipos de vías.	

1.5 Normativa de otros países respecto a la metodología de control del IRI.

En el siguiente cuadro se resume el trabajo de países como Chile, España, Canadá, Suecia, El Salvador y Estados Unidos, en donde cada país ha ajustado su metodología de medición de IRI y sus umbrales en función a sus propios requerimientos.

Los ajustes que ellos han realizado son los necesarios para adaptar las normas internacionales a sus condiciones locales; de esta forma aseguran que organismos o entidades estatales respalden las buenas prácticas de los procedimientos seguidos para la medición de rugosidad durante la generación de alguna controversia.

A continuación se presenta un cuadro resumen de las especificaciones para el control de IRI en los países de Chile, España, Canadá, Suecia, El Salvador y Estados Unidos:

Cuadro 1.4: Normativa de otros países para el control del IRI⁷

PAÍS	REQUERIMIENTOS DE IRI SEGÚN TIPO DE SUPERFICIE				
	METODOLOGÍA	MAC		CONCRETO	TRATAMIENTO SUPERFICIAL
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos de 200 mts. de secciones homogéneas (Media Móvil)	promedio de 5 secciones ≤ 2 m/km			promedio de 5 secciones ≤ 3 m/km
		promedio individual ≤ 2.8 m/km			promedio individual ≤ 4 m/km
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI < 1.5 m/km, en 50% de las secciones del proyecto			
		IRI < 2 m/km, en 80% de las secciones del proyecto			
		IRI < 2.5 m/km, en 100% de las secciones del proyecto			
Estados Unidos, WisDOT	IRI obtenido en tramos de 1.609 km. (1 milla)	IRI (m/km)	Tiempo		
		< 1.1	pav. nuevo		
		< 1.17	1 año		
		< 1.29	2 años		
		< 1.33	3 años		
		< 1.37	4 años		
		< 1.45	5 años		

⁷ Ventura, J., Alvarenga, E., "Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI. ") San Salvador - El Salvador., 2005

PAÍS	REQUERIMIENTOS DE IRI SEGÚN TIPO DE SUPERFICIE			
	METODOLOGÍA	MAC	CONCRETO	TRATAMIENTO SUPERFICIAL
Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 mts.	$IRI \leq 1.2$ m/km en 70% de datos		
		$IRI \leq 1.4$ m/km en 100% de datos		
Suecia	IRI en tramos de 200 mts.	$IRI \leq 1.4$ m/km		
	IRI en tramos de 20 mts.	$IRI \leq 2.4$ m/km		
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	PARA CAMINOS RURALES: IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI no mayor a 3.0 m/km		
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	PARA INTERESTATALES: IRI obtenido en tramos de 100 mts.	IRI no mayor a 2.0 m/km	IRI no mayor a 2.5 m/km	
SIECA 2004	IRI obtenido en tramos de 100 mts.			

1.6 Antecedentes sobre las mediciones del IRI en el Perú.

Las primeras mediciones de rugosidad en el Perú se realizaron a mediados del año 1992 a partir evaluaciones con el Merlín, equipo cuya utilización fue promocionada dentro del país por consultores externos con la intención de satisfacer los requerimientos solicitados por el Banco Mundial que en ese entonces trabajaba por implementar el concepto de gestión en la administración de caminos en los países subdesarrollados. Por otro lado, considero importante mencionar que fue el Merlín el equipo que se utilizó para realizar el primer estudio de rugosidad en el país.⁸

Algunos años después, el Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción (llamado así en ese entonces) adquirió un *Bump Integrator* para

⁸ Del Águila, P. , “Experiencias y resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3,000 km. de pavimentos en el Perú y otros países”, Perú , 1999

implementarse en los controles de calidad y aceptación de obras, así como en la definición de estrategias de mantenimiento y los programas de monitoreo de las redes viales. Sin embargo, era muy complicado mantener las mismas condiciones vehículo – dispositivo que aseguren la repetitividad de las mediciones.

En el año 1994, el estado peruano, actuando a través del Ministerio de Transportes y Comunicaciones otorgó el primer proyecto de concesión que comprendía la rehabilitación y mantenimiento del tramo Arequipa – Matarani, así como la explotación y administración general. Para esta concesión se estableció como control de la rugosidad el uso de la metodología denominada IRI promedio, el cual consiste en dar un solo valor que resulta del promedio de todo el tramo.

Poco después, en octubre del año 1995 mediante el Proyecto Especial de Rehabilitación de la Infraestructura de Transportes (PERT), se dio a conocer las nuevas especificaciones técnicas para rugosidad, las cuales fueron incluidas como parte de control para la recepción de la obras; en donde se menciona que la rugosidad de los pavimentos se deberá controlar calculando un parámetro denominado IRI característico (IRI_c) el cual es igual al IRI promedio más el producto de 1.645 por la desviación estándar. En tal sentido, el control para la recepción de las obras quedaba establecido en: 1) IRI_c menor o igual a 2.0 m/km para pavimentos de nueva construcción, 2) IRI_c menor o igual a 2.5 m/km para tramos de refuerzo de pavimentos y 3) IRI_c menor o igual a 3.0 m/km en tramos de sellado de pavimento existente.⁹

A partir de la implementación de las especificaciones técnicas generales para la construcción de las carreteras EG-2000, se establecieron para el país controles de recepción del IRI en función al tipo de superficie construido: 2.0 m/Km para mezcla asfáltica en caliente y lechadas asfálticas, 2.5 m/Km para tratamientos superficiales y 3.0 m/Km para pavimentos de concreto hidráulico.

En el año 2004, como parte de la implementación de la sistematización de la oficina de gestión de carreteras de PROVÍAS NACIONAL hacia la búsqueda de optimizar la gestión de la administración del mantenimiento, se realizó una medición de rugosidad de casi 9,000 km-calzada de la red vial nacional asfaltada mediante el uso de un perfilómetro laser de la marca *Dynatest*, el cual fue adquirido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones para dicho fin y asegurar la repetitividad de los monitoreos a futuro. Al respecto, esta información fue recolectada y utilizada para alimentar la base de datos del inventario vial calificado y para dar a conocer el valor patrimonial que tenía la red vial nacional asfaltada hasta ese momento. Lo particular de la medición fue que el dispositivo lograba almacenar la información obtenida por huellas por cada 200 metros de recorrido y, se utilizó como metodología de medición de rugosidad el promedio aritmético de las mismas. Cabe mencionar que era la primera vez que en el país se utilizaba tecnología de clase 1 para la medición de rugosidad.

En la actualidad, con la implementación de las políticas de privatización a través de las concesiones de las redes viales, otras metodologías de medición de rugosidad así como umbrales admisibles fueron apareciendo y diversificándose. Es así que para la gestión

⁹ DEL ÁGUILA, P., “Experiencias y resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3,000 km. de pavimentos en el Perú y otros países”, Perú, 1999.

del control de la rugosidad en las concesiones viales aparece una principal regla de juego: la metodología de control y el umbral admisible.

Respecto a la metodología de control y el umbral admisible para las mediciones de rugosidad, puede mencionarse que ha ido cambiando sin tomar en cuenta consideraciones importantes respecto a la exigencia hacia el concesionario y el beneficio que pueda generar a la población.

Cuadro 1.5: Consolidado de exigencias de rugosidad en concesiones viales en el Perú¹⁰

CONCESIÓN	Año	Metodología	IRI				
			Obras Nuevas	Operación	Tolerancia	IMD (veh/día)	Velocidad de diseño (Km/h)
Arequipa - Matarani	1994	IRI promedio	2.0	2.0	No	2,500	60
Red Vial N° 5	2003	IRI promedio	3.5	3.5	No	3,500	75
Red Vial N° 6	2005	IRI promedio	2.0	3.0	20% y 15%	4,500	75
IIRSA norte, IIRSA sur, tramos 2,3 y 4	2006	IRI Media deslizante	2.5 / 3.5	3.5 / 4.0	20% y 15%	400	50
IIRSA sur tramos 1 y 5	2007	IRI Media deslizante	2.0 / 2.5	3.5 / 4.0	No	400	50
Buenos Aires - Canchaque	2007	IRI Media deslizante	2.5 / 3.0	3.5 / 4.0	No	200	50
Autopista del Sol	2009	IRI Media deslizante	2.0	3.5	No	3,000	75
IIRSA centro T-2	2010	IRI Media deslizante	2.0	3.5	No	4,000	50

1.7 Especificaciones técnicas para las mediciones de IRI en el Perú.

Las primeras especificaciones técnicas que se utilizaron para las mediciones de rugosidad en el Perú, relacionaban la exigencia del IRI con el valor PSI de diseño de cuatro (04); el cual era usado para diseño de pavimentos nuevos. Este valor PSI, que

¹⁰Obando, W., “Adaptación de la Ponencia Gestión de Conservación de Carreteras por Niveles de Servicio”, Perú, 2009

según la escala de *Sayers* en valor IRI era igual a 1.23 m/km, supuestamente debía ser alcanzado con procesos constructivos convencionales. Sin embargo, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones emitió opinión al respecto, indicando que el valor que el valor propuesto como umbral era demasiado exigente; razón por la cual establecieron según su opinión un límite más flexible para el caso de los pavimentos en las construcciones nuevas. En ese sentido, la exigencia establecida solicitaba una rugosidad media máxima de 1.5 m/km.

Para el caso de los pavimentos recapados o con refuerzos asfálticos, se consideró que el grado de deformación de la carpeta existente incidía de manera negativa en los resultados de rugosidad del pavimento final. Así fue que, tomando en consideración que ya existía el criterio de proyectar recapados solo para estructuras existentes con rugosidad no mayor de 3 m/km, se estableció un límite de 2.0 m/km.

En octubre del año 1995 mediante el Proyecto Especial de Rehabilitación de la Infraestructura de Transportes (PERT), se dio a conocer las nuevas especificaciones técnicas para rugosidad, las cuales fueron incluidas como parte de control para la recepción de las obras; en donde se menciona que la rugosidad de los pavimentos se controla calculando un parámetro denominado IRI Característico (IRIc), el cual es igual al IRI promedio más el producto de 1.645 por la desviación estándar. En tal sentido, la recepción de las obras quedaba establecida:

- a) En pavimentos de nueva construcción el IRIc deberá ser menor o igual a 2.0 m/km
- b) En tramos de refuerzo del pavimento el IRIc deberá ser menor o igual a 2.5 m/km
- c) En tramos de sellado de pavimentos existente, el IRIc deberá ser menor o igual a 3.0 m/km.

A partir de la implementación de las especificaciones técnicas generales para la construcción de las carreteras EG-2000, se establecieron para el país controles de recepción del IRI en función al tipo de superficie construido: 2.0 m/Km para mezcla asfáltica en caliente y lechadas asfálticas, 2.5 m/Km para tratamientos superficiales y 3.0 m/Km para pavimentos de concreto hidráulico.

1.8 Normativa Peruana respecto a la metodología de control del IRI.

Como se mencionó anteriormente, la rugosidad (IRI) en el Perú constituye en la actualidad uno de los controles de serviciabilidad más importantes, debido a que puede relacionarse con el nivel de comodidad, seguridad y costos de operación y por lo tanto, facilita la cuantificación de los beneficios que obtiene el usuario.

Asimismo, hemos visto que existen diversas metodologías de control; todas ellas implementadas por diversas agencias de acuerdo a su necesidad y sus exigencias de control. Sin embargo, incluso considerando que contamos con controles de recepción establecidos bajo normativa vigente, todavía no se normalizado (como Norma Técnica Peruana o Ensayo MTC) alguna metodología de medición de rugosidad que utilizamos en la actualidad en el entorno nacional.

Actualmente, tomamos como referencias los lineamientos indicados en el Boletín N° 46 del Banco Mundial para el caso de utilización de dispositivos de clase 3 y la norma ASTM E950 “*Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*” para el caso de utilización de dispositivos de clase 1; los cuales tienen validez y respaldo dentro del contexto internacional, sin embargo se requiere de un respaldo de organismos o entidades nacionales que normalicen, actualicen, difundan y adapten las metodologías a nuestro medio.

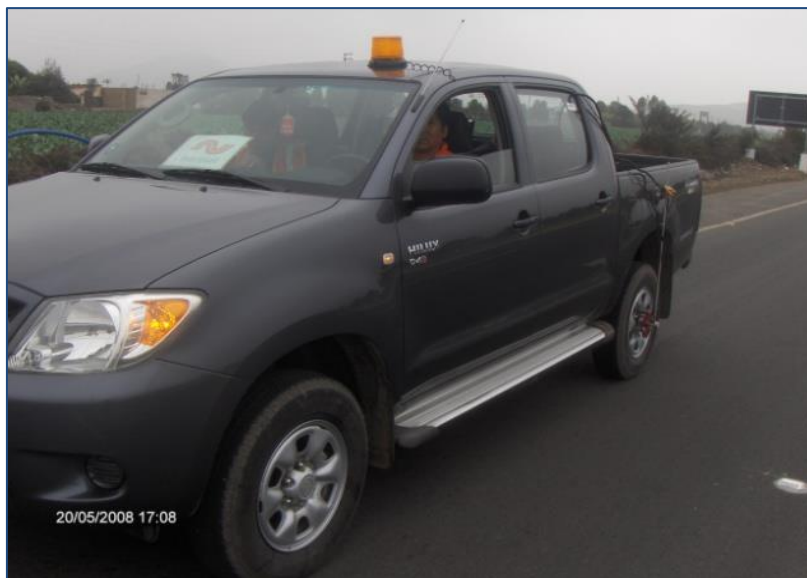


Figura 1.11: Mediciones de rugosidad con *Roughometer II* realizadas en la concesión red vial N° 5



Figura 1.12: Mediciones de rugosidad con Perfilómetro Laser *Dynatest Mark* realizadas en la red vial nacional asfaltada

Capítulo 2

De los contratos de concesión respecto al control de la rugosidad

2.1 Exigencias encontradas en los contratos de concesión respecto al control de la rugosidad.

Por su importancia, la rugosidad es uno de los parámetros de control que normalmente se utiliza para evaluar la gestión del concesionario respecto a la conservación de la vía. La utilización de este parámetro de control es promovida por el Banco Mundial y cuantificada a través del “IRI - Índice de Rugosidad Internacional”, parámetro con el que se estandariza la medición de la rugosidad superficial del pavimento.

El IRI constituye en la actualidad uno de los controles de serviciabilidad más importantes, debido a que puede relacionarse con el nivel de comodidad, seguridad y costos de operación y por lo tanto, facilita la cuantificación de los beneficios que obtiene el usuario. Existen diversas metodologías de control; todas ellas implementadas por diversas agencias y organismos de acuerdo a su necesidad y sus exigencias de control.

En el país, la utilización del IRI como parámetro de control ha sido implementada aproximadamente desde 1992, como herramienta para la recepción de obras de construcción y rehabilitación de vías por parte del estado, para lo cual inicialmente se estableció el IRI característico como metodología de control. Posteriormente, con el inicio de la concesión de las carreteras como Arequipa – Matarani y la red vial N° 5, se dio inicio a la utilización del IRI como mecanismo de control para las redes concesionadas estableciendo como metodología de control el IRI promedio del tramo.

A partir de la implementación de las especificaciones técnicas generales para la construcción de las carreteras EG-2000, se establecieron para el país controles de recepción del IRI en función al tipo de superficie construido: 2.0 m/Km para mezcla asfáltica en caliente y lechadas asfálticas, 2.5 m/Km para tratamientos superficiales y 3,0 m/Km para pavimentos de concreto hidráulico.

A partir del año 2004, para las concesiones viales IIRSA Norte, IIRSA sur (tramos 1, 2, 3, 4 y 5), Empresa. Buenos Aires – Canchaque, IIRSA centro tramo 2 y la autopista “Del Sol”, fue establecido como control de rugosidad la metodología conocida como rugosidad media deslizante calculada en intervalos de 1 Kilómetro. Al respecto

mencionamos que la mayoría de los tramos viales concesionados mencionados anteriormente se caracterizan por clasificarse como vías de penetración; y por ende poseer un trazo sinuoso. Sin embargo y pese a su característica geométrica similar, encontramos que solo para los contratos de las concesiones IIRSA norte e IIRSA sur tramos 2, 3 y 4, al mecanismo de control de rugosidad fue **adicionado una tolerancia**; la cual **no fue incluida dentro de los contratos respectivos de las otras concesiones viales anteriormente mencionadas**: IIRSA sur: tramos 1 y 5, IIRSA centro: tramo 2, empresa Buenos Aires – Canchaque y la autopista Del Sol (Ver cuadro 1.5).

2.2 Problemática encontrada respecto a la falta de tolerancias dentro del mecanismo del control de la rugosidad.

Desde el punto de vista técnico y contractual, la falta de tolerancias dentro de este mecanismo de control arrastra una importante problemática para el concesionario al momento de gestionar el cumplimiento de la rugosidad solicitada. En tal sentido, antes de establecer la problemática considero oportuno mencionar las siguientes hipótesis desarrolladas:

- La ecuación matemática del cálculo del IRI fue planteada considerando las desviaciones con respecto a una superficie plana teórica (llana y no sinuosa), en la cual un vehículo podría transitar a 80 km/h; es decir un horizonte perfecto sin subidas ni bajadas que asegure que en la cuerda que se forma no hayan desviaciones desde el inicio hasta el final de la misma. En tal sentido y considerando el fuerte trazo sinuoso y los fuertes cambios en la pendiente longitudinal necesarios para poder atravesar las cadenas montañosas que caracterizan la geografía peruana es indiscutible indicar que existe una influencia de la geometría de la vía hacia el valor calculado del IRI. Si esta influencia depende mucho del trazo de la vía, queda claro que por defecto el IRI de diseño va a ser mayor que 0 m/km que sería el valor obtenido en una superficie plana teórica ideal. Por esta razón, es que el umbral admisible que se exigen en los contratos de concesión para control de rugosidad debiera modificarse flexibilizándose según el trazo de la vía.
- Respecto a la metodología de medición, el obtenerse la rugosidad media deslizante a partir del promedio de 5 valores de IRI individuales de 200 metros consecutivos, la convierte en una metodología mucho más susceptible a manifestar los valores picos que puedan haberse obtenido en una muestra individual de 200 metros, pudiendo sobrepasar con facilidad los umbrales máximos permisibles. Por esta razón, esta metodología de control es mucho más exigente que el IRI promedio, en la cual (tal como su nombre lo indica) se promedian todos los valores del tramo dando un solo valor absoluto como resultado y de esta forma se pueden disipar los valores picos que puedan obtenerse en los resultados de la medición.
- Los pavimentos asfálticos nuevos, a partir de una serie de mediciones de IRI en proyectos de construcción de carreteras establecen que con los sistemas de pavimentación disponibles en el mercado se obtiene un IRI característico promedio igual a 2.21 m/km¹¹ la cual podría calificarse como el efecto de trabajo para pavimentos nuevos.

¹⁰ Del Águila, P. “Experiencias y resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3,000 kilómetros de pavimentos en el Perú y otros países”, 1999, Perú.

Con base en las tres hipótesis mencionadas, la problemática identificada se encuentra en que: considerando el efecto de trabajo que se obtiene para el IRI en pavimentos nuevos con los sistemas de pavimentación disponibles en el país y sumándole la metodología de la rugosidad media móvil descrita líneas arriba, se considera que para las zonas de trazo sinuoso los valores de rugosidad obtenidos no van a ser similares a los obtenidos en zonas llanas y no sinuosas, puesto que por la influencia de la geometría de la vía no tendrán la misma línea de partida; es decir, que para zonas llanas y poco sinuosas los valores teóricos de IRI de diseño serán casi similares a 0 m/km y por lo tanto el valor de efecto de trabajo para pavimentos nuevos será similar a los valores de IRI obtenidos en campo. Caso distinto es el IRI obtenido en zonas de trazo sinuoso, donde el valor de IRI obtenido en campo será la resultante del efecto de trabajo para pavimentos nuevos sumado al IRI de diseño que en estos casos será mayor que 0 m/km.

Descriptivamente se tendría:

$$a \approx b + c$$

Donde:

IRI obtenido de campo	:	a
IRI de diseño	:	b
Efecto de trabajo	:	c

Se tiene que:

En trazo sinuoso	:	IRI diseño $\neq$ 0 m/km.
En trazo no sinuoso	:	IRI diseño $\approx$ 0 m/km.

