

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS CURVAS HORIZONTALES, ENTORNOS URBANOS Y LA VARIABILIDAD DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE LAS CARRETERAS, CON EL TIEMPO Y A LO ANCHO DE SU HUELLA, EN LA MEDICIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL MEDIANTE EL USO DE PERFILÓMETROS INERCIALES

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería de Transporte y Vías

LUIS DIEGO HERRA GÓMEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

## **Dedicatoria**

*A mi abuelita Felicia.*

Por todo el cariño que nos dio siempre, junto a mi abuelo Gerardo.

## **Agradecimientos**

A mi familia, por ser un apoyo fundamental, diario e incondicional; sin el cual no hubiese podido llegar a este punto.

A mi novia MaPa, por motivarme siempre a seguir cumpliendo metas.

A Grupo Nación, por permitirme ejecutar parte de los ensayos en el Circuito de Competencias del Parque VIVA.

Al Laboratorio de Evaluación de Pavimentos del LanammeUCR, por ayudarme con la ejecución de ensayos de medición del perfil longitudinal.

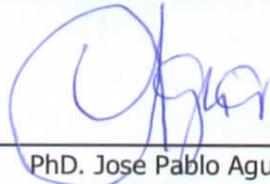
A mi director de tesis y asesores, les agradezco por el acompañamiento y excelentes sugerencias, para que este trabajo haya resultado exitoso.

"Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado de Maestría Académica en Ingeniería del Transporte y Vías."



---

PhD. Jonathan Agüero Valverde  
**Representante de la Decana  
Sistema de Estudios de Posgrado**



---

PhD. Jose Pablo Aguiar Moya  
**Director de tesis**



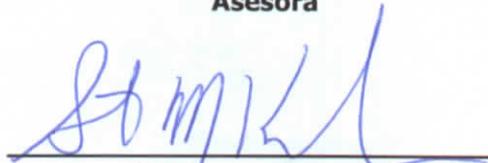
---

PhD. Gustavo Badilla Vargas  
**Asesor**



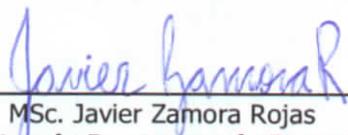
---

MSc. Wendy Sequeira Rojas  
**Asesora**



---

PhD. Steven Karamihas  
**Asesor Invitado**



---

MSc. Javier Zamora Rojas  
**Representante del Director de Programa de Posgrado en Ingeniería Civil**



---

Luis Diego Herra Gómez  
**Candidato**

## Tabla de contenidos

<b>Dedicatoria</b> .....	<b>ii</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Hoja de aprobación</b> .....	<b>iv</b>
<b>Tabla de contenidos</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de cuadros</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Justificación .....	3
1.1.1. <i>El problema específico</i> .....	3
1.1.2. <i>Importancia del estudio</i> .....	4
1.1.3. <i>Antecedentes teóricos y prácticos del problema</i> .....	4
1.2. Objetivos .....	7
1.2.1. <i>Objetivo general:</i> .....	7
1.2.2. <i>Objetivos específicos:</i> .....	7
1.3. Delimitación del problema.....	8
1.3.1. <i>Alcance</i> .....	8
1.3.2. <i>Limitaciones</i> .....	8
1.4. Métodos y procedimiento .....	9
1.4.1. <i>Etapa 1. Revisión bibliográfica</i> .....	10
1.4.2. <i>Etapa 2. Realización de ensayos</i> .....	10
1.4.3. <i>Etapa 3. Análisis de resultados</i> .....	15
1.4.4. <i>Etapa 4. Elaboración del documento final</i> .....	16
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
2.1. Especificaciones de regularidad superficial vigentes en Costa Rica .....	16
2.1.1. <i>En proyectos de mantenimiento y rehabilitación</i> .....	16
2.1.2. <i>En obras nuevas</i> .....	16
2.2. Equipos para la medición del perfil longitudinal (perfilómetros) .....	17
2.2.1. <i>Equipos para la medición del perfil verdadero</i> .....	17
2.2.2. <i>Equipos de referencia móvil (dispositivos rodantes o perfilógrafos)</i> .....	17
2.2.3. <i>Equipos de tipo respuesta (RTRRMS)</i> .....	18
2.2.4. <i>Perfilómetros de referencia inercial</i> .....	18
2.3. Vehículos aéreos no tripulados (VANT) .....	19
2.4. Procedimiento para el cálculo del IRI.....	19
2.4.1. <i>Filtro de media móvil</i> .....	20

2.4.2. Aplicación de la simulación de cuarto de carro.....	21
2.4.3. Acumulación lineal del sistema de suspensión .....	22
2.5. Efecto de las longitudes de onda en el cálculo del IRI.....	22
2.6. Uso de filtros en el análisis del perfil de una carretera .....	23
2.7. Densidad espectral de potencia (PSD) .....	25
2.8. Evaluación estructural de los pavimentos mediante ensayos no destructivos .....	27
<b>3. EVOLUCIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL A LO LARGO DEL TIEMPO. 30</b>	
3.1. Insumos utilizados.....	31
3.2. Resultados obtenidos .....	31
3.2.1. Evaluación cualitativa de la regularidad superficial con el paso del tiempo.....	31
3.2.2. Evaluación estadística de la regularidad superficial con el paso del tiempo .....	33
3.2.3. Comparación entre la capacidad estructural y la "pérdida de regularidad superficial" ..	34
3.2.4. Análisis de los perfiles longitudinales de la carretera.....	39
3.3. Análisis de resultados .....	41
<b>4. INTERLABORATORIAL..... 42</b>	
4.1. Condiciones específicas del estudio: .....	44
4.2. Evaluación del tramo recto (estacionamientos del 0 al 500): .....	45
4.3. Evaluación del tramo curvo (estacionamientos del 500 al 800): .....	48
4.4. Análisis de resultados .....	49
<b>5. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN EL CÁLCULO DEL IRI..... 50</b>	
5.1. Caso 1: Velocidad constante .....	50
5.1.1. Tramo recto (estacionamientos 0 al 500).....	51
5.1.2. Tramo curvo (estacionamientos 500 al 800).....	51
5.1.3. Análisis de resultados .....	52
5.2. Caso 2: Sin acelerar ni aplicar el freno del vehículo .....	55
5.2.1. Análisis de resultados .....	57
5.3. Caso 3: Frenado.....	59
5.3.1. Evaluación del perfil longitudinal para el caso 3: frenado .....	60
5.3.2. Evaluación de la regularidad superficial para el caso 3: frenado.....	65
5.4. Caso 4: Aceleración .....	67
5.4.1. Evaluación de la regularidad superficial para el caso 4: aceleración .....	67
5.5. Caso 5: Frenar – detenerse – acelerar .....	69
5.5.1. Evaluación del perfil longitudinal para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar .....	70
5.5.2. Evaluación de la regularidad superficial para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar..	71
5.6. Caso 6: Detenerse y acelerar .....	74

<b>6. VARIABILIDAD DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL A LO ANCHO DE LA HUELLA DE LOS VEHÍCULOS .....</b>	<b>76</b>
6.1. Procedimiento para la captura y análisis de datos obtenidos a partir del VANT .....	78
6.2. Cálculo del IRI a partir de las fotografías aéreas capturadas sobre el parque VIVA. ....	83
6.3. Evaluación del IRI en rutas de travesía a partir de la captura de imágenes aéreas. ....	85
6.3.1. Ruta Nacional 10104 .....	85
6.3.2. Ruta Nacional 10802 .....	86
6.3.3. Ruta Nacional 10902 .....	86
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
7.1. Evolución de la regularidad superficial a lo largo del tiempo .....	88
7.2. Interlaboratorial .....	88
7.3. Evaluación del efecto de la velocidad y aceleración en el cálculo del IRI .....	89
7.3.1. Caso 1: Velocidad constante .....	89
7.3.2. Caso 2: Sin acelerar ni aplicar el freno .....	89
7.3.3. Caso 3: Frenado .....	89
7.3.4. Caso 4: Aceleración .....	90
7.3.5. Caso 5: Frenar – detenerse – acelerar .....	91
7.3.6. Caso 6: Detenerse y acelerar .....	91
7.4. Variabilidad de la regularidad superficial a lo ancho de la huella de los vehículos.....	91
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
8.1. Evolución de la regularidad superficial a lo largo del tiempo .....	92
8.2. Interlaboratorial .....	92
8.3. Evaluación del efecto de la velocidad y aceleración en el cálculo del IRI .....	92
8.3.1. Caso 1: Velocidad constante .....	92
8.3.2. Caso 2: Sin acelerar ni aplicar el freno .....	92
8.3.3. Caso 3: Frenado .....	92
8.3.4. Caso 4: Aceleración .....	93
8.3.5. Caso 5: Frenar – detenerse – acelerar .....	93
8.3.6. Caso 6: Detenerse y acelerar .....	93
8.4. Variabilidad de la regularidad superficial a lo ancho de la huella de los vehículos.....	93
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>10. APÉNDICE .....</b>	<b>96</b>
10.1. Evaluación de los parámetros estructurales del pavimento en la Ruta Nacional de Travesía 11505. ....	96

## Resumen

La regularidad superficial en carreteras es una característica que afecta la percepción de los usuarios sobre la condición de una vía, así como sus costos de mantenimiento y operación.

Además, este parámetro es muy utilizado como insumo para gestionar el mantenimiento de redes viales, así como para la aceptación de proyectos de obra nueva, mediante el establecimiento de estándares mínimos de regularidad superficial que deben cumplirse según la importancia del proyecto.

Actualmente, la manera más difundida para determinar la regularidad superficial de las carreteras es mediante el parámetro IRI (Índice de Regularidad Internacional), pues se considera un indicador relevante, transferible y estable en el tiempo.

El cálculo de IRI se realiza a partir de un perfil longitudinal de elevaciones, el cual se mide sobre las huellas de la carretera y pese a que existen múltiples instrumentos para medir este perfil, el método más común, por su eficiencia, consiste en que estas mediciones se realicen mediante el uso de perfilómetros inerciales.

El perfilómetro inercial es un vehículo convencional, comúnmente tipo VAN o pick up, que cuenta con láser y acelerómetros que permiten realizar una medición del perfil longitudinal a una velocidad de operación.

La presente investigación tiene el objetivo de evaluar condiciones críticas en la medición del perfil longitudinal, mediante el uso de perfilómetros inerciales, para determinar las principales limitaciones asociadas a su uso. Adicionalmente, se monitorea una carretera recién rehabilitada, para evaluar la evolución de la regularidad superficial en los primeros dos años de servicio.

Como resultado de la investigación se determinó que la evolución de la regularidad superficial está más relacionada con la capacidad estructural de las capas superiores del pavimento. Además, para el proyecto evaluado se observó que la regularidad superficial empieza a desmejorar luego de un año de puesta en servicio.

Según el interlaboratorial realizado, se determinó que, entre laboratorios, el MRI en tangentes tuvo una variación de  $\pm 0,1$  m/km y en curvas de 0,2 m/km.

Además, se determinó que, conducir a una velocidad inferior a 20 km/h o detener el perfilómetro inercial durante la medición, puede alterar el perfil medido y consecuentemente que el IRI calculado no se ajuste a la realidad.

Por último, no se evidenciaron problemas en la medición del perfil longitudinal producto de cambios bruscos en la aceleración longitudinal del perfilómetro.

**Palabras clave:** Regularidad Superficial, Desempeño carreteras, IRI, Perfil longitudinal

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Valores de desplazamiento lateral de vehículos livianos para todas las estaciones de medición.....	6
Cuadro 2. Valores de desplazamiento lateral de vehículos pesados para todas las estaciones de medición. ....	7
Cuadro 3. Historial de mediciones del perfil longitudinal realizadas en la Ruta Nacional de travesía 11505.....	12
Cuadro 4. Especificación de regularidad superficial en sobrecapas.....	16
Cuadro 5. Especificación de regularidad superficial en rehabilitaciones.....	16
Cuadro 6. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos .....	19
Cuadro 7. Distribución de los sensores en el ensayo de FWD (cm) .....	28
Cuadro 8. Clasificación de la condición estructural para pavimentos con base granular ...	29
Cuadro 9. Historial de mediciones del perfil longitudinal realizadas en la Ruta Nacional de travesía 11505.....	31
Cuadro 10. Análisis de varianza para comparar los valores de IRI calculados en distintos momentos.....	33
Cuadro 11. Clasificación de la condición estructural para pavimentos con base granular..	34
Cuadro 12. Promedio correspondiente a cada uno de los deciles de los parámetros DO, BLI, MLI y LLI.....	37
Cuadro 13. Diferencial de regularidad superficial promedio correspondiente a cada uno de los deciles. ....	38
Cuadro 14. Coeficientes de correlación entre la pérdida de regularidad superficial y los parámetros DO, BLI, MLI y LLI .....	38
Cuadro 15. Detalle de los equipos utilizados para llevar a cabo el interlaboratorial.....	42
Cuadro 16. Mediciones del perfil longitudinal realizadas en el circuito de competencias del Parque VIVA.....	44
Cuadro 17. MRI promediado en tramos de 100 m, calculado a partir de las mediciones del perfil longitudinal realizadas por los distintos perfilómetros inerciales. ....	46
Cuadro 18. Diferencias entre los valores de IRI respecto al promedio entre los estacionamientos 0 y 500. ....	46
Cuadro 19. Desviación estándar de los datos de MRI obtenidos entre los estacionamientos 0 y 500. ....	47
Cuadro 20. MRI promediado en tramos de 100 m, calculado a partir de las mediciones del perfil longitudinal realizadas por los distintos perfilómetros inerciales. ....	48
Cuadro 21. Diferencias entre los valores de IRI respecto al promedio entre los estacionamientos 500 y 800.....	48
Cuadro 22. Desviación estándar de los datos de MRI obtenidos entre los estacionamientos 500 y 800.....	49
Cuadro 23. MRI promedio en tramos de 100 m para las distintas velocidades evaluadas en el tramo recto.....	51

Cuadro 24. MRI promedio en tramos de 100 m para las distintas velocidades evaluadas en el tramo curvo .....	51
Cuadro 25. Resumen de las condiciones generales de medición del caso 2 .....	56
Cuadro 26. Diferencias promedio de MRI respecto al valor de referencia, para diferentes rangos de velocidades .....	58
Cuadro 27. Condiciones evaluadas en el caso 3: frenado .....	59
Cuadro 28. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados.....	67
Cuadro 29. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia.....	67
Cuadro 30. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados.....	68
Cuadro 31. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia.....	69
Cuadro 32. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados.....	73
Cuadro 33. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia.....	73
Cuadro 34. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados.....	75
Cuadro 35. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia.....	76

## Lista de figuras

Figura 1. Perfil longitudinal de una carretera .....	2
Figura 2. Efecto de la aceleración longitudinal y lateral en un perfilómetro .....	5
Figura 3. Metodología de investigación “Evaluación del efecto de las curvas horizontales y entornos urbanos en la medición del perfil longitudinal en carreteras mediante el uso de perfilómetros inerciales” .....	9
Figura 4. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10104.....	11
Figura 5. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10802.....	11
Figura 6. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 40902.....	12
Figura 7. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 11505.....	13
Figura 8. Ubicación del circuito de competencias del parque VIVA.....	13
Figura 9. Perfilógrafo longitudinal tipo California .....	17
Figura 10. Perfilómetros de referencia inercial .....	18
Figura 11. Perfil procesado mediante el filtro de media móvil y neumático con una base de contacto “B” .....	20
Figura 12. Modelo de cuarto de carro .....	21
Figura 13. Perfil descompuesto en varias funciones sinusoidales .....	22
Figura 14. Efecto de la longitud de onda en el cálculo de IRI .....	23
Figura 15. Comparación entre los perfiles medidos entre un Dipstick y dos perfilómetros láser .....	24
Figura 16. Comparación entre los perfiles medidos entre un Dipstick y dos perfilómetros láser .....	24
Figura 17. Filtro de Butterworth de paso bajo.....	25
Figura 18. PSD de la pendiente realizado en los proyectos Chilamate – Vuelta Kooper y en la Ruta Nacional 2.....	26
Figura 19. Deflectómetro de impacto (FWD) LanammeUCR .....	27
Figura 20. Ilustración curva de deflexiones generada ensayo deflectometría (FWD).....	28
Figura 21. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 11505.....	30
Figura 22. Proceso de colocación de sobrecapa en la Ruta Nacional de travesía 115050, agosto de 2018.....	30
Figura 23. Comparación del MRI promedio en tramos de 100 m entre la primera y última medición realizada (carril derecho).....	32
Figura 24. Comparación del MRI promedio en tramos de 100 m entre la primera y última medición realizada (carril izquierdo).....	32
Figura 25. Evolución entre las diferencias promedio de MRI conforme fueron pasando los meses.....	32
Figura 26. Categorización del parámetro D0 en el proyecto .....	35
Figura 27. Categorización del parámetro BLI en el proyecto.....	35
Figura 28. Categorización del parámetro MLI en el proyecto .....	36
Figura 29. Categorización del parámetro LLI en el proyecto .....	36

Figura 30. Categorización estructural del proyecto, según la medición de FWD realizada el 23 de noviembre de 2020 .....	37
Figura 31. Razón entre el PSD de la varianza de la pendiente, sentido UCR – El Cristo ....	40
Figura 32. Razón entre el PSD de la varianza de la pendiente, sentido El Cristo - UCR.....	40
Figura 33. Perfilómetros utilizados para llevar a cabo el estudio .....	42
Figura 34. Estacionamientos del circuito de competencias del parque VIVA.....	43
Figura 35. Se colocaron conos espaciados a cada 20 m, para delimitar un ancho de carril de 3,6 m. ....	45
Figura 36. Se colocó cinta reflectiva en el estacionamiento inicial para garantizar que las mediciones iniciaran en el mismo punto. ....	45
Figura 37. MRI promediado en tramos de 100 m, calculado a partir de las mediciones del perfil longitudinal realizadas por los distintos perfilómetros inerciales. ....	46
Figura 38. Evolución del MRI a lo largo de los estacionamientos y a distintas velocidades. ....	51
Figura 39. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio A.....	53
Figura 40. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio B.....	53
Figura 41. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio D.....	54
Figura 42. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio E.....	54
Figura 43. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio F. ....	55
Figura 44. Estacionamientos de inicio y fin para el caso 2: sin acelerar ni aplicar el freno. ....	56
Figura 45. MRI calculado en tramos base de 5 m, para cada una de las pasadas realizadas .....	57
Figura 46. Estacionamientos de inicio y fin para el caso 3: frenado.....	60
Figura 47. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.1 .....	61
Figura 48. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.2.....	61
Figura 49. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.3.....	62
Figura 50. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.4.....	62
Figura 51. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.5.....	63
Figura 52. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.6.....	63
Figura 53. PSD de la varianza de la pendiente para cada uno de los escenarios de análisis .....	65
Figura 54. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 3: frenado. ....	66
Figura 55. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 4: aceleración. ....	68
Figura 56. Estacionamientos de inicio y fin para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar .	70

Figura 57. Comparación de perfiles longitudinales medidos para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar .....	71
Figura 58. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 5: frenar – detenerse – acelerar. ....	72
Figura 59. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 6: detenerse y acelerar.....	74
Figura 60. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10104.....	77
Figura 61. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10802.....	77
Figura 62. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 40902.....	78
Figura 63. Preparación de vuelo programado para la captura de fotografías aéreas. ....	79
Figura 64. Nube de puntos construida a partir de las fotografías capturadas. ....	79
Figura 65. Limpieza de datos con el objetivo de dejar únicamente la superficie de la carretera. ....	80
Figura 66. Modelo de elevación de terreno para un tramo de la ruta 10104. ....	80
Figura 67. Definición las líneas sobre las cuales se calculará el perfil longitudinal de la carretera. ....	81
Figura 68. Visualizador del perfil longitudinal en <i>ArcGIS Desktop</i> . ....	82
Figura 69. Visualizador del perfil longitudinal en ProVAL. ....	82
Figura 70. Modelo de nube de puntos del circuito de competencias del parque VIVA. ....	83
Figura 71. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en el circuito de competencias del parque VIVA.....	84
Figura 72. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en la Ruta Nacional 10104.....	85
Figura 73. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en la Ruta Nacional 10802.....	86
Figura 74. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en la Ruta Nacional 40902.....	86
Figura 75. Deflexión en D0 a lo largo de los estacionamientos (carril derecho) .....	96
Figura 76. Deflexión en D0 a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo).....	96
Figura 77. BLI a lo largo de los estacionamientos (carril derecho) .....	97
Figura 78. BLI a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo).....	97
Figura 79. MLI a lo largo de los estacionamientos (carril derecho).....	98
Figura 80. MLI a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo) .....	98
Figura 81. LLI a lo largo de los estacionamientos (carril derecho).....	99
Figura 82. LLI a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo) .....	99



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

SEP Sistema de  
Estudios de Posgrado

**Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.**

Yo, Luis Diego Herra Gómez, con cédula de identidad 1-1555-0077, en mi condición de autor del TFG titulado Evaluación del efecto de las curvas horizontales, entornos urbanos y la variabilidad de la regularidad superficial de las carreteras, con el tiempo y a lo ancho de su huella, en la medición del perfil longitudinal mediante el uso de perfilómetros inerciales.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI  NO \*

\*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: " \_\_\_\_\_ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

**FIRMA ESTUDIANTE**

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no solo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de carreteras representa uno de los activos más importantes con los cuales puede contar un Estado, ya que permite la movilización de bienes, personas y servicios. En Costa Rica se invierte 0,32 % de PIB anual (alrededor de \$ 183 millones de dólares)<sup>1</sup> para realizar actividades de mantenimiento y rehabilitación que permitan mantener en buenas condiciones dicho sistema.

Por otra parte, se requiere de indicadores significativos y representativos de la condición de una carretera, para determinar sobre qué secciones se deben realizar mantenimientos preventivos o rehabilitaciones, así como para evaluar la calidad de estas intervenciones.

Uno de los indicadores más importantes para evaluar el estado de una carretera es la regularidad superficial. De acuerdo con la norma ASTM E 867-06 "*Standard Terminology Relating to Vehicle – Pavement Systems*", la regularidad superficial de una carretera corresponde a la desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje.

Este parámetro, por su importancia, ha tratado de ser cuantificado a lo largo del desarrollo de la ingeniería de pavimentos mediante diversos índices que en sus inicios consistieron en medidas subjetivas que relacionaban el confort del usuario al transitar por una carretera con la regularidad superficial de la misma (Herra *et al.*, 2018).

Posteriormente, producto del financiamiento a programas de investigación a gran escala se evidenció la necesidad de contar con un índice estable en el tiempo, transferible y relevante. De este modo, con el objetivo de unificar los diferentes parámetros que se utilizaban en diferentes países para medir la regularidad superficial, en 1982, se definió el Índice de Regularidad Internacional (IRI) como un parámetro adecuado para medir la regularidad superficial en carreteras (Sayers, 1986).

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 estándar, producto de la simulación del modelo de cuarto de coche para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h (Sayers, 1986).

Para caminos pavimentados el rango de la escala del IRI es de 0 m/km a 12 m/km, donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el valor de 20 m/km.

La regularidad superficial de una carretera es un aspecto que afecta los costos de mantenimiento y operación de una vía. Por ejemplo, una ruta con gran cantidad de deformaciones y/o baches (IRI alto), tiene un efecto directo en la velocidad de operación de los vehículos, lo cual afecta a su vez el consumo de combustible; así mismo, el sistema

---

<sup>1</sup> En el año 2021, considerando un tipo de cambio de 640 colones. Fuentes: BCCR y CONAVI, 2020

de suspensión de cada automóvil y camión debe trabajar más para compensar estas irregularidades, lo cual acelera su deterioro y el de los neumáticos. Todo esto repercute también en la carrocería del vehículo provocando así mayores costos de operación para el usuario. Por otra parte, los efectos dinámicos producidos por las irregularidades presentes en una carretera pueden propiciar modificaciones en el estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimentos, lo cual puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación (Herra *et al.*, 2017).

Para cuantificar este efecto, el reporte NCHRP 720 "*Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs*" señala que: independientemente de la velocidad, el aumento en el valor del IRI en 1 m/km incrementa el consumo de combustible en vehículos livianos entre un 2 y 3%, por otra parte, a partir de valores de IRI iguales a 3 m/km, el mantenimiento y reparación de vehículos se empieza a ver afectado.

### **Perfil longitudinal:**

El perfil longitudinal de la superficie de camino es un corte en dos dimensiones de la superficie de la carretera (ver Figura 1). Se pueden tomar muchos perfiles de una carretera a lo largo de diferentes líneas imaginarias. Sin embargo, para el cálculo del IRI interesa el perfil longitudinal ubicado bajo las huellas de las llantas de los vehículos, pues estos perfiles representan las franjas sobre las cuales se da el tránsito vehicular.

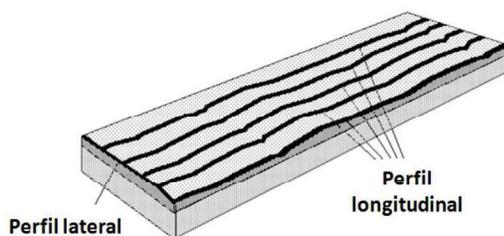


Figura 1. Perfil longitudinal de una carretera  
Fuente: Adaptado de Sayers y Karamihas, 1998

Para medir el perfil longitudinal de una vía, lo más común es el uso de perfilómetros inerciales, que son equipos de alto desempeño, porque permiten levantar el perfil de una ruta rápidamente, y además cuentan con una buena precisión y exactitud.

La presente investigación se centra en el estudio de las limitantes actuales para la medición de dicho perfil, y de qué manera estas limitantes puedan ser interpretadas y consideradas al momento de evaluar una vía. Lo anterior, con el objetivo de que la Administración pueda generar especificaciones que consideren aspectos u escenarios donde la medición del perfil longitudinal de una vía esté sujeta a limitantes.

## 1.1. Justificación

### 1.1.1. El problema específico

Actualmente, en Costa Rica se cuenta con diversas especificaciones para asegurar la regularidad superficial en las carreteras mediante el parámetro IRI. Tanto en proyectos de obra nueva, como lo son la construcción de nuevas rutas o la ampliación de rutas existentes, como en proyectos de mantenimiento y rehabilitación se han emitido especificaciones para garantizar que la regularidad superficial resultante del pavimento sea apropiada y acorde a los trabajos que fueron contratados por la Administración.

Por otra parte, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) realiza evaluaciones bienales de la red vial costarricense, donde una de las características evaluadas es la regularidad superficial de las vías mediante el parámetro IRI. Lo anterior, con el propósito de que la Administración tenga un insumo para mejorar la gestión de la red vial nacional.

Como el cálculo del IRI se realiza a partir del perfil longitudinal de la carretera, la calidad de la evaluación de una vía mediante este parámetro de regularidad depende de qué tan acertada haya sido esta medición del perfil longitudinal. Sin embargo, se ha observado que la precisión y exactitud de los equipos más utilizados para medir el perfil longitudinal (perfilómetros inerciales) disminuye cuando las mediciones del perfil se realizan a bajas velocidades, cuando el perfilómetro inercial se detiene y cuando experimenta cierto tipo de aceleraciones laterales (por ejemplo, las que ocurren en curvas muy cerradas) y longitudinales (por ejemplo, las que ocasionan cambios bruscos de velocidad).

Estas dificultades en el proceso de medición del perfil longitudinal representan una limitante para la evaluación de proyectos viales, ya que muchos de estos proyectos se encuentran en zonas urbanas, que por sus características: densidad del tránsito vehicular, señales de tránsito e interacción con los peatones; restringen la medición del perfil longitudinal a velocidades bajas, que incluso obligan al conductor del perfilómetro a detenerse o a disminuir considerablemente la velocidad durante la medición del perfil longitudinal. Además de esto, en Costa Rica, por su topografía, muchas carreteras atraviesan zonas montañosas que hacen que los radios de curvatura en estas vías sean bajos y que se generen aceleraciones laterales durante el proceso de medición del perfil longitudinal.

Pese a que se ha identificado que la medición del perfil longitudinal se puede ver afectada por condiciones de baja velocidad, aceleraciones laterales y longitudinales, actualmente, en Costa Rica no se cuenta con especificaciones especiales o criterios cartelarios diferenciados para evaluar proyectos que se encuentren en rutas urbanas o sinuosas.

Otro de los aspectos que se desconoce es el efecto del movimiento lateral del perfilómetro durante la medición del perfil longitudinal. Lo anterior es relevante debido a que en muchas ocasiones se requiere repetibilidad en las mediciones. Por ejemplo: cuando se realizan comparaciones entre un laboratorio de verificación de la calidad y otro de autocontrol. Sin embargo, al existir una infinita cantidad de perfiles longitudinales a lo largo de las vías

resulta casi imposible que dos o más operarios de perfilómetros inerciales pasen por el mismo perfil mientras realizan su medición. Situación que puede genera diferencia entre los valores de regularidad superficial obtenidos.

### *1.1.2. Importancia del estudio*

La relevancia técnica de este estudio está relacionada al inicio de la licitación pública número 2014LN-000018-0CV00 "MP Y R: Mantenimiento Periódico y Rehabilitación del Pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada", donde se definió el IRI como parámetro de aceptación de los trabajos de colocación de mezcla asfáltica. Poco tiempo después de iniciada esta licitación (en septiembre de 2016), se presentaron quejas por parte de las empresas adjudicadas a este contrato, con el argumento de que la especificación de IRI establecida era difícil de cumplir especialmente en carreteras muy sinuosas y en rutas de travesía (ubicadas en centros urbanos). Lo anterior, debido a que esta especificación es igual sin importar si se trata de rutas urbanas o sinuosas.

Uno de los argumentos expuestos sobre este tema por estas empresas adjudicadas corresponde al hecho de que en rutas sinuosas y de travesía es más difícil llevar a cabo la construcción de un pavimento (LanammeUCR, 2019). Sin embargo, más allá del tema constructivo, se tiene evidencia que la medición del perfil longitudinal, mediante perfilómetros láser, se puede ver afectada por condiciones de baja velocidad, aceleraciones laterales y longitudinales.

Tomando en cuenta esto, la presente investigación tiene el propósito de evaluar, mediante pruebas en sitio, el efecto de distintas condiciones de velocidad y aceleración, en la medición del perfil longitudinal de una carretera con el uso de perfilómetros láser.

Principalmente, se busca conocer con detalle las limitaciones asociadas a la medición del perfil longitudinal en entornos urbanos y en rutas sinuosas, así como el efecto asociado al correspondiente cálculo del IRI en este tipo rutas.

Lo anterior, con el objetivo de identificar los escenarios donde la medición del IRI se empieza a ver afectada por motivos ajenos al procedimiento constructivo y además determinar la magnitud de estas afectaciones. Esto permitirá que la Administración tenga una referencia técnica, adaptada al contexto nacional, que le sirva para la elaboración de futuras especificaciones de regularidad superficial que se adapten al contexto de cada proyecto.

### *1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema*

#### ***Efecto de la velocidad y aceleración en la medición del perfil longitudinal de carreteras***

##### Efecto de la aceleración:

Karamihas, S. M. (1999), en el reporte NCHRP 434, señala que la geometría de una carretera tiene el potencial de causar errores en la medición del perfil longitudinal, esto al cambiar la orientación del acelerómetro de una posición perfectamente vertical a una con cierto grado de inclinación, lo anterior ocurre especialmente en curvas horizontales. Estas aceleraciones

laterales pueden afectar el aspecto del perfil medido de la carretera, sin embargo, no afectan el cálculo del IRI mientras no excedan un valor de 0,15 g.

Las aceleraciones longitudinales producto del frenado producen un efecto similar al de una curva en carretera, ya que pueden provocar cierto grado de inclinación del acelerómetro y consecuentemente que un componente de la aceleración longitudinal debido al frenado sea percibido por el acelerómetro del equipo como si fuera parte de la aceleración vertical (ver Figura 2)

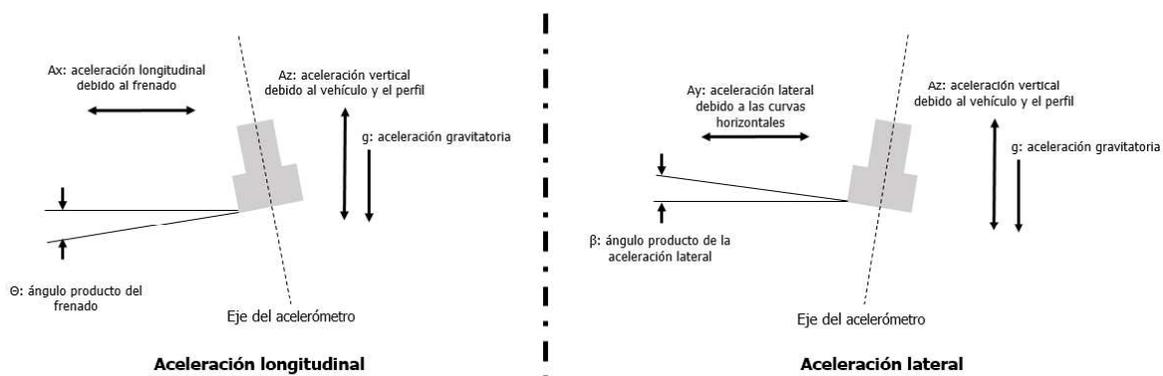


Figura 2. Efecto de la aceleración longitudinal y lateral en un perfilómetro

#### Efecto de la velocidad:

Sayers, M. W., & Karamihis, S. M. (1998), señalan que los acelerómetros (como la mayoría de aparatos electrónicos) generan cierto "ruido" que en este caso empieza a tener significancia cuando los niveles de aceleración vertical son inferiores a 0,1 g, de modo que, si la aceleración vertical es inferior a este umbral el "ruido" generado por el acelerómetro ocasiona un error en la medición del perfil longitudinal. Por lo tanto, la velocidad mínima a la que un perfilómetro debería operar está dictada por la longitud de onda más larga que deba medir el perfilómetro y que le permita alcanzar aceleraciones superiores al umbral de "ruido", siendo que, la mayoría de perfilómetros pueden medir el rango de longitudes de onda relevante para el cálculo del IRI a una velocidad de 25 km/h.