Por lo tanto:

$$\begin{array}{ll} \text{IRI trazo no sinuoso} & \approx c \\ \text{IRI trazo sinuoso} & \approx b + c \end{array}$$

2.3 Incidencia de las tolerancias para el control de la rugosidad en los contratos de concesión.

Proponer la inclusión de una tolerancia para el control de la rugosidad puede ocasionar una controversia tal que genere intenciones de realizar modificaciones dentro de los contratos de concesión mediante adendas; esto se da a razón de la predisposición de considerar como único beneficiario al concesionario.

Sobre el particular, los contratos de concesión consideran aspectos que puedan alterar el equilibrio y por ende reducen beneficios a alguna de las partes que celebran un contrato de concesión; en ese sentido y pre visionando que en el periodo de concesión surjan posibilidades de alterar ese equilibrio, se suscriben cláusulas que contemplan modificaciones para determinados causales.

Al respecto, se ha considerado que la inclusión de dicha tolerancia puede llegar a generar impactos en los aspectos que se resumen a continuación, razón por la cual se ha analizado cada una de ellas a fin de descartar la posibilidad de alterar ese equilibrio por el cual se firma el contrato de concesión:

- Generación de mayores beneficios para los concesionario
- Generación de mayores costos para los usuarios

2.3.1 Generación de mayores beneficios para los concesionarios.

Puede interpretarse que implementar esta modificación a las reglas de juego que se han establecido a partir de la firma de contrato de concesión pueda generar beneficios económicos para el concesionario, sin embargo considero que el tema no se resuelve en este contexto, sino que busca la ecuanimidad de las inversiones (por parte del concesionario) que se realizan en la vía con motivo del cumplimiento de las exigencias mediante el equilibrio de las exigencias de los niveles de servicio específicamente la rugosidad – IRI.

Lo que se busca al implementar una tolerancia en el control de la rugosidad es ajustar las obligaciones de este parámetro (que se encuentra establecido en el contrato de concesión) a las condiciones geográficas y topográficas de la vía, en donde se tomen en consideración los aspectos que aumentan el valor de rugosidad de la vía por efecto de la influencia geométrica; y que como valor absoluto no refleja únicamente la lisura de la superficie de la vía - que es lo que realmente busca exigir el contrato - la que a su vez está directamente relacionado con la calidad del trabajo que el concesionario pueda realizar en su intervención.

De una forma más explícita se presenta el siguiente argumento, el cual haciendo mención a algunos conceptos de la gestión de infraestructura, se señala que el concesionario puede realizar labores de gestión vial mediante estos tres tipos de conservación y que a la vez están establecidos en los contratos de concesión como parte de las obligaciones:

- **Obras de puesta a punto:** Ejecución de las obras necesarias para devolver a la infraestructura vial sus características originales y adecuarla a su nuevo periodo de servicio; las cuales están referidas principalmente a reparación y/o ejecución de pavimentos, puentes, túneles, obras de drenaje, de ser el caso movimiento de tierras en zonas puntuales y otros.
- **Conservación rutinaria:** que son un conjunto de actividades que se realizan en la vía con carácter permanente para conservar sus niveles de servicio. Estas actividades pueden ser manuales o mecánicas y están referidas principalmente referidas a labores de limpieza, bacheo, perfilado, roce, eliminación de derrumbes de pequeña magnitud.
- **Conservación periódica:** que viene a ser un conjunto de actividades programables para cada cierto periodo, que se realizan en las vías para conservar sus niveles de servicio. Estas actividades pueden ser manuales o mecánicas y están referidas principalmente a labores de reparación y colocación de capas niveladoras y sellos de

la capa de rodadura, reparación o reconstrucción puntual de las capas inferiores del pavimento y reparación o reconstrucción puntual de las obras de arte, drenaje y señalización.

Al respecto, la primera gran intervención que se realiza en la vía después de la toma de posesión vienen a ser las consideradas obras de puesta a punto; el concesionario realiza labores necesarias para alcanzar los niveles de servicio exigidos dentro del contrato de concesión.

El mismo concesionario en busca de la optimización técnico - económica busca proponer tipos de intervención más rentables, que como monto de inversión no sean onerosos pero que a la vez logren obtener menores costos de inversión para el resto del periodo de concesión. Según se menciona en distinta literatura seguramente basada en el estudio NCHRP-1-31, valores iniciales elevados de rugosidad-IRI traen consigo como consecuencia mayores deterioros en el tiempo, mayores costos de reparación y una reducción de la vida útil de servicio del pavimento implicando el anticipo de intervenciones o rehabilitaciones antes de lo previsto. Por esta razón el concesionario busca utilizar dentro de las alternativas elegidas la mejor tecnología disponible para obtener mejores resultados de rugosidad como efecto de trabajo de las intervenciones de puesta a punto.

En ese sentido, puede darse el caso que haciendo uso de las buenas prácticas constructivas y utilizando la mejor tecnología disponible en el mercado no se logre obtener el valor de rugosidad deseado el cual debería estar por debajo de lo establecido en el contrato de concesión; esto sumado a que en algunos de los contratos de concesión de las redes viales indicadas en el cuadro 2.1 establecen parámetros de entrada que deben cumplirse con las obras de puesta a punto y normalmente el umbral de rugosidad es mucho más exigente que para el periodo de servicio.

En este caso, el desconocer el efecto de la influencia de los aspectos asociados a la geometría del trazo o a las singularidades en la vía puede generar que los agentes involucrados en las obras de puesta a punto (concesionario, supervisor y constructor) asocien directamente el valor del resultado a la calidad constructiva de la intervención, corriendo el riesgo de volver a ejecutar nuevamente la intervención a fin de alcanzar el valor contractual requerido pensando que de esta forma pueda llegar a subsanarse la observación, generando así una doble inversión injustificada que inclusive pueda no llegar a reducir en algo el valor de rugosidad luego de la primera intervención.

Asimismo, los valores de rugosidad – IRI inicial que puedan obtenerse a partir de la puesta a punto inciden mucho en el anticipo o postergación de las rehabilitaciones programadas, las cuales podrían programarse para después del periodo de concesión e implicaría un ahorro sustancial de las inversiones del concesionario. En ese sentido, a fin de obtener mayor información referente a este tema, se realizó una modelación mediante el programa HDM-4 a un mismo tramo cuya variación que se ha hecho para la comparación es la diferencia del valor de IRI inicial del pavimento (caracterizado a partir de valores similares a los que se exigen cumplir para los pavimentos nuevos o para las obras de puesta a punto), el cual para el caso 1, era igual a 2.0 m/km y para el caso 2 un valor de 2.5 m/km. El tramo modelado simuló ser una vía típica de las rutas transversales de la red vial nacional, caracterizados por poseer un trazo sinuoso y con pendientes variables, una velocidad de circulación promedio de 30 km/h, ancho de

calzada menor a 7.0 mts y con criterios de intervención muy similares a los que se manejan en los organismos estatales.

Respecto al rango de diferencias en los valores de rugosidad – IRI adoptados para la modelación se manifiesta lo siguiente: el valor de rugosidad para el caso 1 fue caracterizado asumiendo un valor promedio del tramo evaluado sin considerar tolerancias. Para el caso 2 si se consideró la aplicación de un factor de tolerancia, por esta razón al momento de caracterizar el valor de rugosidad su promedio aumentó sustancialmente hasta 0.5 m/km sobre el valor del caso 1; es muy importante indicar que la dimensión del aumento fue determinado solo para fines didácticos, pues en la realidad la incidencia de asumir una tolerancia solo podría aumentar en una o dos décimas de unidades IRI.

Cuadro 2.1: Programa de intervenciones modelados en HDM-4 para un mismo tramo con diferentes valores de rugosidad – IRI inicial.

HDM - 4
HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT

CARACTERÍSTICAS TRAMO	CRITERIO DE INTERVENCIÓN	AÑO DE INTERVENCIÓN						INVERSIÓN TOTAL US\$/ KM
		2016	2020	2025	2030	2031	2034	
Caso 1:								
IRI inicial : <u>2.0 m/km</u> Fisuras : 0% Ahuellamiento: 0 mm	Slurry Seal cuando fisuras > 15%. Carpeta Asfáltica 10 cm cuando IRI > 4.	Slurry Seal	Carpeta asfáltica	Slurry Seal	-	Carpeta asfáltica	Carpeta asfáltica	640,200.00
Caso 2:								
IRI inicial : <u>2.5 m/km</u> Fisuras : 0% Ahuellamiento: 0 mm	Slurry Seal cuando desprendimiento > 20%. Mantenimiento rutinario	Slurry Seal	Carpeta asfáltica	Slurry Seal	Carpeta asfáltica	-	Carpeta asfáltica	640,200.00

Los resultados especifican similares fechas de intervención. Es así que para los años 2016 y 2015 se programan trabajos de *slurry seal* y para los años 2020 y 2034 se programa la colocación de carpeta asfáltica en ambos casos modelados. Asimismo, encontramos una única variación en la fecha de intervención para el segundo refuerzo el cual varía solo en un año de diferencia, más los tipos y la cantidad de intervenciones programadas vienen a ser idénticas para los dos casos modelados.

En ese sentido y aunque se presenten modificaciones en los años de intervención las inversiones totales para ambos casos siguen siendo las mismas y por lo tanto, teóricamente no habría beneficios económicos para el concesionario. Cabe mencionar que las fechas de intervención podrían variar en la realidad (puesto que es un cuadro elaborado a base de un modelo de predicciones de deterioro) e inclusive que las últimas intervenciones durante el periodo de concesión podrían cambiar a un estándar más bajo; pero estas decisiones forman parte de la propia gestión del concesionario los que contractualmente están obligados a realizar todas las acciones necesarias para cumplir con los niveles de servicio establecidos y en ese sentido serían auditables en función a los resultados. Sin perjuicio de lo indicado, esta modelación – realizado con un programa avalado por el Banco Mundial - nos demuestra que para los mismos valores de niveles de servicio que se manejan en los contratos de concesión, no hay cabida a reducir sustancialmente las inversiones con las que el concesionario basó su propuesta para adjudicarse la buena pro del tramo en concesión.

Por lo tanto, mediante la ecuanimidad de las inversiones se busca la optimización y la adecuada utilización del capital, evitando duplicar inversiones innecesariamente como en el caso de querer alcanzar valores de rugosidad-IRI en tramos sinuosos que son fuertemente afectados por la geometría del trazo - y que probablemente el valor de IRI por influencia geométrica sea casi similar al valor de IRI por efecto de trabajo - y promover a que el concesionario permita orientar sus inversiones hacia la mejora en los estándares importantes como en el tema de señalización vial o reforzando las iniciativas de responsabilidad social que se brinde a la población marginal asentada adyacente a la vía, los cuales podrían ser calificadas como esas terceras personas que viviendo en el tramo explotado no reciben beneficio alguno por la inversión de la concesión.

2.3.2 Generación de mayores costos para los usuarios.

Del mismo modo, puede interpretarse que implementar esta modificación a las reglas de juego que se han establecido a partir de la firma de contrato de concesión pueda generar mayores costos para los usuarios. Sin embargo, considero que no habrá afectación alguna, puesto que los estándares de condición y serviciabilidad siguen siendo los mismos aún adicionando la tolerancia al control de rugosidad y por lo tanto no podrían afectar determinadamente en los costos de operación vehicular.

Según lo descrito en el marco teórico del capítulo anterior, el concepto del IRI menciona que este parámetro está relacionado de forma directamente proporcional a los costos de operación vehicular; es decir que a mayor valor de rugosidad-IRI en una carretera, mayor serían los costos de operación vehicular que se generen a los usuarios que transitan por ella.

Respecto a los costos de operación vehicular, estos se pueden definir como costos incurridos por los conductores de los vehículos cuyo viaje tiene un punto de inicio y fin determinado. Son cuatro tipos de costos sobre el usuario que se conocen: están asociados a la circulación de los vehículos, al tiempo de viaje, a los accidentes y a las incomodidades que puedan incurrir durante su trayecto de los cuales los dos últimos no son considerados en los modelamientos.

En ese sentido, a fin de obtener mayor información referente a este tema, se realizó una modelación mediante el programa HDM-4 a un mismo tramo cuya variación planteada

para la comparación es la diferencia del valor de IRI inicial del pavimento (caracterizado a partir de valores similares a los que se exigen cumplir para los pavimentos nuevos o para las obras de puesta a punto), el cual para el caso 1 era igual a 2.0 m/km y para el caso 2 un valor exagerado de 3.0 m/km a fin de maximizar la variación que pueda encontrarse al compararse los costos de operación vehicular de estos dos casos. Así como el tramo modelo utilizado en el ítem 3.3.1, éste simuló ser una vía típica de las rutas transversales de la red vial nacional, caracterizados por poseer un trazo sinuoso y con pendientes variables, una velocidad de circulación promedio de 30 km/h, ancho de calzada menor a 7.0 mts y con criterios de intervención muy similares a los que se manejan en los organismos estatales.

Cuadro 2.2: Estimación de costos de operación vehicular, modelados en HDM-4 para un mismo tramo con diferentes valores de rugosidad–IRI inicial.

HDM - 4
HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT

Características tramo	Criterio de intervención	Costos acumulados para un periodo de 20 años		
		costos de circulación (a)	costos tiempo de viaje (b)	Costo de operación vehicular (a) + (b)
Caso 1: Km 35+000 - Km 36+000				
IRI inicial: <u>2.0 m/km</u> Fisuras: 0% Ahuellamiento: 0 mm Geometría: 169.80 °/km Vel. circulac: 30 Km/h	<i>Slurry Seal</i> cuando fisuras > 15%, Carpeta asfáltica 10 cm cuando IRI > 4, Sello de fisuras cuando fisuras > 5%	6,788,093.8	1,536,125.0	8,324,218.8
Caso 2: Km 35+000 - Km 36+000				
IRI inicial: <u>3.0 m/km</u> Fisuras: 0% Ahuellamiento: 0 mm Geometría: 169.80 °/km Vel. circulac: 30 Km/h	<i>Slurry Seal</i> cuando fisuras > 15%, Carpeta asfáltica 10 cm cuando IRI > 4, Sello de fisuras cuando fisuras > 5%	6,903,906.3	1,536,125.0	8,440,031.3

En el cuadro 2.2 se puede apreciar la información utilizada para caracterizar el tramo, en el cual se resalta claramente la variación en los valores de rugosidad–IRI de cada caso. A la vez, se puede apreciar que en la parte final se resumen los costos de operación vehicular para un periodo de 20 años en un tramo de 01 kilómetro, simulado con un

parque vehicular típico de una carretera de penetración; puede apreciarse también que el modelo distingue los costos de operación vehicular y los costos de tiempo de viaje.

Al respecto, los resultados de la modelación indican que para las características indicadas, los costos de tiempo de viaje son similares para los dos casos, y eso se da principalmente por que el modelo asume que la velocidad de circulación está principalmente limitada por la geometría del camino. En el modelo HDM-4, las velocidades promedio son una función de la rugosidad ó IRI y de la geometría del camino; como el valor de rugosidad permite un manejo confortable a la velocidad de circulación que ha sido limitada por la geometría, la influencia de la rugosidad para la determinación de estos costos son nulos. Nótese una vez más, que incluso la misma teoría con la que se elaboraron los algoritmos del HDM-4, no toma en consideración que haya influencia alguna de la geometría hacia la rugosidad, relacionando directamente la rugosidad ó IRI con la lisura de la superficie de rodadura que transmite la vibración en los vehículos que finalmente son los que producen impactos en los costos de operación vehicular.

Esta lógica presentada en el modelo guarda relación con la norma ASTM E-1926, en el que se presenta una escala donde se aprecia el grado de confort en función a la rugosidad que presenta un camino. Como se aprecia en el cuadro 2.2 el rango de rugosidad en que ha sido realizada la modelación oscila entre 2 a 4 m/km, rango que permite un manejo confortable hasta una velocidad de 120 km/h tal como se indica en la Figura 2.1.

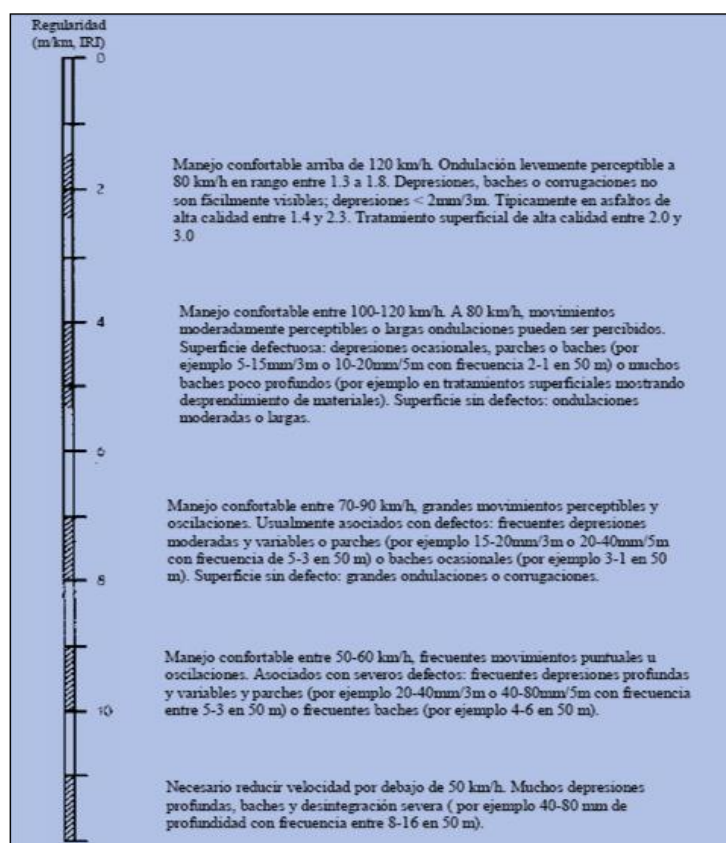


Figura 2.1: Escala de estimación de rugosidad de vías para caminos pavimentados con concreto asfáltico o tratamiento superficial¹²

¹² **ASTM International**, "Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements", (rev. 2009) Adaptación de ASTM E1926

Respecto a los costos de circulación, estos sufren una ligera variación que está basada principalmente en un mayor consumo de neumáticos y repuestos y una pequeña parte asociada al consumo de combustible. Como se indicó anteriormente, en el modelo HDM-4, las velocidades promedio para la determinación del consumo del combustible son una función de la rugosidad ó IRI y de la geometría del camino; entonces el valor de rugosidad permite un manejo confortable a la velocidad de circulación que ha sido limitada por la geometría, sin embargo la rugosidad influye en el uso de cambios menores de la transmisión que a la vez utiliza mayores revoluciones del motor y por ende un mayor consumo de combustible. Asimismo, en el caso 2 se presenta un mayor consumo de neumáticos y repuestos debido a que el modelo asume que a mayor valor de rugosidad habrá mayor desgaste de los consumibles. Como el caso 2 tiene un IRI inicial mayor en 1 m/km, obviamente representará un mayor costo de circulación respecto al caso 1.

Sin embargo, esta diferencia resultante de la modelación representa el 1% del costo de operación vehicular, la cual puede formar parte del margen de error debido a que hablamos de una simulación, por lo cual considero que ambos casos presentan resultados similares.

Además, se debe tener en cuenta la percepción del usuario quien viene a ser el principal beneficiario de las inversiones privadas, para el cual una diferencia de 5 decimales de rugosidad entre el caso 1 y 2 es casi imperceptible, a tal nivel de calificarlas iguales. Lo que busca el usuario (basado en encuestas de satisfacción) es una carretera bien señalizada, patrullada y que en caso de algún siniestro, sepa que va a contar con auxilio en el menor tiempo posible.

Capítulo 3

Factores que influyen en los resultados del IRI

3.1 Influencias en los resultados.

En 1986, Sayers determinó una relación de factores incidentes en la medición y cálculo de la rugosidad ó IRI. Estas son presentadas en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.1: Factores incidentes en la medición del perfil longitudinal para la obtención del IRI mediante la utilización del perfilómetro.

FACTOR	EXACTITUD	REPETITIVIDAD	INTERPRETACIÓN
Diseño del Perfilómetro	X		X
Intervalo de la muestra	X		
Algoritmo computacional	X		
Comprobación de errores automáticos	X		
Altura de los sensores	X		
Acelerómetros	X		
Distancia de medición longitudinal	X		
Número de sensores			X
Forma de la superficie	X	X	
Variación transversal		X	
Variación diaria		X	
Variación estacional		X	
Textura superficial	X		
Daños del pavimento	X	X	
Curvas	X		
Ascensos y descensos	X		
Efectos medioambientales	X		
Viento	X		

FACTOR	EXACTITUD	REPETITIVIDAD	INTERPRETACIÓN
Temperatura	X		
Humedad ambiental	X		
Humedad superficial	X		
Contaminación superficial	X		
Marcas del pavimento	X		
Operación del perfilómetro		X	
Velocidad de operación			
Cambios de velocidad			
Posicionamiento lateral		X	
Posicionamiento longitudinal		X	
Longitud de segmento			X
Frecuencia de la colección de datos			X
Conductor y operador del perfilómetro	X	X	

Tal como se aprecia en el cuadro anterior, Sayers establece que aún con la utilización de los perfilómetros que son dispositivos categorizados como clase 1 es conveniente tener en cuenta que a pesar de sus ventajas existen factores incidentes en la calidad del resultado final de las mediciones. En ese sentido Sayers consideraba que las curvas de la vía como los ascensos y descensos influyen en los resultados de las mediciones de IRI desde el punto de vista de exactitud.

Sin embargo, considero que además de afectar en la exactitud de la medición del perfil longitudinal, influye también en los resultados de la rugosidad puesto que no refleja únicamente la lisura de la superficie de la vía sino que representa también a un valor por defecto debido a las variaciones en la rasante de la superficie.

En ese sentido, se considera que los factores que influyen en los resultados de la rugosidad se pueden agrupar en bajo dos conceptos:

- Incidencia del diseño geométrico en los resultados de IRI.
- Singularidades

3.2 Influencia del diseño geométrico en los resultados del IRI

La obtención de los resultados de rugosidad ó IRI está determinada por el procesamiento de los datos de las cotas del terreno, lo cual corresponde a la proyección de la huella que se desea analizar sobre el plano de elevación, razón por la cual la medición del IRI, no debería verse afectada por la curvatura horizontal y/o vertical del camino.

Pese a lo anterior, en la realidad esto no sucede debido a que en las curvas ocurre una modificación al plano horizontal de la superficie; hipótesis que en el algoritmo de cálculo de IRI no fue considerado. En ese sentido, se presentan dos factores que

influyen desde el punto de vista geométrico: las curvas horizontales y las curvas verticales.

3.2.1 Influencia de las curvas horizontales.

Respecto a la influencia de este aspecto, E. Jelves a través de su trabajo de investigación realizado en Chile, concluyó que las curvas horizontales tienen una significativa influencia en el valor del IRI¹³ y por ende exigen un análisis puntual y particular en especial si se trata de carreteras de penetración, debido a que el trazado de éstos normalmente se encuentra caracterizado por curvas sucesivas de radios reducidos y cortas distancias para el desarrollo de los peraltes, ocurriendo un cambio en la inclinación transversal del camino, el cual se desarrolla desde el bombeo hasta el peralte.

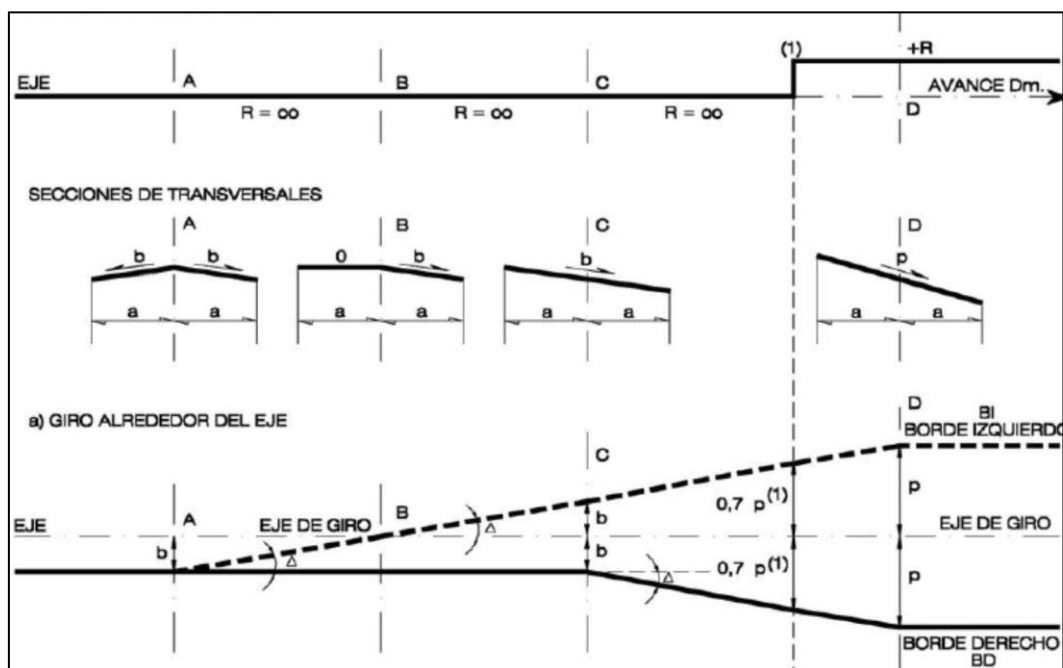


Figura 3.1: Desarrollo del peralte en curvas horizontales.

Asimismo, mencionados estudios e investigaciones permitieron verificar algunas tendencias y relaciones entre parámetros y algunas variables propias del modelo de cuarto de coche tales como la velocidad de simulación y el espaciamiento entre cotas del perfil longitudinal, obteniendo como resultado de los análisis que el diseño geométrico de un camino puede por sí solo incrementar los valores de IRI, hasta valores cercanos a los límites aceptados por las normativas, e incluso superarlos. Este incremento por diseño geométrico puede llegar a ser muy típico para gran parte de las rutas concesionadas en nuestro país; ese es el caso del Tramo 1 de la IIRSA Sur, donde en el tramo de carretera entre Puquio y desviación Pampachiri dentro del departamento de Ayacucho, se realizó el análisis para el cálculo del IRI de diseño a partir de un trabajo de gabinete del área de topografía durante la ejecución de la rehabilitación de la

¹³ **Jelves, E..** “Influencia del diseño geométrico de los pavimentos en el Índice de Rugosidad Internacional” –Chile: Universidad de Chile., 2000

vía el año 2009, en la figura 3.2 se aprecia que en algunos puntos evaluados, el IRI de diseño llega a superar los valores de efecto de trabajo estandarizados en el Perú para las rehabilitaciones o recapeos asfálticos.

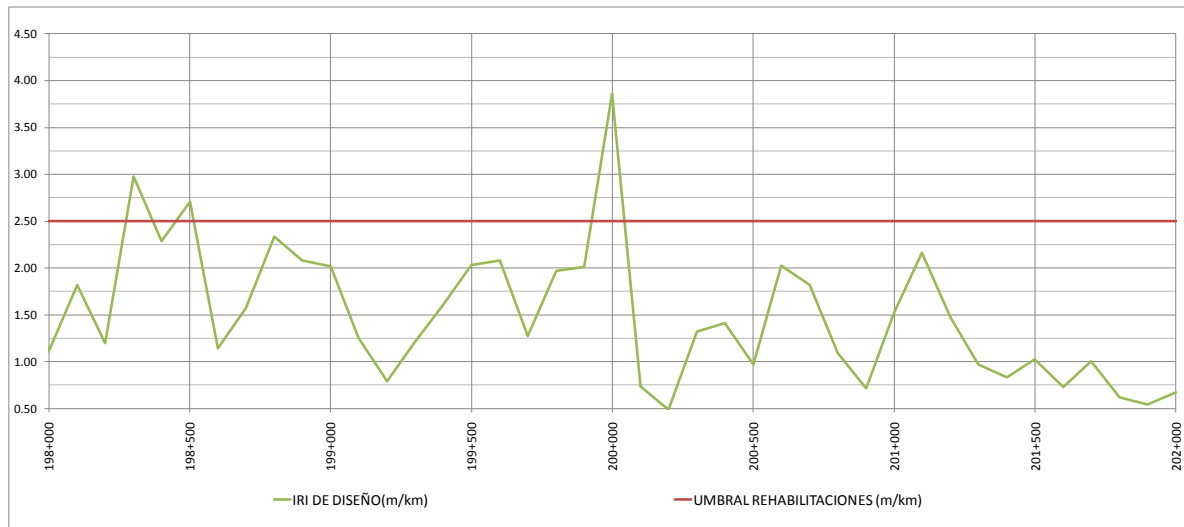


Figura 3.2: Resultados de cálculo de IRI de diseño cada 100 metros de la carretera Puquio – desviación Pampachiri

De otro lado, se pudo observar que en secciones en curva el IRI normalmente tiende a incrementarse y en tramos donde el peralte tiende a ser constante el IRI tiende a disminuir, situación que se explica por la existencia de cuatro cambios de pendiente claramente identificables:

- En el inicio de la transición del bombeo al peralte máximo de diseño de la curva.
- En el punto donde se alcanza el peralte máximo.
- En el punto donde comienza la transición del peralte máximo de la curva al bombeo.
- En el punto donde se alcanza nuevamente el bombeo natural de la pista.¹⁴

En el caso específico de las rutas transversales, en donde la configuración del camino obliga a que prácticamente el trazado típicamente lo compongan una sucesión de curvas, hace que el análisis teórico del IRI seguramente se incremente sustancialmente debido al cambio de cotas que se presenta en los segmentos con curva.

Lo anterior significa que en una longitud de un tramo de camino donde no haya cambios de pendiente el IRI tenderá a disminuir su valor hasta estabilizarse si dicha longitud es lo suficientemente extensa. Se advierte por lo observado en los análisis de las investigaciones realizadas que la distancia mínima entre curvas consecutivas del mismo sentido es demasiado corta en términos de esta situación.

Por lo tanto, si la distancia entre curvas del mismo sentido es corta, es mucho más crítica la situación para el caso de curvas consecutivas de sentido contrario en donde

¹⁴ **Jelves E.**, Influencia del diseño geométrico de los pavimentos en el Índice de Rugosidad Internacional –Chile: Universidad de Chile., 2000

esta separación no se exige y por lo tanto en muchos casos ni siquiera existe, con lo cual el valor del IRI no se alcanzaría a estabilizar.

En este sentido, entendiendo que la existencia de una curva horizontal representa una influencia en términos de la medición de IRI, se denomina longitud de influencia aquella distancia que comienza a partir del punto en que finaliza la transición del peralte al bombeo en la salida de la curva. Los análisis efectuados por las investigaciones realizadas por Jelves mostraron que, en una superposición del perfil longitudinal y los resultados de IRI obtenido punto a punto, la influencia de los cambios de pendiente se prolonga hasta 50 metros hacia adelante. En curvas circulares con o sin curva de transición la influencia de la curva completa se mantiene a 50 metros a partir del final de la transición de peralte a bombeo.

3.2.2 Influencia de las curvas verticales.

Los cambios de pendiente longitudinal que generan las curvas verticales ocasionan también una modificación al plano horizontal de la superficie. Sin embargo, a comparación de las curvas horizontales, las curvas verticales son menos protagonistas, pues normalmente se buscan pendientes suavizadas, generando que se modifiquen a menudo. Asimismo, a diferencia de lo que acontece en las curvas horizontales, existen 3 cambios de pendiente claramente identificables:

- En el inicio del cambio de la pendiente del perfil longitudinal.
- En el punto donde inicia el cambio de pendiente.
- En el punto donde se inicia la nueva pendiente del perfil longitudinal.

Por las razones anteriormente descritas, se descarta que las curvas verticales sea el principal factor que influye en el cálculo de la rugosidad.

Cabe resaltar que la longitud de influencia para las curvas verticales se da 50 metros antes del inicio del cambio de pendiente hasta 50 metros después de iniciada la nueva pendiente longitudinal.

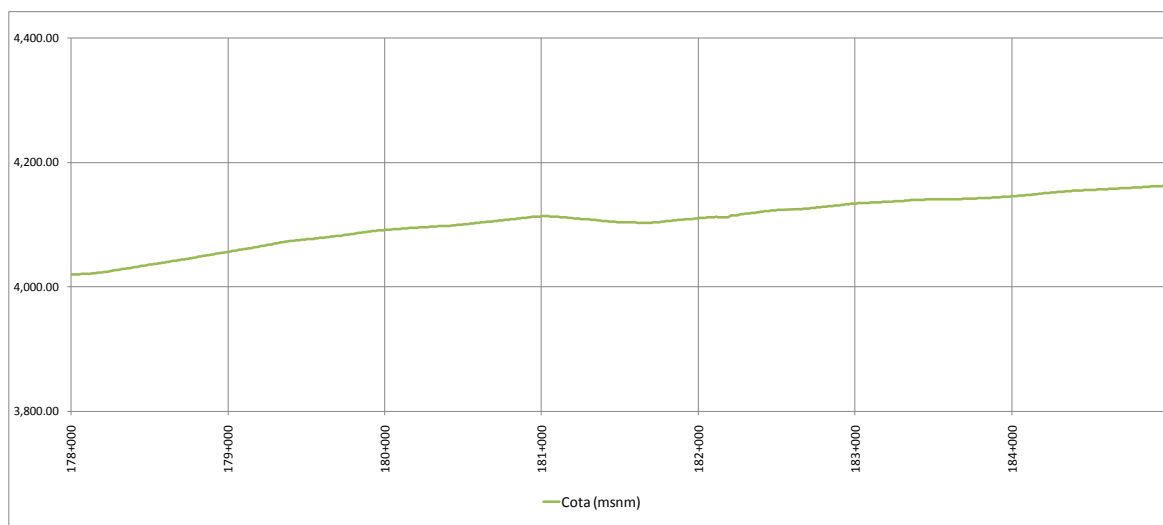


Figura 3.3: Perfil longitudinal de un tramo de la carretera Puquio– desviación. Pampachiri

3.3 Singularidades

Una singularidad es cualquier alteración del perfil longitudinal de la carretera que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. Entre ellas se pueden citar: puentes, badenes, tapas de alcantarillas, gibas, etc. que alteren el perfil del camino.

Las singularidades que se pudieran presentar afectan el intervalo completo de la medición de la pista en que se encuentran ubicadas, el cual no se considera en la evaluación. Las singularidades que se emplacen en dos tramos vecinos, ubicadas al final de un tramo y a comienzos del siguiente (ambas en la misma pista), afectan los dos tramos, los que no se consideran en la evaluación. Las singularidades afectan los tramos que las contengan.

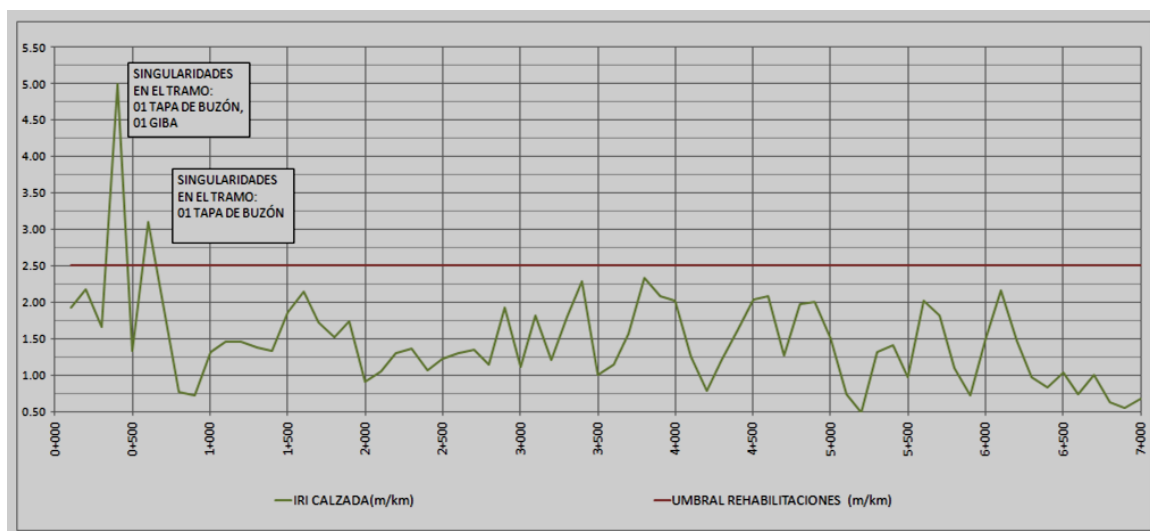


Figura 3.4: Singularidades detectadas de un tramo de la carretera Nazca – Puquio

En ese sentido, las singularidades vendrían a ser afectaciones más puntuales las cuales se pueden filtrar durante el análisis de los resultados.

Respecto a la aplicación del concepto de la singularidad, estos ya forman parte del filtro que realizan los consultores de esta especialidad previa a la presentación de sus resultados.

Capítulo 4

Determinación de la tolerancia

4.1 Sobre la recolección de datos en campo

Durante la ejecución de las obras de puesta a punto del tramo 1 del corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil a fines del año 2008, se propuso como parte del control de calidad monitorear los valores de rugosidad que se obtenían durante el perfilado de una base reciclada, esto debido a que el umbral de control de rugosidad solicitado dentro de las especificaciones técnicas del proyecto de ingeniería era demasiado exigente para el tipo de paquete de pavimento que se proyectó para la rehabilitación antes mencionada. En ese sentido, para la recolección de los datos de rugosidad se adquirió como equipo de medición un *walking profiler*, dispositivo portátil con el cual podía verificarse por tramos de 200 metros los valores de rugosidad que el tren de perfilado podía alcanzar, detectar los tramos con valores altos y proceder a corregir las zonas puntuales a fin de reducir los valores de rugosidad obtenidos.

Al respecto, los primeros tramos intervenidos por la obra fueron ejecutados en parte de la carretera Nazca – Puquio, el cual momento antes de su intervención presentaba una condición superficial de regular a mala, dado por un pavimento envejecido, con mucha presencia de fisuramiento tipo piel de cocodrilo extendido en todo el ancho de la calzada. También se caracterizó por la ausencia de bermas a lo largo de todo el tramo y de drenajes adecuados en ciertos sectores y el socavamiento de la base en algunos puntos particulares, en especial aquellos que se ubican en lugares en los cuales se produce la descarga de la escorrentía superficial proveniente de las laderas; con el consecuente hundimiento y corrimiento de la carpeta en los mencionados sectores. Otras de las características que se observó fue la fuerte presencia de baches de alta severidad y hundimientos, encontrándose tramos con ausencia total de carpeta o superficie de rodadura. Esto sumado a una rugosidad del pavimento muy elevada en este tramo (IRI promedio > 6 m/km).

En el lapso de la interpretación a los monitoreos realizados en obra, los altos valores de rugosidad obtenidos durante los trabajos del tren de perfilado de base fueron asociados a la dificultad para trabajar y dar forma a las transiciones de bombeo a peralte y viceversa en las curvas horizontales y el cambio de pendiente en las curvas verticales. Sin embargo, a fin de descartar que este efecto se produjese debido a maniobras de operación, como modificar la altura de la cuchilla de la motoniveladora, se procedió a comparar los perfiles de terreno obtenido a través de las mediciones del *walking profiler* tanto para zonas rectas como para zonas sinuosas. En el lapso de la comparación, pudo verificarse que la lisura de los perfiles para ambas situaciones llegaba a ser casi

similares, lo cual contradecía a los valores de rugosidad obtenidos, puesto que siempre en zonas sinuosas el valor de rugosidad resultaba mayor.