#### ***NCHRP 914: Medición caracterización y reporte de la regularidad superficial en pavimentos y en entornos urbanos***

En esta investigación se determinó que la validez de los perfiles medidos decrece a velocidades muy bajas y que por lo general los perfilómetros no tienen un límite de velocidad baja común. Por lo tanto, se propone un conjunto de procedimientos experimentales para la certificación de perfilómetros inerciales para su uso en entornos urbanos y de baja velocidad. Estos procedimientos se recomiendan para identificar la velocidad más baja de operación recomendable en un perfilómetro y para determinar el rango de distancia, dentro de un perfil medido, que debería ser marcado como inválido en la vecindad de una operación de frenado o de parada.

### ***Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la medición de la regularidad superficial en carreteras***

En 2018, Toribio y Gutiérrez exponen una metodología alternativa para la evaluación superficial de pavimentos en vías urbanas, empleando imágenes georreferenciadas, obtenidas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT) que se procesan generando una ortofoto y un modelo digital 3D de alta resolución.

Por otra parte, Prosser-Contreras et al. (2020) determinaron que, utilizando vehículos aéreos no tripulados, cámaras y GPS, es posible reconstruir modelos virtuales tridimensionales, los cuales son útiles para extraer la información necesaria que permite replicar con precisión lo capturado. De esta forma, es posible obtener perfiles longitudinales asociados a la vía, y con ello calcular el Índice de Regularidad Internacional (IRI), que da resultados dentro de 0.1 (m / km) de los resultados oficiales certificados, lo que muestra su potencial uso y desarrollo.

### ***Desplazamiento lateral de los vehículos en carretera***

El desplazamiento lateral de los vehículos durante su conducción es un aspecto que puede afectar la repetibilidad en los resultados de IRI en una carretera, ya que no se puede garantizar que un perfilómetro pase siempre exactamente sobre el mismo perfil longitudinal y como se indica en la Figura 1.

En 2016, Morris y Leiva publicaron un estudio denominado "Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica". En esta publicación se muestran los resultados de la medición del desplazamiento lateral de los vehículos en las Rutas Nacionales: 2, 3, 32, 39, 108 y 202. Posteriormente, en 2018, Oconitrillo publicó un estudio sobre las mismas Rutas Nacionales donde se midió el desplazamiento lateral vehicular mediante el uso de sensores ultrasónicos. Los resultados de ambas investigaciones se comparan en el Cuadro 1 para vehículos livianos y en el Cuadro 2 para vehículos pasados.

Cuadro 1. Valores de desplazamiento lateral de vehículos livianos para todas las estaciones de medición.

Ruta	Morris (2016)		Arduino-Sensor		Dif. Abs. (cm)	% Dif.
	Lw (cm)	n	Lw (cm)	n		
2	<b>26,8</b>	107	<b>30,8</b>	388	4,0	13%
3	<b>25,3</b>	762	<b>32,9</b>	189	7,6	23%
202	<b>42,9</b>	103	<b>30,6</b>	234	-12,3	-40%
32	<b>25,0</b>	105	<b>34,9</b>	528	9,9	28%
108	<b>28,5</b>	76	<b>24</b>	228	- 4,5	-19%
39	<b>20,2</b>	124	<b>36,4</b>	591	16,2	45%

Fuente: Oconitrillo, 2018

Cuadro 2. Valores de desplazamiento lateral de vehículos pesados para todas las estaciones de medición.

Ruta	Morris 2016		Arduino-Sensor		Dif. Abs. (cm)	% Dif.
	Lw (cm)	n	Lw (cm)	n		
2	<b>27,6</b>	126	<b>30,5</b>	124	2,9	10%
3	<b>31,4</b>	113	<b>29,7</b>	151	-1,7	-6%
202	<b>36,5</b>	35	<b>34,3</b>	35	-2,2	-6%
32	<b>26,6</b>	160	<b>36,2</b>	152	9,6	27%
108	<b>24,5</b>	139	<b>23,8</b>	76	-0,7	-3%
39	<b>27,8</b>	95	<b>39,6</b>	134	11,8	30%

Fuente: Oconitrillo, 2018

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general:

Evaluar el efecto de las curvas horizontales y entornos urbanos en la medición del perfil longitudinal de las carreteras mediante el uso de perfilómetros inerciales.

### 1.2.2. Objetivos específicos:

- Analizar el efecto de distintas condiciones de velocidad en la medición del perfil longitudinal de una carretera mediante el uso de perfilómetros inerciales.
- Analizar el efecto de la aceleración longitudinal y lateral en la medición del perfil longitudinal de una carretera mediante el uso de perfilómetros inerciales.
- Evaluar la precisión y exactitud asociada al cálculo del IRI a partir de perfiles longitudinales medidos con perfilómetros inerciales que realizan las mediciones bajo distintas condiciones de velocidad y aceleración.
- Determinar si mediante el uso de filtros aplicados al perfil longitudinal de la carretera es posible minimizar los efectos negativos, asociados a condiciones adversas de velocidad y aceleración, para el cálculo de un IRI representativo de la carretera.
- Evaluar, para una muestra de tramos de carretera recién rehabilitada, la variabilidad de la regularidad superficial a lo ancho de la huella de los vehículos.
- Analizar para un tramo de carretera urbana la evolución de la regularidad superficial en el tiempo.
- Determinar bajo qué condiciones de velocidad y aceleración deben operar los perfilómetros láser, para que las mediciones del perfil longitudinal no afecten significativamente el posterior cálculo del IRI.

### **1.3. Delimitación del problema**

#### *1.3.1. Alcance*

El alcance de esta investigación busca determinar el efecto de las curvas horizontales y entornos urbanos en la medición del perfil longitudinal de las carreteras mediante el uso de perfilómetros inerciales.

Para evaluar el efecto de las curvas horizontales se caracterizará el perfil de uno de los tramos curvos del circuito de competencias parque VIVA mediante la medición del perfil longitudinal a 9 velocidades distintas.

Por otra parte, el efecto de la medición del perfil longitudinal en los entornos urbanos considera más casos de estudio, por ejemplo, la medición del perfil sobre pozos de alcantarilla, reducciones en la velocidad de conducción, la necesidad de detenerse para realizar un "Alto" y dificultades en la programación de la medición del perfil longitudinal que hacen que dicha medición no se realice inmediatamente después de la construcción del proyecto.

De modo que, en esta investigación, para evaluar este efecto en entornos urbanos, se realizarán mediciones del perfil longitudinal bajo distintas condiciones de velocidad y aceleración, se caracterizará la regularidad superficial de algunos proyectos en los alrededores de pozos de alcantarilla y se evaluará la evolución de la regularidad superficial de un proyecto con el paso del tiempo.

Por último, como aporte adicional, la durante el proceso de investigación se plantea invitar a los diferentes laboratorios costarricenses de verificación de la calidad para realizar algunas mediciones en conjunto del perfil longitudinal. Esto con el objetivo de evaluar tolerancias y conocer la variabilidad asociada a este método de medición en Costa Rica.

#### *1.3.2. Limitaciones*

- La evaluación de la variación del perfil trasversal en rutas urbanas mediante VANT se realizó en rutas intervenidas recientemente. Sin embargo, se considera deseable que esta evaluación sea realizada justo después de la intervención para evaluar con mayor exactitud el efecto en la regularidad producto de la colocación de una sobrecapa en las cercanías de los pozos de alcantarillado.
- La evolución del IRI en una ruta urbana se realizó con base en una ruta en específico, pese a que a esta ruta se le dio seguimiento durante dos años mediante 7 mediciones de perfil longitudinal, se consideraría deseable contar con una mayor cantidad de rutas evaluadas. Por lo tanto, lo expuesto en esta investigación sobre este tema podría considerarse como un primer acercamiento al estudio de dicha evolución.
- El perfil de referencia se considera como el perfil medido con el perfilómetro inercial a 60 km/h, lo anterior, debido a que al momento de la realización de la investigación no se pudo disponer de otro equipo para evaluar el perfil de referencia.
- Por seguridad vial, el efecto de la velocidad y aceleración se evaluó en un circuito de competencias, pese a que este circuito cuenta con una superficie de pavimento flexible (el más común en Costa Rica), se considera deseable que dichas mediciones puedan ser realizadas en tramos de la Red Vial Nacional mediante un cierre temporal del tránsito.

### 1.4. Métodos y procedimiento

En la Figura 3 se muestra la metodología planteada para llevar a cabo el trabajo de investigación:

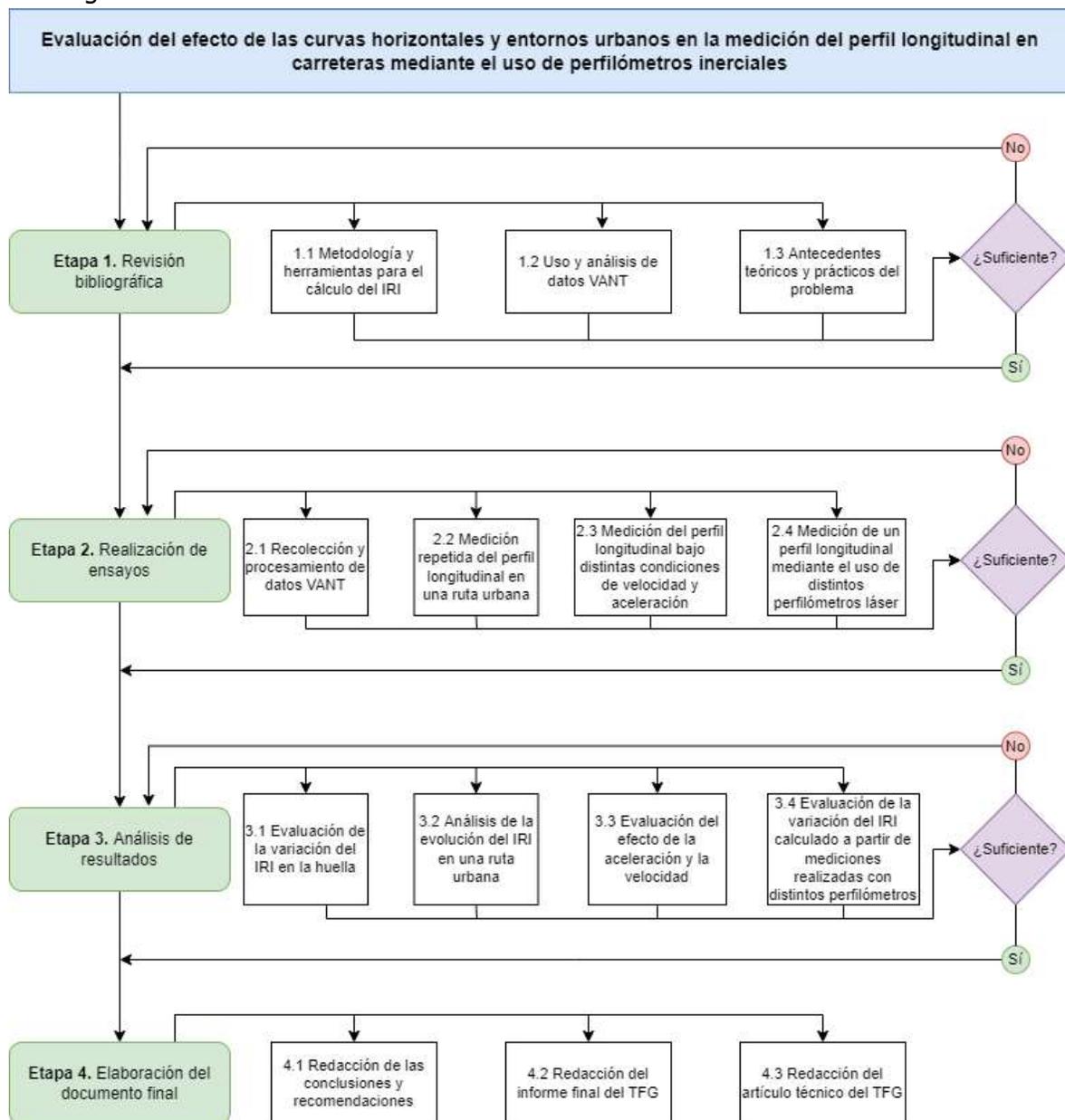


Figura 3. Metodología de investigación "Evaluación del efecto de las curvas horizontales y entornos urbanos en la medición del perfil longitudinal en carreteras mediante el uso de perfilómetros inerciales"

#### *1.4.1. Etapa 1. Revisión bibliográfica*

La primera etapa de la investigación consiste en una revisión bibliográfica sobre el procedimiento de cálculo del IRI, así como del uso de herramientas informáticas para su cálculo y análisis.

Además, en esta etapa se realizará un estudio sobre el proceso de medición y análisis del perfil longitudinal en carreteras haciendo énfasis en la medición del perfil longitudinal de las carreteras mediante el uso de Dipstick, perfilómetros láser y vehículos aéreos no tripulados (VANT). En cuanto al proceso de análisis del perfil longitudinal se realizará un estudio sobre la importancia, funcionamiento y uso de filtros.

Por otra parte, se realizará una revisión de la literatura nacional e internacional referente al uso y procesamiento de nubes de puntos capturados con VANT para el cálculo de la regularidad superficial en carreteras.

Finalmente, se llevará a cabo una revisión de los antecedentes teóricos y prácticos del problema, que consiste en identificar investigaciones de carácter similar que puedan servir de soporte o punto de partida.

#### *1.4.2. Etapa 2. Realización de ensayos*

##### ***Recolección y procesamiento de datos VANT:***

Esta etapa de la investigación consiste en evaluar, mediante un VANT, tres rutas de travesía que fueron atendidas mediante una rehabilitación o una sobrecapa. El objetivo de este procedimiento es analizar las variaciones de regularidad superficial a lo ancho de las huellas de la superficie de ruedo de la carretera. Además, de evaluar el efecto de las tapas de alcantarilla en la regularidad superficial de una vía.

Específicamente, se evaluaron las siguientes rutas de travesía<sup>2</sup>:

- **Ruta Nacional 10040:** Atendida en octubre de 2019, mediante la actividad de perfilado y sobrecapa. Ver ubicación en la Figura 4.
- **Ruta Nacional 10802:** Atendida en febrero de 2020, mediante la actividad de perfilado y sobrecapa. Ver ubicación en la Figura 5.
- **Ruta Nacional 40902:** Atendida en diciembre de 2019, mediante una rehabilitación que contempló la colocación de base estabilizada con cemento. Ver ubicación en la Figura 6.

---

<sup>2</sup> Adicionalmente el perfil longitudinal de estas rutas fue caracterizado mediante el uso de un perfilómetro láser.

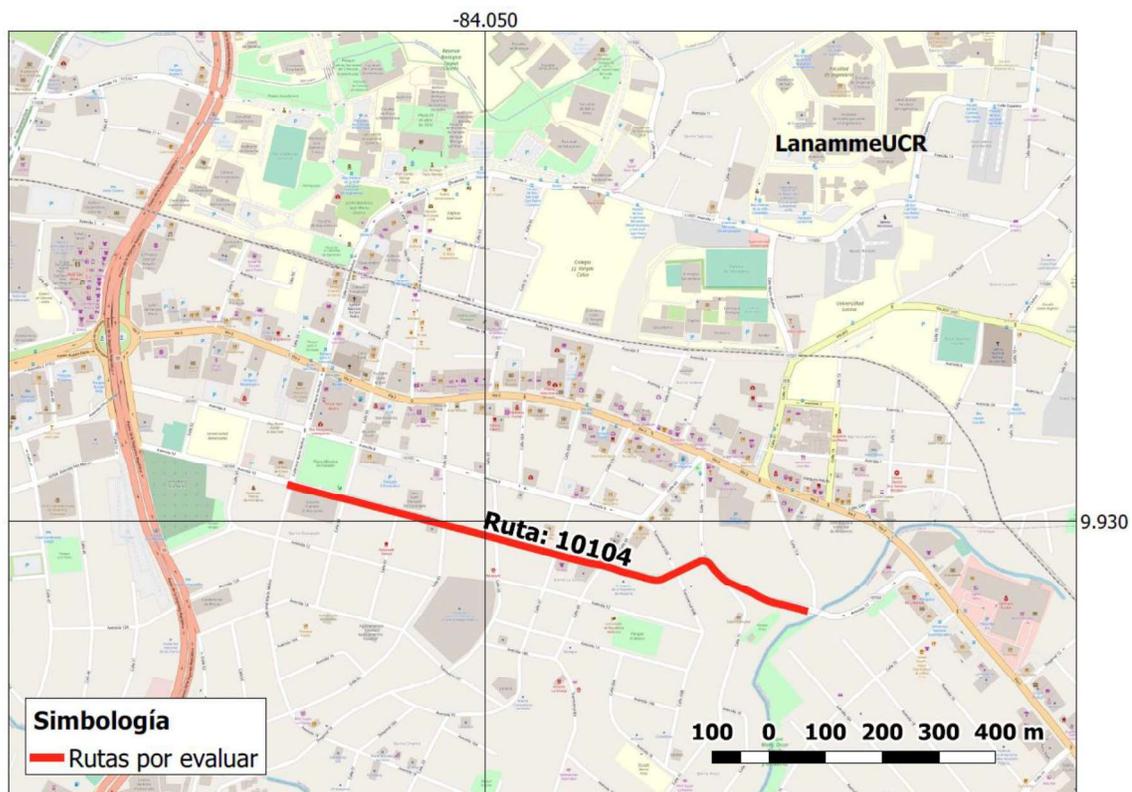


Figura 4. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10104.

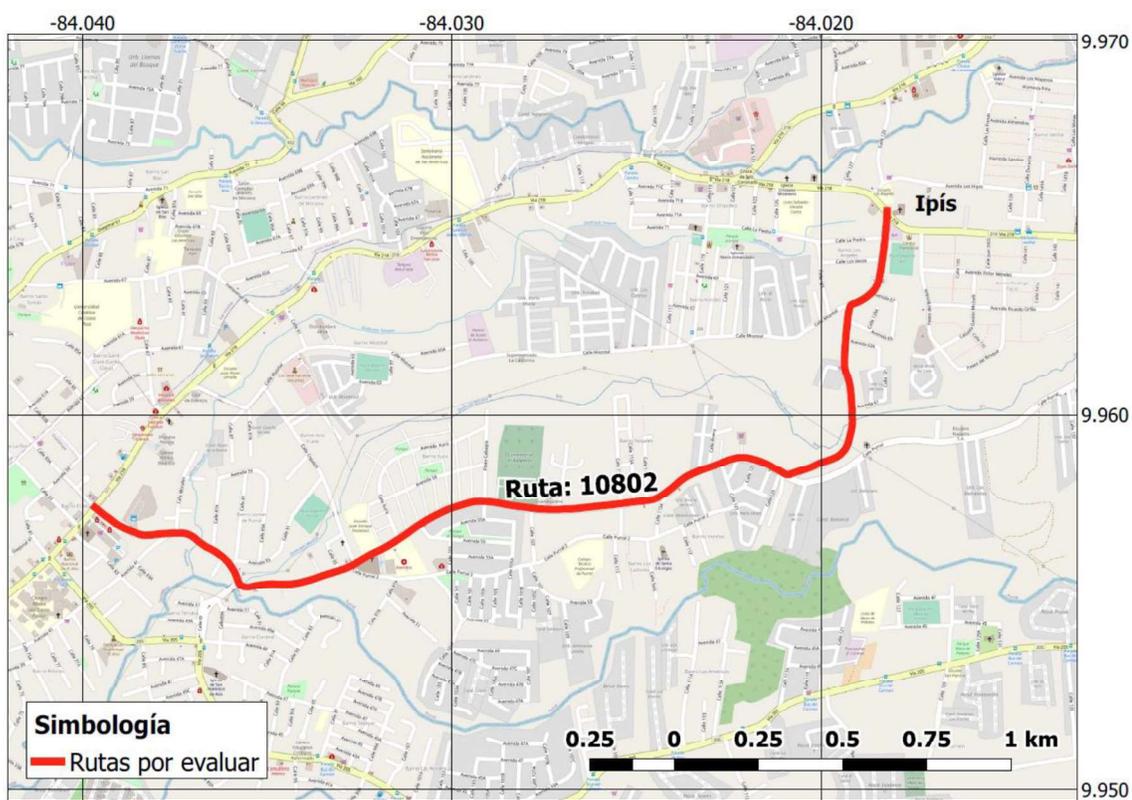


Figura 5. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10802.

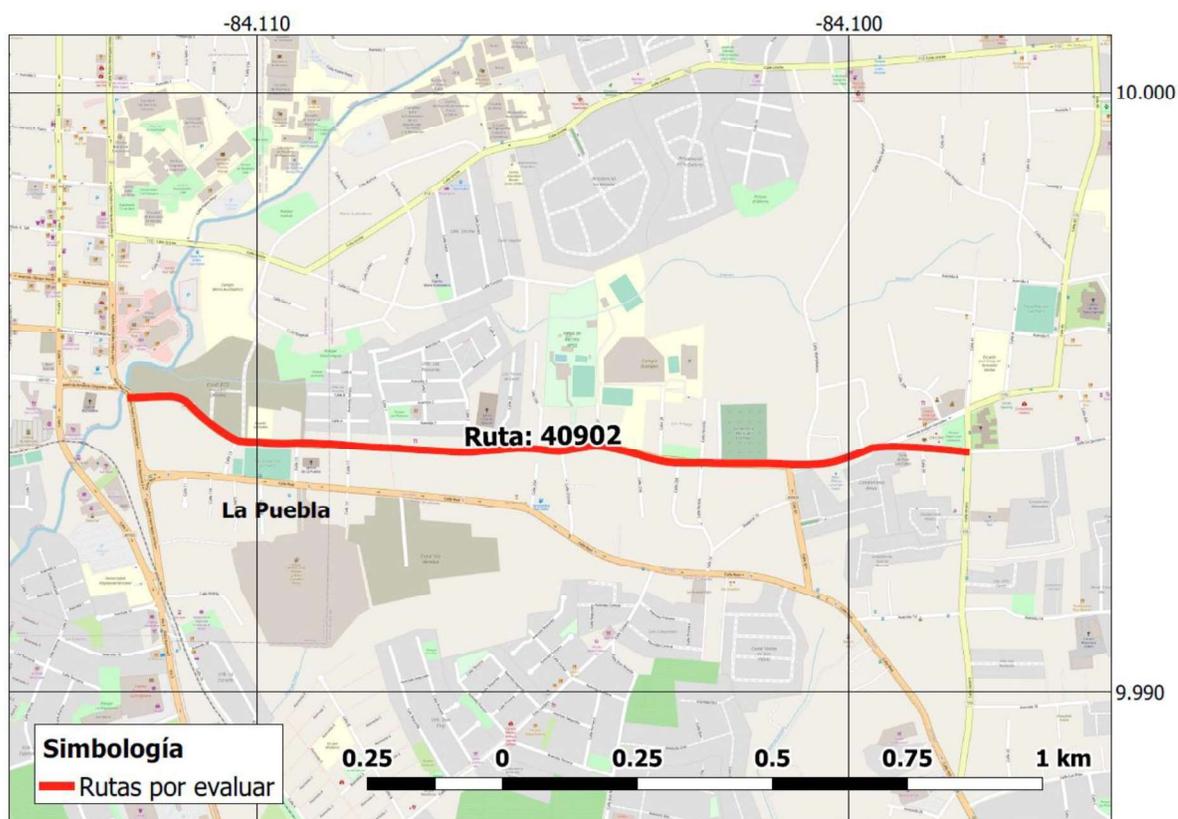


Figura 6. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 40902.

### ***Medición repetida del perfil longitudinal en una ruta urbana:***

Este procedimiento tiene el objetivo de evaluar la evolución de la regularidad superficial de una ruta urbana de travesía con el paso del tiempo y las cargas. Específicamente, en este caso se realizó la medición repetida del perfil longitudinal en la Ruta Nacional de travesía 11505 (ver Cuadro 3), la cual fue atendida en mayo de 2018 mediante las actividades de perfilado y colocación de sobrecapa (ver Figura 7). Adicionalmente, al final del periodo de estudio se caracterizó estructuralmente este tramo con el fin de tratar de establecer relaciones entre la regularidad superficial y la capacidad estructural de la carretera.

Cuadro 3. Historial de mediciones del perfil longitudinal realizadas en la Ruta Nacional de travesía 11505

<b>Laboratorio a cargo de la medición</b>	<b>Número de informe</b>	<b>Fecha de la medición</b>
LanammeUCR	I-1391-18	22/10/2018
LanammeUCR	I-0018-19	17/12/2018
LanammeUCR	I-0207-19	12/2/2019
LanammeUCR	I-1256-19	13/5/2019
LanammeUCR	I-1688-19	19/8/2019
LanammeUCR	I-0146-20	14/2/2020
LanammeUCR	I-0598-20	11/8/2020

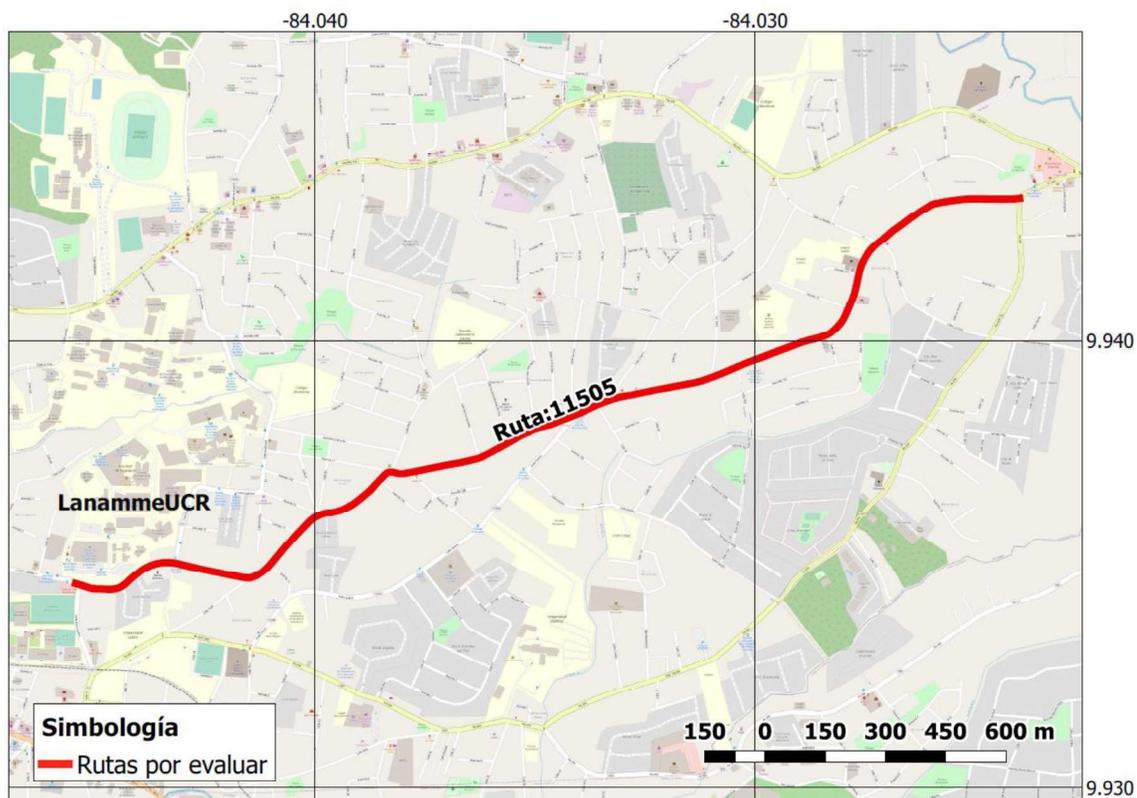


Figura 7. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 11505.

***Medición del perfil longitudinal bajo distintas condiciones de velocidad y aceleración:***



Figura 8. Ubicación del circuito de competencias del parque VIVA.

Esta etapa consiste en medir el perfil longitudinal del circuito de competencias parque VIVA en diferentes tramos, utilizando el perfilómetro inercial del LanammeUCR<sup>3</sup>, y bajo diferentes condiciones de velocidad y aceleración, específicamente se propone la evaluación de las siguientes condiciones<sup>4</sup>:

- a) **Velocidad constante**<sup>5</sup>: a 9 velocidades diferentes (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 km/h) en la recta y curva principal del circuito.
- b) **Sin acelerar ni aplicar el freno del vehículo**: sobre la recta principal del circuito, iniciando a una velocidad de 70 km/h hasta el final de la recta.
- c) **Frenado**: de 70 a 30 km/h aplicando 0,1, 0,2, y 0,3 g de desaceleración y de 50 a 25 km/h aplicando 0,1, 0,2, y 0,3 g de desaceleración. Para lograr estos niveles de aceleración se van a colocar conos a diferentes distancias (según el nivel de aceleración), entre un cono y otro el conductor deberá disminuir la velocidad de manera constante.<sup>6</sup>
- d) **Aceleración**: de 30 a 70 km/h utilizando dos niveles de aceleración "suave" y "fuerte", según el criterio del conductor.
- e) **Frenar – detenerse – acelerar**:
  - Caso 1: iniciando a 50 km/h, frenar a 0,1 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 50 km/h.
  - Caso 2: iniciando a 50 km/h, frenar a 0,2 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 50 km/h.
  - Caso 3: iniciando a 70 km/h, frenar a 0,2 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 70 km/h.
  - Caso 4: iniciando a 70 km/h, frenar a 0,2 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 70 km/h.
- f) **Detenerse y acelerar**: hasta llegar a 70 km/h utilizando dos niveles de aceleración "suave" y "fuerte", según el criterio del conductor.

---

<sup>3</sup> *Dinatest Mark III.*

<sup>4</sup> Tomando como referencia el NHRP 914.

### ***Medición de un perfil longitudinal mediante el uso de distintos perfilómetros láser:***

Esta etapa consiste en realizar una comparación entre los perfiles medidos por diferentes laboratorios de verificación de la calidad que operan en Costa Rica. Las mediciones fueron realizadas a lo largo de la recta y curva principal del circuito de competencias parque VIVA y a 7 velocidades diferentes (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 km/h).

#### *1.4.3. Etapa 3. Análisis de resultados*

### ***Evaluación de la evolución del IRI en la huella***

El objetivo de este procedimiento es analizar las variaciones de regularidad superficial a lo ancho de las huellas de la superficie de ruedo de la carretera. Además, de evaluar el efecto de las tapas de alcantarilla en la regularidad superficial de una vía, tomando como base tres Rutas Nacionales de Travesía (10040, 10802 y 40902) cuyo perfil fue caracterizado mediante un VANT y un perfilómetro inercial.

Para realizar este análisis se hará uso del software ProVAL para procesar los datos obtenidos del perfilómetro inercial y del VANT. Además, las imágenes capturadas por el VANT se procesan previamente mediante el software Agisoft Metashape.

### ***Análisis de la evolución del IRI en una ruta urbana***

Tomando como base las mediciones del perfil longitudinal realizadas sobre la Ruta Nacional de Travesía 11505 entre los años 2018 y 2020, esta etapa consiste en un análisis estadístico y gráfico para evaluar la evolución del IRI en esta ruta posterior a su intervención (en este caso mediante las actividades de perfilado y colocación de sobrecapa). Adicionalmente, mediante el uso del software ProVAL, se tiene considerado la ejecución de un análisis de *PSD* para determinar qué longitudes de onda del perfil longitudinal se ven más afectadas con el paso del tiempo.

Por último, se realiza una evaluación de la capacidad estructural de la carretera con el propósito de determinar si hay alguna correlación entre esta variable y un posible aumento diferencial en la regularidad superficial de la carretera.

### ***Evaluación del efecto de la aceleración y la velocidad***

Esta etapa del análisis consiste en evaluar el efecto de la velocidad y la aceleración en la medición del perfil longitudinal de una carretera. Para esto, se propusieron distintos escenarios de análisis, de acuerdo con la investigación NCHRP 914, con el objetivo de simular diferentes escenarios críticos en la medición del perfil longitudinal y evaluar su efecto en el posterior cálculo del IRI. Dicho análisis se plantea realizar mediante herramientas estadísticas y el uso del software ProVAL.

### ***Evaluación de la variación del IRI calculado a partir de mediciones realizadas con distintos perfilómetros***

En este procedimiento se comparan, por medio de métodos estadísticos y mediante el uso del software ProVAL, las mediciones del perfil longitudinal realizadas bajo diferentes condiciones de velocidad por diferentes laboratorios costarricenses de verificación de la calidad. Esto con el objetivo de evaluar tolerancias y conocer la variabilidad asociada a este método de medición en Costa Rica.

#### 1.4.4. Etapa 4. Elaboración del documento final

Como último paso se establecerán las conclusiones y las recomendaciones pertinentes que resulten del estudio, así como la elaboración del informe final.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Especificaciones de regularidad superficial vigentes en Costa Rica

#### 2.1.1. En proyectos de mantenimiento y rehabilitación

En proyectos de mantenimiento y rehabilitación el IRI es un parámetro de aceptación. De acuerdo con el cartel de licitación pública número 2014LN-000018-0CV00, se cuenta con dos escenarios: el cumplimiento en capas de mezcla asfáltica de sobrecapa y el cumplimiento en capas de mezcla asfáltica colocadas luego de una rehabilitación (que implica generalmente la estabilización de la base en sitio).

En cuanto a la especificación en sobrecapas, esta depende de la regularidad superficial inicial del proyecto (previo a la intervención), según se muestra en el Cuadro 4. Por otro lado, la especificación de regularidad superficial en rehabilitaciones depende del tipo de ruta que se esté atendiendo, como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Especificación de regularidad superficial en sobrecapas

Rango inicial de MRI (m/km)	MRI <sup>7</sup> Final (m/km)
<b>Menor o igual a 2,5</b>	Al menos mantener IRI <sub>inicial</sub>
<b>2,5 &lt; Valor inicial de IRI &lt; 3,6</b>	Reducción del 10%
<b>3,6 ≤ Valor Inicial de IRI ≤ 6,4</b>	Menor o igual a 3,2
<b>Valor inicial de IRI &gt; 6,4</b>	Reducción del 50% y menor o igual a 5,0

Fuente: CONAVI, 2016

Considerando tramos individuales de 100 m.

Cuadro 5. Especificación de regularidad superficial en rehabilitaciones

Clasificación	Valor de MRI máximo (m/km)
<b>Carreteras de la Red Primaria</b>	1,9
<b>Resto de Rutas</b>	2,5

Fuente: CONAVI, 2016

Considerando tramos individuales de 100 m.

#### 2.1.2. En obras nuevas

En obras nuevas, a menos de que el cartel de licitación específico del proyecto tenga una especificación especial, la regularidad superficial de un proyecto de obra nueva debe cumplir con lo señalado en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010). Este manual indica que se deben cumplir los siguientes aspectos:

<sup>7</sup> El MRI corresponde al IRI promedio del IRI bajo las huellas del vehículo.

- Ningún valor individual de MRI (considerando tramos individuales de 100 m) debe ser superior a 3 m/km.
- En autopistas, con tránsitos promedios diarios superiores a 5000, el promedio de diez valores individuales de MRI, calculado a partir de una media móvil no debe ser superior a 2 m/km.
- En el resto de las vías, el promedio de diez valores individuales de MRI, calculado a partir de una media móvil no debe ser superior a 2,5 m/km.

## 2.2. Equipos para la medición del perfil longitudinal (perfilómetros)

Los perfilómetros son instrumentos o procedimientos de ensayo utilizados para reproducir una secuencia de números que se relacionan con el perfil real de una carretera. De modo que, lo que se busca con un perfilómetro es medir los componentes del perfil longitudinal que se requieran para un propósito específico, por ejemplo, para el cálculo del IRI (Sayers y Karamihas, 1998).

Existen diversos equipos que permiten llevar a cabo la medición del perfil longitudinal de una carretera o en general de una superficie, los cuales han evolucionado en el tiempo, variando la precisión, exactitud y complejidad de su uso para la obtención de los resultados (Leiva e Hidalgo, 2014).

Estos equipos se pueden agrupar en cuatro categorías, según la referencia utilizada para determinar el perfil longitudinal. Estas categorías son (Nikolaides, 2014):

### 2.2.1. Equipos para la medición del perfil verdadero

Permiten reproducir las variaciones reales de altura de una carretera, consecuentemente permiten identificar sus irregularidades y el cálculo del IRI. Su funcionamiento se basa en fijar una referencia estática sobre el perfil de la carretera, posteriormente, a lo largo del perfil se miden las diferencias de altura relativas a la referencia estática inicial. Un ejemplo de estos equipos es: el "nivel y mira topográfica" y el "Dipstick".

### 2.2.2. Equipos de referencia móvil (dispositivos rodantes o perfilógrafos)

Estos dispositivos operan a la velocidad de caminado de una persona y cuentan con una rueda sensible que registra las desviaciones verticales de la superficie con respecto al resto del equipo (ver Figura 9).



Figura 9. Perfilógrafo longitudinal tipo California  
Fuente: Dyer, et al. 2009

### 2.2.3. Equipos de tipo respuesta (RTRRMS)

Su funcionamiento se basa en la medición del desplazamiento relativo entre el eje trasero de un vehículo respecto al marco del vehículo. De modo que, estos equipos miden la respuesta del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no son realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie (Leiva e Hidalgo, 2014).

### 2.2.4. Perfilómetros de referencia inercial

Estos equipos, al igual que los RTRRMS operan a la velocidad de ruedo de un vehículo y su funcionamiento basa en la medición continua de la distancia entre un marco de referencia inercial y la superficie de la carretera (mediante un dispositivo de no contacto que por lo general es un láser infrarrojo), de modo que, si se grafican las diferencias de distancia entre el marco de referencia inercial y la carretera a lo largo un tramo recorrido es posible observar y extraer las características que afectan la regularidad de una carretera, siendo posible el cálculo de IRI (ver Figura 10).

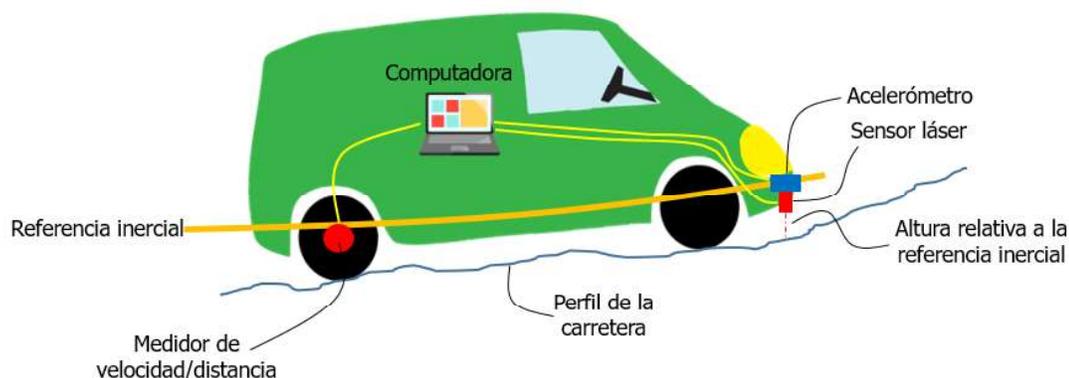


Figura 10. Perfilómetros de referencia inercial

Adicionalmente, para el correcto funcionamiento de un perfilómetro inercial es necesario que este cuente con un medidor de velocidad/distancia, de modo que sea posible graficar las variaciones del perfil con respecto a la longitud recorrida. Además, es necesario que este cuente con un acelerómetro, ya que por inercia el vehículo huésped va a vibrar en función de la velocidad de operación y la calidad de la suspensión del vehículo, así como magnitud de las irregularidades de la carretera. De modo que, es necesario que unido al dispositivo láser haya un acelerómetro que permita determinar la magnitud de estas vibraciones a lo largo del tiempo y que los factores antes mencionados no afecten los resultados del perfil medido.

A continuación, en el Cuadro 6 se resumen las principales características de los equipos mencionados anteriormente:

Cuadro 6. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos

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

Fuente: LanammeUCR, 2015 (Adaptado de Ventura, J.)

### 2.3. Vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Los VANT son otra forma, más reciente, en la que podría determinarse el perfil de una carretera. A diferencia de otras tecnologías desarrolladas anteriormente, los VANT mediante la captura de imágenes traslapadas permiten construir modelos de elevación de terreno a partir de los cuales se puede medir y mapear las características topográficas de un área determinada, incluyendo su elevación, sin limitarse solo a determinar el perfil longitudinal a lo largo de un tramo.

Su funcionamiento se basa en la recolección de imágenes aéreas de un objeto de interés desde diferentes puntos de vista y mediante técnicas de triangulación es posible reconstruir las características geométricas de un área de interés, esta técnica se conoce como fotogrametría (LanammeUCR, 2017)

### 2.4. Procedimiento para el cálculo del IRI

El procedimiento para el cálculo del IRI se puede resumir en los siguientes cuatro pasos:

- Medición del perfil longitudinal mediante alguno de los equipos señalados en el apartado anterior.
- El perfil medido es suavizado mediante un filtro de media móvil.
- Al perfil suavizado se le aplica una simulación de cuarto de carro, con parámetros de calibración específicos.
- Por último, el movimiento de suspensión simulado es linealmente acumulado y dividido por la longitud L para la cual se está calculado el IRI.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos anteriores:

#### 2.4.1. Filtro de media móvil

El filtro de media móvil permite suavizar el perfil longitudinal medido, eliminando longitudes de onda cortas, que pueden verse como asperezas. Lo anterior, con el propósito de representar la forma en la que la llanta de un vehículo cubre la superficie del pavimento.

Esto se puede ejemplificar en la Figura 11, donde se muestra un perfil antes y después de ser procesado mediante un filtro de media móvil. Además, se muestra un neumático con una longitud base de contacto "B". Al comparar esta longitud base con las asperezas del perfil original, es claro que un neumático con una longitud base de contacto "B" no ingresaría en todas estas asperezas, de modo que se hace necesario suavizar el perfil longitudinal para representar de mejor manera el contacto neumático – carretera.

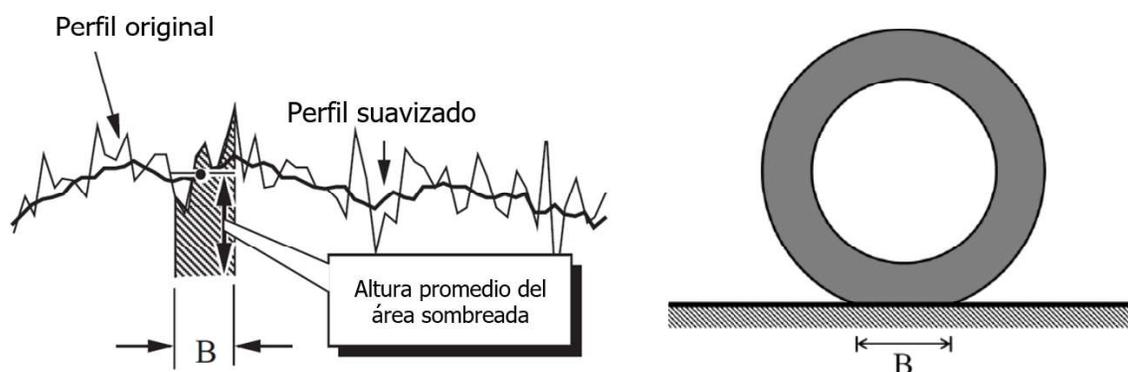


Figura 11. Perfil procesado mediante el filtro de media móvil y neumático con una base de contacto "B"

Fuente: Adaptado de Sayers y Karamihas, 1998

El filtro de media móvil se calcula como se muestra en la siguiente ecuación:

$$h_{ps}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} h_p(j)$$

Ecuación 1

$$k = \max[1, \text{nint}(L_B/\Delta)]$$

Donde:

$h_p$ : elevación del perfil

$h_{ps}$ : elevación del perfil suavizado

max: valor máximo de 2 argumentos

nint: entero más cercano

$L_B$ : longitud base de la media móvil (250 mm)

$\Delta$ : intervalo de muestreo

### 2.4.2. Aplicación de la simulación de cuarto de carro

El filtro de cuarto de carro es un modelo matemático que calcula la deflexión en la suspensión de un sistema mecánico teórico que simula las condiciones de un vehículo que viaja a 80 km/h. Esta suspensión simulada finalmente es acumulada y dividida por la distancia recorrida, para obtener un índice en m/km.

Los atributos de esta suspensión simulada (constantes de los resorte y amortiguador) se respaldan en el NCHRP 228 "Calibration of response-type road roughness measuring systems".

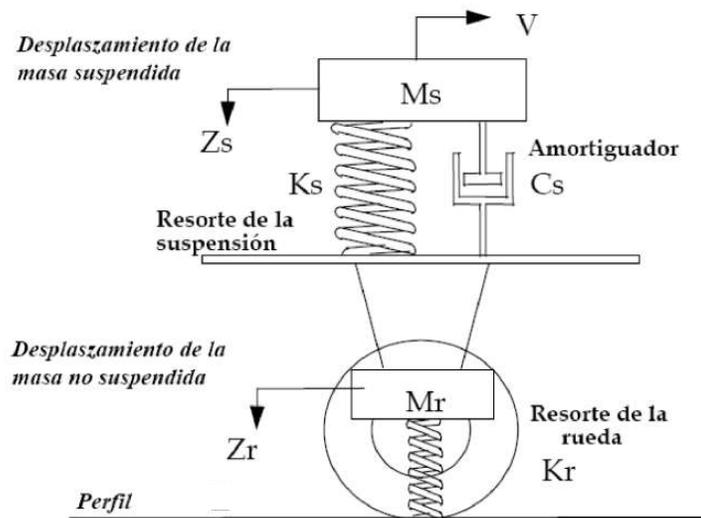


Figura 12. Modelo de cuarto de carro  
Fuente: Leiva e Hidalgo, 2014

El modelo de cuarto de carro está descrito por 4 ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, que pueden ser descritas matricialmente de la siguiente manera:

$$\dot{x} = Ax + Bh_{ps} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 + k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$x = [z_s, \dot{z}_s, z_r, \dot{z}_r]^T \quad \text{Ecuación 4}$$

$$B = [0, 0, 0, k_1/\mu]^T \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$h_{ps}$ : elevación del perfil suavizado

$z_s$ : elevación (coodenada vertical) de la masa suspendida

$z_r$ : elevación (coordenada vertical) de la masa no suspendida

$x$ : matriz de las variables de estado (variables que en conjunto describen completamente el estado del sistema simulado)

$k_r/m_s$ :  $k_1$ ,  $k_s/m_s$ :  $k_2$ ,  $c_s/m_s$ :  $c$ ,  $m_r/m_s$ :  $\mu$

### 2.4.3. Acumulación lineal del sistema de suspensión

Finalmente, el movimiento de suspensión simulado es linealmente acumulado y dividido por la longitud  $L$  para la cual se está calculando el IRI, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_r| dt$$

Ecuación 6

## 2.5. Efecto de las longitudes de onda en el cálculo del IRI

El perfil de una carretera puede ser descompuesto en diferentes funciones sinusoidales, con diferentes amplitudes, fases y longitudes de onda (ver Figura 13).

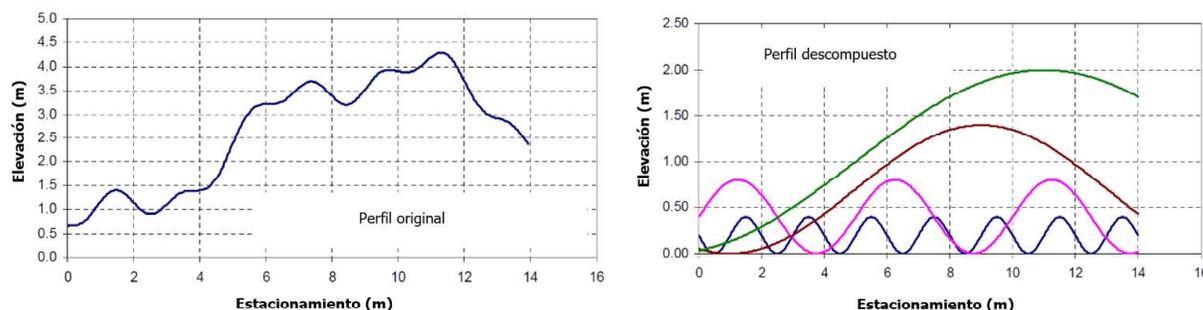


Figura 13. Perfil descompuesto en varias funciones sinusoidales

En este apartado se muestra cómo los diferentes rangos de longitud de onda del perfil de una carretera pueden incidir en el posterior cálculo del IRI. Lo anterior es relevante pues permite entender qué aspectos de la vía, y en qué medida, contribuyen en el aumento de la regularidad superficial de un pavimento.

En términos generales, la regularidad superficial puede ser afectada por longitudes de onda que van desde los 0,3 m hasta los 100 m. Esto se puede ver en la Figura 14, que muestra una gráfica sobre el efecto de la longitud de onda en el cálculo del IRI, de modo que, para una determinada longitud de onda el valor de IRI corresponde a el producto entre el valor

del eje Y obtenido de la Figura 14 por la pendiente del perfil en el punto que se desee calcular el IRI.

Otro aspecto que puede destacarse de la Figura 14 es que el modelo para el cálculo de IRI tiene dos picos para los cuales el efecto de la pendiente tiene una mayor incidencia en el cálculo del IRI, esto ocurre cuando la longitud de onda del perfil o de una de sus funciones constituyentes es de 2,4 m o de 15 m.

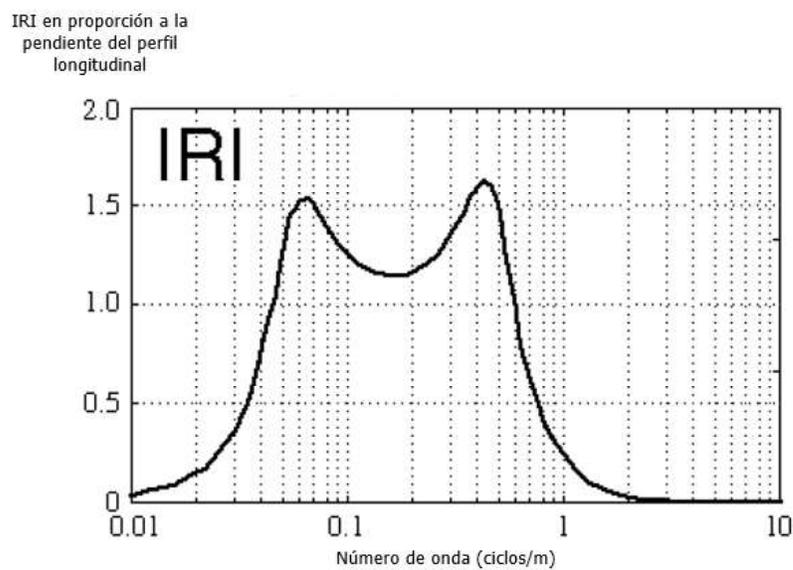


Figura 14. Efecto de la longitud de onda en el cálculo de IRI  
Fuente: Adaptado de Sayers y Karamihas, 1998

## 2.6. Uso de filtros en el análisis del perfil de una carretera

El uso de filtros en el análisis del perfil de una carretera es un proceso que permite eliminar o atenuar la presencia de algunas longitudes de onda. Lo anterior es relevante si se considera que existen longitudes de onda que afectan en mayor o menor medida el cálculo del IRI.

El uso de filtros puede ser útil cuando se comparan visualmente los perfiles generados por diferentes equipos, por ejemplo, en la Figura 15 se muestran tres perfiles medidos sobre un mismo tramo de carretera: un perfil medido con un Dipstick y dos perfiles medidos mediante perfilómetros inerciales.

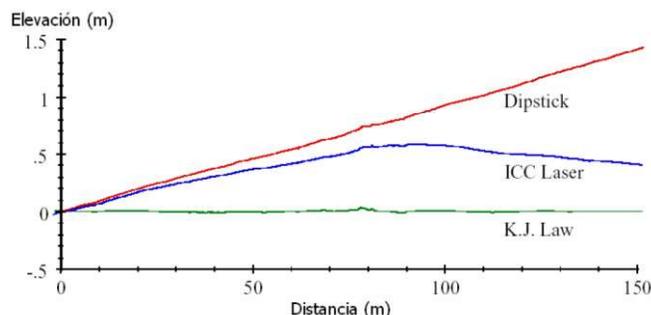


Figura 15. Comparación entre los perfiles medidos entre un Dipstick y dos perfilómetros láser  
Fuente: Adaptado de Sayers y Karamihas, 1998

El perfil medido con Dipstick, al ser un perfil verdadero, permite medir tanto la pendiente real de la carretera (sus cambios de elevación) como las irregularidades que afectan al confort del usuario (IRI). Por otra parte, los perfiles medidos con perfilómetros láser capturan las irregularidades que afectan el posterior cálculo del IRI, sin embargo, no son capaces de mostrar los cambios reales de elevación de una carretera.

Estos cambios reales de elevación no son un aspecto que afecte en mayor medida el cálculo de IRI, pues como se indicó anteriormente, longitudes de onda superiores a los 100 m no afectan en la regularidad superficial de una vía, de modo que, mediante el uso de filtros es posible eliminar las longitudes de onda que superen cierto umbral (estos filtros se conocen como filtros de paso alto).

En la Figura 16 se muestran los perfiles de la Figura 15 luego de haber sido filtrados mediante un filtro de paso alto, eliminando longitudes de onda altas que no afectan la regularidad superficial de la vía y permitiendo observar con mayor detalle dónde se encuentran las irregularidades de la vía, ya que el eje de elevación pasa a tener un rango más pequeño.

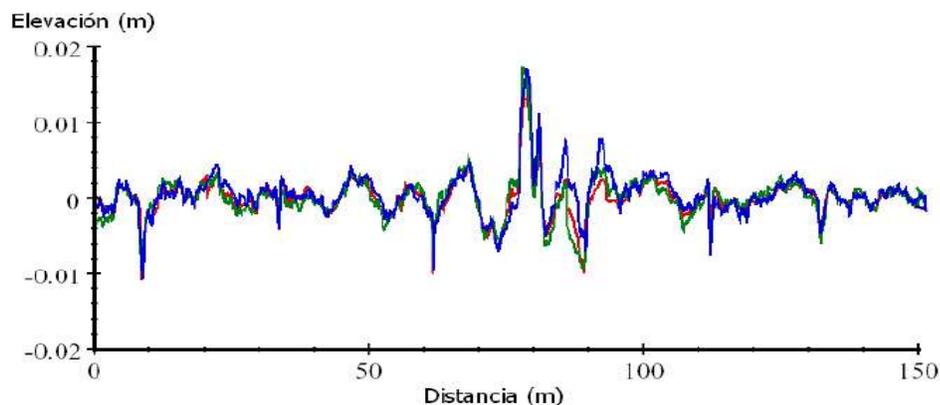


Figura 16. Comparación entre los perfiles medidos entre un Dipstick y dos perfilómetros láser  
Fuente: Adaptado de Sayers y Karamihas, 1998

El tipo de filtro más común utilizado para el cálculo del IRI es el filtro de media móvil que como se indica en el apartado 2.4.1, permite simular el efecto del acople de la llanta de los vehículos con el perfil de la carretera, dicho filtro es considerado como un filtro de paso ya que permite eliminar longitudes de onda inferiores a cierto umbral.

### **Filtros de Butterworth:**

Existen otros tipos de filtros que no necesariamente eliminan todas las longitudes de onda inferiores o superiores a cierto umbral, sino que a partir de cierto umbral atenúan el efecto (la amplitud) de las longitudes de onda hasta que el efecto se vuelve cero. Un ejemplo de esto son los filtros de Butterworth.

Los filtros de Butterworth pueden ser tanto de paso alto, como de paso bajo o incluso una combinación de ambos (denominados filtros de paso de banda), de modo que, con un solo filtro sea posible atenuar el efecto de longitudes de onda altas y bajas al mismo tiempo.

La Figura 17 muestra la función que describe a los filtros de Butterworth, siendo que, el filtro de Butterworth multiplica la amplitud de las longitudes de onda de un perfil por un número entre 0 y 1 según se describe en dicha figura, para los distintos órdenes "n" que pueda tener el filtro, entre más bajo sea el valor "n" más gradualmente se reduce el efecto de las longitudes de onda que se deseen eliminar, por el contrario, entre más alto sea el valor "n" más se parece el filtro de Butterworth a un filtro que elimina de manera drástica las longitudes de onda a partir de cierto umbral.

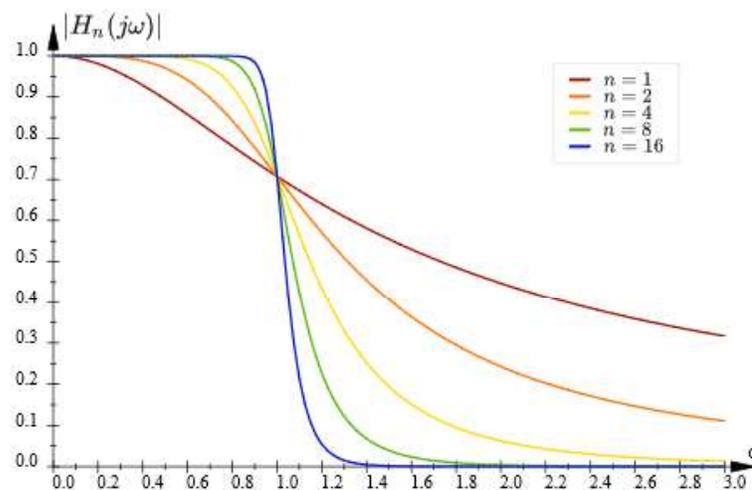


Figura 17. Filtro de Butterworth de paso bajo

### **2.7. Densidad espectral de potencia (PSD)**

La densidad espectral de potencia, *PSD* por sus siglas en inglés, es una función que puede ser empleada para caracterizar el perfil de una carretera. Específicamente, esta función permite tomar un perfil determinado, separarlo en sus diferentes funciones sinusoidales

constituyentes mediante una transformada de Fourier, y posteriormente caracterizar el comportamiento del perfil estudiado en cada una de sus longitudes de onda.

Para ejemplificar esto, en la Figura 18 se muestran dos perfiles procesados mediante *PSD*, señalando en el eje X las diferentes longitudes de onda presentes en estos perfiles y en el eje Y la varianza de la pendiente para cada longitud de onda, mostrándose que el proyecto Chilamate – Vuelta Kooper (proyecto de obra nueva) cuenta con menores variaciones en la pendiente para la mayoría de las longitudes de onda (es decir mejor regularidad superficial), en comparación con el perfil medido en la autopista Florencio del castillo luego de que esta fuera atendida mediante un contrato de mantenimiento, cuyos estándares constructivos y de regularidad superficial por lo general son más bajos a los que se podrían espera en un proyecto de obra nueva.

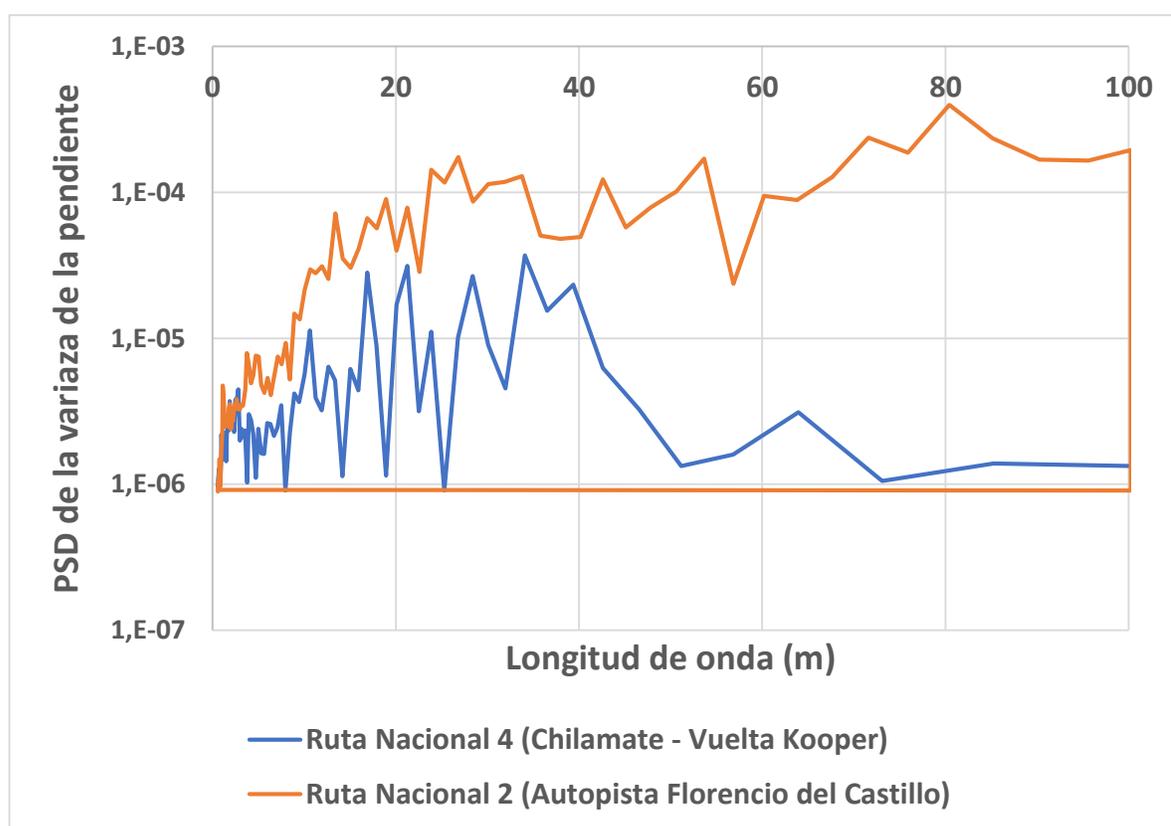


Figura 18. PSD de la pendiente realizado en los proyectos Chilamate – Vuelta Kooper y en la Ruta Nacional 2

Un análisis PSD puede ser relevante debido a que, como se indicó en la Figura 14, existen longitudes de onda para las cuales el efecto de la pendiente tiene una mayor incidencia en el posterior cálculo del IRI.

## 2.8. Evaluación estructural de los pavimentos mediante ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos en la evaluación estructural de los pavimentos consisten en aplicar un golpe a la superficie del pavimento y medir las deflexiones instantáneas en diferentes puntos, deflexiones que posteriormente pueden ser asociadas a una condición estructural.

Uno de los equipos más utilizados para realizar este tipo de ensayos es conocido como *Falling Weight Deflectometer* (FWD por sus siglas en inglés) o simplemente deflectómetro de impacto (ver Figura 19).



Figura 19. Deflectómetro de impacto (FWD) LanammeUCR

El deflectómetro de impacto es un equipo que mide el hundimiento o deflexión instantánea que experimenta el pavimento en varios puntos de su superficie, debido al golpe por caída libre de un peso definido (en este caso de 40 kN o 566 MPa). Esta carga cae sobre un plato de 300 mm de diámetro; las deflexiones obtenidas son registradas por 9 sensores, el primero directamente bajo en el plato de carga, y los demás dispuestos en un arreglo lineal con una distancia máxima de 180 cm, como se muestra en el Cuadro 7. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Con esta disposición es posible relacionar el tamaño de las deflexiones con las características de los materiales que componen el pavimento (LanammeUCR, 2015).

Cuadro 7. Distribución de los sensores en el ensayo de FWD (cm)

Ubicación	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
X	0	20	30	45	60	90	120	150	180
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En cuanto a la frecuencia de medición de este ensayo, se tiene que esta depende del nivel para el cual se esté recabando la información. Según la guía *Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements D 4695-03* de la organización ASTM (*American Standard for Testing Materials*), para una evaluación detallada y específica a nivel de proyecto, la cual se realiza con el propósito de localizar áreas que presenten altas deflexiones, las deflexiones son típicamente medidas con un espaciamiento de 10 m a 100 m. Por lo tanto, de acuerdo con las recomendaciones establecidas en esta guía, en la presente investigación se analizarán datos de FWD registrados a cada 50 m.

Actualmente, existen diversas técnicas para relacionar estas deflexiones con la capacidad estructural de la carretera, las cuales se basan en la teoría del pavimento como una estructura multicapa, cuyo comportamiento sigue la teoría de elasticidad y muestra un patrón semejante al mostrado en la Figura 20.

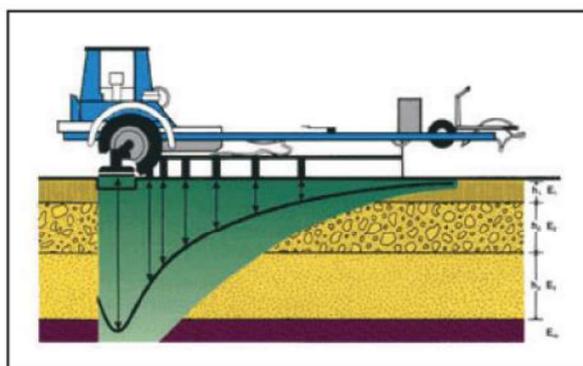


Figura 20. Ilustración curva de deflexiones generada ensayo deflectometría (FWD)

Una de las alternativas para correlacionar estas deflexiones con la capacidad estructural del pavimento, y la que será considerada en la presente investigación, considera el uso de indicadores que categorizan la magnitud de las deflexiones en determinada condición estructural.

A continuación, se detallan los indicadores a considerar:

- **Deflexión máxima (D0):** este parámetro refleja el aporte a nivel de deflexiones de todas las capas del pavimento (Saleh F., 2016), así como la condición de la subrasante (Ullidtz, 1987).
- **Indicador de curvatura superficial (BLI):** este indicador específicamente caracteriza la capacidad estructural tanto de la capa ligada (asfáltica) como de la

capa de base de la estructura de pavimento entre los 0 mm y 300 mm de profundidad (Horak,1987).

$$BLI = d_0 - d_1$$

Donde:

BLI=Indicador de curvatura superficial.

$d_0$ ,  $d_1$ =deflexiones en mm medidas a la distancia 0 y 300 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

- **Indicador de daño base (MLI):** Este indicador caracteriza la rigidez de la parte intermedia o de inflexión de la estructura de pavimento, contenida entre los 300 mm y 600 mm medidos desde el punto de aplicación de la carga, (Horak, 2008) y (Talvik y Aavik, 2009).

$$MLI = d_1 - d_2$$

Donde:

MLI=Indicador de daño base.

$d_1$ ,  $d_2$ =deflexiones en mm medidas a la distancia 300, 600, mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

- **Indicador de curvatura base (LLI):** encargado de presentar la rigidez de la parte inferior del pavimento, específicamente en la subrasante considerando la diferencia de deflexión entre la distancia de 600 mm y 900mm (Horak, 2008), (Talvik y Aavik, 2009) y (Kilareski y Anani, 1982).

$$LLI = d_2 - d_3$$

Donde:

LLI=Indicador de curvatura base.

$d_2$  y  $d_3$ =deflexiones en mm medidas a la distancia 600 y 900mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

A partir de los parámetros descritos anteriormente, Horak (2008) realizó un estudio en el cual se propuso la siguiente clasificación de la condición estructural para pavimentos con base granular:

Cuadro 8. Clasificación de la condición estructural para pavimentos con base granular

	Clasificación de condición estructural	Parámetros del cuenco de deflexión			
		$D_0$ ( $\mu\text{m}$ )	BLI ( $\mu\text{m}$ )	MLI ( $\mu\text{m}$ )	LLI ( $\mu\text{m}$ )
Base granular	Buena	<500	<200	<100	<50
	Regular	500-750	200-400	100-200	50-100
	Severa	>750	>400	>200	>100

Fuente: Horak, 2008

### 3. EVOLUCIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL A LO LARGO DEL TIEMPO

Este capítulo tiene el objetivo de evaluar la evolución de la regularidad superficial de una ruta urbana de travesía con el paso del tiempo y las cargas de tránsito. Específicamente, en este caso se realizó la medición repetida del perfil longitudinal en la Ruta Nacional de travesía 11505 (ver Figura 21), la cual fue atendida en agosto de 2018 mediante las actividades de perfilado y colocación de 8 centímetros de sobrecapa (ver Figura 22).