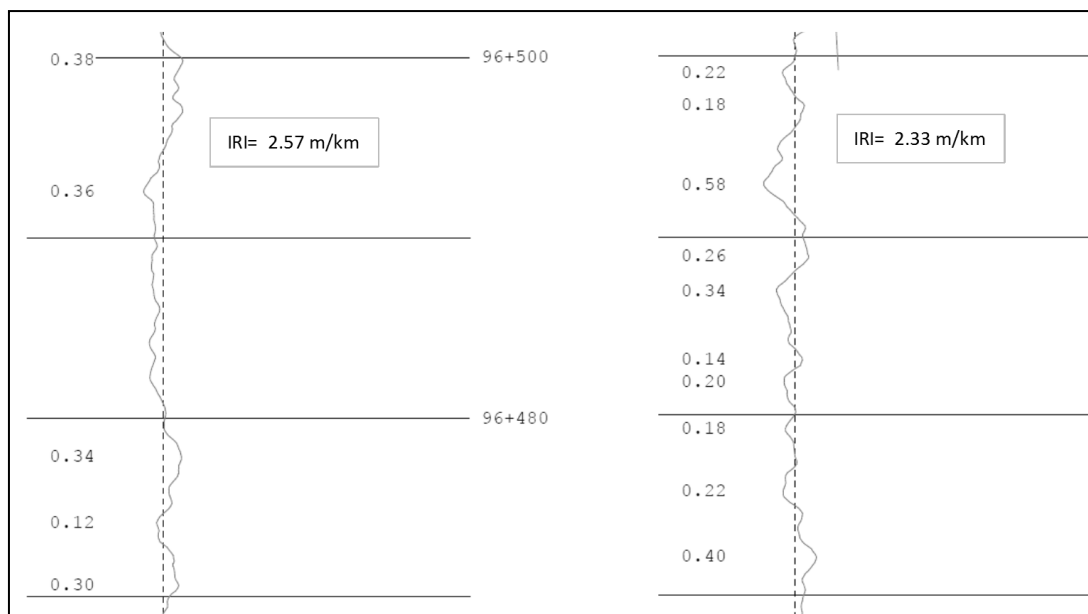


Figura 4.1 Comparación de perfiles entre un tramo sinuoso (izquierda) y un tramo recto (derecha) en el tramo de la carretera Nazca – Puquio.

En la Figura 4.1 puede apreciarse el diagrama del lado izquierdo donde se muestra que el perfil del tramo sinuoso incluso presentando un perfil más liso, presenta un valor de rugosidad mayor al valor de rugosidad del tramo recto, en donde se aprecia algo más de irregularidades en el perfil. A partir de la comparación de los perfiles longitudinales, se procedió a realizar consultas e investigar por internet, y gracias a esto último, se encontraron investigaciones chilenas donde se sustentaba que una curva horizontal podía generar una alteración en el valor de los resultados de rugosidad, pues la transición bombeo – peralte – bombeo genera pequeñas variaciones en las cotas, las cuales por defecto darían un valor inicial por encima de cero (0 m/km).

Para comprobar dicha hipótesis, se planteó analizar una medición de rugosidad con perfilómetro láser realizada en el tramo comprendido entre el Puente Sahuinto y la ciudad de Abancay en el departamento de Apurímac, tramo de vía que se caracterizaba por tener una aceptable sensación de confort con pocas vibraciones en su extensión de recorrido.

La grafica mostrada en la figura 4.2 líneas abajo, representa la envolvente de la rugosidad media deslizante del tramo evaluado, la cual facilita identificar los puntos con los más altos valores que se han identificado a lo largo del tramo en evaluación. Cabe mencionar que entre los Km 761+000 al Km 762+300 la vía presenta 3 contracurvas exigentes, donde coincidentemente los valores de rugosidad obtenidos son los más altos de la evaluación. Si bien es cierto no puede imputarse el valor total de la rugosidad obtenida al efecto de influencia por geometría, resulta categórica la afirmación que cierto porcentaje del valor de rugosidad obtenido representa esta influencia por el trazo de la vía.

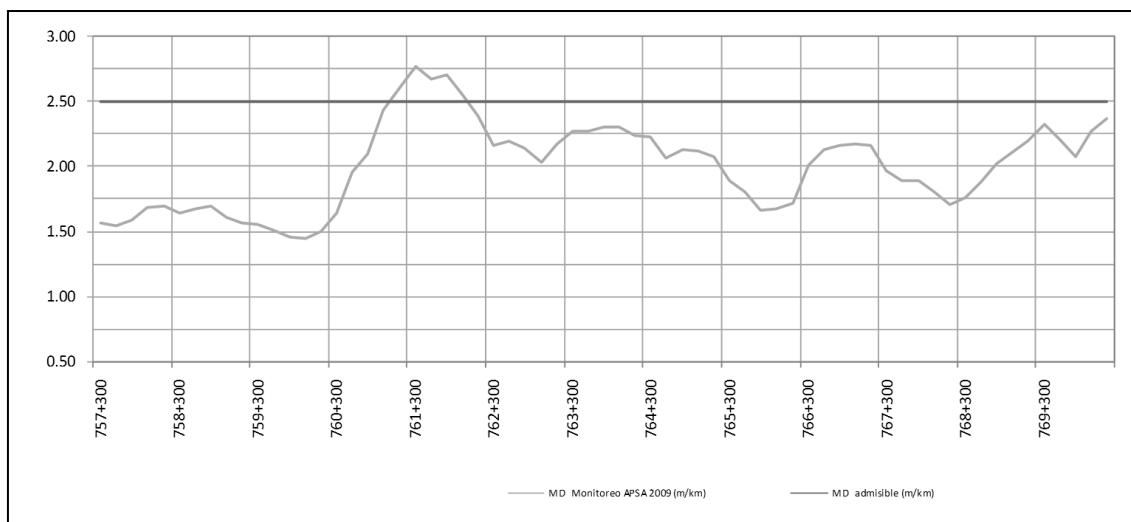


Figura 4.2 Representación de la rugosidad media deslizante en el tramo puente Sahuinto – Abancay en el año 2008.

De lo expuesto anteriormente podemos afirmar la existencia de una tendencia en la medida que a mayor grado de curvatura horizontal (mayor cantidad de curvas horizontales), mayor debe ser el valor de IRI de diseño de la vía. Entonces, para conocer esta relación fue necesario tener como datos de entrada el IRI de diseño y las características del trazo de vía.

En tal sentido, esta condición llevó a determinar que esta relación debiera de ser aplicada para justificar el incumplimiento que pueda producirse en la obtención de la rugosidad media deslizante, debido a que esta no está compuesta solamente por el efecto de trabajo, sino por el resultado de la suma de los valores de efecto de trabajo y el IRI de diseño; siendo este último mucho más distinto a 0 m/km en función al dimensionamiento de curvas horizontales que se encuentren dentro del intervalo en evaluación. Por esta razón el conocer esta relación IRI de diseño vs. curvatura horizontal permitió elaborar el mecanismo que pueda justificar estos incumplimientos e incluso llegar a establecer tolerancias – cual es objetivo de la presente tesis - similares a las establecidas en los contratos de concesión de la IIRSA 2, 3 y 4 y la red vial N° 6.

Por lo cual, el IRI de diseño pudo ser dimensionado a partir de conocer las cotas de las huellas de circulación cada 25 centímetros. Al respecto, esta etapa requiere de mucha inversión pues requiere de un área geomática avocada exclusivamente a este trabajo necesitándose de un presupuesto adicional. Para el presente caso, se aprovechó la información generada por el área de topografía en apoyo a los trabajos de replanteo topográfico para el emplantillado necesario para los trabajos de perfilado de base de pavimento.

Respecto a la procura de la información, la oportunidad de aprovechar estos datos se dio durante la ejecución de la obra, durante el cual se detectó que el proceso de replanteo y emplantillado requería de una mejor automatización que pueda no necesariamente colocar la plantilla exactamente a cada 20 metros, sino adecuarse a acercar las plantillas en caso se requiera más precisión como es el caso de trabajar en zona de curvas, donde se requería reducir las distancias de estas referencias a fin de poder asegurar una curvatura vertical suavizada. Para tal propósito, se dotó de una mejor instrumentación

topográfica a las cuadrillas y se optó trabajar con modelos digitales de terreno (DTM), los cuales consisten en recrear la superficie del terreno y permitir conocer la cota de terreno de cualquier punto dentro de la superficie recreada. En ese sentido, teniendo el modelo digital del terreno puede obtenerse el perfil de las huellas de circulación así como las cotas cada 25 centímetros de las mismas para poder realizar el cálculo del IRI y conocer de esta forma el IRI de diseño en función al trazo de la vía. A continuación vemos la cuadrilla de topografía realizando el replanteo del eje y la colocación de plantillas previos al proceso de perfilado de base de pavimento.



Figura 4.3 Cuadrilla de topografía trabajando (año 2009)

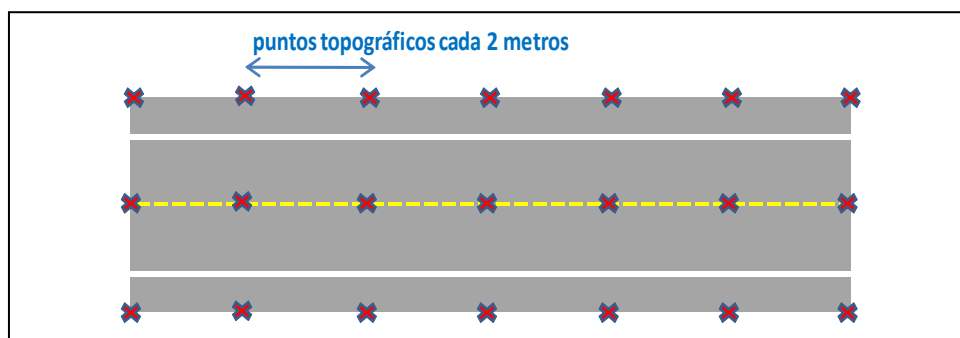


Figura 4.4 Esquema de recolección de datos topográficos para la recreación de la superficie de la vía mediante el modelo digital de terreno (DTM).

Respecto al trazo de la vía, se optó por utilizar los datos de curvatura horizontal por kilómetro que se realizó en el país con motivo del Inventario de la red vial nacional asfaltada del año 2004 en aproximadamente 9,000 km / calzada, dentro del cual estaba incluida nuestro tramo en evaluación. Cabe mencionar que a partir de la limitación de tener los valores de curvatura horizontal en intervalos de 1 kilómetro, los valores de IRI de diseño fueron calculados considerando este intervalo.

El cálculo de los valores de IRI se realizó mediante el uso del programa Proval 3.2, para lo cual los valores de los perfiles de las huellas debieron ser adecuadas al formato ERD, el cual es requerido por el programa.

En tal sentido, el procedimiento para la obtención del mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad media deslizante tomó en cuenta lo siguiente:

- Obtención de perfiles de las huellas de circulación mediante los archivos DTM.
- Adecuación de los datos de los perfiles de las huellas al formato ERD.
- Cálculo de valores de IRI mediante el programa PROVAL 3.2.
- Análisis bidimensional IRI de diseño vs. Curvatura horizontal.
- Mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad media deslizante.

4.2 Procesamiento para la obtención de perfiles de las huellas de circulación.

Los perfiles de las huellas de circulación fueron obtenidos a partir de modelos digitales de terreno (DTM), los cuales fueron elaborados a partir de puntos topográficos levantados a una distancia de 2 metros medidos en el eje y en el extremo de la plataforma de la vía, logrando de esta forma recrear la superficie suavizada de la vía existente. Respecto a esto último, no se consideró necesario el reducir las distancias de los puntos topográficos, pues se tenía conocimiento que tomar puntos topográficos más cercanos recrearía mucho mejor el perfil de la superficie existente y por tanto el procesamiento de los datos de dicho perfil daría como resultado el IRI existente en la vía. Por esta razón, se mantuvieron los 2 metros de distancia previamente definidos para los puntos topográficos, buscando suavizar la superficie existente que permita poder recrear los perfiles de diseño de la vía, filtrando de esta forma oquedades o defectos superficiales y de esta forma recrear un valor cercano al IRI de diseño de la vía.

Es importante resaltar que la presente investigación buscó aprovechar la información de campo disponible, evitando incurrir en gastos que no puedan ser financiados y que imposibiliten el cumplimiento del objetivo planteado; puesto que la condición ideal hubiera sido el obtener los perfiles de las huellas de circulación a partir de los archivos digitales del diseño geométrico de la vía para lo cual se hubiera requerido una etapa de rediseño de la vía; la cual si representaría exactamente las variaciones en la cotas producto de los cambios de peralte – bombeo –peralte generadas por las curvas horizontales.

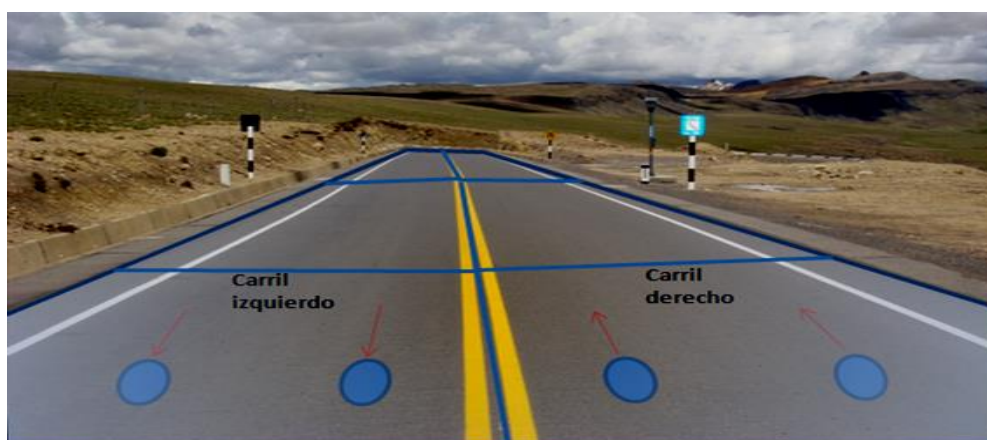


Figura 4.5 Perfiles para la obtención de las huellas de circulación dentro del modelo digital de terreno (DTM).

A partir del modelo digital del terreno (DTM), se procedió a generar las cotas topográficas de los perfiles de las huellas a cada 25 centímetros, estas huellas fueron generadas a 1.5 y 3.0 metros distantes del eje de la vía y proyectadas hacia el lado derecho y hacia el lado izquierdo del mismo, y calculadas haciendo uso de una rutina LISP del *Autocad Land*. Cabe resaltar que el espaciamiento de las huellas mantiene relación con un vehículo de tamaño medio como es el caso de una camioneta rural, el cual se encuentra dentro del intervalo recomendado por el Banco Mundial.¹⁵

Para calcular el IRI para un solo kilómetro fue necesario generar 4,001 cotas topográficas, sumando en total 16,004 cotas considerando las cuatro huellas de circulación; lo cual hubiera sido un proceso muy tedioso si no se hubiera contado con el apoyo de las herramientas informáticas. Del mismo modo, el formato ERD necesario para el cálculo del IRI solicitaba una precisión en milésimas de metro, razón por la cual se elaboró el formato de reporte que se presenta en el cuadro siguiente, el cual considera en positivo las huellas del carril derecho y en negativo las huellas del carril izquierdo:

A continuación, presentamos las cotas topográficas de los perfiles de las huellas de circulación en el kilómetro 165+000 del tramo Puquio – desviación Pampachiri.

Cuadro 4.1 Nivel topográfico: cota de terreno en perfil indicado, referencia desde eje y cota de terreno de cada 25 centímetros

- 3.0 m	-1.5 m	PROGRESIVA	+ 1.5 m	+ 3.0 m
3,440.843	3,440.825	165+000.00	3,440.822	3,440.829
3,440.855	3,440.837	165+000.25	3,440.834	3,440.841
3,440.866	3,440.848	165+000.50	3,440.845	3,440.852
3,440.877	3,440.859	165+000.75	3,440.856	3,440.863
3,440.888	3,440.870	165+001.00	3,440.867	3,440.874
3,440.900	3,440.882	165+001.25	3,440.879	3,440.886
3,440.911	3,440.893	165+001.50	3,440.890	3,440.897
3,440.922	3,440.904	165+001.75	3,440.901	3,440.908
3,440.934	3,440.916	165+002.00	3,440.913	3,440.920
3,440.945	3,440.927	165+002.25	3,440.924	3,440.931
3,440.956	3,440.938	165+002.50	3,440.935	3,440.942
3,440.967	3,440.949	165+002.75	3,440.946	3,440.953
3,440.979	3,440.961	165+003.00	3,440.958	3,440.965
3,440.990	3,440.972	165+003.25	3,440.969	3,440.976
3,441.001	3,440.983	165+003.50	3,440.980	3,440.987
3,441.012	3,440.994	165+003.75	3,440.991	3,440.998
3,441.023	3,441.005	165+004.00	3,441.002	3,441.009

¹⁵ **Brown, D. and Thomsem, T.**, “*Generic Equipment Specification Multi-Function Road Data Collection System*”. USA - World Bank, 2007.

- 3.0 m	-1.5 m	PROGRESIVA	+ 1.5 m	+ 3.0 m
3,441.036	3,441.018	165+004.25	3,441.015	3,441.022
3,441.048	3,441.030	165+004.50	3,441.027	3,441.034
3,441.061	3,441.043	165+004.75	3,441.040	3,441.047
3,441.073	3,441.055	165+005.00	3,441.052	3,441.059
3,441.087	3,441.069	165+005.25	3,441.066	3,441.073
3,441.101	3,441.083	165+005.50	3,441.080	3,441.087

4.3 Elaboración de archivo de análisis ERD

Debido a que el formato de reporte de las cotas de los perfiles de las huellas de circulación fueron reportadas en extensión Excel, fue necesario convertir esta información a archivos con formato ERD para poder hacer uso del software PROVAL.

El archivo ERD es un formato de archivo estándar que se utiliza para almacenar números en forma de tabla, con las etiquetas de asistencia técnica automatizada de trazado y de procesamiento. Un archivo ERD contiene dos secciones independientes: la cabecera y los datos. La parte del encabezado contiene sólo texto, y la parte de datos contiene sólo números.

Para convertir las cotas topográficas a los formatos de números para el archivo ERD, se multiplicó las cotas topográficas por mil, posteriormente se formatearon los decimales a 5 unidades y mediante un proceso de concatenado se extrajeron las comas y se eliminaron los espacios en blanco; de esta forma, la información de las cotas topográficas quedan listas para ser adicionadas al archivo ERD.

Cuadro 4.2 Adaptación de la información de las cotas topográficas al formato solicitado para el archivo ERD.

PROGRESIVA	NIVEL TOPOGRÁFICO	CONVERSIÓN PRELIMINAR	COTAS EN FORMATO ERD
261+000.00	4,181.976	4,181,976.000	4181976.00000
261+000.25	4,181.978	4,181,978.000	4181978.00000
261+000.50	4,181.979	4,181,979.000	4181979.00000
261+000.75	4,181.981	4,181,981.000	4181981.00000
261+001.00	4,181.983	4,181,983.000	4181983.00000
261+001.25	4,181.985	4,181,985.000	4181985.00000
261+001.50	4,181.987	4,181,987.000	4181987.00000
261+001.75	4,181.989	4,181,989.000	4181989.00000
261+002.00	4,181.991	4,181,991.000	4181991.00000
261+002.25	4,181.993	4,181,993.000	4181993.00000
261+002.50	4,181.995	4,181,995.000	4181995.00000
261+002.75	4,181.997	4,181,997.000	4181997.00000
261+003.00	4,181.998	4,181,998.000	4181998.00000
261+003.25	4,182.000	4,182,000.000	4182000.00000
261+003.50	4,182.002	4,182,002.000	4182002.00000
261+003.75	4,182.004	4,182,004.000	4182004.00000
261+004.00	4,182.006	4,182,006.000	4182006.00000
261+004.25	4,182.008	4,182,008.000	4182008.00000
261+004.50	4,182.010	4,182,010.000	4182010.00000

PROGRESIVA	NIVEL TOPOGRÁFICO	CONVERSIÓN PRELIMINAR	COTAS EN FORMATO ERD
261+004.75	4,182.012	4,182,012.000	4182012.00000
261+005.00	4,182.014	4,182,014.000	4182014.00000
261+005.25	4,182.016	4,182,016.000	4182016.00000
261+005.50	4,182.018	4,182,018.000	4182018.00000
261+005.75	4,182.020	4,182,020.000	4182020.00000
261+006.00	4,182.022	4,182,022.000	4182022.00000
261+006.25	4,182.023	4,182,023.000	4182023.00000
261+006.50	4,182.025	4,182,025.000	4182025.00000
261+006.75	4,182.027	4,182,027.000	4182027.00000
261+007.00	4,182.029	4,182,029.000	4182029.00000
261+007.25	4,182.031	4,182,031.000	4182031.00000
261+007.50	4,182.033	4,182,033.000	4182033.00000
261+007.75	4,182.035	4,182,035.000	4182035.00000
261+008.00	4,182.037	4,182,037.000	4182037.00000
261+008.25	4,182.039	4,182,039.000	4182039.00000
261+008.50	4,182.041	4,182,041.000	4182041.00000

La información de las cotas topográficas quedan listan para ser adicionadas a la sección de datos del archivo ERD tal como se aprecia en la figura siguiente; cabe mencionar que la cantidad de datos debe de ser declarada en la cabecera, pues es requisito por defecto el indicar la cantidad de datos que conforman el archivo.

```

KM 158 - KM 165 CD-HE: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
ERDFILEV2.00
1, 4001, 4001, 1, 5, 0.25000, -1,
TITLE SECTOR 3.2
SHORTNAMLelev.
UNITSNAMmm
XLABEL Distance
XUNITS m
DATE Wed, 04 Ago 2009 at 08:05
PROFINSTSSI Inertial Profiler
HIGHPASSNone
LOWPASS None
ANMLYFLTtrue
OPERATOREnsayo
PROJID 001
COUNTY sector3
STATE PE
WEATHER Huella externa
SECNOTESHuella externa
END
3201815.00000
3201823.00000
3201830.00000
3201838.00000
3201846.00000
3201854.00000
3201861.00000
3201869.00000
3201877.00000
3201884.00000
3201892.00000
3201900.00000
3201908.00000
3201915.00000
3201923.00000
3201931.00000
3201938.00000
3201946.00000
3201953.00000

```

Figura 4.6 Visualización del formato ERD haciendo uso del programa block de notas

4.4 Cálculo de valores de IRI mediante el programa PROVAL 3.2

Para realizar el cálculo de los valores de rugosidad para el IRI de diseño se utilizó el programa PROVAL en su versión 3.2. PROVAL es un programa de ingeniería gratuito que permite visualizar y analizar perfiles de pavimentos de diversas maneras; asimismo es un producto patrocinado y avalado por el departamento de transporte de los Estados Unidos, la FHWA y el programa de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP).

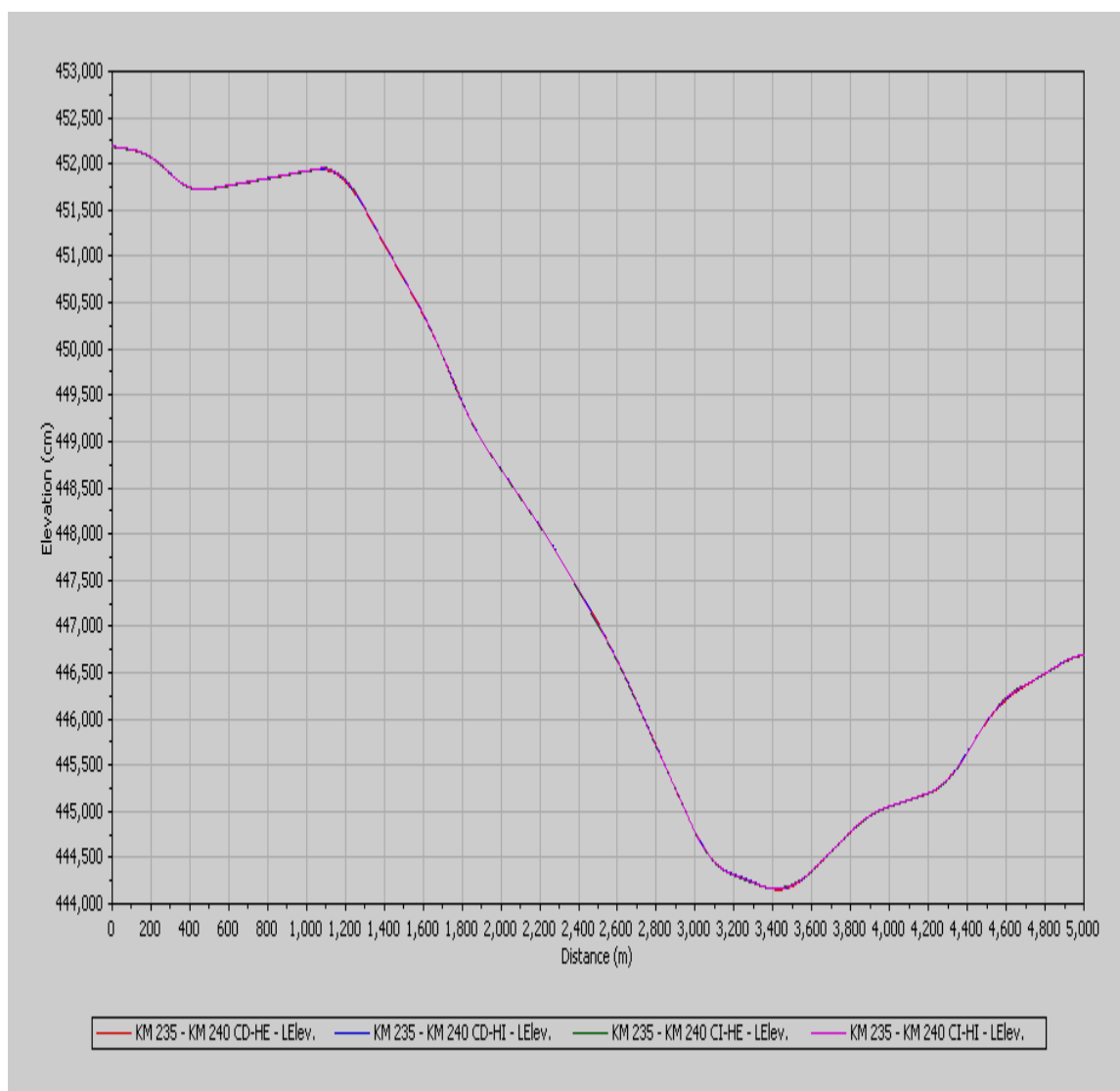


Figura 4.7 Visualización del perfil de las huellas de circulación del Km 235+000 al Km 240+000 del tramo Puquio – desviación Pampachiri.

Los archivos ERD de los kilómetros analizados fueron cargados desde el mismo programa y su procesamiento fue configurado para que los valores de IRI resultantes sean calculados en intervalos de 20 metros; de esta forma, se obtuvo 200 valores de IRI por cada kilómetro de vía.

Dentro del programa se cuenta con la opción para activar el filtro denominado “*low pass*”, sin embargo su activación no fue necesaria puesto que este filtro se utiliza para asignar un valor representativo a un intervalo de perfil de 25 centímetros, y los datos de

entrada ya cuentan con este procedimiento (recordar que las cotas del perfil de las huellas de circulación fueron calculadas cada 25 centímetros).

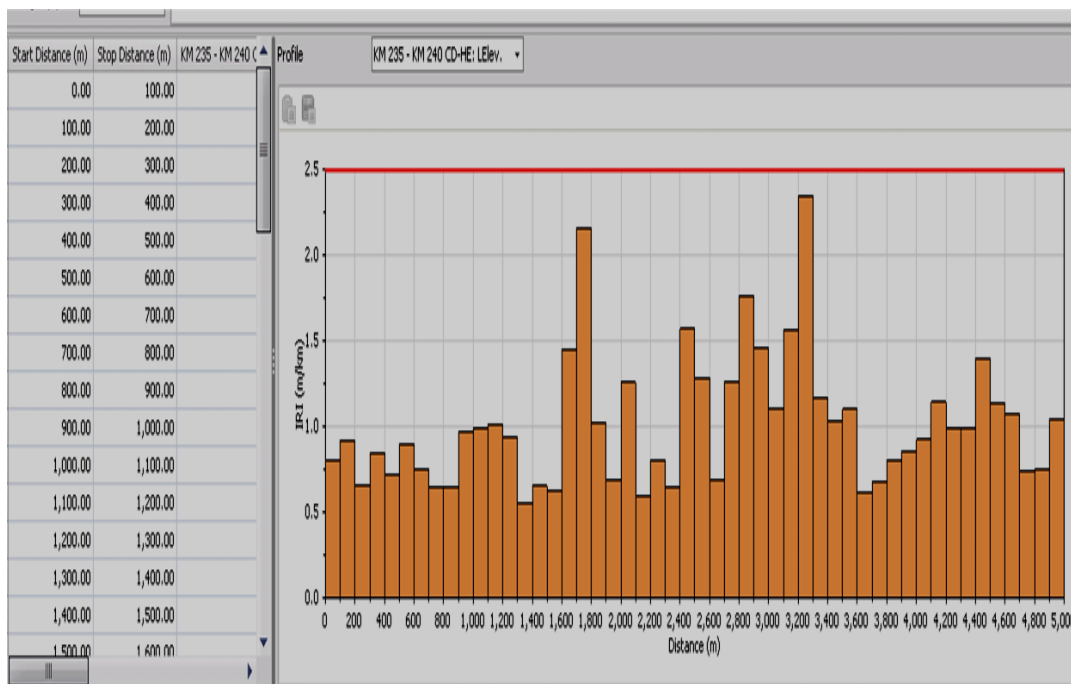


Figura 4.8 Visualización de los valores de rugosidad obtenidos en intervalos de 20 metros en la huella externa del carril derecho del Km 235+000 al Km 240+000 del tramo Puquio – desviación Pampachiri.

Generados los resultados, estos fueron exportados en formato Excel y ordenados de acuerdo a la progresiva y a la huella en la cual fue determinada. Se repitió este procedimiento para los 94 kilómetros que se procesaron como muestra.

Cuadro 4.3: Resultados de rugosidad calculada a intervalos de 20 metros en la huella externa del carril derecho del Km 238+000 al Km 239+000 del tramo Puquio – Desviación Pampachiri.

INICIO	FIN	CARRIL DERECHO HUELLA EXTERNA	CARRIL DERECHO HUELLA INTERNA	CARRIL IZQUIERDO HUELLA EXTERNA	CARRIL IZQUIERDO HUELLA INTERNA
238+000	238+020	1.18	1.55	2.04	1.71
238+020	238+040	0.91	1.18	1.38	1.30
238+040	238+060	1.00	0.97	0.67	0.66
238+060	238+080	1.13	0.88	1.15	0.98
238+080	238+100	1.29	1.10	0.78	0.99
238+100	238+120	0.74	0.72	0.70	0.86

INICIO	FIN	CARRIL DERECHO HUELLA EXTERNA	CARRIL DERECHO HUELLA INTERNA	CARRIL IZQUIERDO HUELLA EXTERNA	CARRIL IZQUIERDO HUELLA INTERNA
238+120	238+140	1.80	1.52	0.67	0.88
238+140	238+160	2.28	1.63	1.06	0.93
238+160	238+180	1.74	1.21	1.38	1.28
238+180	238+200	1.26	1.64	1.38	1.69
238+200	238+220	2.01	1.67	1.52	1.59
238+220	238+240	2.76	2.39	2.15	2.47
238+240	238+260	1.27	1.37	1.23	1.39
238+260	238+280	2.31	2.05	2.28	2.04
238+280	238+300	3.31	2.20	2.44	2.27
238+300	238+320	2.49	2.02	1.06	1.23
238+320	238+340	1.05	1.25	1.25	1.26
238+340	238+360	0.90	0.81	0.79	0.78
238+360	238+380	0.73	0.66	0.79	0.71
238+380	238+400	0.72	0.87	1.98	1.16
238+400	238+420	1.30	1.12	1.63	1.67
238+420	238+440	0.98	0.71	0.79	0.85
238+440	238+460	0.78	0.82	0.90	0.87
238+460	238+480	1.14	1.26	1.32	1.24
238+480	238+500	0.91	0.88	0.68	0.85
238+500	238+520	1.19	1.24	1.16	1.18
238+520	238+540	1.81	1.04	1.56	1.04
238+540	238+560	0.87	0.88	2.52	1.61
238+560	238+580	0.77	1.16	1.61	1.42
238+580	238+600	0.84	1.08	1.14	1.13
238+600	238+620	0.52	0.54	1.34	0.80
238+620	238+640	0.77	0.51	1.02	0.50
238+640	238+660	0.61	0.64	0.54	0.40
238+660	238+680	0.69	0.54	0.49	0.50
238+680	238+700	0.51	0.63	0.58	0.69
238+700	238+720	0.49	0.43	0.48	0.49
238+720	238+740	0.66	0.88	0.87	0.79
238+740	238+760	0.86	0.97	0.61	0.88
238+760	238+780	0.72	0.62	0.53	0.50
238+780	238+800	0.65	0.49	0.52	0.49
238+800	238+820	1.29	1.01	0.75	0.80
238+820	238+840	0.81	0.76	0.57	0.85
238+840	238+860	0.57	0.57	0.50	0.55
238+860	238+880	0.69	0.61	0.74	0.66
238+880	238+900	0.64	0.60	0.50	0.44
238+900	238+920	0.91	0.95	0.75	0.99
238+920	238+940	1.08	1.19	0.86	1.21
238+940	238+960	0.71	0.52	0.43	0.67
238+960	238+980	0.96	0.87	0.83	0.73
238+980	239+000	0.62	0.59	0.64	0.55

4.5 Margen de error del cálculo de valores de rugosidad

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la condición ideal para obtener el IRI de diseño hubiera sido el de determinar los perfiles de las huellas de circulación a partir de los archivos digitales del diseño geométrico de la vía, donde se vuelva a rediseñar la vía para anular toda posibilidad de que alguna deformación pueda filtrarse y manifestarse en los cálculos de la rugosidad o IRI de diseño.

La teoría para el cálculo de la rugosidad contempla dos procesos previos: el *low pass* y el *high pass*. El *low pass* es un filtro previo al procesamiento de cálculo, el cual se utiliza para suavizar las irregularidades que se presentan en intervalos menores a 25 cm y asignarse a este mismo intervalo un solo valor que represente el promedio de todas las cotas de las irregularidades y elimine el efecto de las ondas pequeñas que no se consideran dentro de la ecuación de cálculo de rugosidad. En la figura 4.9, se puede apreciar un ejemplo de cómo funciona el *low pass*, donde para conocer el valor del área sombreada se requiere promediar la altura. En este caso el ancho o la base B representa el intervalo de 25 cm y las cotas topográficas son representadas por la altura.

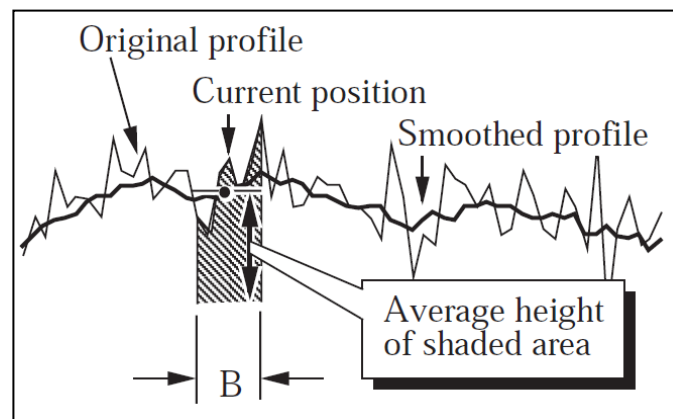


Figura 4.9 Visualización del efecto del filtro *low pass*.¹⁶

Por otro lado, el *high pass* es un filtro que elimina el efecto de las longitudes de onda mayores a 30 metros, las cuales el algoritmo de cálculo de rugosidad no considera como datos de entrada, puesto que estas no provocan las vibraciones relacionadas a la reducción de la sensación de confort de la vía.

El filtro *low pass* no fue necesario aplicarla debido a que las cotas topográficas que representan los perfiles de las huellas de circulación de los kilómetros evaluados, han sido calculados tomando en consideración los intervalos de 25 centímetros. Caso distinto ocurre con el *high pass*, en donde si hay un alto grado de existencia de longitudes de onda mayores a 30 metros, debido a que por defecto, los datos de campo que fueron levantados cada dos metros, han logrado suavizar las longitudes de onda que se encuentran dentro de estos mismos intervalos haciéndolas más similares a las obtenidas de un diseño geométrico. Sin embargo, las longitudes de onda mayores a 2 metros, si podrían haber recreado deformaciones de la misma plataforma, la cual no ha

¹⁶ **Laser, ICC & Law, KJ.**, “*The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles*”, USA-University of Michigan, 1998.

podido ser filtrada debido a que se mezcla con la información directamente relacionada con los cambios topográficos por la presencia de curvas horizontales.

En la figura 4.10 se muestra la representación de un gráfico PSD (*Power Spectral Density*), en la que se visualizan las longitudes de onda que delinean el perfil de un terreno, en este caso, el gráfico ha sido formado con datos que han recibido el tratamiento de los filtros *low pass* y *high pass*, por esta razón es que no se encuentran longitudes de onda menores a 25 centímetros ni mayores a 30 metros.

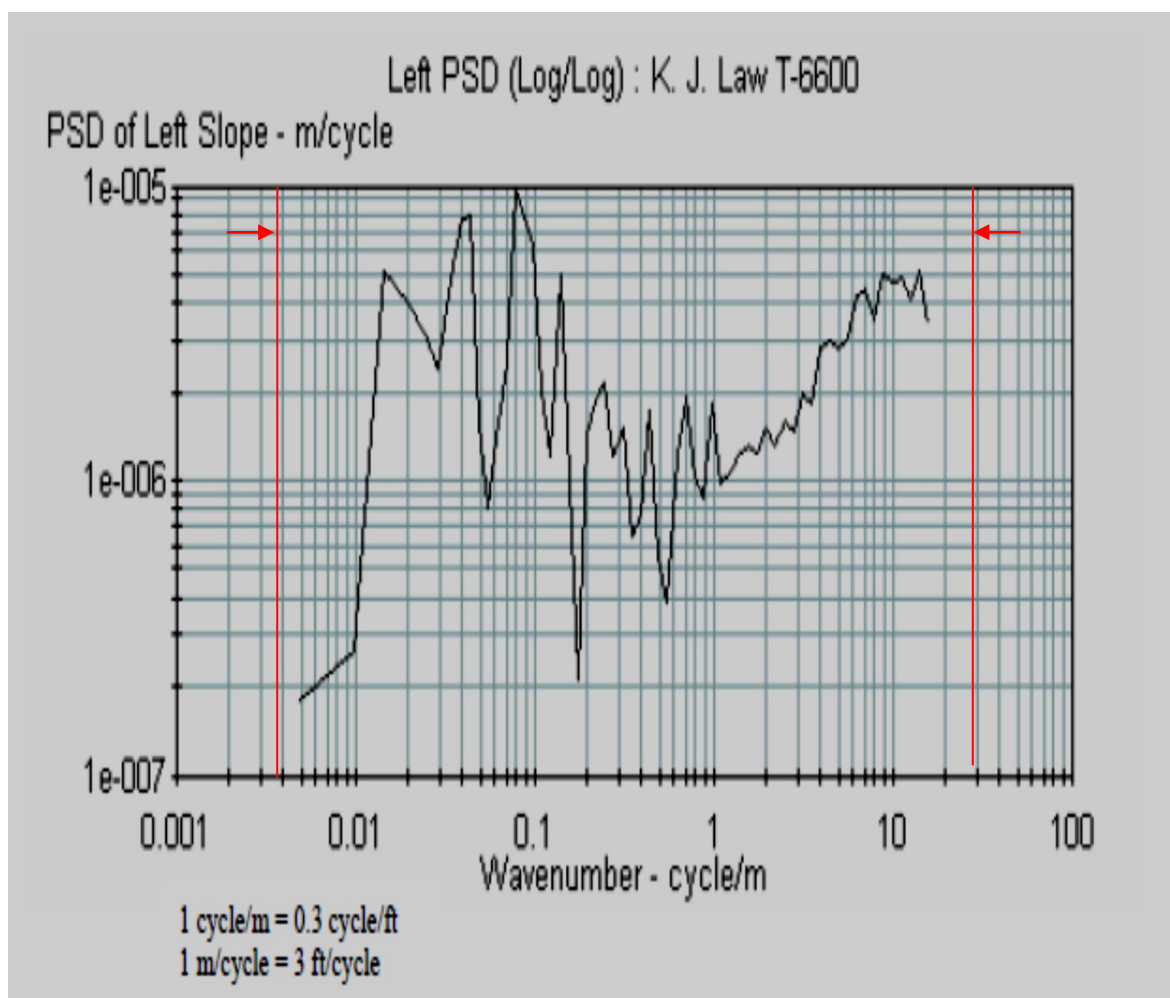


Figura 4.10 Ejemplo de un gráfico de PSD¹⁷

Sin embargo, la figura 4.11 muestra el gráfico PSD de la huella externa de carril derecho del Km 28+000 al Km 29+000 del tramo Nazca – Puquio, la cual fue elaborada con base en los datos de los perfiles de las huellas de circulación que fue entregada por el área de topografía de la obra; en ella se puede apreciar el efecto del *low pass* el cual elimina las longitudes de onda menores a 25 centímetros. Sin embargo se puede verificar la presencia de longitudes de onda mayores a 30 metros, las cuales contienen

¹⁷ **Laser, ICC y Law, K.J.**, “The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles” USA-University of Michigan, 1988.

parte de la contaminación de las longitudes de onda propias de las irregularidades de la vía existente, teniendo la otra parte presencia en las longitudes de onda mayores a 2 metros y menores a 30 metros.