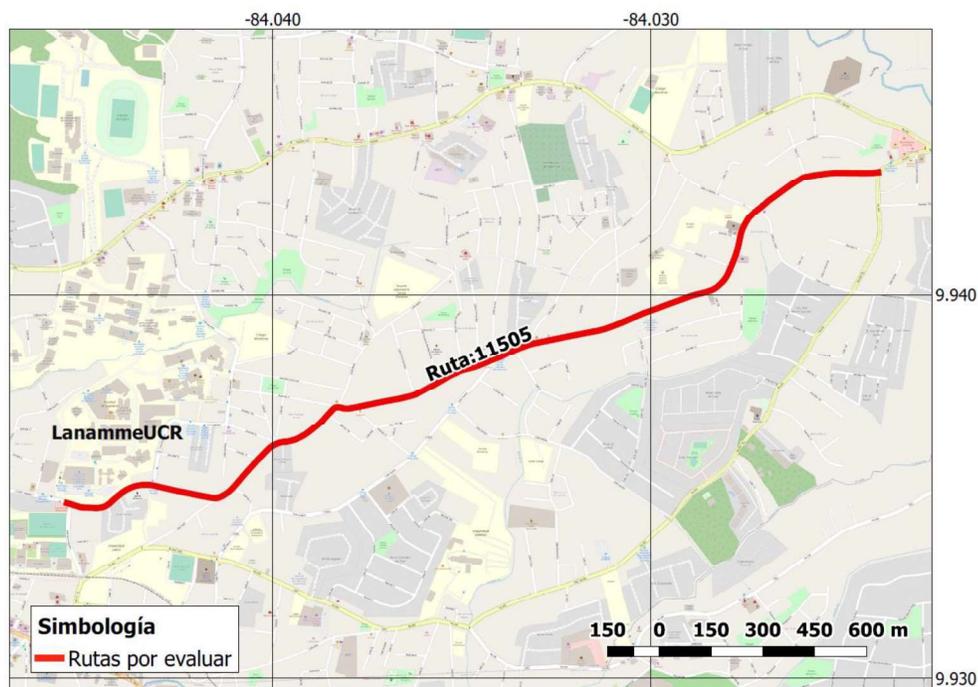


Figura 21. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 11505.



Figura 22. Proceso de colocación de sobrecapa en la Ruta Nacional de travesía 11505, agosto de 2018.

### 3.1. Insumos utilizados

En cuanto a los insumos utilizados se consideró la medición repetida del perfil longitudinal del proyecto (ver Cuadro 9), específicamente se realizaron 7 mediciones distribuidas temporalmente en los primeros dos años de servicio de la carretera luego de haber sido intervenida mediante las actividades de perfilado y sobrecapa. Se realizaron visitas al proyecto, para identificar tramos que no podrían ser considerados en el análisis, por ejemplo: reductores de velocidad, semáforos y puntos donde el perfilómetro no tenía la prioridad de paso en la vía. Por último, en conjunto con la última medición del perfil longitudinal realizada se llevó a cabo una deflectometría de impacto sobre el pavimento, con una frecuencia de 50 m a lo largo del proyecto, para evaluar la capacidad estructural de la carretera luego de 2 años de haber sido atendida.

Cuadro 9. Historial de mediciones del perfil longitudinal realizadas en la Ruta Nacional de travesía 11505.

Laboratorio a cargo de la medición	Número de informe	Fecha de la medición
LanammeUCR	I-1391-18	22/10/2018
LanammeUCR	I-0018-19	17/12/2018
LanammeUCR	I-0207-19	12/2/2019
LanammeUCR	I-1256-19	13/5/2019
LanammeUCR	I-1688-19	19/8/2019
LanammeUCR	I-0146-20	14/2/2020
LanammeUCR	I-0598-20	11/8/2020

### 3.2. Resultados obtenidos

#### 3.2.1. Evaluación cualitativa de la regularidad superficial con el paso del tiempo

Se pudo observar que luego de dos años de operación el carril derecho experimentó un incremento de 0,11 m/km en su MRI promedio a lo largo de todo el tramo, mientras que el carril izquierdo experimentó un incremento de 0,09 m/km. Además, debe mencionarse que no todos los tramos de 100 m evaluados presentaron incrementos en sus valores de MRI luego de transcurridos los dos años, como se muestra en la Figura 23 y Figura 24 que representan una comparación del MRI promedio en tramos de 100 m entre la primera y última medición del perfil longitudinal realizada.

Por otra parte, en la Figura 25 se muestra la evolución entre las diferencias promedio de MRI conforme fueron pasando los meses. A partir de esta gráfica se pudo observar que en los primeros meses el tramo evaluado experimentó una mejora en su regularidad superficial, es decir en los primeros meses se observaron diferencias negativas entre los MRI promedio. Sin embargo, a partir del duodécimo mes la regularidad promedio en tramos de 100 m empezó a desmejorar, observándose diferencias positivas entre los valores de MRI promedio hasta llegar a una diferencia promedio de 0,098 m/km en el mes 24 (dos años después).

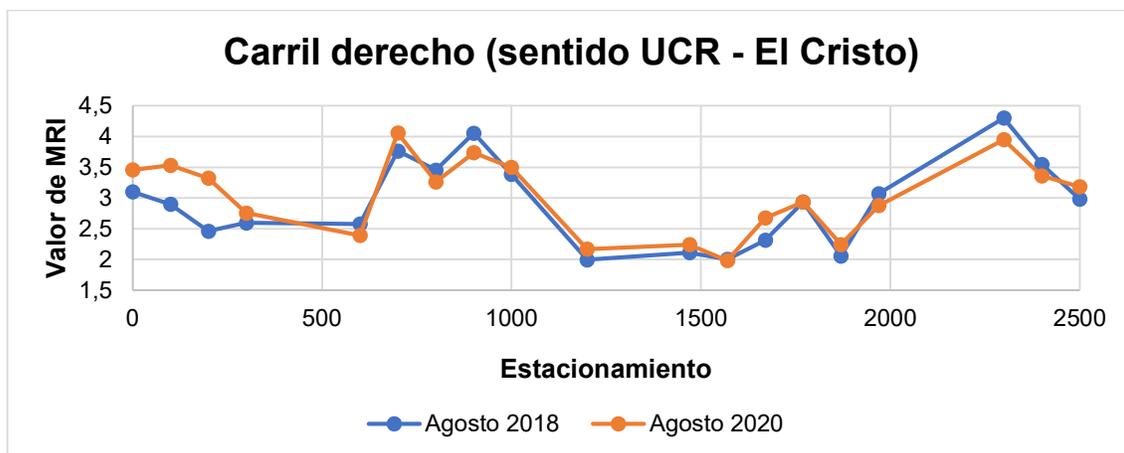


Figura 23. Comparación del MRI promedio en tramos de 100 m entre la primera y última medición realizada (carril derecho).

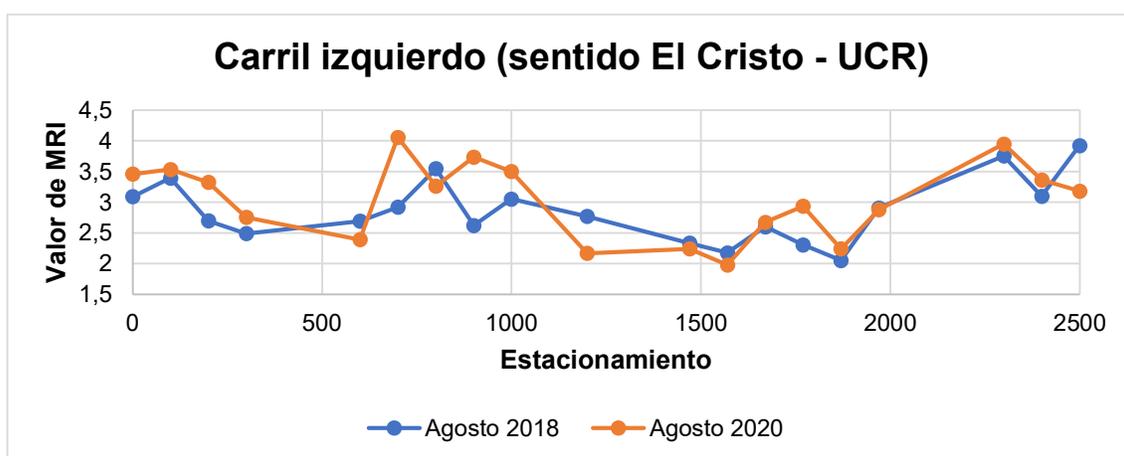


Figura 24. Comparación del MRI promedio en tramos de 100 m entre la primera y última medición realizada (carril izquierdo).

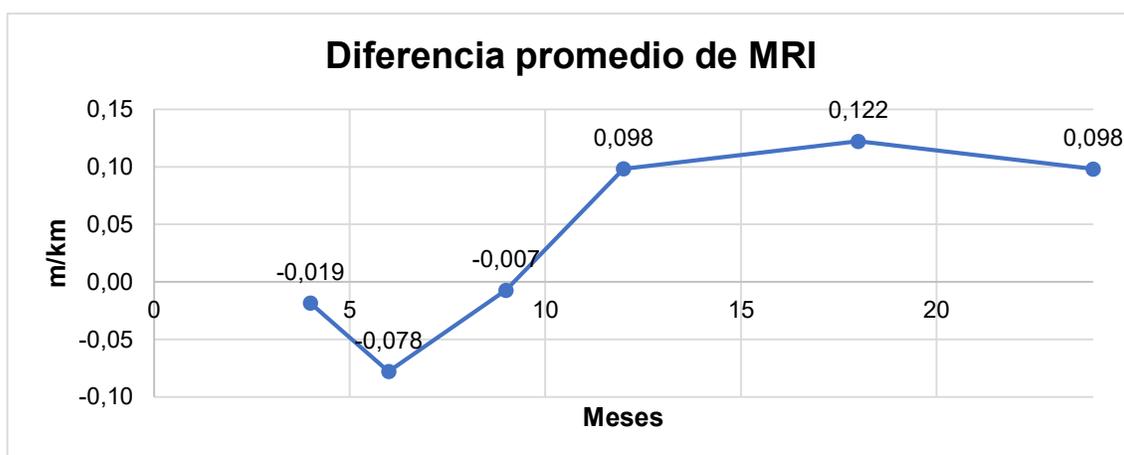


Figura 25. Evolución entre las diferencias promedio de MRI conforme fueron pasando los meses.

### 3.2.2. Evaluación estadística de la regularidad superficial con el paso del tiempo

Para evaluar la evolución de la regularidad superficial con el paso del tiempo se procedió a realizar un análisis ANOVA con el objetivo de determinar en qué momento después de la construcción de la sobrecapa el IRI se vuelve significativamente distinto.

#### a) Resultados del análisis ANOVA:

El análisis de varianza considera la siguiente hipótesis nula:

$H_0: \overline{X}_{t1} = \dots = \overline{X}_{t7}$ , donde  $\overline{X}_{t1}$  es la regularidad promedio asociada a la primer medición del perfil longitudinal realizada y  $\overline{X}_{t7}$  corresponde a la regularidad promedio asociada a la última medición del perfil longitudinal realizada.

La idea de este análisis es evaluar si la regularidad promedio es igual en todo momento sin importar la fecha de la medición. Al realizar el análisis ANOVA se obtuvo un valor F de 0,65, menor al valor crítico de F para un 95% de significancia (ver Cuadro 10). Por lo tanto, de acuerdo con este análisis no es posible rechazar la hipótesis nula, es decir no se puede concluir que la regularidad superficial promedio se vio afectada en el tiempo.

Cuadro 10. Análisis de varianza para comparar los valores de IRI calculados en distintos momentos

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1,30	6	0,22	0,65	0,69	2,13 > 0,65 (no se puede rechazar la hipótesis nula)
Dentro de los grupos	86,43	259	0,33			
Total	87,73	265				

### 3.2.3. Comparación entre la capacidad estructural y la "pérdida de regularidad superficial"

En este apartado se compara la capacidad estructural del pavimento, medida el 23 de noviembre de 2020 mediante el ensayo FWD, respecto a la pérdida de regularidad superficial. Esto es, la diferencia entre los valores de MRI registrados en la primera medición y los valores de MRI registrados en la última medición del perfil longitudinal realizada (dos años después).

#### a) Caracterización estructural del pavimento:

Para llevar a cabo la caracterización estructural del se consideraron los parámetros del cuenco de deflexión y la categorización de las deflexiones mostrada en el Cuadro 11, y detallada en el apartado "[Evaluación estructural de los pavimentos mediante ensayos no destructivos](#)", donde:

- El parámetro D<sub>0</sub> es representativo de la condición estructural de todas las capas del pavimento.
- El parámetro BLI es representativo de la condición estructural del pavimento entre 0 y 300 mm de profundidad, es decir principalmente la capa de mezcla asfáltica y la base del pavimento.
- El parámetro MLI es representativo de la condición estructural del pavimento entre 300 y 600 mm, es decir principalmente la capa de subbase.
- El parámetro LLI es representativo de la condición estructural del pavimento entre 600 y 900 mm, es decir principalmente de la subrasante.

Cuadro 11. Clasificación de la condición estructural para pavimentos con base granular

	Clasificación de condición estructural	Parámetros del cuenco de deflexión			
		D <sub>0</sub>	BLI	MLI	LLI
		(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Base granular	Buena	<500	<200	<100	<50
	Regular	500-750	200-400	100-200	50-100
	Severa	>750	>400	>200	>100

Fuente: Horak, 2008

A continuación, en las Figuras 26, 27, 28 y 29 se ilustra la categorización de los parámetros D<sub>0</sub>, BLI, MLI y LLI a lo largo del tramo evaluado.



Figura 26. Categorización del parámetro D0 en el proyecto



Figura 27. Categorización del parámetro BLI en el proyecto

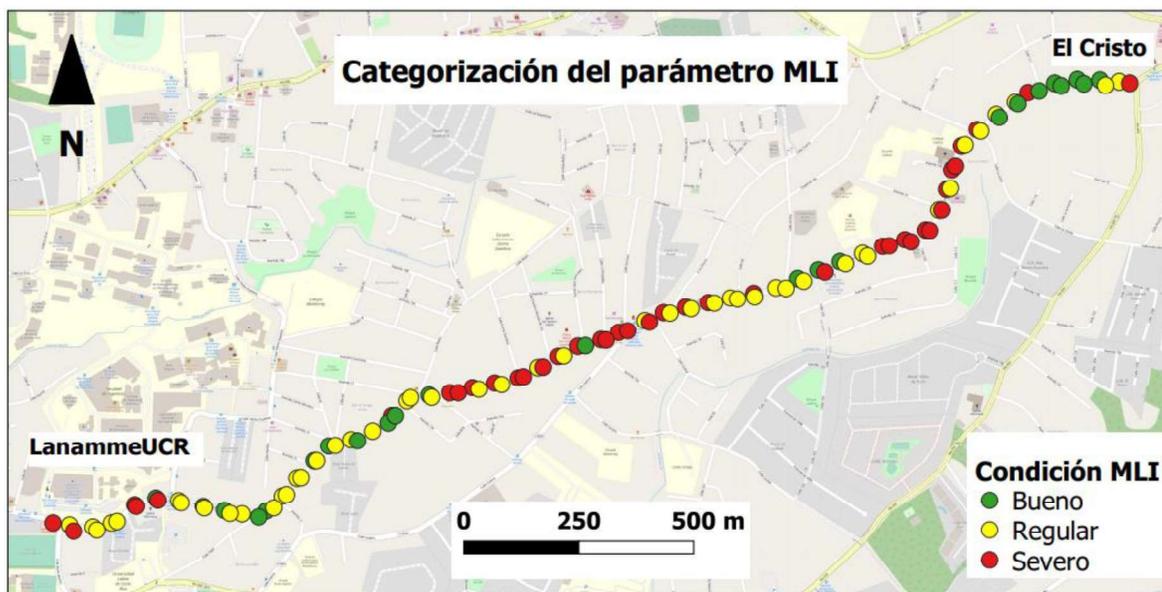


Figura 28. Categorización del parámetro MLI en el proyecto



Figura 29. Categorización del parámetro LLI en el proyecto

En términos generales, al final del periodo de estudio, se determinó que solo un 28 % del tramo evaluado se encontraba en una condición estructural buena, mientras que un 42 % de la superficie se encontraba en una condición severa.

De todos los indicadores considerados el parámetro BLI, que evalúa los primeros 30 cm del pavimento, fue el que mostró una mejor condición estructural. Este resultado se respalda con el hecho de que la intervención realizada en este tramo fue una sobrecapa de 8 cm, por lo tanto, la intervención realizada se refleja en este parámetro.

En cuanto a los parámetros MLI y LLI, se observó que el parámetro LLI, representativo de la subrasante fue el que presentó la peor condición estructural, con un 74% del tramo en condición severa (ver Figura 30).

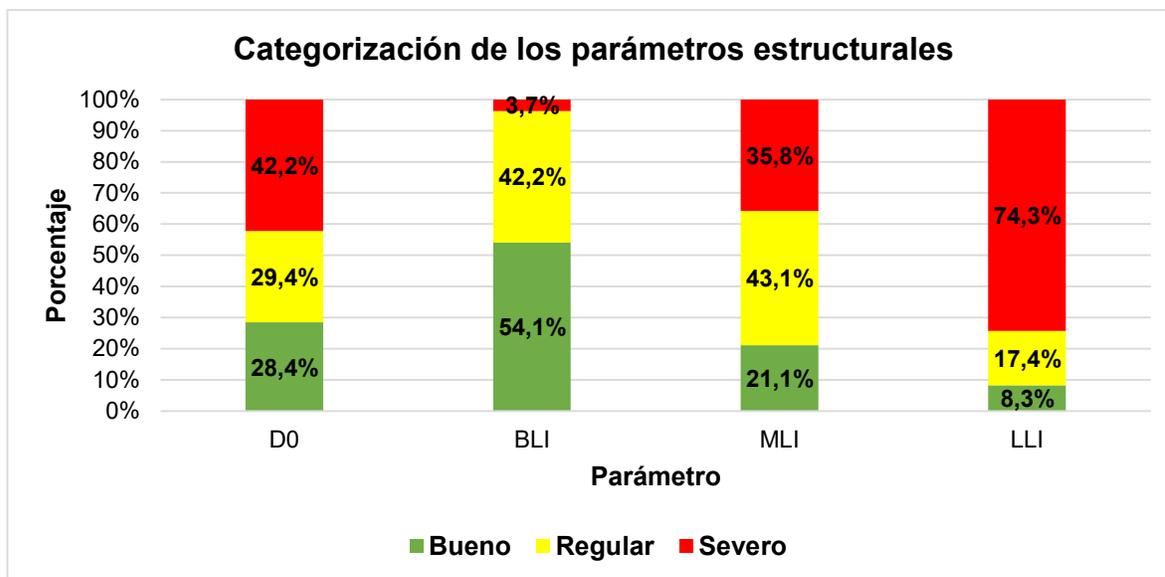


Figura 30. Categorización estructural del proyecto, según la medición de FWD realizada el 23 de noviembre de 2020

b) Comparación entre la condición estructural y la pérdida de regularidad superficial.

Para llevar a cabo esta comparación se realizaron tres procedimientos:

- En primer lugar, se ordenaron de manera descendente los valores de los parámetros estructurales del proyecto. Considerando este orden, se determinó el promedio correspondiente a cada uno de los deciles de los parámetros D0, BLI, MLI y LLI (ver Cuadro 12). Además, cada uno de estos promedios se clasificó por color según el grado de severidad respecto a la condición estructural.

Cuadro 12. Promedio correspondiente a cada uno de los deciles de los parámetros DO, BLI, MLI y LLI.

Decil	D0	BLI	MLI	LLI
1	1080.99	350.61	284.35	221.65
2	954.37	289.99	239.29	188.34
3	828.40	254.93	208.07	164.07
4	730.00	229.38	184.71	142.98
5	655.75	198.87	163.54	130.81
6	610.82	176.76	147.90	122.33
7	550.61	154.33	128.29	116.14
8	503.45	130.68	115.75	102.57
9	390.69	104.04	83.16	79.94
10	230.88	46.92	34.50	43.05

- En segundo lugar (ver Cuadro 13), se determinó el diferencial de regularidad superficial promedio correspondiente a cada uno de los deciles del Cuadro 12, donde valores positivos significan un incremento en los valores de MRI. Lo anterior, con el objetivo de determinar si existió alguna relación entre la capacidad estructural del tramo evaluado y su pérdida de regularidad superficial.

Al respecto, se pudo observar que los deciles 1 y 2 (asociados a las condiciones estructurales más críticas) fueron los que presentaron una mayor pérdida de regularidad superficial promedio, mientras que el decil 10 (asociado a los tramos que contaban con las mejores condiciones estructurales) fue el que presentó la menor pérdida de regularidad superficial, incluso se evidenció en promedio una leve mejoría en cuanto a la regularidad superficial.

Cuadro 13. Diferencial de regularidad superficial promedio correspondiente a cada uno de los deciles.

Decil	D0	BLI	MLI	LLI	Promedio
1	0.31	0.47	0.41	0.33	0.38
2	0.34	0.17	0.26	0.14	0.23
3	-0.09	0.04	-0.20	-0.18	-0.11
4	0.03	0.11	0.06	0.08	0.07
5	0.09	-0.05	0.06	0.22	0.08
6	0.09	0.01	0.12	0.15	0.09
7	0.16	0.07	0.16	0.15	0.14
8	0.16	0.25	0.15	0.27	0.21
9	0.14	0.06	0.17	0.07	0.11
10	-0.17	-0.15	-0.13	-0.17	-0.16

- Como tercer y último punto, se determinaron los coeficientes de correlación entre la pérdida de regularidad superficial y los parámetros D0, BLI, MLI y LLI; tanto para la totalidad de los datos como para los datos correspondientes solo al primer y último decil (ver Cuadro 14).

Cuadro 14. Coeficientes de correlación entre la pérdida de regularidad superficial y los parámetros D0, BLI, MLI y LLI

Parámetro	Coeficientes de correlación		
	Todos los datos	Primer decil	Último decil
D0 ( $\mu\text{m}$ )	0.20	0.46	-0.12
BLI ( $\mu\text{m}$ )	0.23	0.53	-0.32
MLI (m)	0.21	0.71	-0.25
LLI ( $\mu\text{m}$ )	0.17	0.01	0.04

En este punto se observó que, al considerar todos los datos, los coeficientes de correlación obtenidos para cada uno de los parámetros estructurales son muy similares y con valores relativamente bajos que oscilan entre 0,20 y 0,23.

Por otra parte, al considerar solo los datos correspondientes al primer decil de datos, es decir el decil que presentó los valores más críticos de capacidad estructural, se observaron los valores más altos de correlación entre la capacidad estructural y la pérdida de regularidad superficial, siendo que, en este caso el parámetro MLI fue el que presentó una mayor correlación con la pérdida de regularidad superficial (coeficiente de 0,71) y el parámetro LLI no presentó correlación alguna con respecto a la pérdida de regularidad superficial.

Por último, al considerar solo los datos correspondientes al último decil de datos, es decir el decil que presentó los valores menos críticos de capacidad estructural, se observaron coeficientes de correlación negativos (asociados a una mejoría en la regularidad superficial). Además, al igual que en el caso anterior, el parámetro LLI no presentó correlación alguna con respecto a la pérdida de regularidad superficial.

#### *3.2.4. Análisis de los perfiles longitudinales de la carretera*

Este análisis consiste comparar el perfil longitudinal del tramo evaluado al inicio y al final del periodo de estudio (dos años después), con el objetivo de observar las variaciones que experimentan las distintas longitudes de onda del perfil en un periodo de dos años luego de que la carretera fuera intervenida mediante el perfilado y la colocación de 8 cm de sobrecapa.

Para llevar a cabo esta comparación se procesó, mediante un análisis PSD, los datos del perfil longitudinal medidos al inicio y al final del periodo de estudio. Posteriormente, se calculó la razón entre los resultados de los análisis PSD realizados, específicamente se tomó el análisis PSD correspondiente a la última medición del perfil longitudinal realizada y se dividió entre los valores del análisis PSD correspondientes a la primera medición de perfil longitudinal realizada. Los resultados de este procedimiento se muestran en la Figura 31 y Figura 32, para los sentidos UCR – El Cristo y El Cristo – UCR respectivamente.

Valores superiores a 1 en la razón de PSD de la varianza de la pendiente significan que, al cabo de dos años, es decir luego de transcurrido el periodo de estudio, el perfil longitudinal de la carretera presentó una mayor variación en una determinada longitud de onda. De modo que, las longitudes de onda que presenten una mayor variación al cabo de dos años representaron un aporte en el incremento del MRI del pavimento.

Como resultado del estudio se observó que, para las longitudes de onda entre 0 y 3 m la razón del PSD de la varianza de la pendiente siempre era superior a 1. Por otra parte, para longitudes de onda mayores a 3 m la tendencia no era clara. Lo anterior, significa que las longitudes de onda entre 0 y 3 m en todos los casos representaron un aporte al incremento del MRI del proyecto luego de transcurridos los dos años del periodo de estudio.

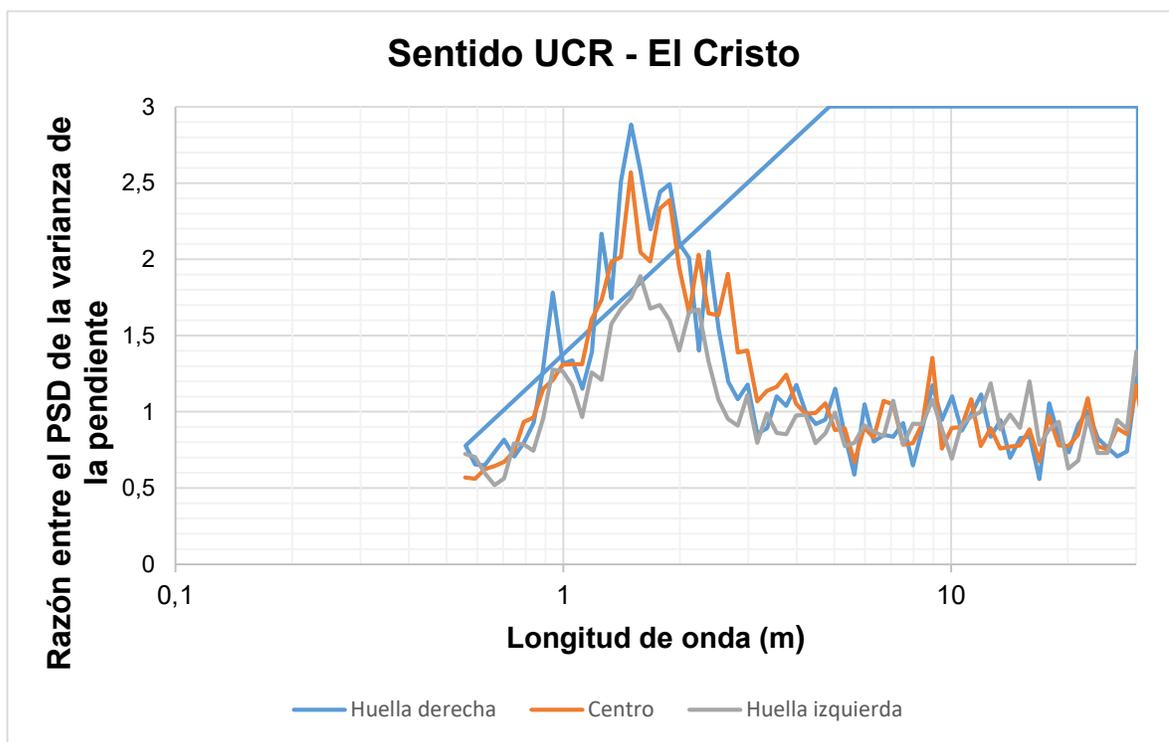


Figura 31. Razón entre el PSD de la varianza de la pendiente, sentido UCR – El Cristo

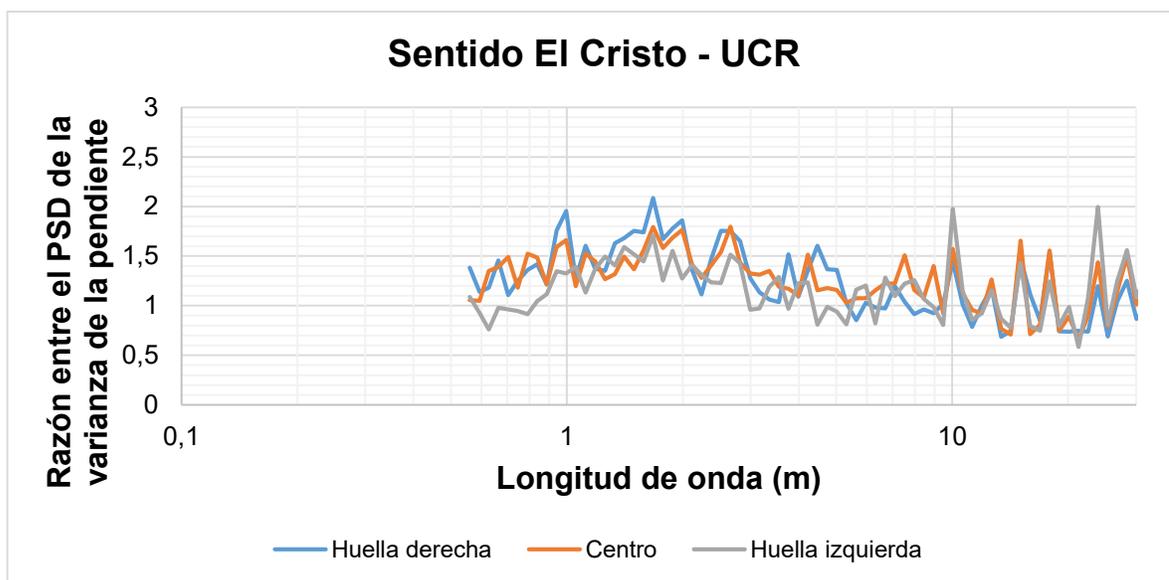


Figura 32. Razón entre el PSD de la varianza de la pendiente, sentido El Cristo - UCR

### 3.3. Análisis de resultados

En términos generales se observó que, luego del periodo de estudio, la regularidad superficial del pavimento evaluado presentó una desmejora que se reflejó en un incremento de 0,1 m/km en el MRI promedio del proyecto.

Se observó que a partir del duodécimo mes la regularidad superficial del proyecto empezó a ser superior a la regularidad superficial medida justo después de colocada la sobrecapa, sin embargo, no se pudo determinar estadísticamente que al cabo de dos años la regularidad superficial incrementó significativamente. Este dato debe ser interpretado cuidadosamente, ya que el proyecto evaluado se trató de una sobrecapa donde el 42 % del proyecto se encontraba en una condición estructural severa<sup>8</sup>. Por lo tanto, se considera que los resultados obtenidos sobre la evolución de la regularidad superficial son conservadores respecto a lo que se podría esperar en un proyecto de rehabilitación mayor que implique la atención del pavimento desde capas granulares.

Se observó que la regularidad superficial está relacionada con la capacidad estructural del pavimento. Específicamente los tramos más débiles y más fuertes del pavimento presentaron una mayor correlación con respecto a la evolución de la regularidad superficial con el paso del tiempo, siendo que, los tramos más débiles presentaron un incremento promedio de la regularidad superficial de 0,38 m/km, mientras que los tramos estructuralmente más robustos presentaron una mejora promedio en la regularidad superficial de 0,16 m/km (se observó una disminución promedio en el parámetro MRI).

En cuanto a los parámetros estructurales evaluados se observó que los coeficientes BLI y MLI fueron los que presentaron una mayor correlación con el avance de la regularidad superficial del pavimento. En otras palabras, se observó que la evolución de la regularidad superficial estuvo más relacionada con la capacidad estructural de las capas del pavimento ubicadas entre 0 y 60 cm de profundidad. Por otra parte, la correlación entre el coeficiente LLI y el avance de la regularidad superficial fue prácticamente nula, de modo que, la capacidad estructural de las capas de 60 o más centímetros de profundidad no influyeron significativamente en el avance de la regularidad superficial del pavimento.

Por último, en relación con el análisis PSD realizado se observó que, la varianza de la pendiente asociada a longitudes de onda entre 0 y 3 m aumentó tras el periodo de estudio. Por otra parte, la varianza de la pendiente asociada a longitudes de onda superiores a los 3 m en algunos casos aumentó y en otros disminuyó, tras concluido el periodo de estudio.

Lo anterior significa que, luego de transcurrido el periodo de estudio, se pudo determinar que algunas longitudes de onda superiores a los 3 m representaron un aumento en la irregularidad superficial del proyecto, mientras que otras longitudes de onda favorecieron en la disminución del parámetro MRI. No obstante, todas las longitudes de onda inferiores a 3 m presentaron afectaciones que se traducen en incrementos al parámetro MRI (es decir favorecen la irregularidad superficial del proyecto), dicha situación se puede explicar por el

---

<sup>8</sup> Al final del periodo de estudio.

hecho de que la mayoría de los deterioros y deformaciones producto del tránsito vehicular se ubican en este rango de longitudes de onda (entre 0 y 3 m), por ejemplo, la aparición de baches, hundimientos y agrietamientos.

Por otra parte, las longitudes de onda superiores no muestran una tendencia respecto a si benefician o no la regularidad superficial del proyecto luego de transcurrido el periodo de estudio pues dichas longitudes de onda obedecen más a la topografía y alineamiento geométrico de la carretera, el cual debería permanecer relativamente constante con el paso del tiempo.

#### 4. INTERLABORATORIAL

En este capítulo se evalúa la variación del IRI calculado a partir de mediciones del perfil longitudinal realizadas por distintos perfilómetros y operarios, con el objetivo de que se tenga una referencia a nivel nacional sobre qué tan variable pueden ser los datos de IRI obtenidos a partir de los distintos laboratorios encargados de realizar la verificación de calidad de obras viales en Costa Rica.

Para llevar a cabo esta parte del estudio se realizó un interlaboratorial donde se contó con la participación de cuatro laboratorios de verificación de la calidad, además de la participación del LanammeUCR que aportó dos perfilómetros inerciales para el estudio. En el Cuadro 15 se muestra un detalle de los equipos utilizados para llevar a cabo el interlaboratorial.

Cuadro 15. Detalle de los equipos utilizados para llevar a cabo el interlaboratorial.

Laboratorio	Perfilómetro	Vehículo	Año del vehículo	Transmisión
LanammeUCR	Dinatest, Mark III	Dodge, RAM	2014	Automático
LanammeUCR	Dinatest, Mark IV	Mercedez Benz, Metris	2019	Automático
OJM	Pavetester PavePro2	Toyota, Hilux	2013	Manual
VIETO	CS 9300	Nissan, Frontier	2017	Manual
LGC	RTP 300 Topcon	Toyota, Hilux	2013	Automático
CACISA	Dinatest, Mark IV	Mitsubishi, L200	2012	Manual



Figura 33. Perfilómetros utilizados para llevar a cabo el estudio

Es importante mencionar que a cada laboratorio se le solicitó que realizara las mediciones del perfil utilizando los mismos parámetros y procedimientos con que evalúan los proyectos viales en Costa Rica. Al respecto, se observó que todos los laboratorios realizaron las mediciones del perfil longitudinal con un intervalo de muestreo de 250 mm (porque así lo señalaba la normativa técnica nacional), pese a que lo ideal en términos de exactitud es que dicho intervalo de muestreo sea cercano a 25 mm. Además, se observó que uno de los laboratorios (OJM) solo contaba con un láser, por lo tanto, dicho laboratorio tuvo que realizar el doble de pasadas para poder registrar la variación del perfil longitudinal en ambas huellas.