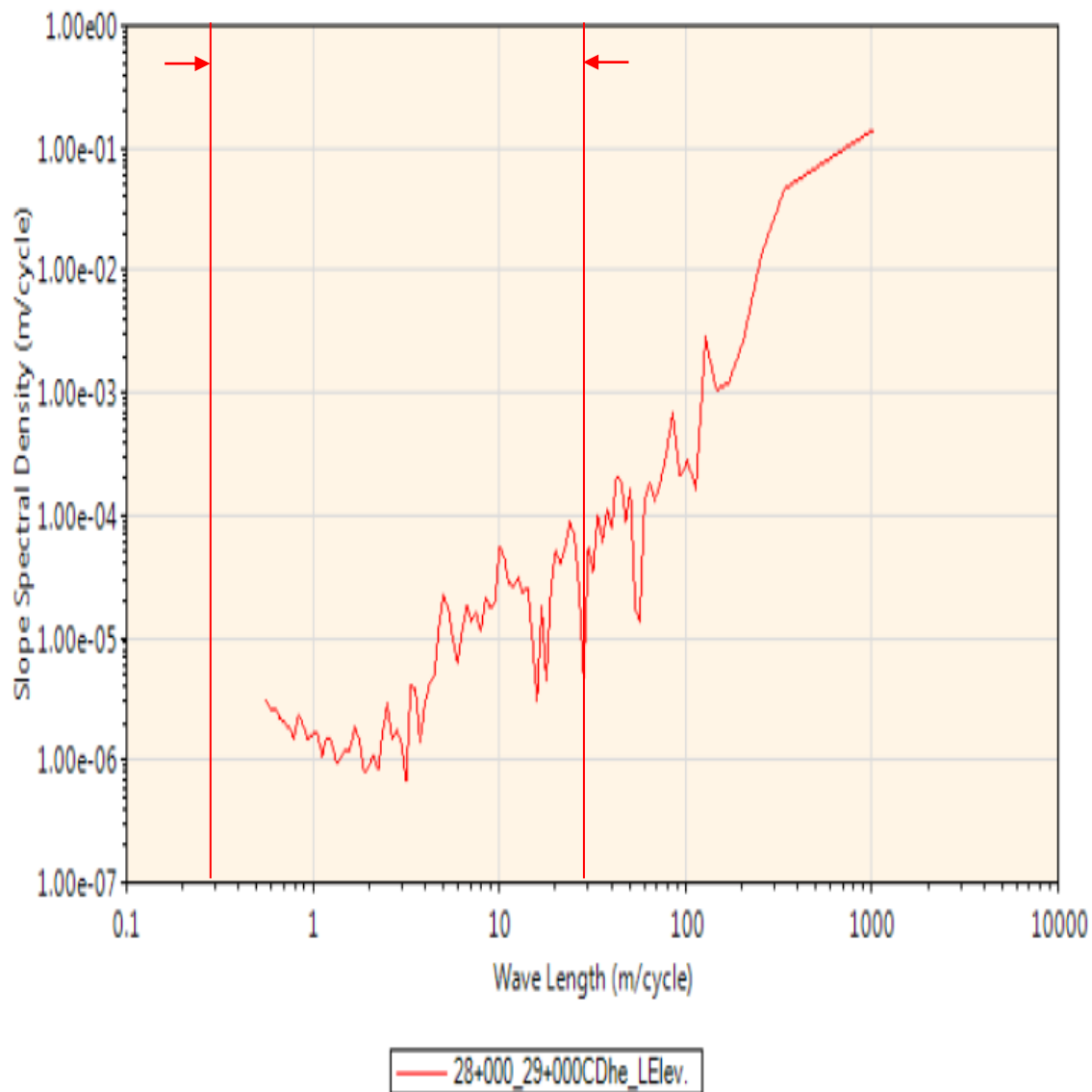


Figura 4.11 Grafico PSD de la huella externa de carril derecho del Km 28+000 al Km 29+000 del tramo Nazca – Puquio.

Por esta razón se ratifica la existencia de un cuantioso margen de error, el cual tendrá una fuerte incidencia en el grado de correlación al momento de realizar el análisis bidimensional.

Con la finalidad de aminorar el margen de error del valor representativo de IRI por kilómetro se tomó en consideración la ejecución de la siguiente propuesta:

- Si se considerara agrupar los 200 valores de IRI calculados en intervalos de 20 metros calculados en un kilómetro y se proyectara una curva de distribución, es

lógico suponer que el error no estará orientado a ambas colas, sino hacia la cola de los resultados mayores, puesto que mayores irregularidades provocarían resultados de IRI más altos. Entonces, estadísticamente se puede suponer que el 10% de los datos mayores forman parte del margen de error.

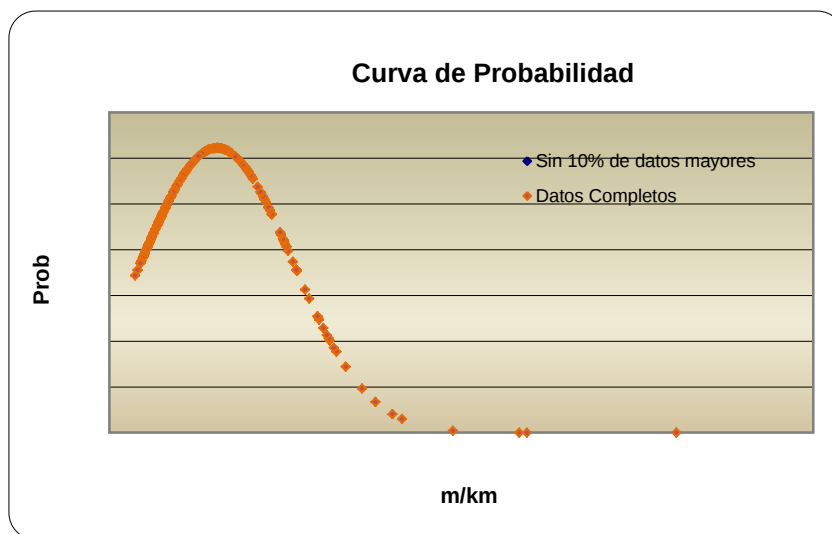


Figura 4.12 Curva de distribución de los 200 valores de $IRI_{20\text{ mts}}$ del Km 159+000 al Km 160+000 del tramo Puquio – desviación Pampachiri.

- Si se eliminara la cola mayor, la cual está conformada por el 10% de los datos mayores, puede suponerse que la curva de distribución será mas representativa y por lo tanto, el promedio de las mismas representará mejor el valor de IRI de diseño del kilometro en mención.

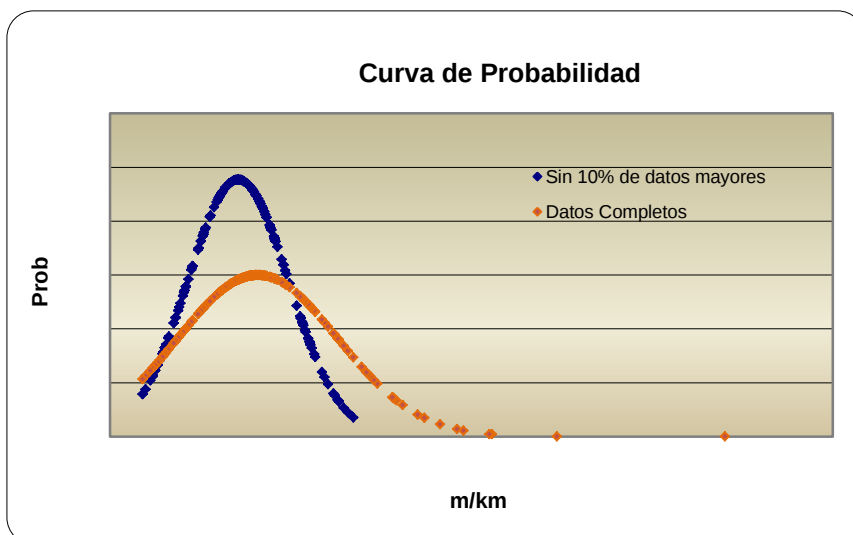


Figura 4.13 curvas de distribución de los datos con error y sin error de $IRI_{20\text{ mts}}$ del Km 159+000 al Km 160+000 del tramo Puquio – desviación Pampachiri.

En la figura 4.13 se puede apreciar una mejor distribución de los datos, y lo que se obtiene a partir de eliminar el margen de error representado por el 10% de los datos mayores es reducir el valor de la desviación estándar y aumentar la probabilidad de que

el valor promedio sea más representativo. Esto se puede verificar en la cuadro 4.4, donde se observa dentro de los resultados estadísticos la mejora de los datos después de eliminar el 10% de los datos. Este proceso se realizó para 94 kilómetros que serán datos para el análisis bidimensional.

Cuadro 4.4 Comparativo de la caracterización del valor de rugosidad por kilómetro.

DATOS COMPLETOS	SIN 10% DE DATOS MAYORES
Desv. Est. 1.33	Desv. Est. 0.84
Prom. 2.45	Prom. 2.13

Al respecto, los resultados del cálculo del valor de rugosidad para los 94 kilómetros evaluados son presentados en el Anexo de la presente tesis.

4.6 Inventario de los valores de geometría

La geometría de una carretera se define normalmente por los valores de los parámetros que se necesitan para llevar a cabo la construcción. Específicamente son:

- Peralte
- Curvatura horizontal
- Curvatura vertical
- Pendiente longitudinal

Según lo analizado en el capítulo 3, el parámetro que influye más en el valor del IRI es la curvatura horizontal.

La curvatura horizontal se puede obtener de dos maneras: mediante un compás eléctrico y también mediante la relación entre la velocidad angular alrededor del eje vertical y la velocidad del vehículo. La curvatura horizontal es expresada en grados por kilómetro ($^{\circ}/\text{km}$).¹⁸

¹⁸ **Ramón Crespo del Río,** "Medida de la geometría de la carretera.", España –Madrid, 1999.

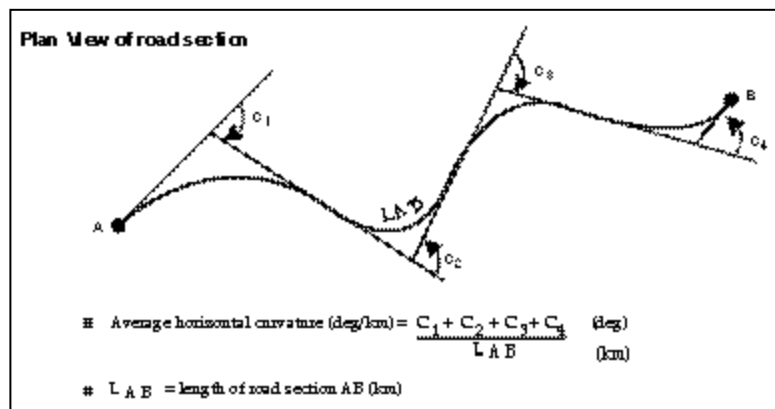


Figura 4.14: Esquema descriptivo de las consideraciones para el cálculo de la curvatura horizontal.

La recolección de los datos de curvatura horizontal fue realizada en el año 2004 como parte del servicio de inventario, valorización y Monumentación de la red vial nacional asfaltada ejecutada por la consultora *TNM Limited* como parte de los alcances para la alimentación del Inventario vial calificado, cuyo inventario fue ejecutado en aproximadamente 9,000 kilómetros de vía. En ese sentido, la información aprovechada fue medida a través de un giroscopio acoplado en el *bumper* del perfilómetro láser. En la figura 4.14 se aprecia que la información asociada a las curvas de la vía se encuentra en la columna que describe el grado de curvatura horizontal de la vía.

Cuadro 4.5: Inventario vial calificado de la geometría de la ruta 026A de la red vial asfaltada.

**SIC -07 GEOMETRÍA DATOS HDM
RUTA 026A**

CARRETERA	CALZADA	INICIO	FIN	PENDIENTE (m/km)	CURVATURA (°/km)	FECHA
		CÓDIGO PR	CODIGO PR			
026A	CD	0+000	1+000	12.8	-79.8	17/10/2004
026A	CD	1+000	2+000	14.8	-37.1	17/10/2004
026A	CD	2+000	3+000	13.9	-13.7	17/10/2004
026A	CD	3+000	4+000	40.6	52.4	17/10/2004
026A	CD	4+000	5+000	15.9	-.3	17/10/2004
026A	CD	5+000	6+000	21.0	-25.0	17/10/2004
026A	CD	6+000	7+000	17.7	-23.7	17/10/2004
026A	CD	7+000	8+000	26.6	17.1	17/10/2004
026A	CD	8+000	9+000	36.6	23.2	17/10/2004
026A	CD	9+000	10+000	13.9	-57.1	17/10/2004
026A	CD	10+000	11+000	32.0	17.9	17/10/2004
026A	CD	11+000	12+000	34.0	-.4	17/10/2004
026A	CD	12+000	13+000	42.5	-1.4	17/10/2004

		INICIO	FIN			
CARRETERA	CALZADA	CÓDIGO PR	CODIGO PR	PENDIENTE (m/km)	CURVATURA (°/km)	FECHA
026A	CD	13+000	14+000	34.4	71.2	17/10/2004
026A	CD	14+000	15+000	51.4	41.2	17/10/2004
026A	CD	15+000	16+000	41.1	2.0	17/10/2004
026A	CD	16+000	17+000	48.1	-76.4	17/10/2004
026A	CD	17+000	18+000	54.1	40.5	17/10/2004
026A	CD	18+000	19+000	54.0	192.0	17/10/2004
026A	CD	19+000	20+000	47.1	-285.6	17/10/2004
026A	CD	20+000	21+000	45.2	159.0	17/10/2004
026A	CD	21+000	22+000	49.1	-24.3	17/10/2004
026A	CD	22+000	23+000	37.0	-15.3	17/10/2004

4.7 Análisis bidimensional IRI de diseño vs. curvatura horizontal.

Para realizar el análisis bidimensional, fue necesario considerar como datos de entrada a los valores de curvatura horizontal, las que a partir de su correlación, nos indicará el valor estimado de IRI de diseño que correspondería al tramo analizado.

En el cuadro 4.6 se recogen los resultados obtenidos del IRI de diseño en los 94 kilómetros analizados, los cuales serán comparados con los valores de curvatura horizontal.

Cuadro 4.6: Cuadro resumen de los parámetros IRI de diseño y curvatura horizontal.

N°	RUTA	Inicio	Fin	IRI Diseño (m/km)	CURVATURA (°/km)
1	026	0+000	1+000	0.64	79.8
2	026	1+000	2+000	0.48	37.1
3	026	27+000	28+000	0.98	52.4
4	026	28+000	29+000	1.39	0.3
5	026	29+000	30+000	1.16	25.0
6	026	30+000	31+000	1.23	23.7
7	026	38+000	39+000	1.05	23.2
8	026A	158+000	159+000	2.35	35.8
9	026A	159+000	160+000	2.13	162.6
10	026A	160+000	161+000	2.28	255.0
11	026A	161+000	162+000	3.22	6.2
12	026A	162+000	163+000	2.52	118.8
13	026A	163+000	164+000	2.04	68.4
14	026A	164+000	165+000	2.45	2.6
15	026A	165+000	166+000	1.53	40.1

N°	RUTA	Inicio	Fin	IRI Diseño (m/km)	CURVATURA (°/km)
16	026A	166+000	167+000	2.29	4.2
17	026A	167+000	168+000	1.67	25.4
18	026A	168+000	169+000	2.37	110.7
19	026A	169+000	170+000	2.12	112.9
20	026A	170+000	171+000	1.36	42.9
21	026A	171+000	172+000	1.67	23.3
22	026A	172+000	173+000	1.63	159.2
23	026A	173+000	174+000	1.16	65.0
24	026A	174+000	175+000	1.54	72.5
25	026A	175+000	176+000	1.81	98.4
26	026A	176+000	177+000	1.95	35.1
27	026A	177+000	178+000	1.40	1.2
28	026A	178+000	179+000	0.95	19.8
29	026A	179+000	180+000	1.50	11.0
30	026A	180+000	181+000	1.06	125.7
31	026A	181+000	182+000	1.68	206.1
32	026A	182+000	183+000	1.96	119.3
33	026A	183+000	184+000	1.76	51.0
34	026A	184+000	185+000	1.36	125.3
35	026A	185+000	186+000	1.67	106.2
36	026A	186+000	187+000	1.81	21.5
37	026A	187+000	188+000	1.59	73.4
38	026A	188+000	189+000	1.64	155.8
39	026A	189+000	190+000	1.98	170.4
40	026A	190+000	191+000	1.91	100.9
41	026A	191+000	192+000	1.08	.6
42	026A	192+000	193+000	1.68	150.8
43	026A	193+000	194+000	1.31	46.2
44	026A	194+000	195+000	1.29	126.9
45	026A	195+000	196+000	1.32	11.5
46	026A	196+000	197+000	1.37	162.5
47	026A	197+000	198+000	1.13	7.0
48	026A	198+000	199+000	1.78	87.5
49	026A	199+000	200+000	1.54	99.7
50	026A	200+000	201+000	1.03	77.8
51	026A	201+000	202+000	0.80	20.4
52	026A	202+000	203+000	0.89	9.2
53	026A	203+000	204+000	0.89	14.3
54	026A	204+000	205+000	0.77	18.2
55	026A	205+000	206+000	0.92	69.4

Nº	RUTA	Inicio	Fin	IRI Diseño (m/km)	CURVATURA (°/km)
56	026A	206+000	207+000	1.01	18.8
57	026A	207+000	208+000	1.35	12.2
58	026A	208+000	209+000	.79	49.1
59	026A	209+000	210+000	.80	1.3
60	026A	210+000	211+000	.78	0.5
61	026A	211+000	212+000	.85	0.2
62	026A	212+000	213+000	.86	0.1
63	026A	213+000	214+000	.89	22.6
64	026A	214+000	215+000	1.21	23.5
65	026A	215+000	216+000	0.71	24.5
66	026A	216+000	217+000	0.84	13.3
67	026A	217+000	218+000	1.18	122.8
68	026A	218+000	219+000	1.08	84.5
69	026A	219+000	220+000	0.95	66.4
70	026A	220+000	221+000	0.94	64.6
71	026A	221+000	222+000	0.99	30.0
72	026A	222+000	223+000	1.16	118.0
73	026A	223+000	224+000	1.32	109.0
74	026A	224+000	225+000	0.92	69.9
75	026A	225+000	226+000	0.94	19.8
76	026A	226+000	227+000	1.25	54.6
77	026A	227+000	228+000	1.03	23.7
78	026A	228+000	229+000	0.92	41.6
79	026A	229+000	230+000	1.32	2.1
80	026A	230+000	231+000	1.20	87.9
81	026A	231+000	232+000	1.05	67.8
82	026A	232+000	233+000	1.04	140.1
83	026A	233+000	234+000	1.06	156.2
84	026A	234+000	235+000	0.74	25.5
85	026A	235+000	236+000	0.73	0.7
86	026A	236+000	237+000	0.83	18.1
87	026A	237+000	238+000	0.89	1.7
88	026A	238+000	239+000	0.93	2.2
89	026A	239+000	240+000	0.90	0.6
90	026A	240+000	241+000	0.88	16.5
91	026A	241+000	242+000	0.64	0.2
92	026A	242+000	243+000	0.75	0.9
93	026A	243+000	244+000	0.67	9.5
94	026A	244+000	245+000	0.71	1.8

El análisis bidimensional se utilizó para relacionar las variables de curvatura horizontal con los valores estimados de IRI de diseño correspondientes a cada kilómetro evaluado. Luego de analizar la serie de datos y cuantificar su ecuación mediante regresión lineal, se confirmó la tendencia que tienen los valores de IRI de diseño a ser mayores en función del valor acumulado de curvatura horizontal.

Del análisis de los resultados se concluye que entre la línea de tendencia y la dispersión de los datos existe una alta línea de convergencia; sin embargo el grado de correlación alcanzado no permitiría tener una buena precisión del valor de IRI de diseño estimado a partir de su ecuación. Cabe resaltar que en estos casos de estudios, una alta correlación no significa siempre una alta precisión ya que puede aún tener una línea de convergencia significativa.

Para mejorar el valor de correlación y visto el tamaño de la muestra con la que se ha elaborado el análisis bidimensional, se determinó eliminar del gráfico la serie de datos que corresponden al ítem 11 (Km 161+000 – Km 162+000). En la figura 4.15 se aprecia en el plano cartesiano, los valores de curvatura horizontal vs IRI de diseño de los 94 kilómetros analizados inicialmente, así como su línea de tendencia, su ecuación y su grado de correlación; del mismo modo puede apreciarse el ítem 11, el cual es el valor más alejado de la línea de tendencia.

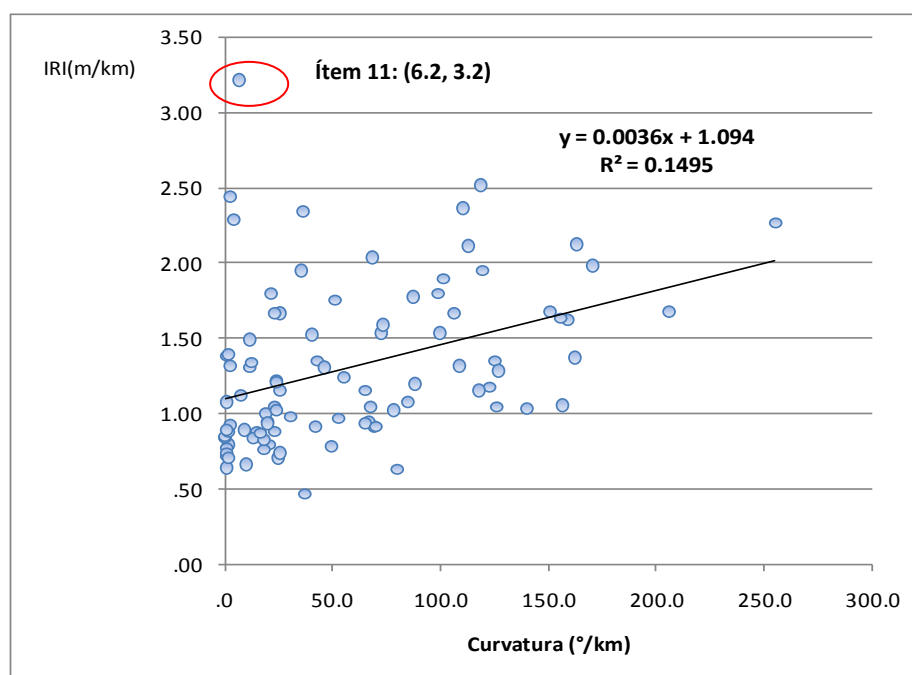


Figura 4.15 Valores de curvatura horizontal vs. IRI de diseño de los 94 kilómetros analizados.

4.8 Línea de tendencia y margen de error encontrado en el análisis bidimensional.

Una vez eliminado el ítem 11 de la serie de datos, se procedió a calcular la nueva línea de tendencia así como su grado de correlación. Respecto a este último, se tuvo una mejora considerable, obteniendo un valor de $R^2=0.21$ el cual se considera aceptable y que ratifica la hipótesis planteada.

Asimismo, se determinó la ecuación de la línea de tendencia, la cual es la presentada a continuación:

$$Y = 0.004X + 1.0498$$

Uno de los puntos observables de la línea de tendencia obtenida es que el coeficiente “1.0498” no se ajusta a la lógica de la relación teórica de ambas variables, puesto que el valor de IRI por influencia geométrica debiera de ser cero cuando el valor de curvatura acumulada lo sea. Es decir, la ecuación de la línea de tendencia debiera solo considerar un solo coeficiente tal cual lo indica la ecuación teórica mostrada a continuación:

$$Y = a \cdot X$$

Donde:

Y	:	IRI de diseño estimado
a	:	Coefficiente de ajuste de la línea de tendencia
X	:	Grado de curvatura horizontal

La razón de la alta línea de convergencia encontrada tiene que ver con la filtración de los datos que recrean la superficie de la vía existente, los cuales deben de estar en el rango de longitudes de onda entre 2 a 30 metros que no pudieron ser eliminados por haberse mezclado con la data requerida para el cálculo del IRI.

Sin embargo, considero que la línea de tendencia si es válida, sino que ha sido trasladada en el eje de las ordenadas cortando con el valor $y = 1.0498$. Como solución se deberá anular este coeficiente dentro de la ecuación, trasladando de esta forma la ecuación al punto de origen y así cumplir con las hipótesis planteadas en los capítulos anteriores.

En la Figura 4.16 se aprecia la gráfica definitiva del análisis bidimensional, en donde se ha identificado el área comprendida por el margen de error inducido por los datos de IRI de diseño, los que a su vez fueron contaminados por las longitudes de onda entre 2 y 30 metros que recrearon las irregularidades de la superficie existente de la vía.

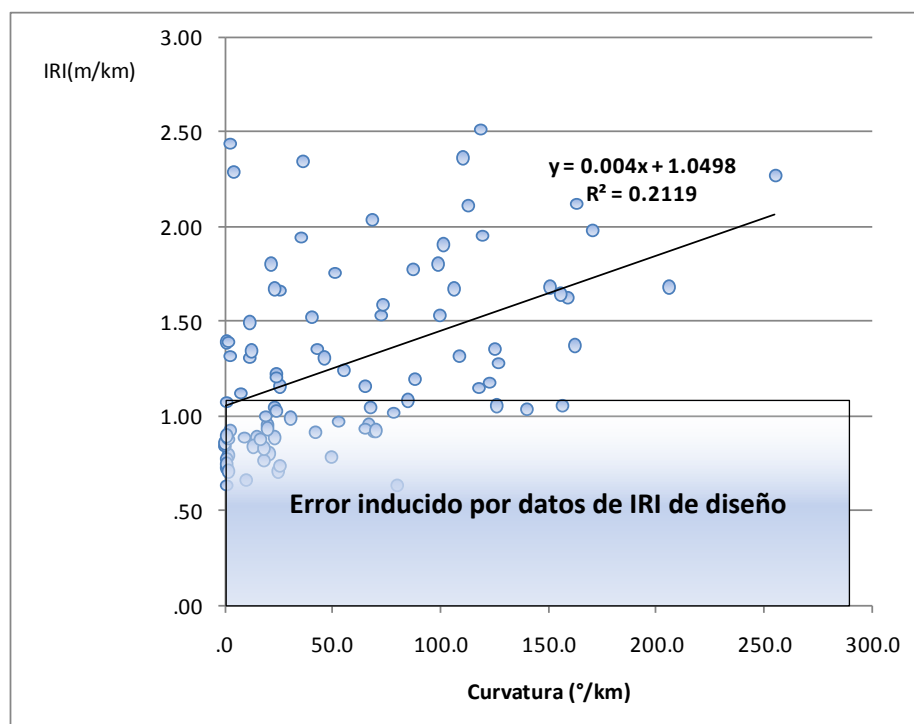


Figura 4.16: Análisis bidimensional definitivo de los valores de curvatura horizontal vs. IRI de diseño de los 93 kilómetros analizados.

En conclusión, la línea de tendencia que representa la relación entre el grado de curvatura horizontal y el IRI de diseño queda definida por la siguiente ecuación:

$$Y = 0.004.X$$

Donde:

Y	:	IRI de diseño estimado (m/km)
0.004	:	coeficiente de relación entre variables
X	:	Grado de curvatura horizontal (°/km)

4.9 Mecanismo para la determinación de la tolerancia en el umbral de control de la rugosidad media deslizante.

A continuación se describe el procedimiento propuesto para determinar la tolerancia en el control de la rugosidad media deslizante en los contratos de concesión; el cual sería aplicado al umbral admisible como un valor porcentual dentro del cuadro de control de parámetros y serviciabilidad o niveles de servicio de forma similar a como han sido asignados en algunos de los contratos de concesión vigentes mencionados anteriormente (ver cuadro 1.5). Cabe señalar que el alcance de dicha tolerancia se aplica básicamente a los umbrales indicados **a las obras de puesta a punto**, en donde las exigencias son mayores:

1. De la base de datos del inventario vial calificado del sistema de gestión de carreteras de PROVÍAS NACIONAL, extraer los valores de curvatura horizontal correspondientes a los tramos que se desee determinar. En caso que estos tramos hayan recibido alguna modificación de su trazo geométrico, habrá que recalculas el valor de curvatura horizontal en el kilómetro intervenido. Cabe resaltar que los valores de curvatura horizontal deberán estar calculados en un intervalo de un kilómetro.
2. Una vez identificados los valores de curvatura horizontal para cada kilómetro, utilizar la ecuación que relaciona el grado de curvatura con el IRI de diseño.
3. El IRI de diseño que sea afectado por un grado de curvatura, será representado por un valor mayor a cero, el cual deberá ser sumado al efecto de trabajo del tipo de intervención propuesto. Así se tendrá:

$$a \approx b + c$$

Donde:

IRI a obtenerse	:	a
IRI de diseño	:	b
Efecto de trabajo	:	c

Por ejemplo, un refuerzo de 7.5 cm tiene un efecto de trabajo de 2.05 m/km en zonas con un IRI de 3.0 m/km antes de la intervención.

Al respecto, se sugiere utilizar la siguiente ecuación, la cual fue extraída del Volumen 5 del manual de usuario del HDM-4:

$$IRI_{aw} = a0 + a1 * MAX [0, (IRI_{ap} - a0)] * MAX [0, (a2 - HSNEW_{aw})]$$

a0:	2	por defecto
a1:	0.01	por defecto
a2:	80	por defecto

IRI_{aw} IRI despues de los trabajos
 IRI_{ap} IRI antes de los trabajos
 HSNEW_{aw} espesor del refuerzo especificado por el usuario (mm)

4. Ese “IRI a obtenerse”, deberá de ser comparado con el umbral admisible indicado en el contrato de concesión; dentro de la comparación se deberá contar la cantidad de valores “IRI a obtenerse” que exceden o incumplen con el umbral admisible. Este

valor deberá compararse con el total de kilómetros evaluados, con lo cual se deberá obtener un porcentaje de incumplimiento. Es decir:

$$a (\%) = b / c$$

Donde:

a : porcentaje de incumplimiento
b : N° de valores que incumplen con el umbral admisible
c : total de kilómetros evaluados

5. Este porcentaje de incumplimiento está relacionado a la cantidad de kilómetros donde se podría incumplir debido a la influencia de la geometría en el cálculo del IRI. En ese sentido, se podría sugerir su implementación dentro del control de la rugosidad como una tolerancia debido a un hecho no previsto dentro de las consideraciones técnicas.

En ese sentido, con base en dicho procedimiento podríamos proceder a completar las celdas resaltadas en amarillo con lo cual todos los contratos de las concesiones señaladas podrían poseer similares condiciones a diferencia de lo indicado en el Cuadro N° 1.5.

CONCESIÓN	Año	Metodología	IRI		
			Obras Nuevas	Operación	Tolerancia
Arequipa - Matarani	1994	IRI promedio	2.0	2.0	
Red Vial N° 5	2003	IRI promedio	3.5	3.5	
Red Vial N° 6	2005	IRI promedio	2.0	3.0	20% y 15%
IIRSA norte, IIRSA sur, tramos 2,3 y 4	2006	IRI Media deslizante	2.5 / 3.5	3.5 / 4.0	20% y 15%
IIRSA sur tramos 1 y 5	2007	IRI Media deslizante	2.0 / 2.5	3.5 / 4.0	
Buenos Aires - Canchaque	2007	IRI Media deslizante	2.5 / 3.0	3.5 / 4.0	
Autopista del Sol	2009	IRI Media deslizante	2.0	3.5	
IIRSA centro T-2	2010	IRI Media deslizante	2.0	3.5	

Capítulo 5

Ejemplo de otras aplicaciones del factor de la tolerancia en el control de la rugosidad media deslizante

5.1 Amenazas en el cumplimiento de los parámetros establecidos en una propuesta ofrecida para la licitación del Tramo 2 IIRSA centro.

El 31 de octubre de 2009 se convocó al concurso de proyectos integrales para la concesión del tramo 2 IIRSA centro, publicándose las bases en la página web de PROINVERSIÓN; de esta forma se inició el proceso de licitación cuyo objeto es transferir la potestad de prestar el servicio a favor de los usuarios, para lo cual se le concede el aprovechamiento económico de los bienes de la concesión durante 25 años. Para tal fin, el ganador de la buena pro deberá cumplir con los parámetros, niveles, capacidad y otros asociados a la inversión, así como con los Índices de serviciabilidad previstos dentro de los términos de referencia; para lo cual el contrato de concesión para esta licitación responde a un esquema BOT (*build, operate and transfer*), es decir que la infraestructura que forma parte de los tramos en licitación en todo momento mantienen su condición pública.

Dentro de las obligaciones impuestas en la licitación del Tramo 2 de la IIRSA centro, es la ejecución de las Obras de puesta a punto, para lo cual deberá elaborar un estudio definitivo de ingeniería que considere la oferta con la que se adjudique la buena pro.

En ese sentido, los licitantes debieron considerar que las obras ofertadas para la puesta a punto deberán asegurar el cumplimiento de los índices de serviciabilidad exigidos dentro del anexo 1 de los términos de referencia; es decir, que posterior a la ejecución de las obras de puesta a punto, será exigido el cumplimiento de los índices de serviciabilidad mencionados y el incumplimiento de los mismos conllevarán a sanciones que puedan en algún caso llegar a la resolución del contrato.

Con estas consideraciones, se preparó la propuesta técnica, para lo cual se debió conocer el estado de la vía a partir de éstas evaluar las soluciones más idóneas a considerar como propuesta.

Luego de la evaluación técnica realizada, las soluciones que se ajustaron a las exigencias dadas por los términos de referencia son los siguientes:

- Tramo puente Ricardo Palma – La Oroya: 1.5 pulgadas de carpeta asfáltica

- Tramo La Oroya – Huancayo: 3.0 pulgadas de carpeta asfáltica
- Tramo La Oroya – desviación Cerro de Pasco: 3.0 pulgadas de carpeta asfáltica

Al respecto, las soluciones fueron contempladas considerando la necesidad estructural de la vía, y que con una buena ejecución de la colocación de la carpeta asfáltica, lleguen a disminuirse los valores existentes encontrados de IRI por debajo de los permisibles en los términos de referencia.

Al respecto, el nivel de servicio solicitado dentro de los términos de referencia para la rugosidad es la siguiente:

Rugosidad para la recepción de obra nueva o intervenciones de cambio de carpeta asfáltica	Rugosidad media móvil máxima, con un intervalo de 100 m.	2.00 IRI
---	--	----------

Sobre esta metodología de medición, el obtenerse la rugosidad media móvil a partir del promedio de 5 valores de IRI individuales de 200 metros consecutivos, la convierte en una metodología mucho más susceptible a manifestar los valores picos que puedan haberse obtenido en una muestra individual de 200 metros, pudiendo sobrepasar con facilidad los umbrales máximos permisibles. Por esta razón esta metodología de control es mucho más exigente que el IRI promedio, en la cual (tal como su nombre lo indica) se promedian todos los valores del tramo dando un solo valor absoluto como resultado y de esta forma se pueden disipar los valores picos que puedan obtenerse en los resultados de la medición.

Conocido en implementado este concepto, se procedió a tomar en consideración el efecto de trabajo de las obras propuestas respecto a la rugosidad, a la cual se le deberá adicionar la incidencia de la geometría de la vía en el valor de IRI de diseño. En ese sentido el tramo que podría complicar el cumplimiento de la rugosidad solicitada sería el tramo puente Ricardo Palma - La Oroya, puesto que este es el que presenta mayor densidad de curvas horizontales y por ende, mayor afectación al IRI de entrada.

Asimismo, es el tramo que recibirá menor espesor de carpeta asfáltica, por lo cual podría ser el tramo que reduzca en menor proporción los valores de rugosidad existentes respecto a los otros 2 tramos de la vía en licitación, pues el colocar un espesor menor de pavimento reduce las probabilidades de reducir los valores de rugosidad en mayor proporción.

Para realizar el cálculo del valor estimado de rugosidad a obtener en campo posterior al refuerzo con mezcla asfáltica se deberá considerar lo siguiente:

$$a \approx b + c$$

Donde:

IRI a obtenerse en campo : **a**

IRI de diseño : **b**
 Efecto de trabajo : **c**

En ese sentido, para obtener el efecto de trabajo de rugosidad con la alternativa propuesta, se ha considerado la siguiente ecuación:

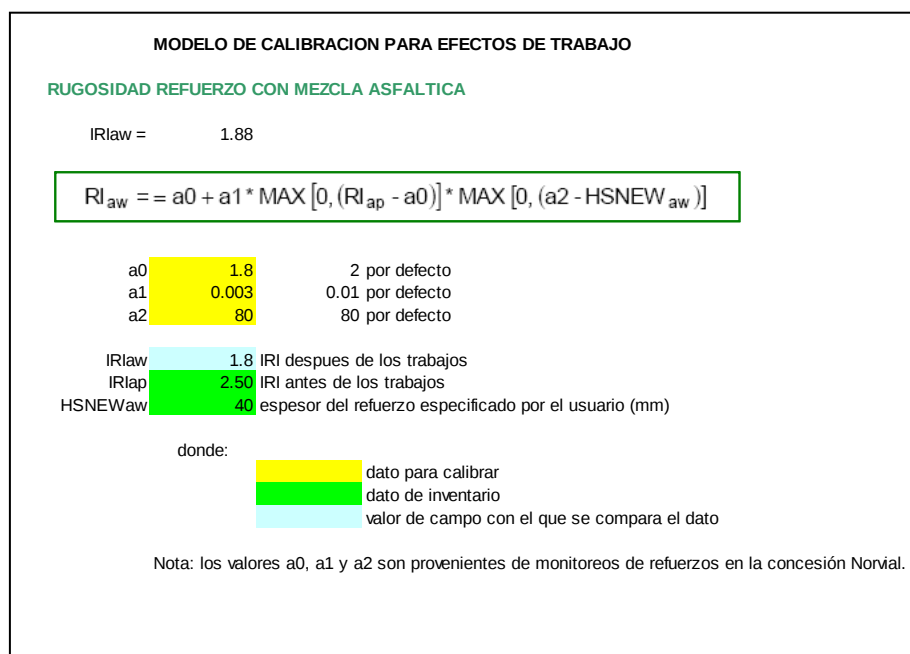


Figura 5.1: Cálculo del efecto de trabajo de rugosidad para un refuerzo asfáltico de 4.0 centímetros de espesor.