Específicamente, se realizaron mediciones repetidas del perfil longitudinal sobre un tramo del circuito de competencias del Parque VIVA ubicado en la Guácima, Alajuela (ver Figura 34).

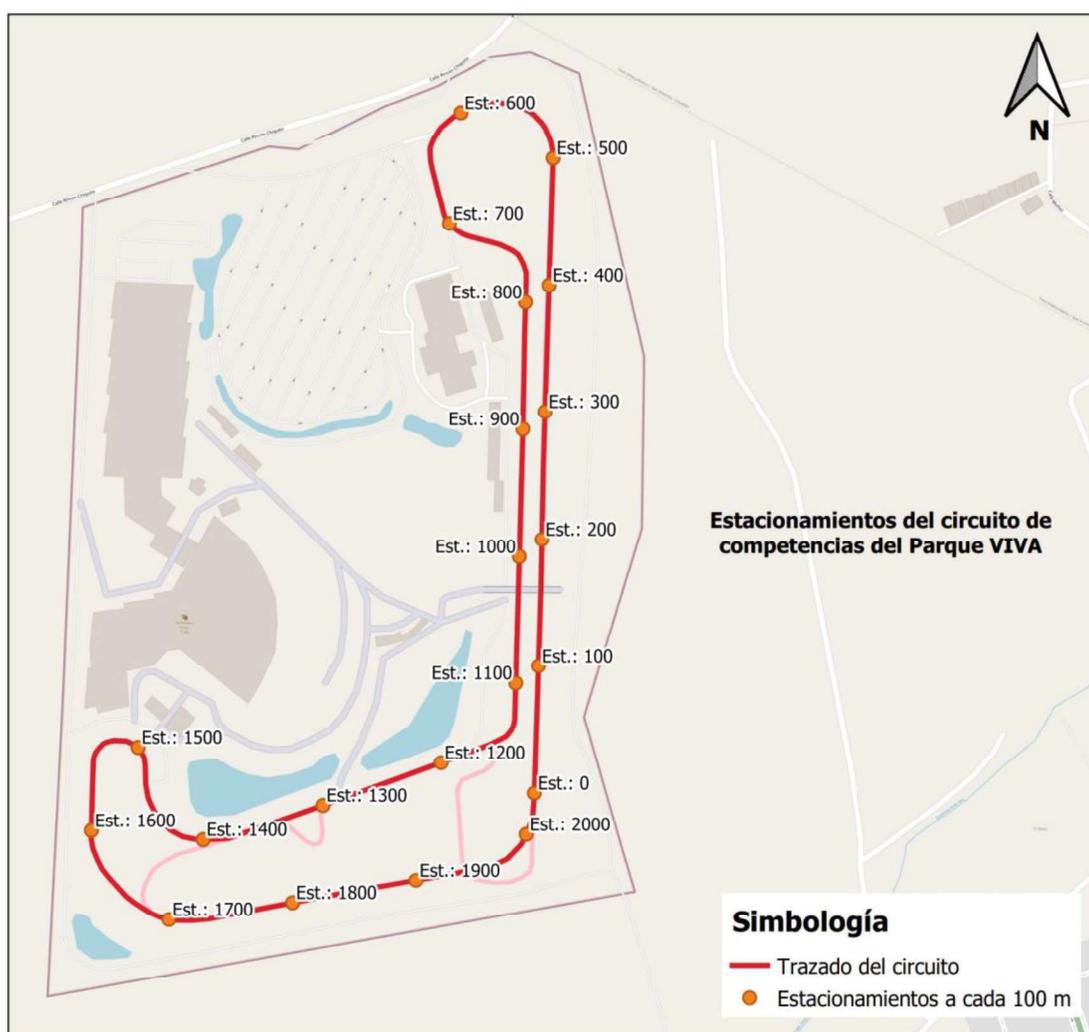


Figura 34. Estacionamientos del circuito de competencias del parque VIVA

#### 4.1. Condiciones específicas del estudio:

Para llevar a cabo el interlaboratorial se realizaron mediciones del perfil longitudinal a distintas velocidades constantes en un tramo de 800 m del circuito de competencias del Parque VIVA (ver Cuadro 16), que en total tiene una longitud aproximada de 2 km. Se tomó la decisión de evaluar principalmente el carril interno ubicado entre los estacionamientos 0 y 800 del circuito porque en una evaluación preliminar realizada se observó que dicho tramo era el que contaba con las mejores condiciones de regularidad superficial (menores valores de IRI), además de que en este tramo se cuenta con un tramo recto (entre los estacionamientos 0 y 500) y un tramo en curva (entre los estacionamientos (500 y 800)). Lo anterior, permitió establecer dos escenarios de análisis donde lo que se buscó fue determinar si la repetibilidad en las mediciones del perfil longitudinal se puede ver afectada por la presencia de curvas horizontales.

Cuadro 16. Mediciones del perfil longitudinal realizadas en el circuito de competencias del Parque VIVA.

Velocidad (km/h)	Repeticiones	Rango evaluado
10	2	0 a 800 m
20	2	0 a 800 m
30	2	0 a 800 m
40	2	0 a 800 m
50	2	0 a 800 m
60	3	0 a 800 m
70	2	0 a 800 m
80	2	0 a 800 m
90	2	0 a 800 m
40	2	0 a 2000 m

Para simular el ancho de un carril durante las mediciones del perfil longitudinal se delimitó un tramo de la pista para que tuviese un ancho de 3,6 m, mediante el uso de conos espaciados a cada 20 m (ver Figura 35).





Figura 35. Se colocaron conos espaciados a cada 20 m, para delimitar un ancho de carril de 3,6 m.

Por otra parte, para garantizar que todas las mediciones del perfil longitudinal iniciaran en el mismo estacionamiento se colocó cinta reflectiva en el estacionamiento inicial y se programó para que los perfilómetros inerciales iniciaran sus mediciones en este punto. Posteriormente, mediante el uso del software ProVAL, a partir de la metodología desarrollada por Karamihas (2004), se mejoró la sincronización entre los perfiles longitudinales medidos por los diferentes laboratorios.



Figura 36. Se colocó cinta reflectiva en el estacionamiento inicial para garantizar que las mediciones iniciaran en el mismo punto.

#### **4.2. Evaluación del tramo recto (estacionamientos del 0 al 500):**

El análisis del tramo recto se llevó a cabo entre los estacionamientos 0 y 500 definidos en la Figura 34. Para llevar a cabo este análisis se calculó el MRI promedio representativo de tramos de 100 m, con el objetivo de que el tramo base de medición fuese el mismo utilizado en las especificaciones actuales de Costa Rica.

En el Cuadro 17 y Figura 35 se muestran los valores de MRI promediado a cada 100 m (en unidades de m/km) correspondientes a cada uno de los laboratorios. Es importante mencionar que para calcular el MRI promedio asociado a cada laboratorio se tomaron en cuenta las mediciones del perfil longitudinal realizadas a las velocidades de: 40, 50, 60 y 70 km/h, por lo tanto, cada dato del Cuadro 17 se respalda en al menos 11 mediciones de perfil

longitudinal. Por otra parte, la medición de referencia corresponde al promedio de las mediciones realizadas por todos los laboratorios exceptuando al laboratorio C, que presentó valores de MRI significativamente distintas al resto de los laboratorios.

Cuadro 17. MRI promediado en tramos de 100 m, calculado a partir de las mediciones del perfil longitudinal realizadas por los distintos perfilómetros inerciales.

Estacionamiento	Lab. A	Lab. B	Lab. C	Lab. D	Lab. E	Lab. F	Referencia
0 - 100	2,68	2,80	4,07	2,85	2,83	2,75	2,79
100 - 200	1,69	1,79	2,69	1,84	1,63	1,76	1,74
200 - 300	1,98	2,18	3,51	2,21	2,03	2,21	2,12
300 - 400	2,70	2,81	3,94	2,62	2,71	2,42	2,65
400 - 500	2,22	2,23	3,54	2,23	2,19	2,23	2,22

Nota: la asignación de las letras para cada laboratorio es aleatoria.

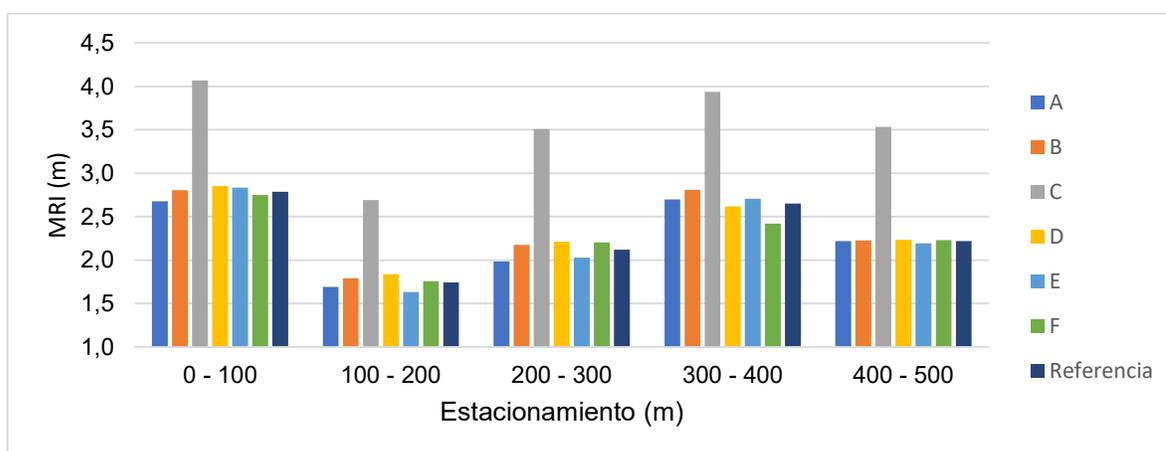


Figura 37. MRI promediado en tramos de 100 m, calculado a partir de las mediciones del perfil longitudinal realizadas por los distintos perfilómetros inerciales.

En términos generales, para el tramo recto se observó que los laboratorios presentaron diferencias de MRI entre 0,08 y 0,06 m/km respecto al promedio de las mediciones, siendo que, los laboratorios B y D presentaron las menores diferencias respecto al promedio. Además, se determinó que el laboratorio C presentó valores de MRI significativamente mayores al resto de los laboratorios.

Cuadro 18. Diferencias entre los valores de IRI respecto al promedio entre los estacionamientos 0 y 500.

Estacionamiento	Lab. A	Lab. B	Lab. C	Lab. D	Lab. E	Lab. F
0 - 100	0,11	0,02	1,28	0,07	0,05	0,04
100 - 200	0,05	0,05	0,95	0,10	0,11	0,01
200 - 300	0,14	0,06	1,39	0,09	0,09	0,08
300 - 400	0,05	0,16	1,29	0,03	0,06	0,23
400 - 500	0,00	0,01	1,32	0,01	0,03	0,01
Promedio	0,07	0,06	1,24	0,06	0,07	0,08

En cuanto a la repetibilidad de las mediciones en el tramo recto del circuito de competencias, se observó que para un mismo laboratorio la desviación estándar promedio en el cálculo del MRI para tramos de 100 m está entre 0,025 y 0,243 m/km, siendo que, los laboratorios B y D fueron los que presentaron menores valores de desviación estándar (en este caso 0,025 y 0,038 m/km respectivamente). Además, se observó que el laboratorio C fue el que presentó los mayores valores de desviación estándar, en este caso 0,243 m/km (ver Cuadro 19).

Por otra parte, en cuanto a la repetibilidad de todas las mediciones del realizadas en el tramo recto del circuito de competencias se observó que la desviación estándar promedio es de 0,084 m/km. Esta desviación estándar no considera los datos obtenidos del laboratorio C (pues dicho laboratorio presentó valores de MRI significativamente distintos al resto de los laboratorios).

Cuadro 19. Desviación estándar de los datos de MRI obtenidos entre los estacionamientos 0 y 500.

<b>Estacionamiento</b>	<b>Lab. A</b>	<b>Lab. B</b>	<b>Lab. C</b>	<b>Lab. D</b>	<b>Lab. E</b>	<b>Lab. F</b>	<b>Entre laboratorios</b>
<b>0 - 100</b>	0,095	0,020	0,204	0,029	0,084	0,032	0,071
<b>100 - 200</b>	0,039	0,022	0,092	0,022	0,063	0,031	0,082
<b>200 - 300</b>	0,036	0,007	0,194	0,034	0,027	0,031	0,107
<b>300 - 400</b>	0,044	0,056	0,184	0,028	0,067	0,084	0,144
<b>400 - 500</b>	0,055	0,019	0,540	0,075	0,042	0,083	0,016
<b>Promedio</b>	<b>0,054</b>	<b>0,025</b>	<b>0,243</b>	<b>0,038</b>	<b>0,056</b>	<b>0,052</b>	<b>0,084</b>

Es importante mencionar que la desviación estándar promedio entre laboratorios presentó ciertos niveles de dispersión entre los estacionamientos 0 y 500, pese a que el promedio fue de 0,084 m/km se encontraron valores entre 0,016 y 0,144.

Para hallar el origen de este amplio rango de desviaciones estándar, o en otras palabras los factores que podrían afectar la repetibilidad de las mediciones en tramos rectos, se procedió a determinar el coeficiente de correlación entre el valor de MRI promedio en tramos de 100 m y la desviación estándar entre laboratorios; se encontró que dicho coeficiente fue de 0,22, por lo tanto, se concluye que la repetibilidad en las mediciones no se correlaciona con el valor de MRI promedio del tramo.

Por otra parte, se procedió a determinar el coeficiente de correlación entre la varianza del MRI a lo interno de los tramos de 100 m (en este caso se calculó la varianza correspondiente a los 10 tramos de 10 m que conforman a un tramo de 100 m) y la desviación estándar entre laboratorios; se encontró que dicho coeficiente es 0,75, por lo tanto, se concluye que la repetibilidad en las mediciones está relacionada con la variabilidad de la regularidad superficial a lo interno de los tramos de 100 m que se estén evaluando, entre menor es esta variabilidad mejor fue la repetibilidad en las mediciones.

### 4.3. Evaluación del tramo curvo (estacionamientos del 500 al 800):

El análisis del tramo curvo se realizó tomando en cuenta los mismos parámetros evaluados previamente en el tramo recto:

- a) Los valores de MRI promediados en tramos de 100 m: en este caso al igual que en el análisis del tramo recto se observó que el laboratorio C presentó valores de MRI significativamente superiores al resto de los laboratorios (ver Cuadro 20). Además, en términos generales se observó que los valores de MRI en el tramo curvo fueron superiores en comparación con el tramo recto.

Cuadro 20. MRI promediado en tramos de 100 m, calculado a partir de las mediciones del perfil longitudinal realizadas por los distintos perfilómetros inerciales.

Estacionamiento	Lab. A	Lab. B	Lab. C	Lab. D	Lab. E	Lab. F	Referencia
<b>500 – 600</b>	2,86	3,23	4,89	3,23	3,02	2,77	3,05
<b>600 – 700</b>	4,59	4,54	6,37	4,40	4,46	4,37	4,48
<b>700 – 800</b>	3,77	3,52	5,52	3,61	3,34	3,48	3,55

- b) Diferencias de MRI respecto al promedio de las mediciones: se observó que los laboratorios presentaron diferencias de MRI entre 0,09 y 0,17 m/km respecto al promedio de las mediciones, siendo que, los laboratorios B y E presentaron las menores diferencias respecto al promedio. Además, nuevamente se observó que el laboratorio C presentó valores de MRI significativamente mayores al resto de los laboratorios (ver Cuadro 21).

Cuadro 21. Diferencias entre los valores de IRI respecto al promedio entre los estacionamientos 500 y 800.

Estacionamiento	Lab. A	Lab. B	Lab. C	Lab. D	Lab. E	Lab. F
<b>500 – 600</b>	0,19	0,18	1,84	0,18	0,03	0,28
<b>600 – 700</b>	0,11	0,06	1,89	0,08	0,02	0,11
<b>700 – 800</b>	0,23	0,03	1,97	0,06	0,21	0,07
<b>Promedio</b>	<b>0,17</b>	<b>0,09</b>	<b>1,90</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>	<b>0,15</b>

- c) Repetibilidad de las mediciones entre un mismo laboratorio y entre todos los laboratorios:

En cuanto a la repetibilidad de las mediciones en el tramo curvo del circuito de competencias, se observó que para un mismo laboratorio la desviación estándar promedio en el cálculo del MRI para tramos de 100 m está entre 0,073 y 0,146 m/km, siendo que, los laboratorios E y A fueron los que presentaron menores valores de desviación estándar (en este caso 0,073 y 0,097 m/km respectivamente). Además, se observó que el laboratorio C fue el que presentó los mayores valores de desviación estándar, en este caso 0,146 m/km (ver Cuadro 22).

Por otra parte, en cuanto a la repetibilidad de todas las mediciones realizadas en el tramo curvo se observó que la desviación estándar promedio es de 0,154 m/km. Esta desviación estándar no considera los datos obtenidos del laboratorio C (pues dicho laboratorio presentó valores de MRI significativamente distintos al resto de los laboratorios).

Cuadro 22. Desviación estándar de los datos de MRI obtenidos entre los estacionamientos 500 y 800.

Estacionamiento	Lab. A	Lab. B	Lab. C	Lab. D	Lab. E	Lab. F	Desviación estándar
<b>500 - 600</b>	0,058	0,125	0,271	0,047	0,056	0,085	<b>0,211</b>
<b>600 - 700</b>	0,151	0,061	0,082	0,104	0,046	0,063	<b>0,090</b>
<b>700 - 800</b>	0,081	0,112	0,086	0,282	0,115	0,161	<b>0,161</b>
<b>Promedio</b>	<b>0,097</b>	<b>0,099</b>	<b>0,146</b>	<b>0,144</b>	<b>0,073</b>	<b>0,103</b>	<b>0,154</b>

Al igual que se evidenció en la evaluación del tramo recto, es importante mencionar que la desviación estándar promedio entre laboratorios presentó ciertos niveles de dispersión entre los estacionamientos 500 y 800, pese a que el promedio fue de 0,154 m/km se encontraron valores entre 0,211 y 0,090 m/km.

En este caso al intentar hallar los factores que podrían incidir en la repetibilidad de las mediciones y contrario a lo observado en el tramo recto, se evidenció que dicha repetibilidad en las mediciones no solo se correlacionó con la variabilidad de la regularidad superficial a lo interno de los tramos de 100 m, sino que también se correlacionó con la magnitud de los valores de MRI promedio en los tramos de 100 m. Un aspecto que llama la atención es que en este caso la correlación observada fue inversa a la observada para el tramo recto, es decir, se observó que entre mayor era la variabilidad de la regularidad superficial a lo interno del tramo de 100 m mejor era la repetibilidad. Además, se observó que en este caso entre mayores eran los valores de MRI, mayor era la repetibilidad de las mediciones.

#### 4.4. Análisis de resultados

A raíz del interlaboratorial realizado se observó que la repetibilidad o congruencia entre las mediciones del perfil longitudinal hechas por un mismo perfilómetro o incluso por distintos perfilómetros fue mayor en la sección tangente del tramo evaluado en comparación con la sección curva.

Al considerar el promedio de la desviación estándar obtenida a partir de las mediciones realizadas en el tramo recto o tangente se podría decir que, con un 90 % de confianza<sup>9</sup>, se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia.

Por otra parte, al considerar el promedio de la desviación estándar obtenida a partir de las mediciones realizadas en el tramo curvo se podría decir que, con un 90 % de confianza, se

<sup>9</sup> Considerando una distribución de probabilidad normal y excluyendo los datos obtenidos por el laboratorio C.

espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,2$  m/km respecto al promedio o valor de referencia.

En cuanto a las causas que podrían afectar la repetibilidad de las mediciones, a parte del hecho de que es casi imposible que dos perfilómetros pasen por la misma línea durante su medición (situación que es aún más crítica en el tramo curvo), para el tramo recto se observó que existe una correlación entre la variabilidad de la regularidad superficial a lo interno de los tramos de 100 m y la repetibilidad de las mediciones, siendo que, a mayor variabilidad menor repetibilidad.

Por otra parte, en el tramo curvo se observó una tendencia contraria, es decir, se observó que entre mayor era la variabilidad de la regularidad superficial a lo interno del tramo de 100 m mejor era la repetibilidad. No obstante, es importante considerar que las mediciones en el tramo curvo, a diferencia de la medición realizada en tangente, implica la aparición de otras variables (que no pudieron ser medidas en todos los perfilómetros) como la aceleración centrípeta y su incidencia en la precisión de los datos recolectados por el acelerómetro.

Por último, se observó que el perfilómetro utilizado por el laboratorio C realizó mediciones del perfil longitudinal asociadas a valores de MRI significativamente superiores al resto de los laboratorios. Lo anterior, podría estar relacionado con algún problema en la calibración del equipo o alguna falla en uno o varios de los componentes electromecánicos del perfilómetro.

## **5. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN EL CÁLCULO DEL IRI**

En este capítulo se evalúa<sup>10</sup>, bajo distintas condiciones de velocidad y aceleración, el perfil longitudinal del carril interno ubicado entre los estacionamientos 0 y 800 del circuito de competencias del Parque VIVA (ver Figura 34). Lo anterior, con el propósito de identificar condiciones que durante la medición podrían afectar la correcta medición del perfil longitudinal y el posterior cálculo del IRI.

### **5.1. Caso 1: Velocidad constante**

Este caso se enfoca en la medición del perfil a 9 velocidades constantes: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 km/h; tanto en el tramo recto del circuito de competencias (ubicado entre los estacionamientos 0 y 500) como en el tramo curvo (ubicado entre los estacionamientos 500 y 800).

En términos generales se pudo observar que los perfiles longitudinales medidos a velocidades de 20 km/h o superiores presentaron niveles similares de regularidad superficial, mientras que los perfiles longitudinales medidos a velocidades de 10 km/h presentaron valores inferiores de IRI. Lo anterior, se muestra gráficamente en la Figura 38 que muestra

---

<sup>10</sup> Para realizar esta evaluación se utilizó el perfilómetro Dinatest Mark III.

la evolución del MRI a lo largo de los estacionamientos correspondiente a distintas velocidades de medición.

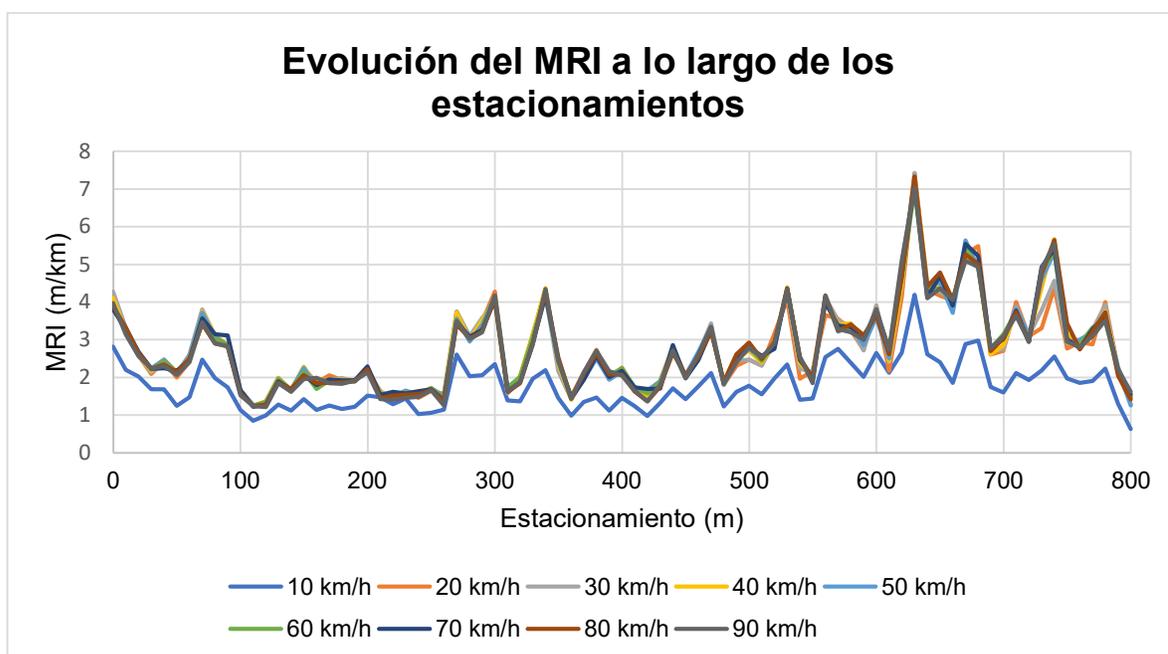


Figura 38. Evolución del MRI a lo largo de los estacionamientos y a distintas velocidades.

### 5.1.1. Tramo recto (estacionamientos 0 al 500)

Cuadro 23. MRI promedio en tramos de 100 m para las distintas velocidades evaluadas en el tramo recto

Est./Velocidad	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h
0-100	0,445	0,016	0,067	0,003	0,034	0,031	0,022	0,054	0,052
100-200	0,526	0,027	0,003	0,009	0,007	0,015	0,029	0,026	0,048
200-300	0,339	0,011	0,003	0,003	0,002	0,001	0,014	0,028	0,085
300-400	0,179	0,008	0,018	0,005	0,013	0,018	0,061	0,036	0,045
400-500	0,508	0,008	0,032	0,023	0,040	0,018	0,018	0,065	0,063
<b>Promedio</b>	<b>0,399</b>	<b>0,014</b>	<b>0,025</b>	<b>0,009</b>	<b>0,019</b>	<b>0,016</b>	<b>0,029</b>	<b>0,042</b>	<b>0,059</b>

### 5.1.2. Tramo curvo (estacionamientos 500 al 800)

Cuadro 24. MRI promedio en tramos de 100 m para las distintas velocidades evaluadas en el tramo curvo

Est./Velocidad	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
500-600	0.702	0.069	0.018	0.038	0.003
600-700	1.631	0.078	0.031	0.015	0.022
700-800	1.386	0.298	0.119	0.028	0.023
<b>Promedio</b>	<b>1.240</b>	<b>0.149</b>	<b>0.056</b>	<b>0.027</b>	<b>0.016</b>

Para tratar de entender la causa que provoca que el perfil medido a 10 km/h esté relacionado con valores de IRI más bajos se procedió a realizar un análisis donde se comparó, para cada laboratorio<sup>11</sup>, el PSD correspondiente al perfil medido a 10 km/h contra el PSD correspondiente al perfil medido a 60 km/h. Lo anterior, con el objetivo de determinar si hay alguna longitud de onda que se vea más afectada al realizar las mediciones a baja velocidad. Este análisis se muestra de la Figura 39 a la Figura 43.

De acuerdo con Sayers y Karamihas (1998), si se toma en cuenta que los perfilómetros inerciales cuentan con un acelerómetro para detectar el movimiento vertical del vehículo y así establecer una referencia inercial, la velocidad de medición del perfil longitudinal no debería afectar la precisión del perfil longitudinal medido. Sin embargo, dentro de las imperfecciones que rodean a los componentes electrónicos que se fabrican actualmente, incluyendo a los acelerómetros, existe cierto "ruido" que debe ser sobrepasado para que el componente electrónico funcione correctamente. En el caso de los acelerómetros este "ruido" se traduce en un umbral de aceleración mínimo que debe registrarse para que el efecto del "ruido" no sea predominante.

Por lo tanto, durante la medición del perfil longitudinal se requiere de una velocidad mínima que garantice que el acelerómetro, con el paso del vehículo sobre la carretera, tendrá el estímulo suficiente como para registrar aceleraciones superiores al umbral mínimo de "ruido".

### *5.1.3. Análisis de resultados*

En términos generales, se observó que según el análisis realizado de la Figura 39 a la Figura 43, las mayores diferencias al comparar el PSD correspondiente al perfil medido a 10 km/h contra el PSD correspondiente al perfil medido a 60 km/h se presentaron longitudes de onda largas. Específicamente, se observó que para las longitudes de onda largas el PSD correspondiente al perfil medido a 10 km/h registró menores varianzas de la pendiente. Lo anterior, se justifica por el hecho de que a velocidades bajas las longitudes de onda más largas no provocan un estímulo de aceleración suficiente como para sobrepasar el umbral mínimo de "ruido" de los acelerómetros.

Por lo tanto, a nivel teórico, si lo que se quisiera evaluar en un pavimento son elementos asociados a longitudes de onda corta, por ejemplo: macro textura, o incluso alguna irregularidad causada por longitudes de onda corta; la velocidad de medición podría disminuirse. Sin embargo, en la práctica y según lo observado en la presente investigación, pese a que las mayores diferencias se observaron en las longitudes onda largas, también se registraron diferencias en longitudes de onda intermedias y pequeñas (ver Figura 41 como ejemplo). Lo anterior, por motivos que no se tienen claros.

---

<sup>11</sup> Excepto para el laboratorio C, debido a que el perfilómetro de este laboratorio no era capaz de realizar mediciones a 10 km/h.

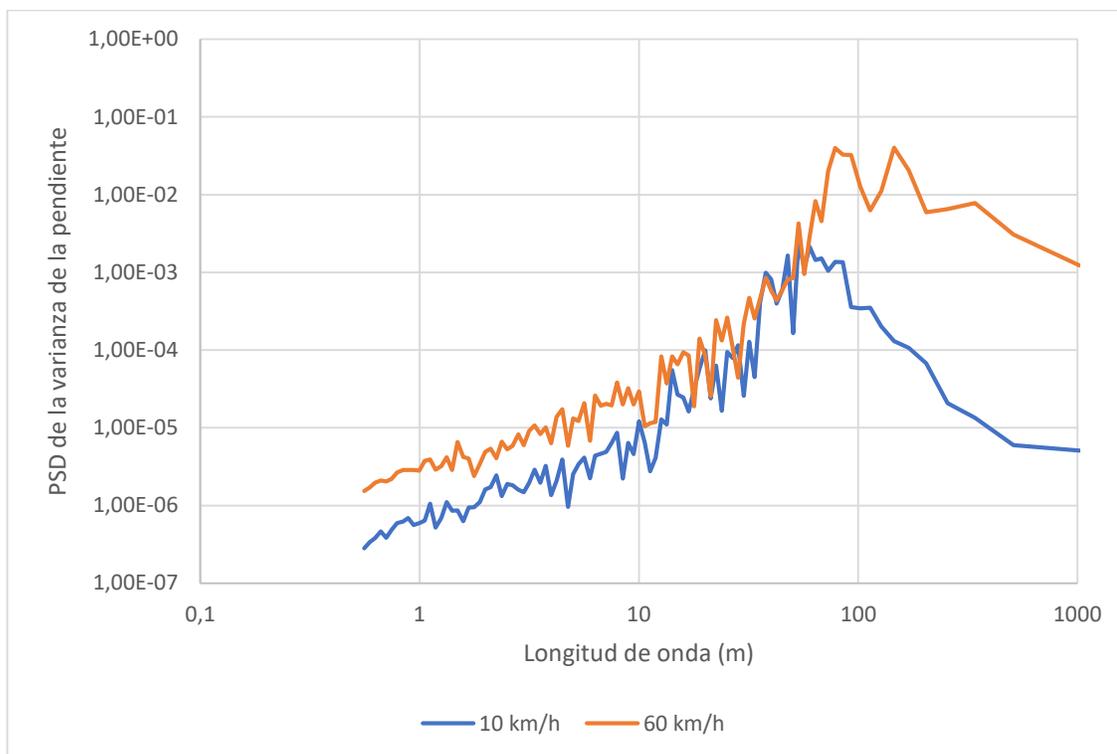


Figura 39. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio A.

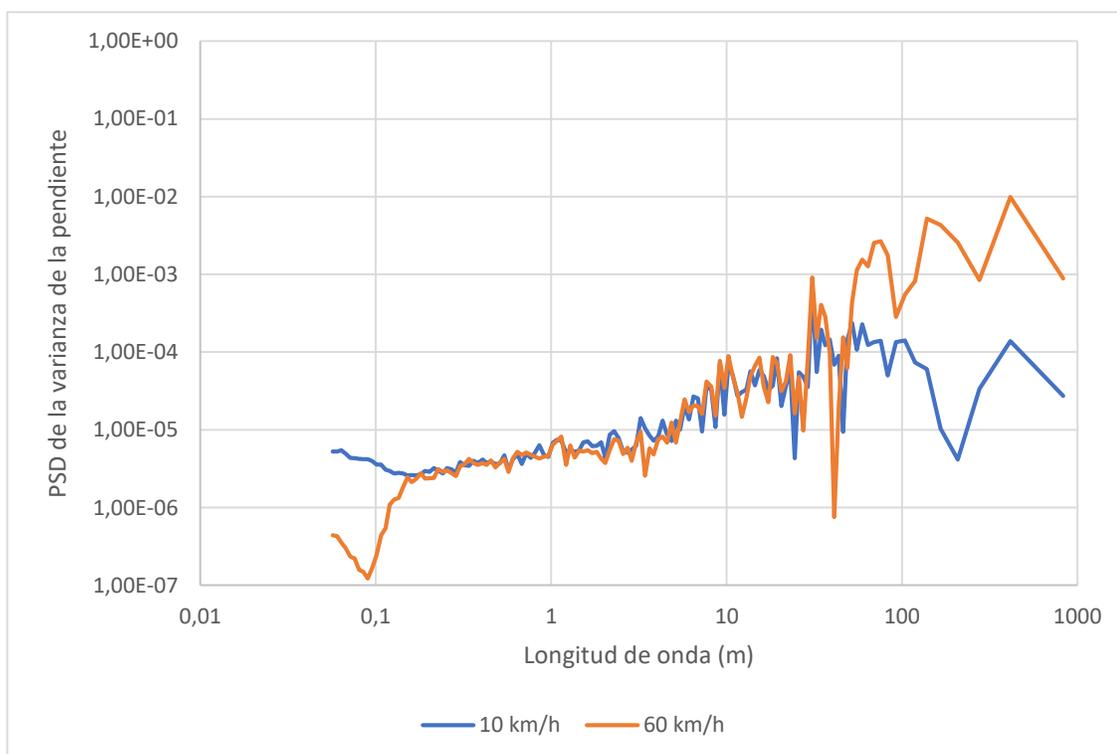


Figura 40. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio B.

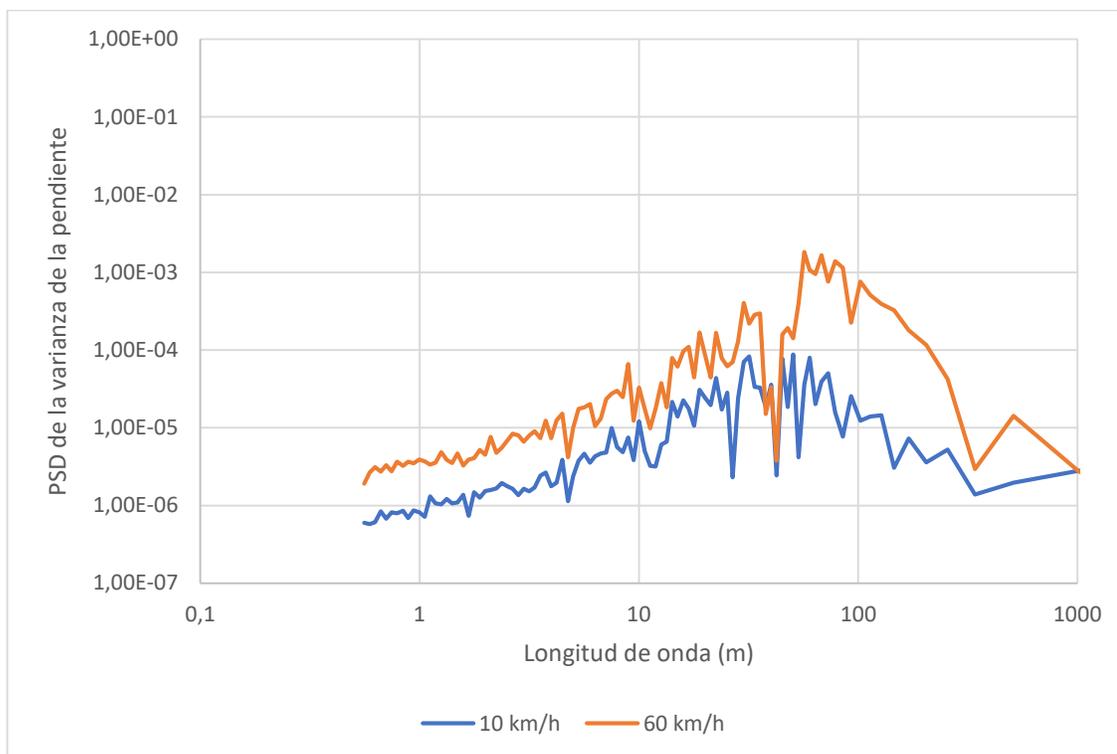


Figura 41. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio D.

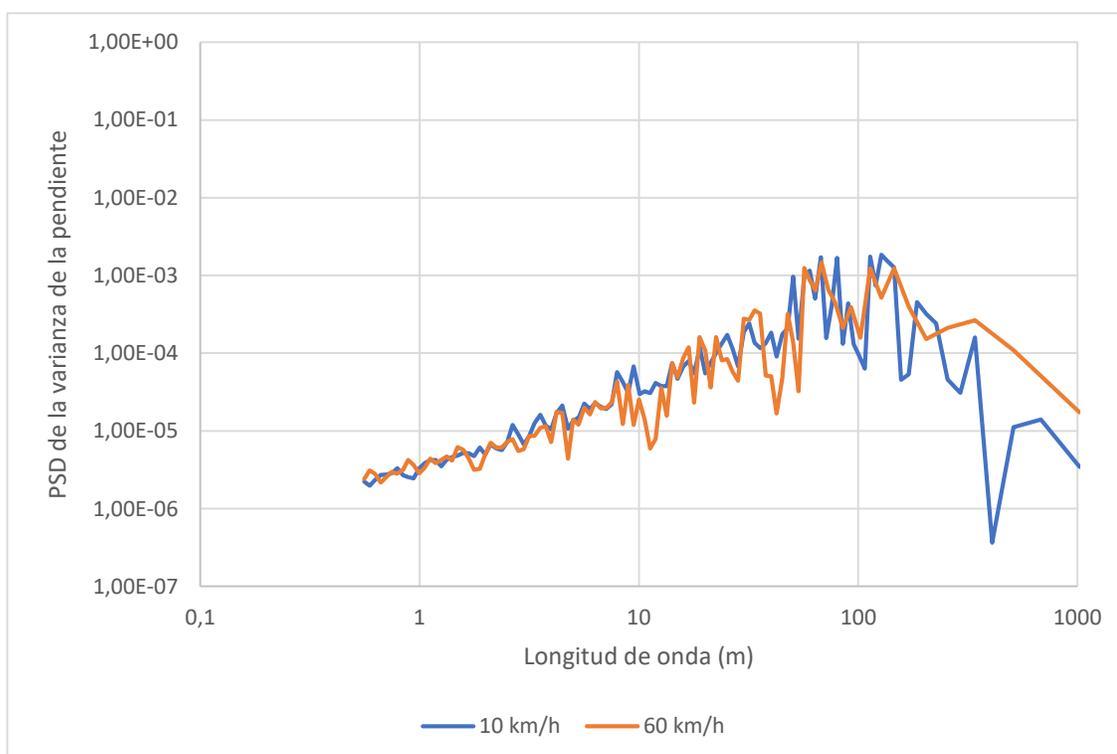


Figura 42. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio E.

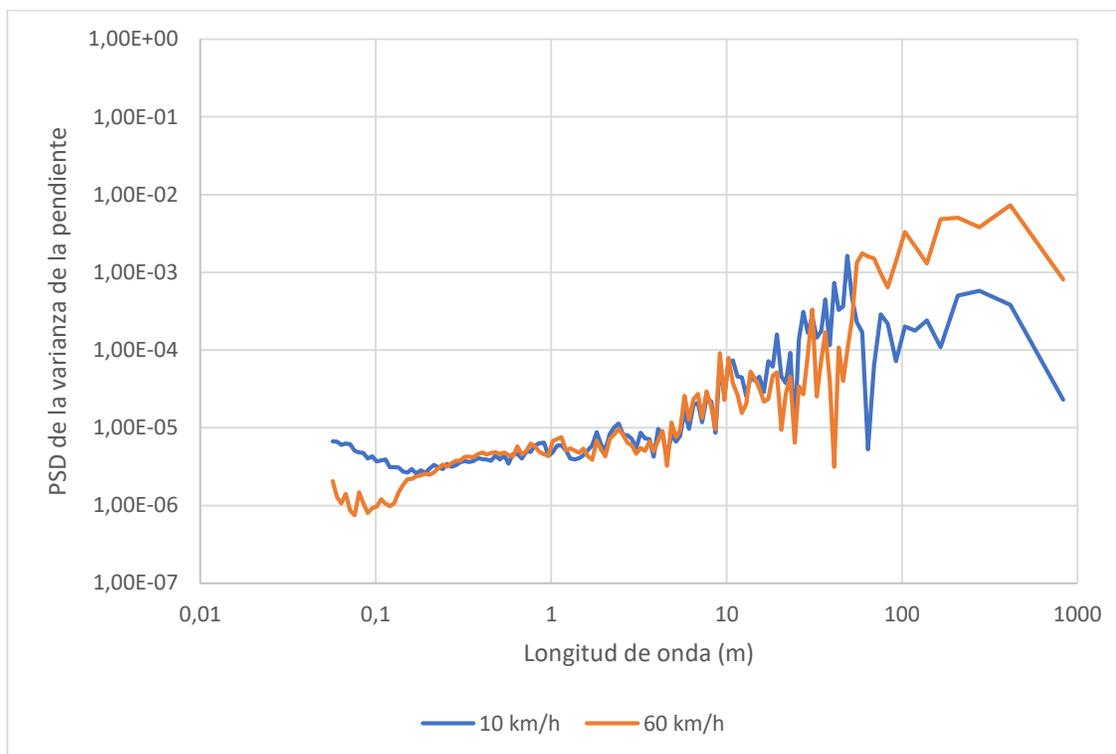


Figura 43. PSD de la varianza de la pendiente, medido en la huella izquierda, para las velocidades de 10 y 60 km/h, correspondientes al laboratorio F.

## 5.2. Caso 2: Sin acelerar ni aplicar el freno del vehículo

Este caso se enfoca en la medición del perfil iniciando a una velocidad de 70 km/h, y posteriormente, sin acelerar ni aplicar el freno del vehículo continuar realizando la medición del perfil longitudinal mientras el perfilómetro pierde velocidad. De manera que, con este caso lo que se busca es determinar si existe alguna afectación en la medición del perfil longitudinal producto de una disminución paulatina y “suave” de la velocidad del perfilómetro láser.

Para este caso, se realizaron cuatro pasadas mediante el uso del perfilómetro Mark III. Además, las pruebas se llevaron a cabo iniciando en el estacionamiento 50 y finalizando en el estacionamiento 500 (ver Figura 44).

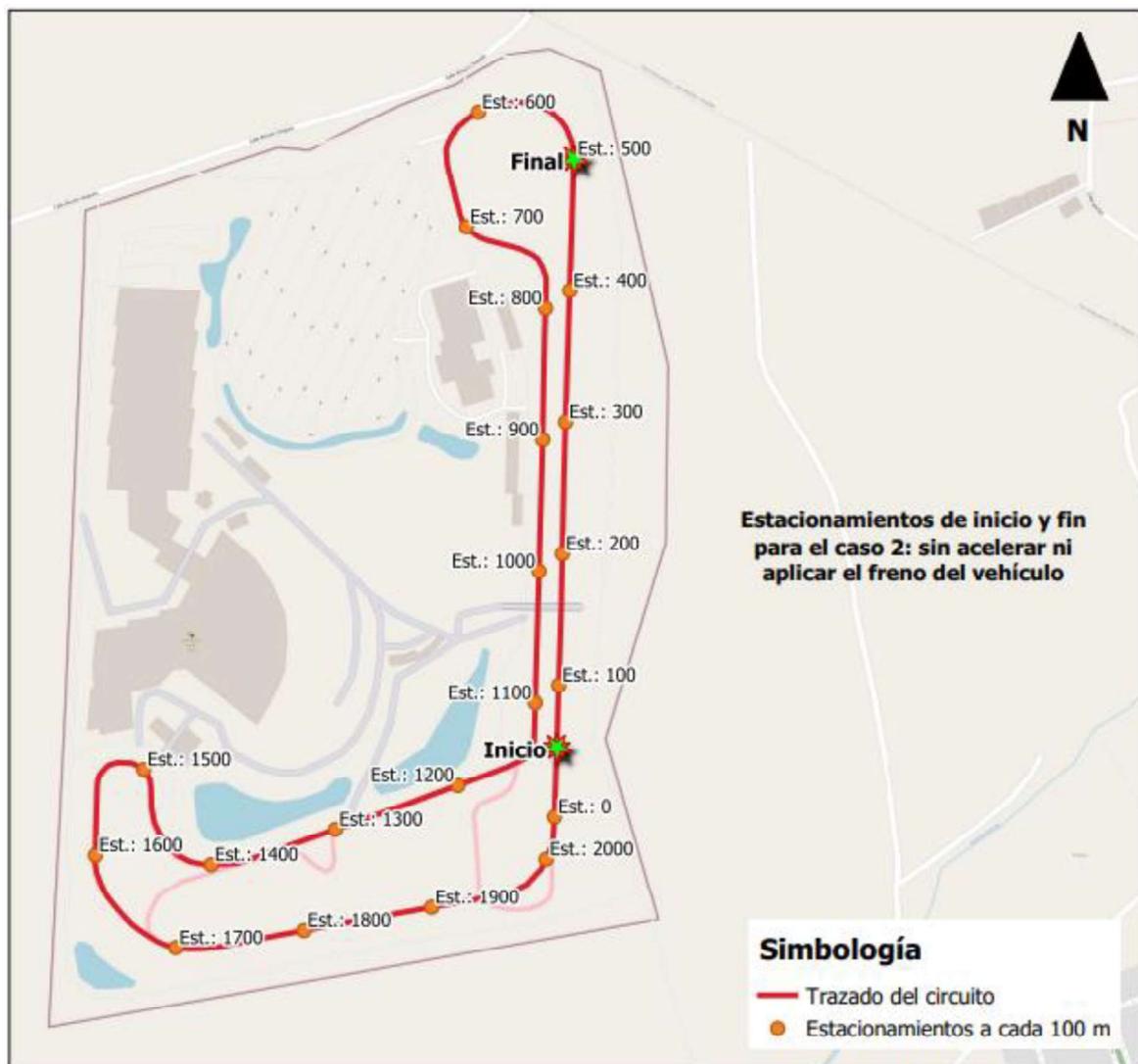


Figura 44. Estacionamientos de inicio y fin para el caso 2: sin acelerar ni aplicar el freno.

Las condiciones generales de las mediciones realizadas se resumen en el **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** donde en promedio se determinó que la velocidad inicial fue de 70.9 km/h hasta llegar a una velocidad de 26 km/h en un tramo de 450 m, lo cual significó una desaceleración promedio de 0,038 g.

Cuadro 25. Resumen de las condiciones generales de medición del caso 2

Número de pasada	Velocidad inicial (km/h)	Velocidad final (km/h)	Desaceleración promedio (g)
1	68,1	29,2	-0,0331
2	68,9	29,5	-0,0339
3	71,9	23,0	-0,0406
4	74,7	22,4	-0,0444
<b>Promedio</b>	70,9	26,0	-0,0380

En la gráfica de la Figura 45 se muestra el MRI calculado en tramos base pequeños, de 5 m, para cada una de las pasadas realizadas y para el perfil de referencia que fue medido a una velocidad constante de 60 km/h. Lo anterior, con el objetivo de comparar visualmente los valores de MRI de cada una de las pasadas con respecto al valor de referencia y determinar si hay diferencias apreciables entre un perfil y otro.

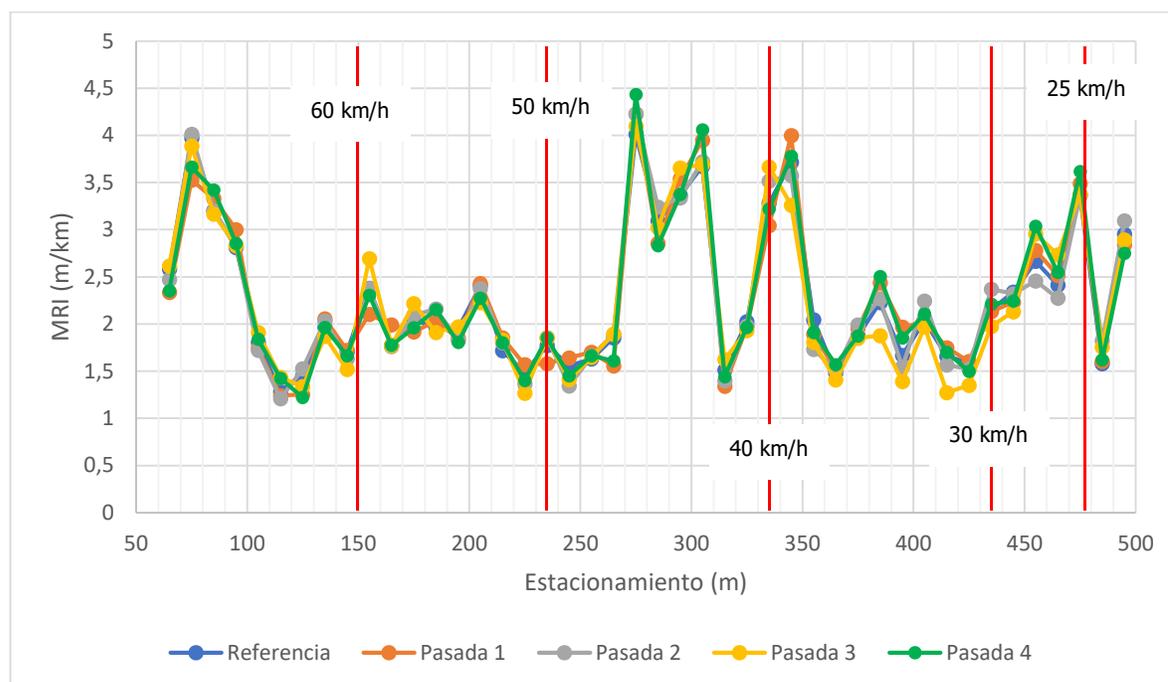


Figura 45. MRI calculado en tramos base de 5 m, para cada una de las pasadas realizadas

### 5.2.1. Análisis de resultados

Considerando que las mediciones en este caso se realizaron bajo un escenario donde no hay cambios bruscos de velocidad que puedan afectar la medición del perfil longitudinal. Lo esperado en este caso es que, en los primeros estacionamientos, donde la velocidad de medición es "aceptable" y cercana a los 70 km/h, no se observen diferencias marcadas entre el MRI medido en cada una de las pasadas respecto al MRI de referencia. Por otra parte, también es esperado que, conforme la velocidad del perfilómetro disminuye hasta alcanzar niveles de velocidad bajos (en los estacionamientos finales de medición) se observen mayores diferencias entre el MRI calculado y el MRI de referencia. No obstante, gráficamente no se pudo observar que en los estacionamientos mayores ocurrieran diferencias notables de MRI respecto al valor de referencia.

Para evaluar con mayor detalle este aspecto se procedió calcular las diferencias promedio de MRI respecto al valor de referencia correspondiente a distintos rangos de velocidades (ver Cuadro 26). Como se mencionó anteriormente, lo esperado es que la calidad de las mediciones disminuya conforme se disminuye el rango de velocidades, específicamente, para los rangos de velocidad más bajos se esperan mayores diferencias respecto al MRI de referencia. Al respecto, de acuerdo con el Cuadro 26 efectivamente las mayores diferencias ocurrieron en el rango de velocidades más bajo (entre 30 y 23 km/h), sin embargo, no se

observó una tendencia clara si se tiene en cuenta que en orden de importancia las segundas mayores diferencias se observaron en el rango de velocidades más alto.

Además, se pudo observar que para ningún rango de velocidades la diferencia promedio de MRI respecto al valor de referencia fue alarmantemente alta. Lo anterior, si se compara contra los resultados del Interlaboratorial realizado donde se podría concluir que las diferencias encontradas se ubican dentro de la dispersión esperada. Esto toma relevancia si se considera que al final de la recta, para ninguno de los casos se llegó a velocidades cercanas a los 10 km/h, donde previamente se habían detectado problemas asociados al cálculo del MRI.

Cuadro 26. Diferencias promedio de MRI respecto al valor de referencia, para diferentes rangos de velocidades

<b>Rango de velocidades (km/h)</b>	<b>Diferencia promedio de MRI respecto al valor de referencia (m/km)</b>
70 - 60	0.036
60 - 50	-0.002
50 - 40	-0.020
40 - 30	0.025
30 - 23	-0.048

Nota: diferencias positivas significan que el valor de MRI medido es superior al de referencia.

### 5.3. Caso 3: Frenado

El propósito de este caso es evaluar el efecto que podría causar distintas condiciones de frenado a la medición del perfil longitudinal y consecuentemente al posterior cálculo del MRI. Específicamente se realizaron mediciones bajo 3 escenarios de desaceleración 0.1 g, 0.2 g y 0.3 g. Lo anterior, con el objetivo de representar niveles de frenado: leve, intermedio y fuerte respectivamente.

Cada escenario de desaceleración se realizó comenzando a una velocidad inicial determinada, de manera que, para alcanzar los diferentes objetivos de desaceleración, se le indicó al operario del perfilómetro cuantos metros debía recorrer (distancia de frenado) desacelerando de manera constante hasta llegar a una velocidad final objetivo (ver Cuadro 27). Además, se realizaron pruebas hasta que el conductor lograra identificar, para cada escenario de aceleración, la magnitud del frenado constante que debía aplicar para que se cumpliera con los objetivos de velocidad inicial y final.

Cuadro 27. Condiciones evaluadas en el caso 3: frenado

Escenario	Velocidad inicial (km/h)	Velocidad final (km/h)	Distancia de frenado (m)	Aceleración (g)
3.1	70	30	160	0.1
3.2	70	30	80	0.2
3.3	70	30	50	0.3
3.4	50	25	70	0.1
3.5	50	25	35	0.2
3.6	50	25	25	0.3

Es relevante mencionar que para alcanzar exitosamente este objetivo se colocaron conos en los puntos donde se quería alcanzar los objetivos de velocidad, según el escenario por evaluar, la ubicación de inicio para cada escenario se muestra en la Figura 46. Además, en este caso para propósitos de comparación se definió que la ubicación final sería la misma para todos los casos.

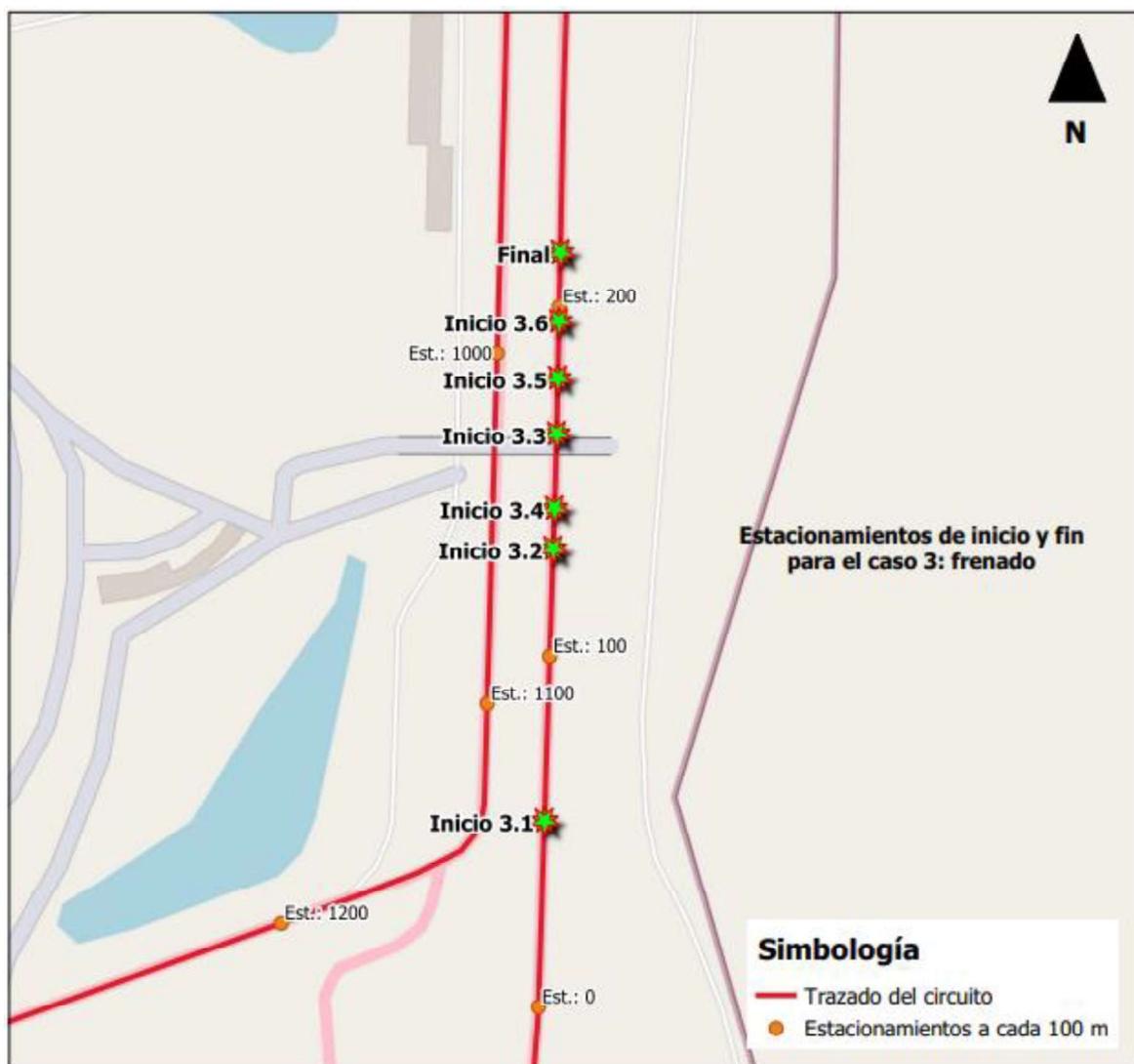


Figura 46. Estacionamientos de inicio y fin para el caso 3: frenado

### 5.3.1. Evaluación del perfil longitudinal para el caso 3: frenado

Para evaluar la condición de frenado en primera instancia se procedió a comparar el perfil longitudinal de todos los escenarios evaluados respecto a un perfil longitudinal de referencia. Específicamente, para propósitos de comparación se consideró el perfil longitudinal de la huella izquierda del vehículo. Además, como perfil de referencia se utilizó un perfil medido a una velocidad constante de 60 km/h.

La comparación de estos perfiles, para cada una de los escenarios evaluados, se muestra entre la Figura 47 y la Figura 52.