En la Figura 5.1 se muestra el cálculo empírico del efecto de trabajo para un refuerzo con carpeta asfáltica de 40 milímetros de espesor, la cual es una solución similar a la planteada en la propuesta para el tramo de puente Ricardo Palma – La Oroya; calculo con el que se estima que, con procedimientos constructivos conocidos y considerando un IRI en la vía existente promedio de 2.50 m/km, podemos obtener como mínimo estimado un valor IRI de 1.88 m/km. Esta ecuación de modelo de efecto de trabajo de rugosidad para refuerzo con mezcla asfáltica fue extraída de las ecuaciones del HDM-4, y calibrada a condiciones locales considerando monitoreos a los refuerzos realizados en la concesión NORVIAL.

Para el cálculo del IRI de diseño, se consideró utilizar la ecuación descrita en el Capítulo 4 de la presente tesis, para lo cual se utilizó como datos de entrada los valores de curvatura horizontal de la ruta 020 (denominada Ruta 022 desde el año 2009). Con este dato calculado, se estimó el valor de IRI a obtenerse en campo sumando los valores de efecto de trabajo al IRI de diseño correspondientes a cada kilómetro evaluado.

Dentro del cuadro 5.1 las dos últimas columnas consideran la comparación de los valores estimados de IRI a obtenerse en campo con el valor de umbral admisible requerido en los términos de referencia, del cual se puede concluir que de un total de

136 kilómetros evaluados, 40 valores se encuentran por encima del umbral admisible, siendo el saldo valores que se encuentran por debajo del umbral admisible determinado en 2 m/km.

Cuadro 5.1: Resumen comparativo de valores de IRI obtenido en relación al umbral admisible

Km Ini	Km Fin	Curvatura	IRI de diseño	Efecto de Trabajo	IRI obtenido	Umbral Admisible
		°/Km	m/km	m/km	m/km	m/km
38+000	39+000	14.4	0.06	1.88	1.9	2.0
39+000	40+000	34.2	0.14	1.88	2.0	2.0
40+000	41+000	9.2	0.04	1.88	1.9	2.0
41+000	42+000	14.8	0.06	1.88	1.9	2.0
42+000	43+000	28.8	0.12	1.88	2.0	2.0
43+000	44+000	11.3	0.05	1.88	1.9	2.0
44+000	45+000	14.2	0.06	1.88	1.9	2.0
45+000	46+000	6.9	0.03	1.88	1.9	2.0
46+000	47+000	48.7	0.19	1.88	2.1	2.0
47+000	48+000	59.8	0.24	1.88	2.1	2.0
48+000	49+000	45.6	0.18	1.88	2.1	2.0
49+000	50+000	27.2	0.11	1.88	2.0	2.0
50+000	51+000	70.1	0.28	1.88	2.2	2.0
51+000	52+000	10.4	0.04	1.88	1.9	2.0
52+000	53+000	29.3	0.12	1.88	2.0	2.0
53+000	54+000	7.4	0.03	1.88	1.9	2.0
54+000	55+000	85.4	0.34	1.88	2.2	2.0
55+000	56+000	58	0.23	1.88	2.1	2.0
56+000	57+000	26.4	0.11	1.88	2.0	2.0
57+000	58+000	80.5	0.32	1.88	2.2	2.0
58+000	59+000	11.3	0.05	1.88	1.9	2.0
59+000	60+000	44.6	0.18	1.88	2.1	2.0
60+000	61+000	27.5	0.11	1.88	2.0	2.0
61+000	62+000	1.5	0.01	1.88	1.9	2.0
62+000	63+000	51	0.20	1.88	2.1	2.0
63+000	64+000	28.6	0.11	1.88	2.0	2.0
64+000	65+000	154.3	0.62	1.88	2.5	2.0
65+000	66+000	278.1	1.11	1.88	3.0	2.0
66+000	67+000	99	0.40	1.88	2.3	2.0
67+000	68+000	26.6	0.11	1.88	2.0	2.0
68+000	69+000	16.6	0.07	1.88	1.9	2.0
69+000	70+000	25.2	0.10	1.88	2.0	2.0
70+000	71+000	33.8	0.14	1.88	2.0	2.0
71+000	72+000	20.6	0.08	1.88	2.0	2.0
72+000	73+000	39.9	0.16	1.88	2.0	2.0
73+000	74+000	50.5	0.20	1.88	2.1	2.0

Km Ini	Km Fin	Curvatura	IRI de diseño	Efecto de Trabajo	IRI obtenido	Umbral Admisible
		°/Km	m/km	m/km	m/km	m/km
74+000	75+000	19.1	0.08	1.88	2.0	2.0
75+000	76+000	16.9	0.07	1.88	1.9	2.0
76+000	77+000	16.2	0.06	1.88	1.9	2.0
77+000	78+000	3	0.01	1.88	1.9	2.0
78+000	79+000	3.8	0.02	1.88	1.9	2.0
79+000	80+000	51.1	0.20	1.88	2.1	2.0
80+000	81+000	133.9	0.54	1.88	2.4	2.0
81+000	82+000	87.6	0.35	1.88	2.2	2.0
82+000	83+000	40.4	0.16	1.88	2.0	2.0
83+000	84+000	10	0.04	1.88	1.9	2.0
84+000	85+000	158.4	0.63	1.88	2.5	2.0
85+000	86+000	101.7	0.41	1.88	2.3	2.0
86+000	87+000	4.1	0.02	1.88	1.9	2.0
87+000	88+000	12.9	0.05	1.88	1.9	2.0
88+000	89+000	40.8	0.16	1.88	2.0	2.0
89+000	90+000	34.4	0.14	1.88	2.0	2.0
90+000	91+000	140.7	0.56	1.88	2.4	2.0
91+000	92+000	116.2	0.46	1.88	2.3	2.0
92+000	93+000	31.5	0.13	1.88	2.0	2.0
93+000	94+000	39.1	0.16	1.88	2.0	2.0
94+000	95+000	36.5	0.15	1.88	2.0	2.0
95+000	96+000	2.8	0.01	1.88	1.9	2.0
96+000	97+000	14.7	0.06	1.88	1.9	2.0
97+000	98+000	23.2	0.09	1.88	2.0	2.0
98+000	99+000	0.1	0.00	1.88	1.9	2.0
99+000	100+000	35.8	0.14	1.88	2.0	2.0
100+000	101+000	16.1	0.06	1.88	1.9	2.0
101+000	102+000	162.1	0.65	1.88	2.5	2.0
102+000	103+000	41.2	0.16	1.88	2.0	2.0
103+000	104+000	28.3	0.11	1.88	2.0	2.0
104+000	105+000	146	0.58	1.88	2.5	2.0
105+000	106+000	115.4	0.46	1.88	2.3	2.0
106+000	107+000	15.6	0.06	1.88	1.9	2.0
107+000	108+000	54.9	0.22	1.88	2.1	2.0
108+000	109+000	10.2	0.04	1.88	1.9	2.0
109+000	110+000	56.2	0.22	1.88	2.1	2.0
110+000	111+000	47.3	0.19	1.88	2.1	2.0
111+000	112+000	9.5	0.04	1.88	1.9	2.0
112+000	113+000	13.6	0.05	1.88	1.9	2.0
113+000	114+000	57.2	0.23	1.88	2.1	2.0
114+000	115+000	3.7	0.01	1.88	1.9	2.0
115+000	116+000	18.6	0.07	1.88	2.0	2.0

Km Ini	Km Fin	Curvatura	IRI de diseño	Efecto de Trabajo	IRI obtenido	Umbral Admisible
		°/Km	m/km	m/km	m/km	m/km
116+000	117+000	0.6	0.00	1.88	1.9	2.0
117+000	118+000	70.3	0.28	1.88	2.2	2.0
118+000	119+000	72.9	0.29	1.88	2.2	2.0
119+000	120+000	145.8	0.58	1.88	2.5	2.0
120+000	121+000	101.9	0.41	1.88	2.3	2.0
121+000	122+000	22.8	0.09	1.88	2.0	2.0
122+000	123+000	29.3	0.12	1.88	2.0	2.0
123+000	124+000	4	0.02	1.88	1.9	2.0
124+000	125+000	30.4	0.12	1.88	2.0	2.0
125+000	126+000	28.4	0.11	1.88	2.0	2.0
126+000	127+000	41	0.16	1.88	2.0	2.0
127+000	128+000	54.7	0.22	1.88	2.1	2.0
128+000	129+000	60.8	0.24	1.88	2.1	2.0
129+000	130+000	36.3	0.15	1.88	2.0	2.0
130+000	131+000	63.9	0.26	1.88	2.1	2.0
131+000	132+000	115.1	0.46	1.88	2.3	2.0
132+000	133+000	63.8	0.26	1.88	2.1	2.0
133+000	134+000	7	0.03	1.88	1.9	2.0
134+000	135+000	26	0.10	1.88	2.0	2.0
135+000	136+000	79.8	0.32	1.88	2.2	2.0
136+000	137+000	84	0.34	1.88	2.2	2.0
137+000	138+000	20.7	0.08	1.88	2.0	2.0
138+000	139+000	46.7	0.19	1.88	2.1	2.0
139+000	140+000	10.3	0.04	1.88	1.9	2.0
140+000	141+000	13.8	0.06	1.88	1.9	2.0
141+000	142+000	53	0.21	1.88	2.1	2.0
142+000	143+000	26.3	0.11	1.88	2.0	2.0
143+000	144+000	31.1	0.12	1.88	2.0	2.0
144+000	145+000	36.7	0.15	1.88	2.0	2.0
145+000	146+000	14.8	0.06	1.88	1.9	2.0
146+000	147+000	13.8	0.06	1.88	1.9	2.0
147+000	148+000	6.5	0.03	1.88	1.9	2.0
148+000	149+000	51.2	0.20	1.88	2.1	2.0
149+000	150+000	17.2	0.07	1.88	1.9	2.0
150+000	151+000	25.9	0.10	1.88	2.0	2.0
151+000	152+000	22.5	0.09	1.88	2.0	2.0
152+000	153+000	3.2	0.01	1.88	1.9	2.0
153+000	154+000	4	0.02	1.88	1.9	2.0
154+000	155+000	29.1	0.12	1.88	2.0	2.0
155+000	156+000	4.7	0.02	1.88	1.9	2.0
156+000	157+000	2.4	0.01	1.88	1.9	2.0
157+000	158+000	38.7	0.15	1.88	2.0	2.0

Km Ini	Km Fin	Curvatura	IRI de diseño	Efecto de Trabajo	IRI obtenido	Umbral Admisible
		°/Km	m/km	m/km	m/km	m/km
158+000	159+000	42	0.17	1.88	2.0	2.0
159+000	160+000	19.2	0.08	1.88	2.0	2.0
160+000	161+000	2	0.01	1.88	1.9	2.0
161+000	162+000	18	0.07	1.88	2.0	2.0
162+000	163+000	25.6	0.10	1.88	2.0	2.0
163+000	164+000	44.8	0.18	1.88	2.1	2.0
164+000	165+000	6.8	0.03	1.88	1.9	2.0
165+000	166+000	41.3	0.17	1.88	2.0	2.0
166+000	167+000	34.1	0.14	1.88	2.0	2.0
167+000	168+000	5.7	0.02	1.88	1.9	2.0
168+000	169+000	38.4	0.15	1.88	2.0	2.0
169+000	170+000	66	0.26	1.88	2.1	2.0
170+000	171+000	27.5	0.11	1.88	2.0	2.0
171+000	172+000	48.9	0.20	1.88	2.1	2.0
172+000	173+000	7.6	0.03	1.88	1.9	2.0
173+000	174+000	12.8	0.05	1.88	1.9	2.0

Por lo tanto, para la solución de 1.5 pulgadas de refuerzo con mezcla asfáltica propuesta considerando el IRI existente en la vía antes de su intervención, hay una posibilidad de incumplir con alcanzar el valor de rugosidad al indicado como umbral admisible dentro de los términos de referencia. En ese sentido, se estima que para un 32% de los kilómetros conformantes del tramo puente Ricardo Palma – La Oroya llegaría a correrse un riesgo de incumplimiento.

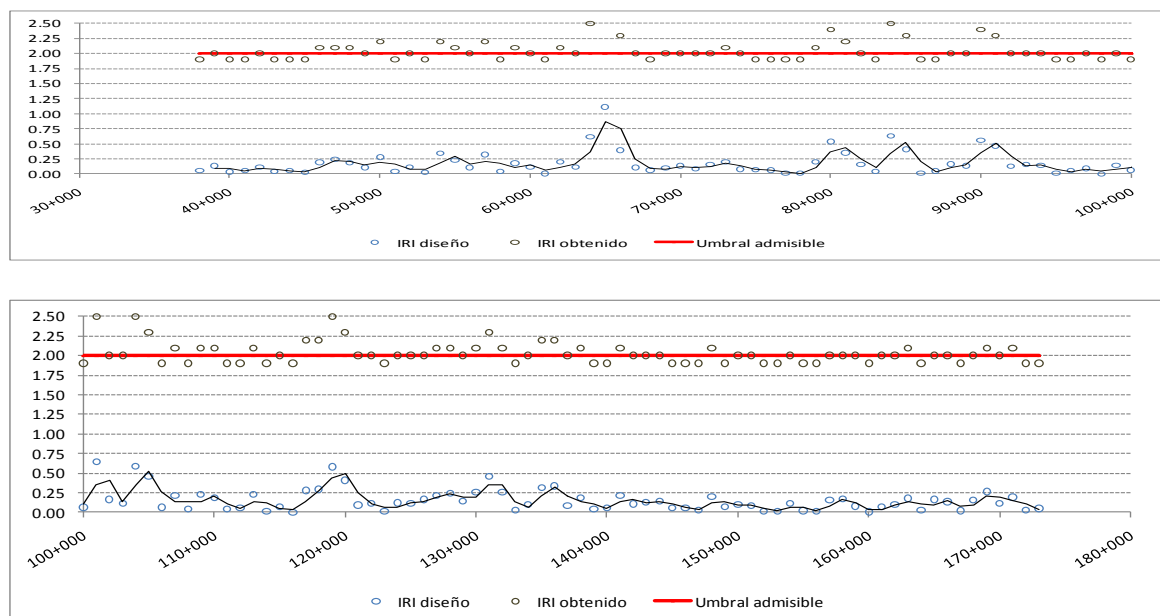


Figura 5.2 Reporte de kilómetros analizados en el tramo puente Ricardo Palma-La Oroya

En la figura 5.2 se pueden identificar los kilómetros que pudieran verse afectados por el incumplimiento del parámetro de rugosidad, el cual tendría una implicancia considerable dentro de la aceptación de la obra.

Con base en dicha identificación, se pueden plantear distintas acciones a tomar, entre las cuales se puede mencionar el aumentar el espesor en los kilómetros con posibilidad de incumplimiento (lo cual podría generar aumentar los costos de la propuesta) o solicitar la inclusión de una tolerancia, para lo cual se podría proponer un coeficiente que puede ser el calculado así como solicitar la modificación del umbral en el tramo puente Ricardo Palma – La Oroya.

Conclusiones y recomendaciones

- La presente tesis relata el análisis del IRI en un proyecto, a partir del cual se propone un mecanismo para la determinación de tolerancias en el control de la rugosidad media deslizante establecido en el contrato de las concesiones viales, aprovechando la información disponible reportada de campo durante la ejecución de una rehabilitación de carretera.
- En ese sentido, queda establecido que según lo analizado en la presente tesis, para las vías de penetración de nuestro país, el parámetro que influye más en el valor del IRI es la curvatura horizontal; debido a que en esta hay cuatro cambios de pendiente claramente identificables a comparación de la curva vertical, en la que hay solamente 3 cambios. Asimismo, la cantidad de curvas horizontales, las cuales están en mucha mayor frecuencia que las curvas verticales.
- Luego del análisis del grado de relación entre el valor de IRI de Diseño y el grado de curvatura se puede concluir que existe una tendencia entre ambas variables. Sin embargo se puede concluir que en caso se requiera mayor grado de relación, es necesario invertir para generar planos de los diseños de las vías que puedan proveer de valores reales de diseño, lo cual no se logró con la presente tesis, la cual partió de un modelo digital de terreno obtenido de un levantamiento topográfico de la superficie de una vía existente.
- En el marco de los contratos de concesión, dicha ecuación obtenida que relaciona el grado de curvatura con el IRI de diseño puede ser aplicable como es el caso aplicado al umbral admisible como un valor porcentual dentro del cuadro de control de parámetros y serviciabilidad o niveles de servicio de forma similar a como han sido asignados en algunos de los contratos de concesión vigentes mencionados anteriormente (ver cuadro 1.5)

Asimismo, se analizó y verificó la nula posibilidad en que la implementación de estas tolerancias pueda afectar el equilibrio económico dentro del marco del contrato de concesión. De esta forma, tanto el concesionario como los usuarios no se verán afectados debido a que según lo analizado, no se generarán ni beneficios y costos para ninguno de los involucrados.

- Dentro del marco de los controles de recepción de las obras, como en otros países esta metodología se puede aplicar para promover la importación de mejores procedimientos constructivos que faciliten mejores resultados de IRI, recompensando al constructor por obtener resultados por debajo del control receptivo, y penalizando

a este último en caso obtengan resultados por encima del valor de control receptivo. En tal sentido, la inversión que las entidades públicas y privadas puedan realizar para obtener un verdadero perfil de diseño aunado a la metodología de cálculo de la línea de tendencia es vital para conocer la verdadera tendencia del valor de IRI de diseño en relación al grado de curvatura horizontal de las vías de penetración. Para este caso es importante identificar los valores de rugosidad asociados a la influencia de la geometría con el fin de reconocer los valores asociados directamente a la calidad constructiva y evitar penalizaciones por causas no imputables a los constructores.

Asimismo, este mecanismo puede ser aplicado también para reconocer el efecto de la influencia de los aspectos asociados a la geometría del trazo o a las singularidades en la vía puede generar que los agentes involucrados en las obras (supervisor y constructor) asocien directamente el valor del resultado a la calidad constructiva de la intervención, corriendo el riesgo de volver a ejecutar nuevamente intervenciones con el fin de alcanzar el valor contractual requerido pensando que de esta forma pueda llegar a subsanarse la observación, generando así una doble inversión injustificada que inclusive pueda no llegar a reducir en algo el valor de rugosidad luego de la primera intervención.

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

Bibliografía

- **LASER, ICC & KJ LAW, KJ**, *“The Little Book of Profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles”*, University of Michigan.U.S.A., 1988
- **H. DE SOLMINIHAC, T.**, “Gestión de Infraestructura Vial”, Chile.
- **WIKIPEDIA**, en línea Internet. Accesible en www.es.wikipedia.org, 04 de febrero 2011.
- **WASHINGTON DEPARTMENT OF TRANSPORTATION**, En línea Internet, Accesible en www.wsdot.wa.gov., 01 de mayo 2005.
- **VENTURA J., ALVARENGA E**, “Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI.)”, San Salvador, El Salvador, 2005.
- **DEL ÁGUILA, P.**, “Experiencias y resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3,000 km. de pavimentos en el Perú y otros países”, Perú, 1999.
- **OBANDO, W**, Adaptación de la Ponencia: “Gestión de conservación de carreteras por Niveles de Servicio”, Perú, 2009.
- **REVISTA ASTM INTERNATIONAL**, “Adaptation of ASTM E1926 “Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements”, 2009.
- **JELVES E.** “Influencia del diseño geométrico de los pavimentos en el Índice de Rugosidad Internacional”, Universidad de Chile, Chile, 2000.
- **BROWN D. & THOMSEM T.** “Generic Equipment Specification Multi-Function Road Data Collection System.” World Bank, U.S.A., 2007.
- **CRESPO DEL RÍO, Ramón**, “Medida de la geometría de la carretera”, Madrid, España, 1999.
- **GILLESPIE, Tomas**, “Every you always wanted about the IRI, but never afraid to ask!” University of Michigan, U.S.A., 1992.