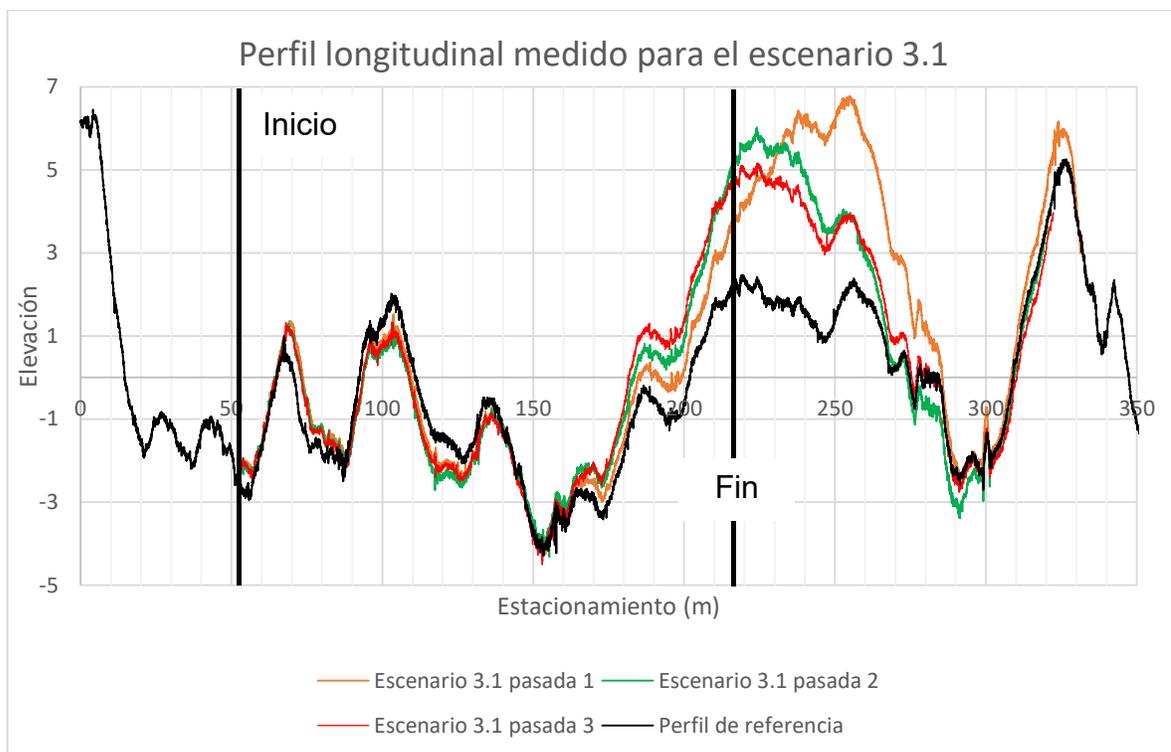


Figura 47. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.1

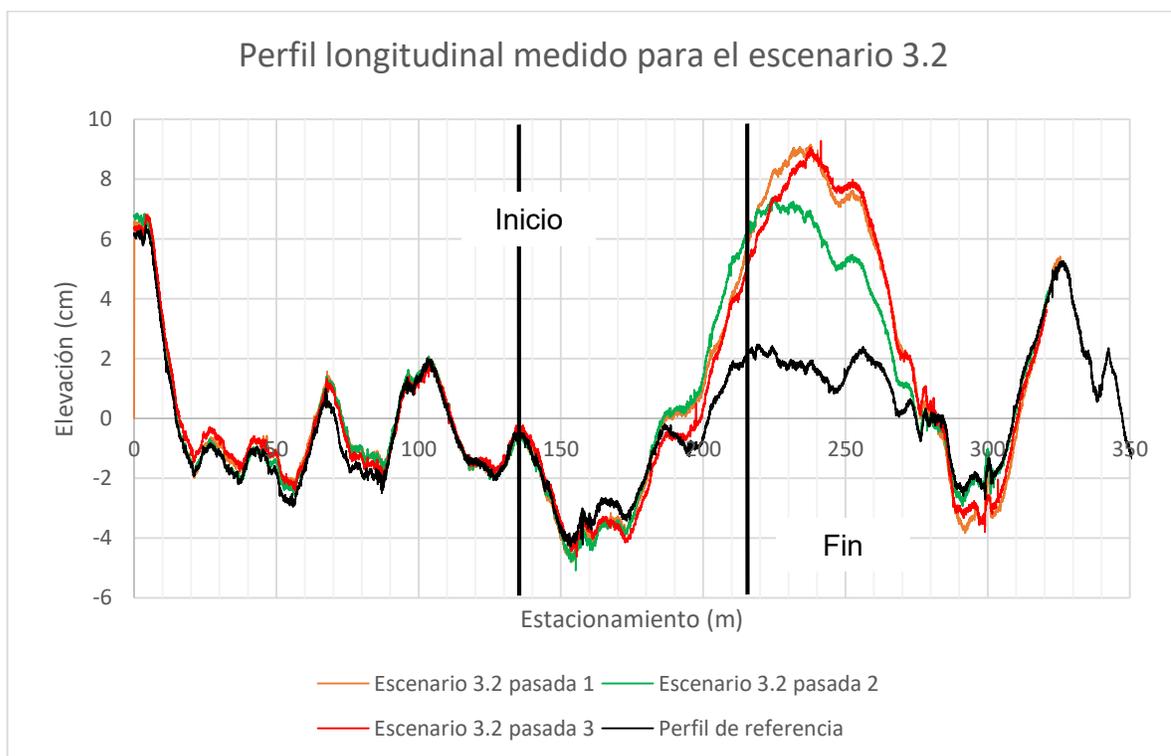


Figura 48. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.2

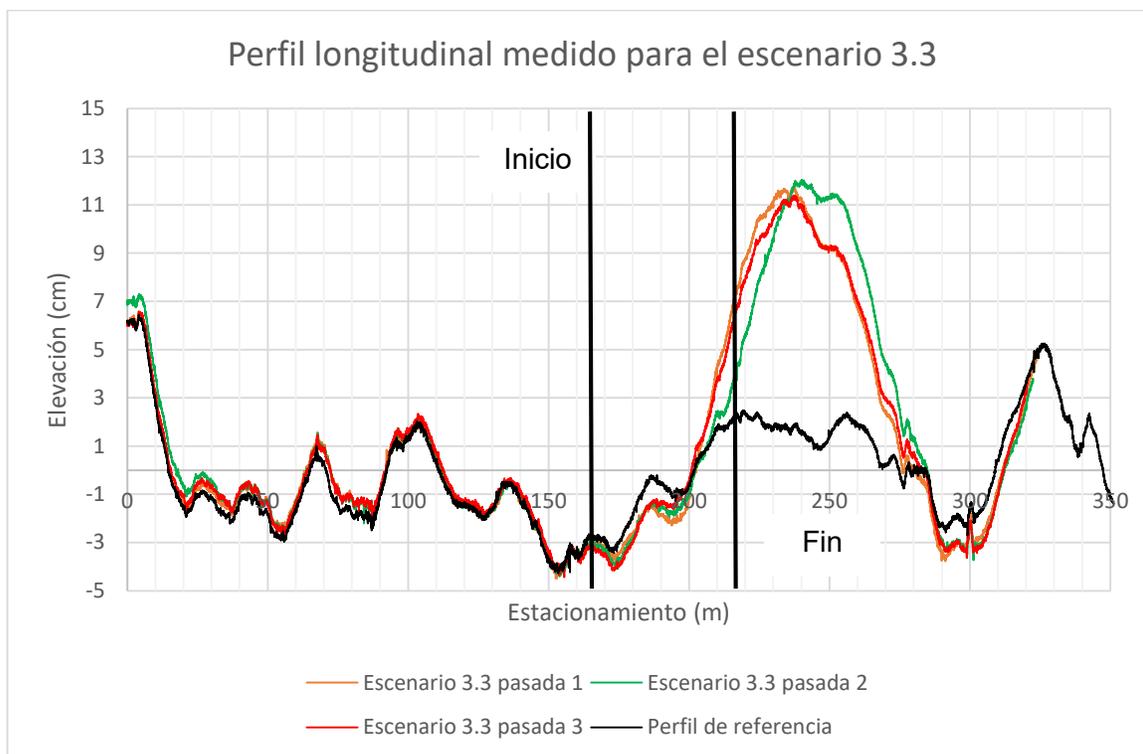


Figura 49. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.3

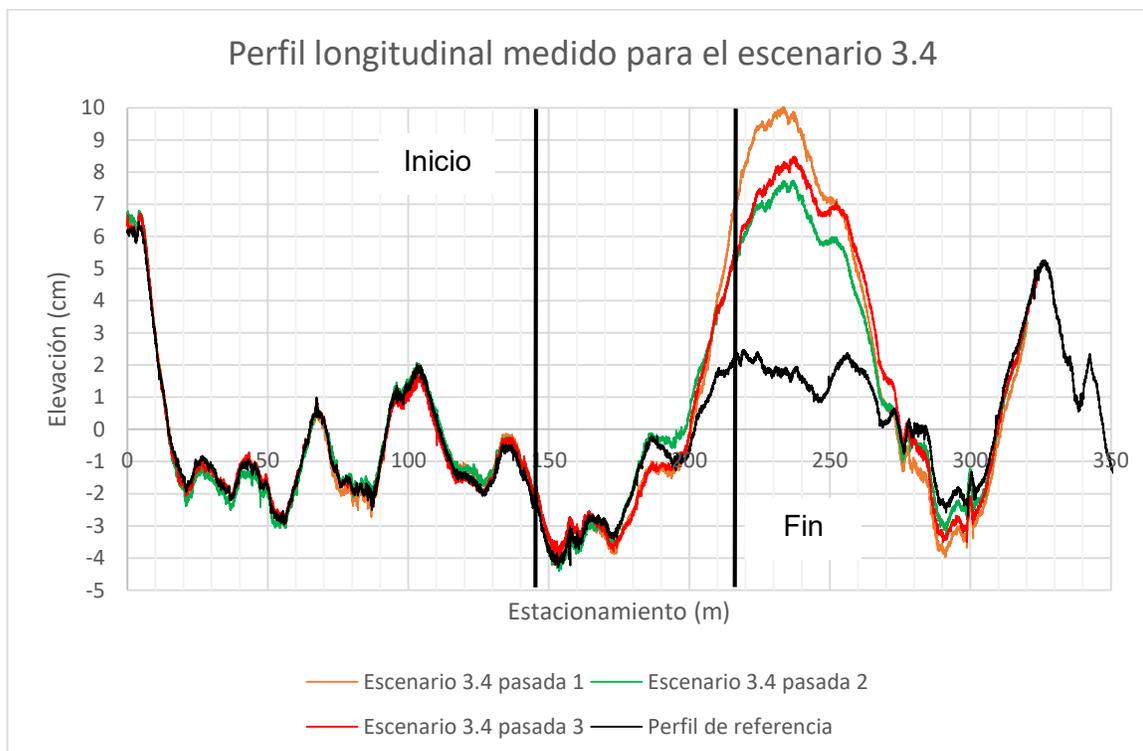


Figura 50. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.4

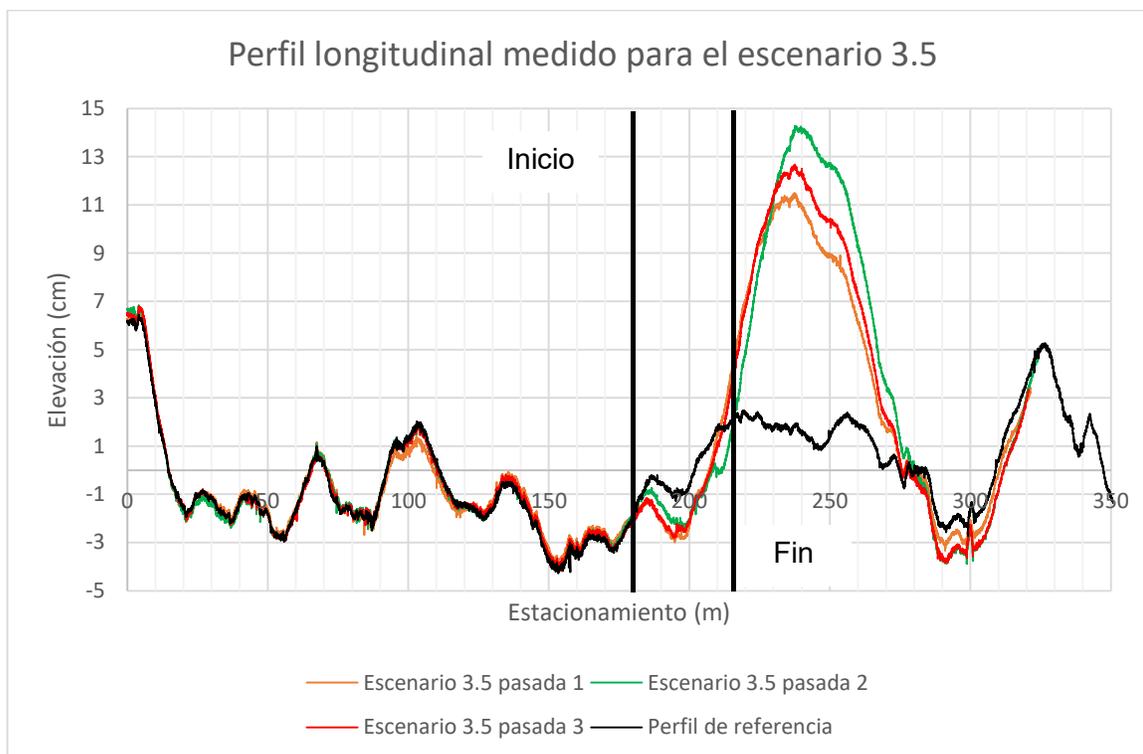


Figura 51. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.5

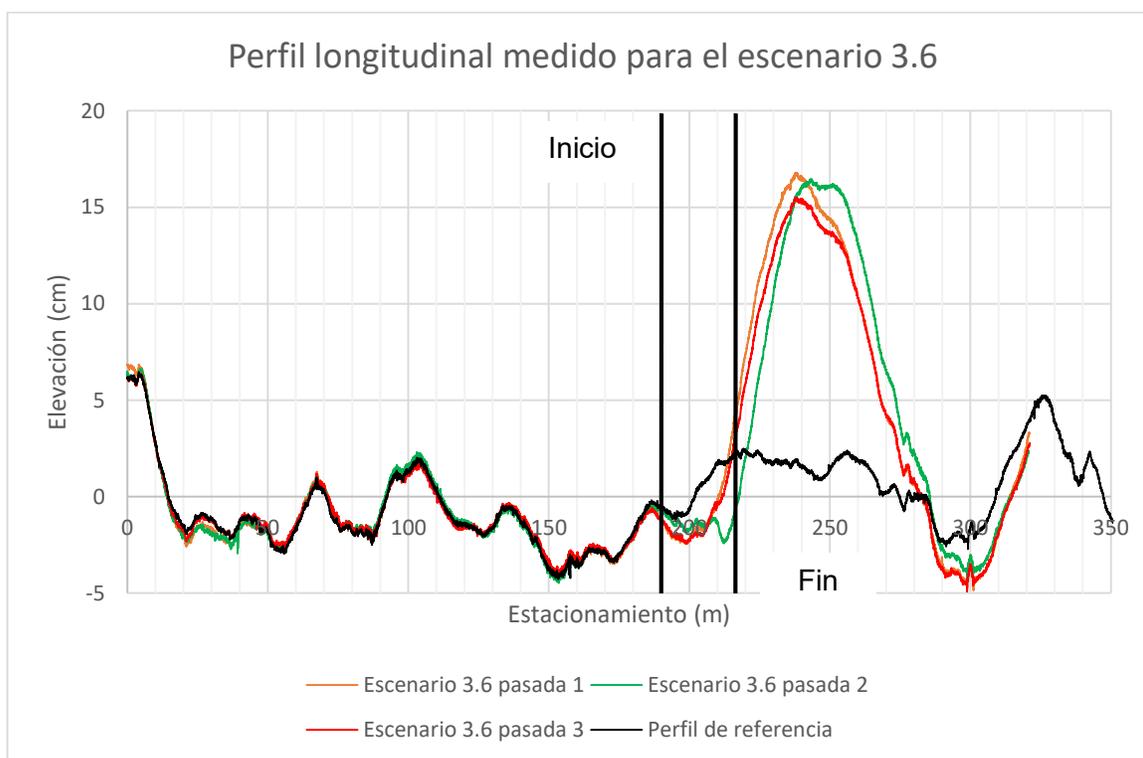


Figura 52. Perfiles longitudinales medidos para el escenario 3.6

En términos generales, se pudo observar que las mayores diferencias entre el perfil longitudinal de referencia y el perfil longitudinal medido para cada uno de los escenarios ocurren en las cercanías del punto final (ver Figura 46), es decir, en las cercanías del punto en que el vehículo deja de frenar para continuar a una velocidad constante (25 o 30 km/h según el escenario evaluado).

Las diferencias observadas entre perfiles longitudinales básicamente consisten en que, en las cercanías del punto final, se registra un incremento en la elevación del perfil respecto al perfil de referencia. Esta diferencia de elevaciones incluso se extiende posterior al punto final, es decir cuando el vehículo deja de frenar y retoma nuevamente una velocidad constante.

Además, se observó que entre mayor era la magnitud de la desaceleración mayor era diferencia de elevación con respecto al perfil longitudinal de referencia. Esta tendencia se puede observar tanto para los casos donde se pasó de una velocidad de 70 km/h a una velocidad de 30 km/h, como para los casos donde se pasó de una velocidad de 50 km/h a una velocidad de 50 km/h.

Para el caso en que se pasa de 70 a 30 km/h los escenarios de desaceleración de 0,1, 0,2 y 0,3 g presentaron picos de elevación de 6,5 cm, 9 cm y 11,3 cm respectivamente. Por otra parte, para los casos en que se pasa de 50 a 30 km/h los escenarios de desaceleración de 0,1, 0,2 y 0,3 g presentaron picos de elevación de 10 cm, 13,9 cm y 16,4 cm respectivamente.

Pese a que los picos de elevación aumentaron conforme se aumentó la magnitud de la desaceleración, se observó que comparativamente los picos de elevación eran mayores para los casos donde se pasó de 50 a 25 km/h respecto a los casos en donde se pasó de 70 a 30 km/h. Al respecto, una prueba de hipótesis que se podría validar en investigaciones futuras es si la distancia a la cual se aplica la desaceleración representa una variable que afecta la magnitud del pico de elevación que pueda generarse y consecuentemente el valor de MRI reportado. En este caso particular se evidenció que para un mismo nivel de desaceleración se presentaron mayores afectaciones cuando la desaceleración se aplicaba en distancias más cortas. En la práctica lo anterior es relevante puesto que muchas veces durante la evaluación de proyectos viales el operario del perfilómetro podría verse obligado a frenar repentinamente a lo largo de un tramo relativamente corto.

Para analizar con más detalle las variaciones del perfil longitudinal producto de los escenarios de frenado evaluados se elaboró un gráfico PSD (ver Figura 53) con el objetivo de comparar cada uno de estos escenarios respecto al perfil longitudinal de referencia y determinar cuáles longitudes de onda se ven más afectadas producto de la operación de frenado.

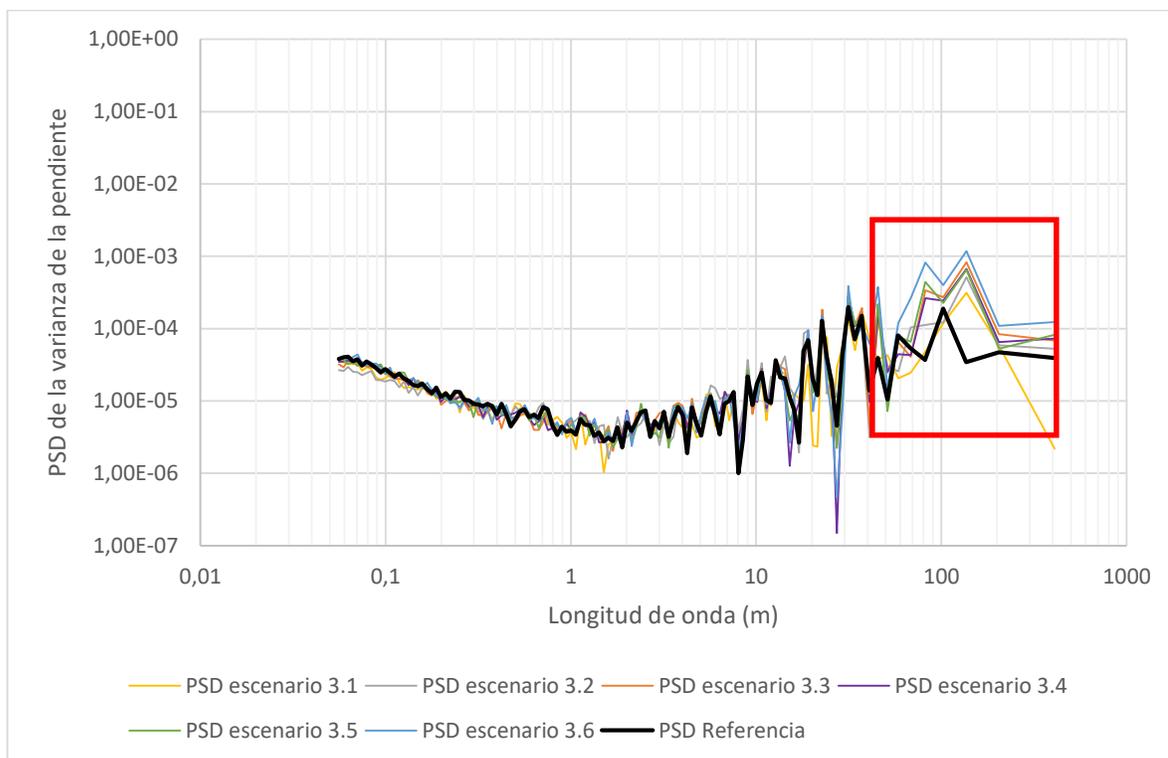


Figura 53. PSD de la varianza de la pendiente para cada uno de los escenarios de análisis

A partir del análisis de los gráficos PSD se pudo observar que las mayores diferencias respecto al perfil de referencia se presentaron en las longitudes de onda mayores a 45 m. Específicamente se evidenció que los escenarios evaluados presentaron una mayor varianza de la pendiente en longitudes de onda mayores a 45 m respecto al perfil de referencia, situación que podría representar un incremento en los valores de IRI de los escenarios evaluados.

### 5.3.2. Evaluación de la regularidad superficial para el caso 3: frenado

Para evaluar la regularidad superficial según el caso 3 (frenado) se elaboró una gráfica (ver Figura 54) donde se presentan los valores de MRI, continuo con un tramo base de 10 m, correspondientes al perfil de referencia (medido a 60 km/h) y para cada uno de los escenarios de frenado analizados. A partir de esta gráfica se evidenció que, en la mayoría de escenarios de frenado evaluados hubo presencia de irregularidad localizada en el punto final, es decir en el punto en que el perfilómetro deja de frenar para continuar nuevamente a velocidad constante.

El único escenario en que no se observó irregularidad localizada en el punto final fue en el escenario 3.1, que corresponde al de desaceleración leve pasando de una velocidad de 70 km/h a 30 km/h.

Por otra parte, el escenario donde se observó la mayor irregularidad localizada en el punto final fue en el escenario 3.6, que corresponde al de desaceleración fuerte pasando de una velocidad de 50 km/h a 25 km/h, siendo que, para este caso que fue el más crítico la irregularidad localizada alcanzó valores de 2,4 m/km y en este punto el valor MRI de referencia era de 1,4 m/km (es decir una diferencia de 1,0 m/km).

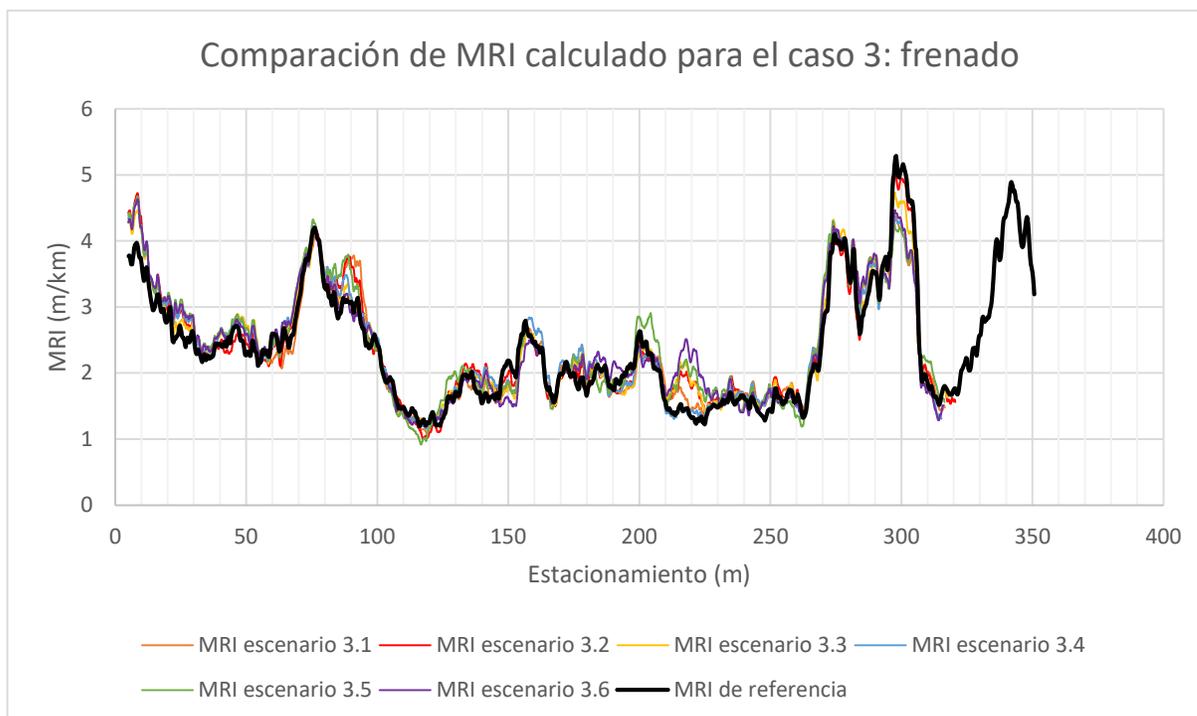


Figura 54. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 3: frenado.

Además, se calculó el MRI en tramos base de 100 m entre los estacionamientos 50 – 150 y 150 - 250, tanto para el perfil de referencia como para cada uno de los escenarios de frenado evaluados (ver Cuadro 28). Lo anterior, teniendo en cuenta que la especificación nacional enfatiza en el cálculo del MRI en tramos base de 100 m, de manera que lo que se busca es determinar si alguno de los escenarios de frenado evaluados podría afectar el cumplimiento especificación.

Al evaluar los escenarios de frenado en tramos base de 100 m se observó que las mayores diferencias respecto al MRI de referencia rondan los 0,1 m/km (ver Cuadro 29). Por lo tanto, si se consideran los resultados del Interlaboratorial realizado, donde se determinó que se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia, se podría concluir que los escenarios de frenado analizados no deberían influir para el cumplimiento de una especificación nacional.

Cuadro 28. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados

<b>Estacionamiento</b>	<b>Referencia</b>	<b>3.1 (0.1 g)</b>	<b>3.2 (0.2 g)</b>	<b>3.3 (0.3 g)</b>	<b>3.4 (0.1 g)</b>	<b>3.5 (0.2 g)</b>	<b>3.6 (0.3 g)</b>
<b>50 - 150</b>	2.24	2.24	2.31	2.31	2.33	2.33	2.28
<b>150 - 250</b>	1.85	1.86	1.91	1.91	1.89	1.98	1.97

Cuadro 29. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia

<b>Estacionamiento</b>	<b>3.1 (0.1 g)</b>	<b>3.2 (0.2 g)</b>	<b>3.3 (0.3 g)</b>	<b>3.4 (0.1 g)</b>	<b>3.5 (0.2 g)</b>	<b>3.6 (0.3 g)</b>
<b>50 - 150</b>	0.00	0.07	0.07	0.09	0.09	0.04
<b>150 - 250</b>	0.01	0.05	0.06	0.03	0.13	0.11

#### **5.4. Caso 4: Aceleración**

Este caso consistió en realizar mediciones del perfil longitudinal bajo dos condiciones distintas de aceleración: fuerte y suave, según el criterio del operario del perfilómetro. Lo anterior, con el objetivo de evaluar si estas condiciones de aceleración se traducen posteriormente en errores en el cálculo del MRI de un proyecto.

Cada escenario de aceleración se realizó iniciando en el estacionamiento 0 + 000 a una velocidad de 30 km/h, hasta llegar a 70 km/h. Además, para cada una de las condiciones de aceleración (suave y fuerte) se realizaron 3 mediciones del perfil longitudinal llegándose a una aceleración máxima de 0,3 g.

##### *5.4.1. Evaluación de la regularidad superficial para el caso 4: aceleración*

Para evaluar la regularidad superficial según el caso 4 (aceleración) se elaboró una gráfica (ver Figura 55) donde se presentan los valores de MRI, continuo con un tramo base de 10 m, correspondientes al perfil de referencia (medido a 60 km/h) y para cada uno de los escenarios de aceleración analizados.

A partir de esta gráfica se evidenció que, principalmente destaca un punto de irregularidad localizada en el estacionamiento 0 + 090 siendo que, para este caso la irregularidad localizada alcanzó valores de 3,8 m/km y en este punto el valor MRI de referencia era de 3,2 m/km (es decir una diferencia de 0,6 m/km).

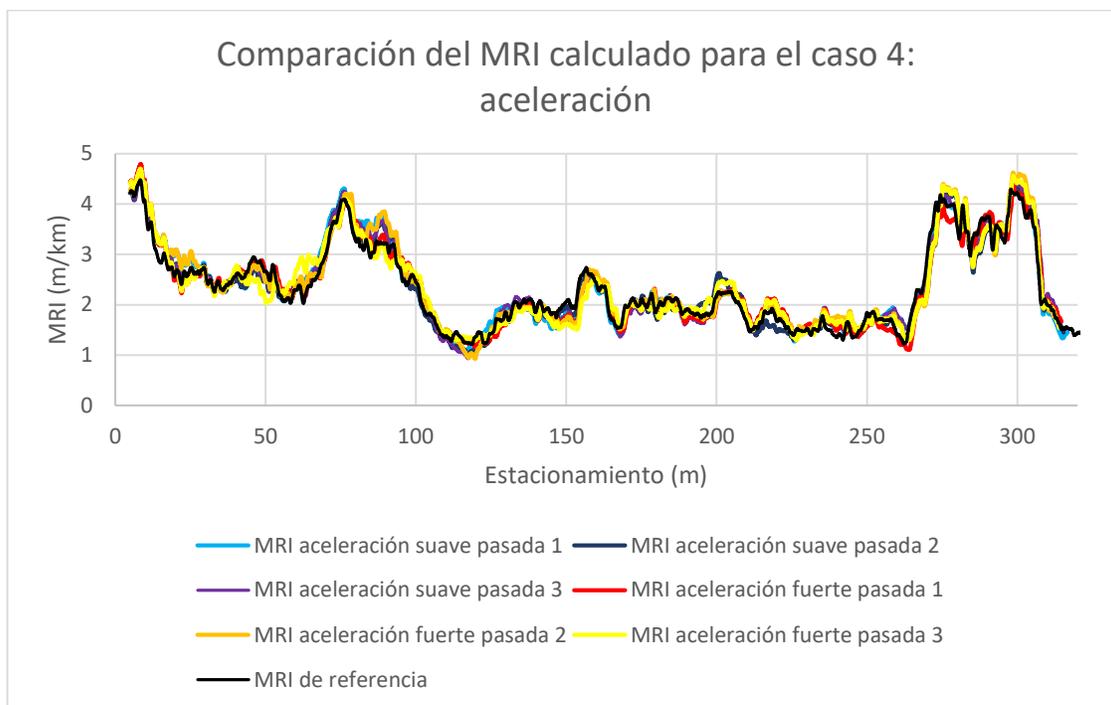


Figura 55. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 4: aceleración.

Para este caso también se calculó el MRI en tramos base de 100 m entre los estacionamientos 0 y 300, tanto para el perfil de referencia como para cada uno de los escenarios de aceleración evaluados (ver Cuadro 30). Lo anterior, teniendo en cuenta que la especificación nacional enfatiza en el cálculo del MRI en tramos base de 100 m, de manera que lo que se busca es determinar si alguno de los escenarios de aceleración evaluados podría afectar el cumplimiento especificación.

Cuadro 30. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados

Estacionamiento	Referencia	4.1 (suave)	4.2 (suave)	4.3 (suave)	4.4 (fuerte)	4.5 (fuerte)	4.6 (fuerte)
<b>0 - 100</b>	2.91	3.03	2.97	3.02	3.00	3.05	2.98
<b>100 - 200</b>	1.86	1.80	1.81	1.78	1.80	1.82	1.80
<b>200 - 300</b>	2.27	2.28	2.22	2.30	2.23	2.29	2.29

Al evaluar los escenarios de aceleración en tramos base de 100 m se observó que las mayores diferencias respecto al MRI de referencia rondan los 0,1 m/km (ver Cuadro 31). Por lo tanto, si se consideran los resultados del Interlaboratorial realizado, donde se determinó que se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia, se podría concluir que los escenarios de aceleración analizados no deberían influir para el cumplimiento de una especificación nacional.

Por último, se observó que las diferencias respecto al de MRI de referencia son similares para todos los escenarios evaluados, sin importar si se trataba de un escenario de aceleración suave o aceleración fuerte. De manera que, el efecto de la aceleración afectó longitudes de onda (particularmente longitudes de onda larga) que no influyen en gran medida para el cálculo de IRI.

Cuadro 31. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia

Estacionamiento	4.1 (suave)	4.2 (suave)	4.3 (suave)	Promedio suave	4.4 (fuerte)	4.5 (fuerte)	4.6 (fuerte)	Promedio fuerte
<b>0 - 100</b>	0.12	0.06	0.10	<b>0.10</b>	0.09	0.14	0.07	<b>0.10</b>
<b>100 - 200</b>	-0.06	-0.05	-0.09	<b>-0.07</b>	-0.07	-0.04	-0.07	<b>-0.06</b>
<b>200 - 300</b>	0.01	-0.06	0.03	<b>0.00</b>	-0.04	0.01	0.02	<b>0.00</b>

### 5.5. Caso 5: Frenar – detenerse – acelerar

Este caso tiene el objetivo de evaluar la afectación en el cálculo del IRI asociada a situaciones comunes que pueden ocurrir durante la medición del perfil longitudinal, principalmente en rutas urbanas donde resulta más común que el operario del perfilómetro tenga que detenerse ya sea por un CEDA, ALTO, semáforo o el cruce inesperado de un peatón.

Para evaluar este caso se consideraron 4 escenarios:

- Escenario 5.1: iniciando a 50 km/h, frenar a 0,1 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 50 km/h.
- Escenario 5.2: iniciando a 50 km/h, frenar a 0,2 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 50 km/h.
- Escenario 5.3: iniciando a 70 km/h, frenar a 0,1 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 70 km/h.
- Escenario 5.4: iniciando a 70 km/h, frenar a 0,2 g, detenerse durante 5 segundos y acelerar nuevamente a 70 km/h.

La ubicación de inicio, parada y fin de cada uno de los escenarios se muestra en la Figura 56, donde se buscó que para todos los escenarios el sitio de parada fuera el mismo. Esto con el propósito de facilitar el análisis comparativo posterior.

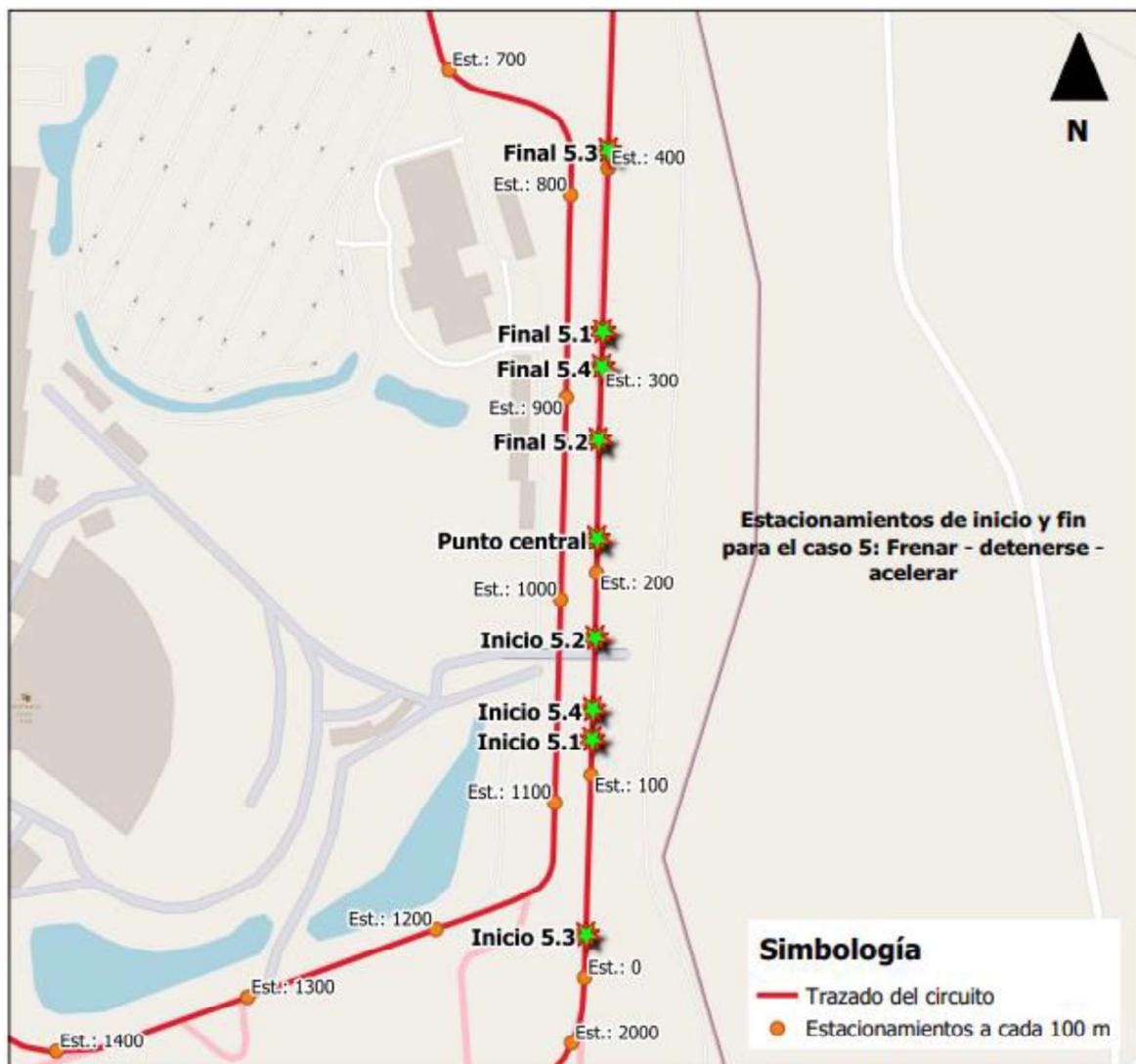


Figura 56. Estacionamientos de inicio y fin para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar

### 5.5.1. Evaluación del perfil longitudinal para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar

Para evaluar el efecto de detener el perfilómetro durante la medición del perfil longitudinal procedió a comparar el perfil longitudinal de todos los escenarios evaluados respecto a un perfil longitudinal de referencia. Específicamente, para propósitos de comparación se consideró el perfil longitudinal de la huella izquierda del vehículo. Además, como perfil de referencia se utilizó un perfil medido a una velocidad constante de 60 km/h.

Esta comparación se muestra en la Figura 57, donde además se señala la ubicación del punto central, que es el lugar en el cual el perfilómetro se detuvo para todos los escenarios evaluados.

A partir de esta comparación se pudo observar que, para todos los escenarios evaluados, en el punto donde el perfilómetro se detuvo ocurrió un salto inusual en la elevación del perfil medido respecto al perfil de referencia.

Adicionalmente, antes y después del punto donde se detuvo del perfilómetro se observaron diferencias entre el perfil de referencia y el medido, siendo que las diferencias o distorsiones previo a que el vehículo se detenga se podrían explicar con el hecho de que en las cercanías de este punto el perfilómetro opera a velocidades bajas, inferiores a su capacidad.

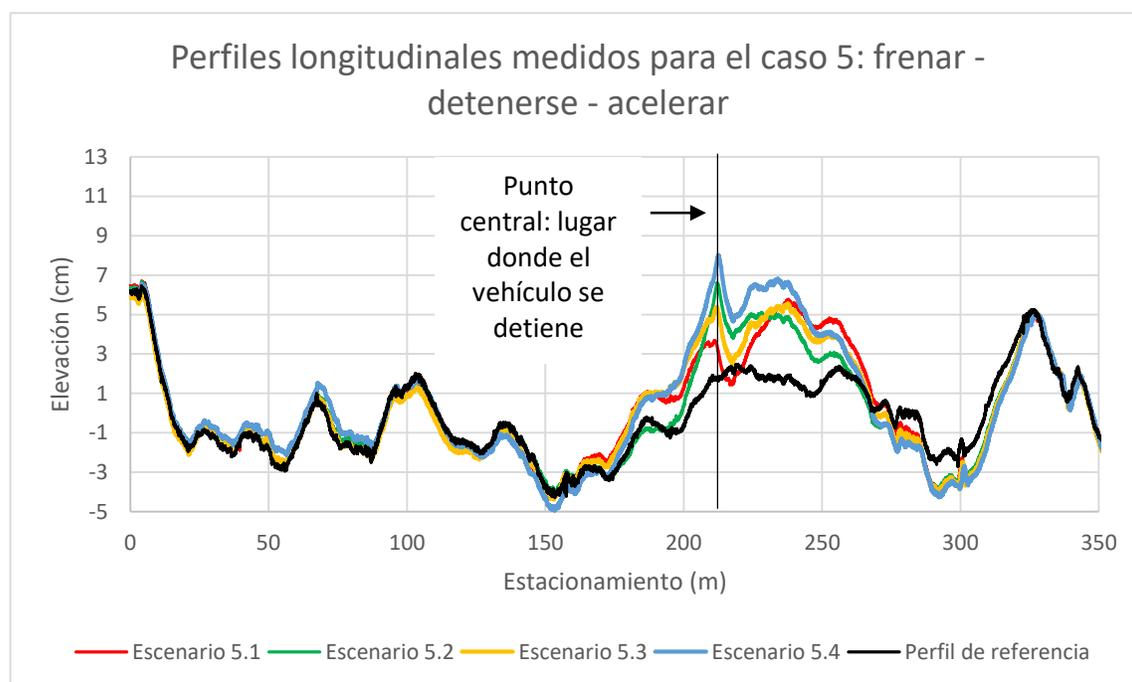


Figura 57. Comparación de perfiles longitudinales medidos para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar

#### *5.5.2. Evaluación de la regularidad superficial para el caso 5: frenar – detenerse - acelerar*

Para evaluar la regularidad superficial según el caso 5 se elaboró una gráfica (ver Figura 58) donde se presentan los valores de MRI, continuo con un tramo base de 10 m, correspondientes al perfil de referencia (medido a 60 km/h) y para cada uno de los escenarios analizados.

A partir de esta gráfica se evidenció que, en los alrededores del punto donde el vehículo se detiene (estacionamiento 0+215) se produce irregularidad localizada que implica un incremento en los valores de regularidad respecto a los valores de referencia. En general, para todos los escenarios evaluados este incremento en la regularidad superficial ocurrió en una longitud de aproximadamente 30 m que se distribuye en 10 m antes y 20 m después del sitio de parada.

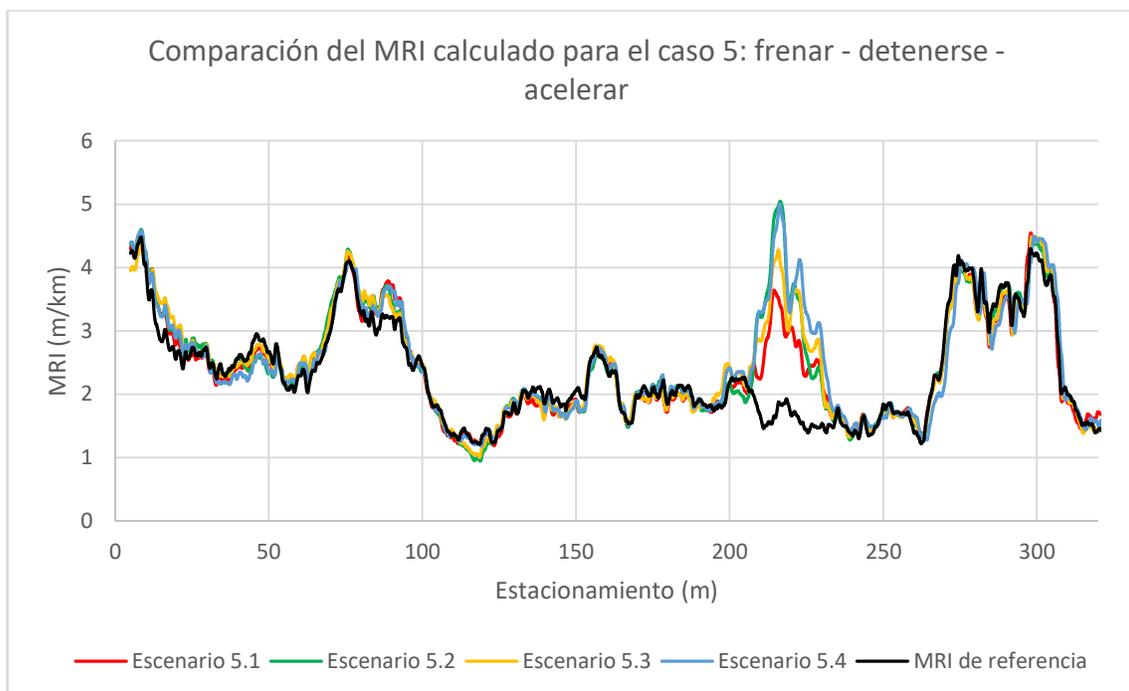


Figura 58. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 5: frenar – detenerse – acelerar.

Las irregularidades localizadas evidenciadas en este caso son mayores a las a las observadas en otros casos, como por ejemplo el caso 4 donde se observó que el efecto de la aceleración no afectaba en gran medida los valores finales de IRI.

Además, se pudo observar que, comparativamente, en los escenarios en que se frenó/aceleró a 0,2 g se presentaron mayores incrementos en el IRI con respecto a los valores de referencia. De igual forma se pudo observar que, comparativamente, en los escenarios en que se inició a 70 km/h se presentaron mayores valores de IRI con respecto a los valores de referencia.

Por último, para este caso también se calculó el MRI en tramos base de 100 m entre los estacionamientos 0 y 300, tanto para el perfil de referencia como para cada uno de los escenarios evaluados (ver Cuadro 32 **Cuadro 30**). Lo anterior, teniendo en cuenta que la especificación nacional enfatiza en el cálculo del MRI en tramos base de 100 m, de manera que lo que se busca es determinar si alguno de los escenarios evaluados en este caso podría afectar el cumplimiento especificación.

Al evaluar la regularidad superficial en tramos base de 100 m se observó que las mayores diferencias respecto al MRI de referencia están entre los 0,24 m/km y 0,48 m/km, para los escenarios 5.1 y 5.4 respectivamente (ver Cuadro 33). Por lo tanto, si se consideran los resultados del Interlaboratorial realizado, donde se determinó que se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia, se podría concluir que el hecho de detener el perfilómetro durante la medición del perfil longitudinal podría influir en el cumplimiento de una especificación nacional.

Cuadro 32. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados

<b>Estacionamiento</b>	<b>0 - 100</b>	<b>100 - 200</b>	<b>200 - 300</b>
<b>Referencia</b>	2.91	1.86	2.27
Escenario 5.1 (pasada 1)	2.98	1.80	2.70
Escenario 5.1 (pasada 2)	2.99	1.80	2.38
Escenario 5.1 (pasada 3)	3.03	1.81	2.45
<b>Escenario 5.1 (promedio)</b>	3.00	1.80	2.51
Escenario 5.2 (pasada 1)	3.05	1.85	2.71
Escenario 5.2 (pasada 2)	2.96	1.79	2.61
Escenario 5.2 (pasada 3)	3.10	1.80	2.62
<b>Escenario 5.2 (promedio)</b>	3.04	1.81	2.65
Escenario 5.3 (pasada 1)	3.09	1.81	2.53
Escenario 5.3 (pasada 2)	3.02	1.85	2.60
Escenario 5.3 (pasada 3)	2.95	1.85	2.69
<b>Escenario 5.3 (promedio)</b>	3.02	1.84	2.61
Escenario 5.4 (pasada 1)	3.05	1.83	2.86
Escenario 5.4 (pasada 2)	2.96	1.85	2.66
Escenario 5.4 (pasada 3)	2.93	1.81	2.75
<b>Escenario 5.4 (promedio)</b>	2.98	1.83	2.76

Cuadro 33. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia

<b>Estacionamiento</b>	<b>0 - 100</b>	<b>100 - 200</b>	<b>200 - 300</b>
Escenario 5.1 (pasada 1)	0.07	-0.06	0.42
Escenario 5.1 (pasada 2)	0.08	-0.07	0.11
Escenario 5.1 (pasada 3)	0.11	-0.06	0.17
<b>Escenario 5.1 (promedio)</b>	0.09	-0.06	0.24
Escenario 5.2 (pasada 1)	0.14	-0.02	0.44
Escenario 5.2 (pasada 2)	0.05	-0.08	0.34
Escenario 5.2 (pasada 3)	0.18	-0.06	0.35
<b>Escenario 5.2 (promedio)</b>	0.12	-0.05	0.38
Escenario 5.3 (pasada 1)	0.17	-0.05	0.26
Escenario 5.3 (pasada 2)	0.11	-0.01	0.32
Escenario 5.3 (pasada 3)	0.04	-0.01	0.42
<b>Escenario 5.3 (promedio)</b>	0.11	-0.03	0.33
Escenario 5.4 (pasada 1)	0.13	-0.03	0.58
Escenario 5.4 (pasada 2)	0.05	-0.01	0.39
Escenario 5.4 (pasada 3)	0.02	-0.05	0.48
<b>Escenario 5.4 (promedio)</b>	0.07	-0.03	0.48

### 5.6. Caso 6: Detenerse y acelerar

Este caso se evalúa la afectación en el cálculo del IRI asociada a la medición del perfil longitudinal iniciando desde una posición de velocidad cero. Lo anterior, con el objetivo de determinar la distancia requerida al inicio de la medición para que los valores de perfil longitudinal puedan considerarse como válidos.

Para evaluar este caso se consideraron 2 escenarios:

- Escenario 6.1: hasta llegar a 70 km/h utilizando un nivel de aceleración suave, según el criterio del conductor.
- Escenario 6.2: hasta llegar a 70 km/h utilizando un nivel de aceleración fuerte, según el criterio del conductor.

Para evaluar la regularidad superficial según el caso 6 se elaboró una gráfica (ver Figura 59) donde se presentan los valores de MRI, continuo con un tramo base de 10 m, correspondientes al perfil de referencia (medido a 60 km/h) y para cada uno de los escenarios analizados.

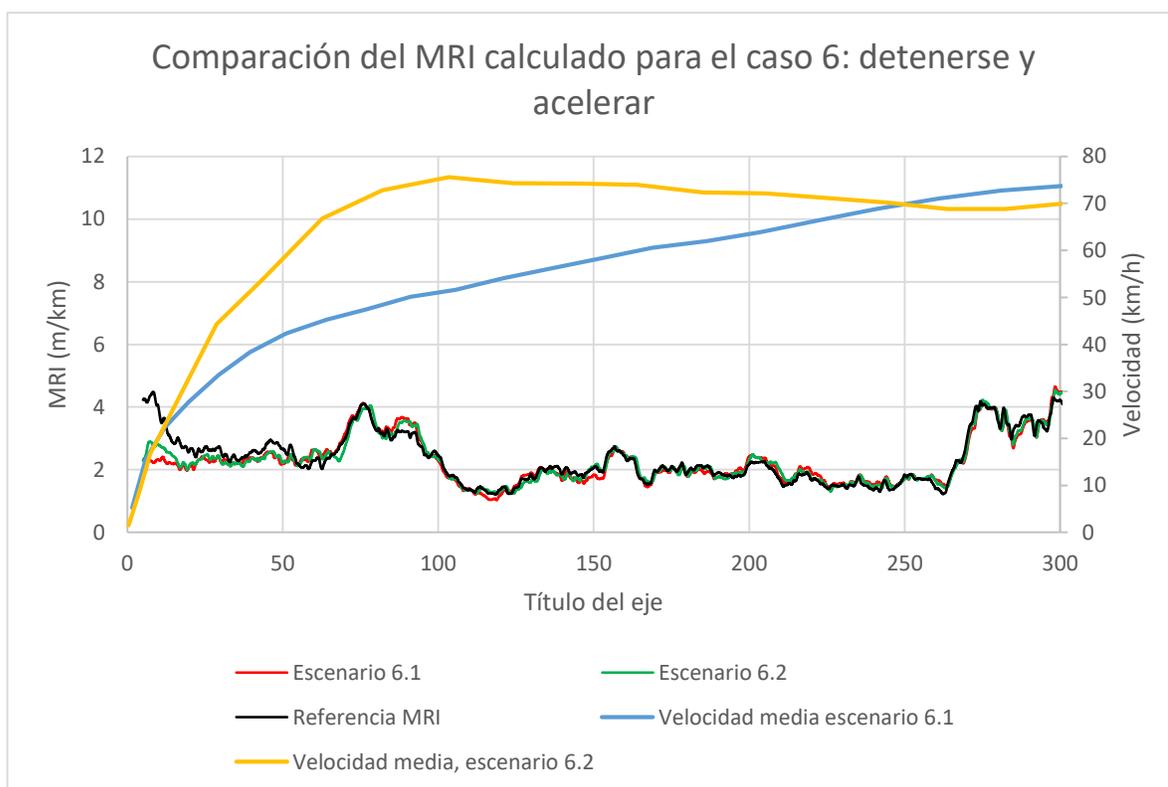


Figura 59. MRI continuo calculado en tramos base de 10 m, para cada uno de los escenarios de análisis del caso 6: detenerse y acelerar.

A partir de esta gráfica se evidenció que, para ambos escenarios (aceleración suave y fuerte), en los primeros 23 m a partir del punto donde el perfilómetro arranca es posible discriminar que las gráficas de MRI tienden a mostrar valores inferiores a la referencia.

En cuanto a las diferencias entre los escenarios de aceleración suave y aceleración fuerte se pudo observar que, para el caso de aceleración fuerte, comparativamente respecto al caso de aceleración suave, los valores de MRI en los primeros metros son superiores. Sin embargo, en ambos casos hay diferencias en los primeros metros respecto al perfil de referencia, por lo tanto, se recomienda iniciar las mediciones del perfil longitudinal al menos 30 m antes del inicio del proyecto.

Por último, para este caso también se calculó el MRI en tramos base de 100 m entre los estacionamientos 0 y 300, tanto para el perfil de referencia como para cada uno de los escenarios evaluados (ver Cuadro 34 **Cuadro 30**). Lo anterior, teniendo en cuenta que la especificación nacional enfatiza en el cálculo del MRI en tramos base de 100 m, de manera que lo que se busca es determinar si alguno de los escenarios evaluados en este caso podría afectar el cumplimiento especificación.

Al evaluar la regularidad superficial en tramos base de 100 m se observó que las mayores diferencias respecto al MRI de referencia están entre los 0,32 m/km y 0,28 m/km, para los escenarios 6.1 y 5.2 respectivamente (ver Cuadro 35). Por lo tanto, si se consideran los resultados del Interlaboratorial realizado, donde se determinó que se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia, se podría concluir que el hecho de realizar una medición del perfil longitudinal desde una posición de velocidad cero podría influir en el cumplimiento de una especificación nacional.

Cuadro 34. MRI en tramos base de 100 m, calculado para el perfil de referencia y para cada uno de los escenarios evaluados

<b>Estacionamiento</b>	<b>0 - 100</b>	<b>100 - 200</b>	<b>200 - 300</b>
<b>Referencia</b>	2.91	1.86	2.27
Escenario 6.1 (pasada 1)	2.58	1.80	2.33
Escenario 6.1 (pasada 2)	2.61	1.78	2.30
Escenario 6.1 (pasada 3)	2.58	1.81	2.27
<b>Escenario 6.1 (promedio)</b>	2.59	1.80	2.30
Escenario 6.2 (pasada 1)	2.64	1.83	2.29
Escenario 6.2 (pasada 2)	2.63	1.83	2.28
<b>Escenario 6.2 (promedio)</b>	2.64	1.83	2.29

Cuadro 35. Diferencia de MRI para cada uno de los escenarios evaluados respecto a los valores de referencia

<b>Estacionamiento</b>	<b>0 - 100</b>	<b>100 - 200</b>	<b>200 - 300</b>
Escenario 6.1 (pasada 1)	-0.33	-0.06	0.05
Escenario 6.1 (pasada 2)	-0.30	-0.08	0.03
Escenario 6.1 (pasada 3)	-0.33	-0.05	0.00
<b>Escenario 6.1 (promedio)</b>	<b>-0.32</b>	<b>-0.07</b>	<b>0.03</b>
Escenario 6.2 (pasada 1)	-0.28	-0.03	0.02
Escenario 6.2 (pasada 2)	-0.28	-0.03	0.01
<b>Escenario 6.2 (promedio)</b>	<b>-0.28</b>	<b>-0.03</b>	<b>0.01</b>

## 6. VARIABILIDAD DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL A LO ANCHO DE LA HUELLA DE LOS VEHÍCULOS

El objetivo de este capítulo es evaluar mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) la variabilidad de la regularidad superficial a lo ancho de la huella de los vehículos y en las cercanías de tapas de alcantarilla.

Este capítulo consiste en evaluar, mediante un VANT, tres rutas de travesía que fueron atendidas mediante una rehabilitación o una sobrecapa. El objetivo de este procedimiento es analizar las variaciones de regularidad superficial a lo ancho de las huellas de la superficie de ruedo de la carretera. Además, de evaluar el efecto de las tapas de alcantarilla en la regularidad superficial de una vía.

Específicamente, se van a evaluar las siguientes rutas de travesía<sup>12</sup>:

- **Ruta Nacional 10040:** Atendida en octubre de 2019, mediante la actividad de perfilado y sobrecapa. Ver ubicación en la Figura 4.
- **Ruta Nacional 10802:** Atendida en febrero de 2020, mediante la actividad de perfilado y sobrecapa. Ver ubicación en la Figura 5.
- **Ruta Nacional 40902:** Atendida en diciembre de 2019, mediante una rehabilitación que contempló la colocación de base estabilizada con cemento. Ver ubicación en la Figura 6.

<sup>12</sup> Adicionalmente el perfil longitudinal de estas rutas será caracterizado mediante el uso de un perfilómetro láser.

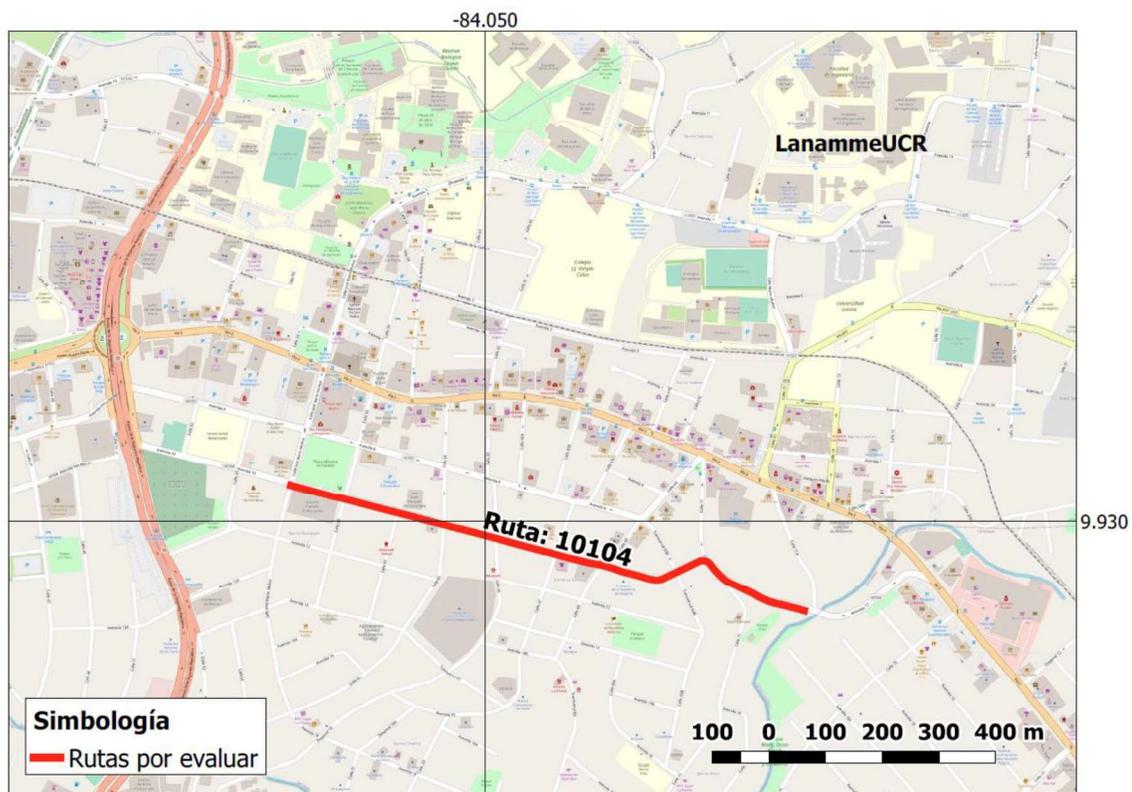


Figura 60. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10104.

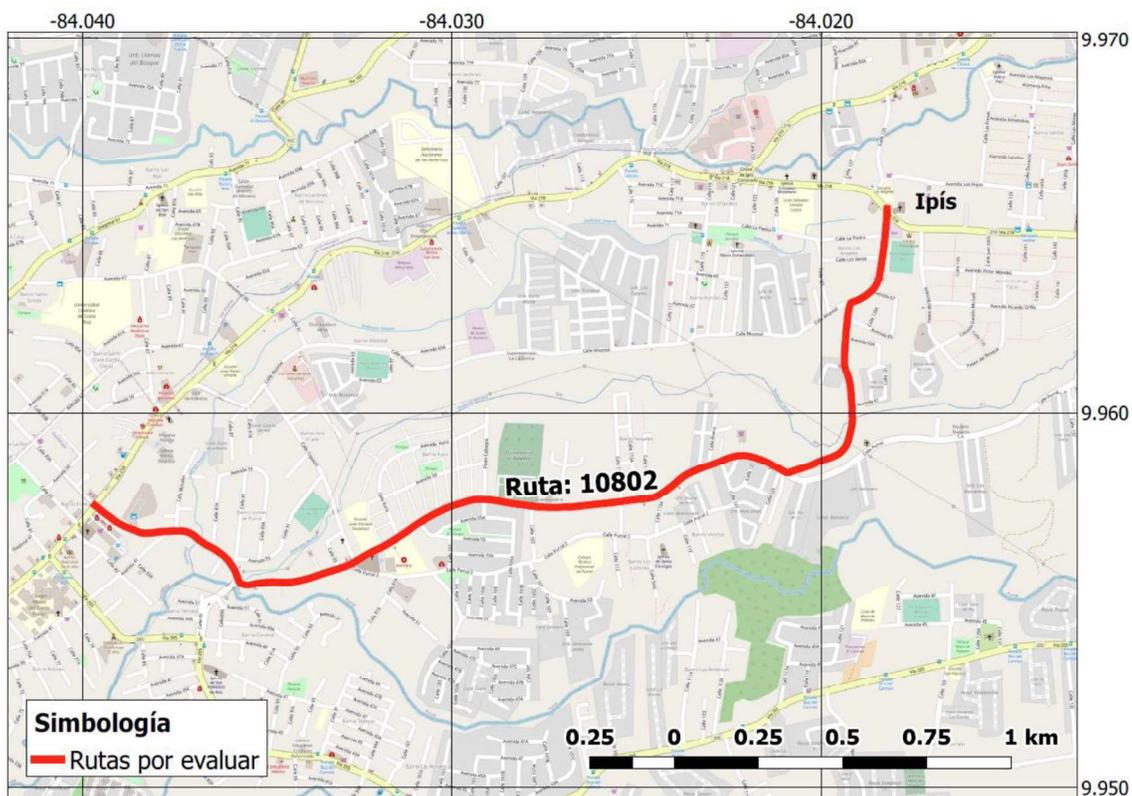


Figura 61. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 10802.

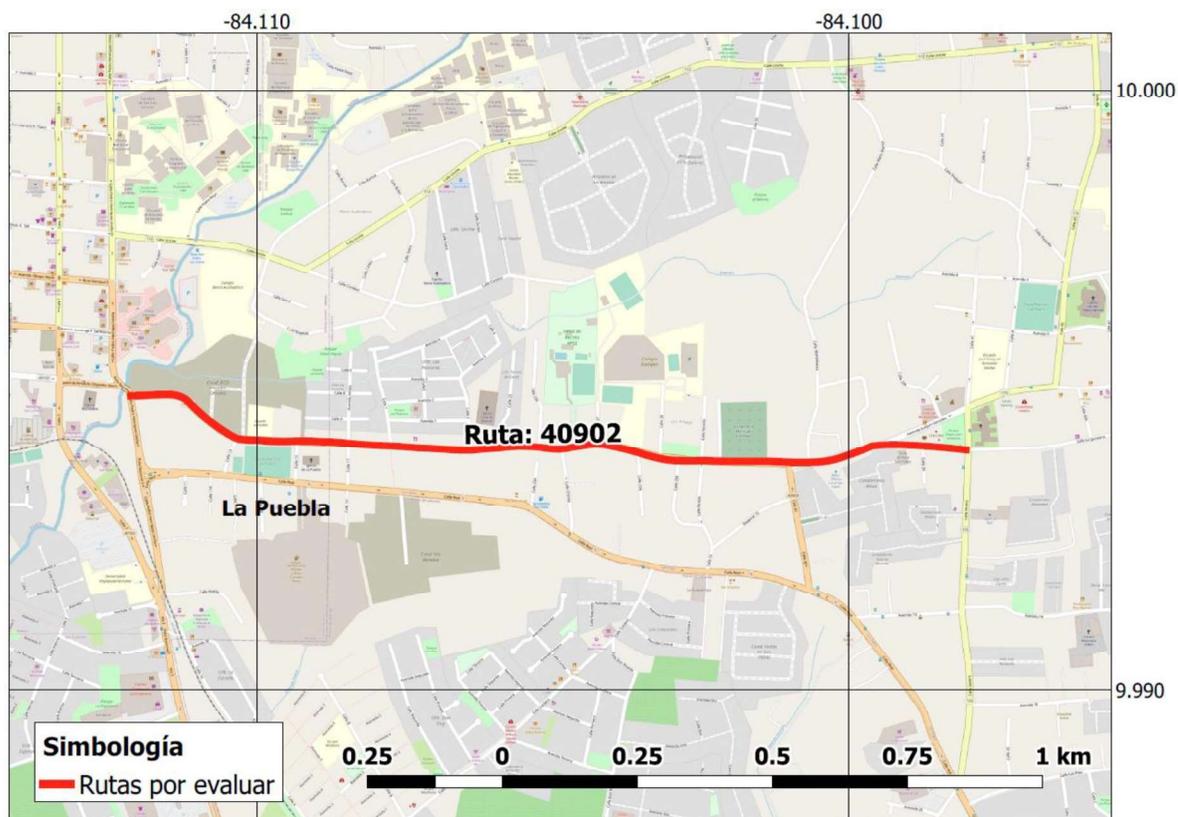


Figura 62. Ubicación de la Ruta Nacional de travesía 40902.

### 6.1. Procedimiento para la captura y análisis de datos obtenidos a partir del VANT

El procedimiento para la captura y análisis de datos obtenidos a partir del VANT inicia con la ejecución vuelos programados sobre las superficies de las carreteras por evaluar, en este caso particular los vuelos se realizaron a una altura de 30 m y utilizando un drone marca DJI, modelo Phantom 4 Pro (ver Figura 63). Con la programación de estos vuelos se obtiene una serie de fotografías superpuestas que mediante el uso de técnicas de fotogrametría permiten posteriormente generar un modelo de elevación de las superficies.

La siguiente fase está relacionada con el procesamiento de las fotografías, para lo cual se utilizó el software *Agisoft Metashape Professional*, siendo que el proceso se dividió en las siguientes etapas:

- a) Importe de las fotografías y la definición del sistema de coordenadas, en este caso se definió el sistema de coordenadas CRTM05.
- b) Construcción de una nube de puntos, a partir de las fotografías capturadas (ver Figura 64).



Figura 63. Preparación de vuelo programado para la captura de fotografías aéreas.



Figura 64. Nube de puntos construida a partir de las fotografías capturadas.

- c) Limpieza de datos: en este punto se eliminan elementos que no son de interés para el estudio, con el objetivo de dejar únicamente la superficie de la vía (ver Figura 65).



Figura 65. Limpieza de datos con el objetivo de dejar únicamente la superficie de la carretera.

- d) Creación del modelo de elevación de terreno (*DEM: Digital Elevation Model*): posterior a la limpieza de los datos se procede a generar un modelo de elevación de terreno (ver Figura 66), sobre el cual posteriormente se extrae el perfil longitudinal de la carretera.

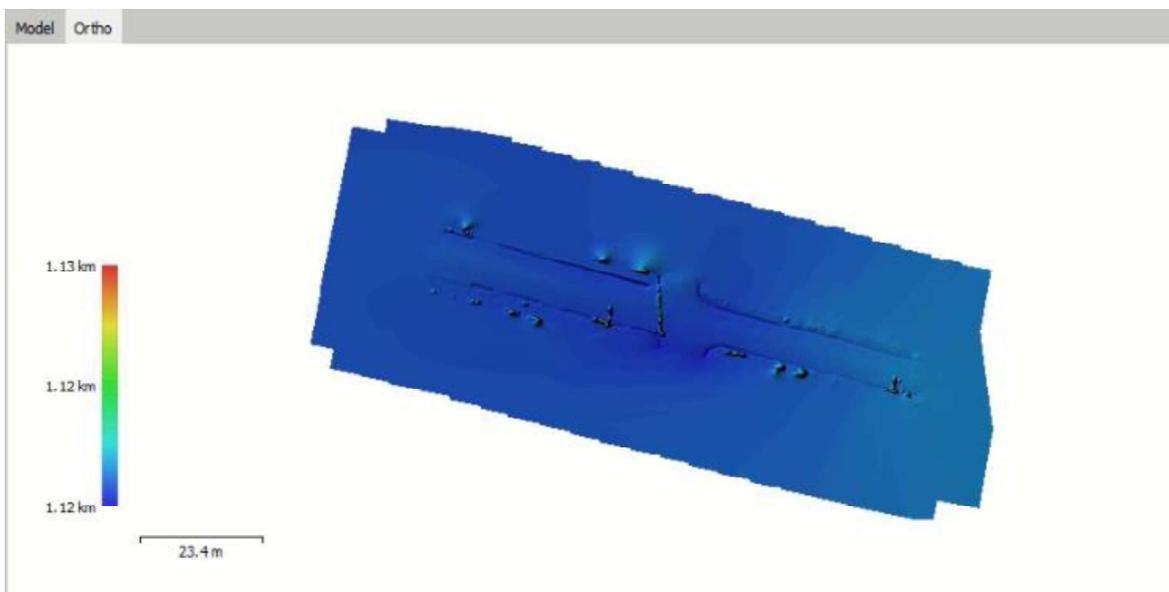


Figura 66. Modelo de elevación de terreno para un tramo de la ruta 10104.

- e) Definición las líneas sobre las cuales se calculará el perfil longitudinal de la carretera (ver Figura 67): en este punto se realiza un trazado manual sobre las partes de la carretera donde posteriormente se va a extraer el perfil longitudinal.

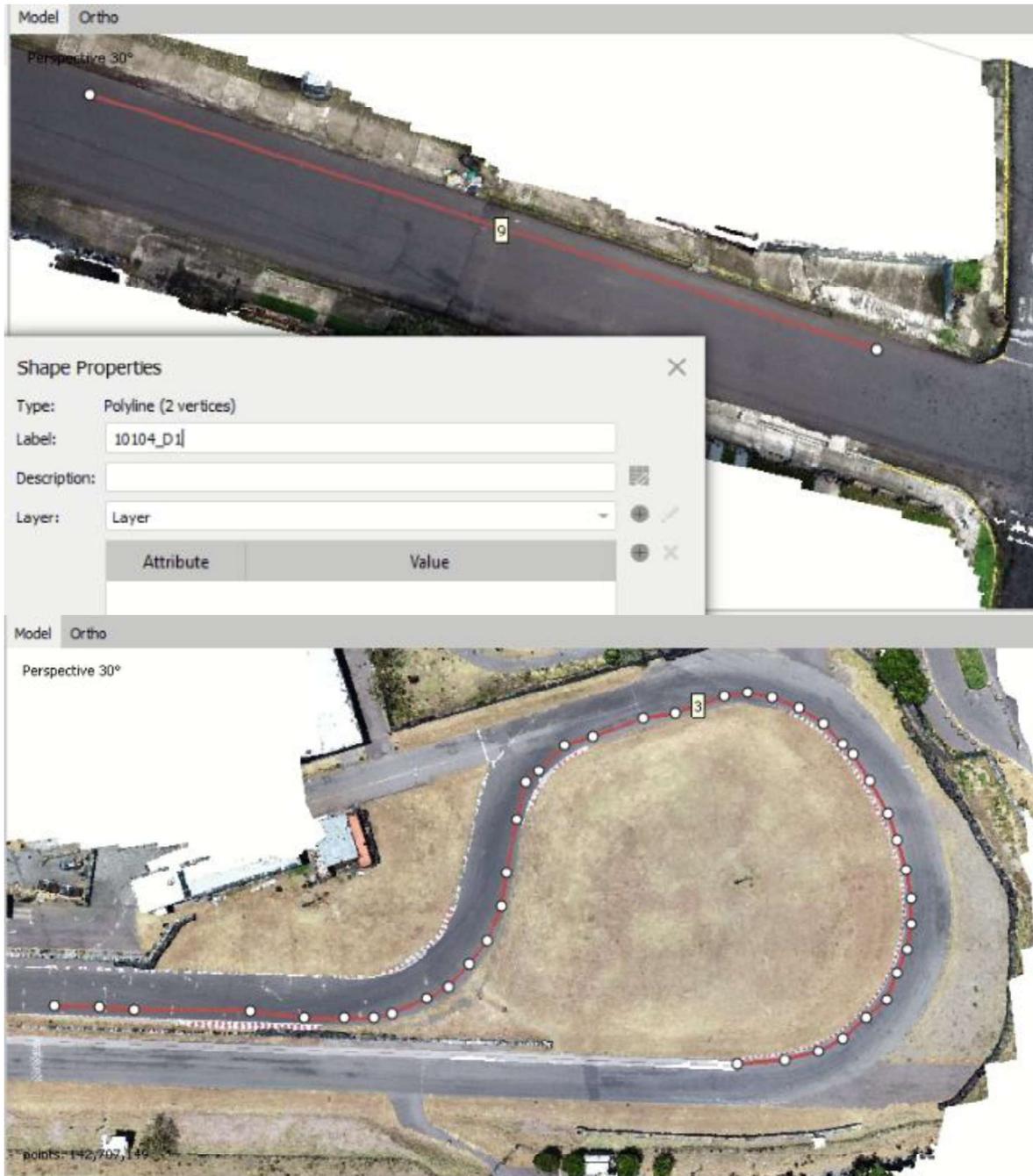


Figura 67. Definición las líneas sobre las cuales se calculará el perfil longitudinal de la carretera.

- f) Extracción del perfil longitudinal: mediante el uso del software *ArcGIS Desktop* o alternativamente el software *QGIS* (de licencia gratuita) se exportan, en formato *.txt*, los perfiles longitudinales trazados sobre el modelo de elevación.

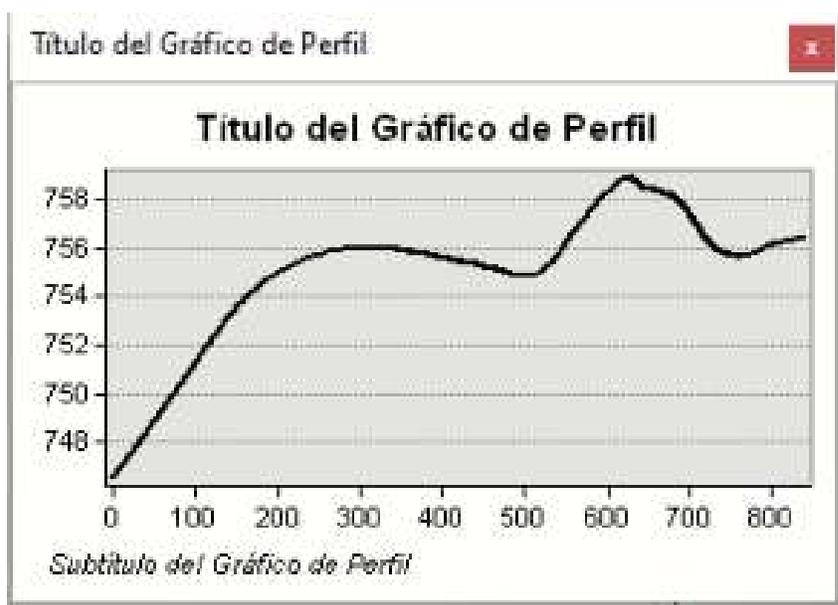


Figura 68. Visualizador del perfil longitudinal en *ArcGIS Desktop*.

- g) Como paso final se realiza un importe del perfil longitudinal al software ProVAL, para el posterior cálculo del IRI (ver Figura 69).

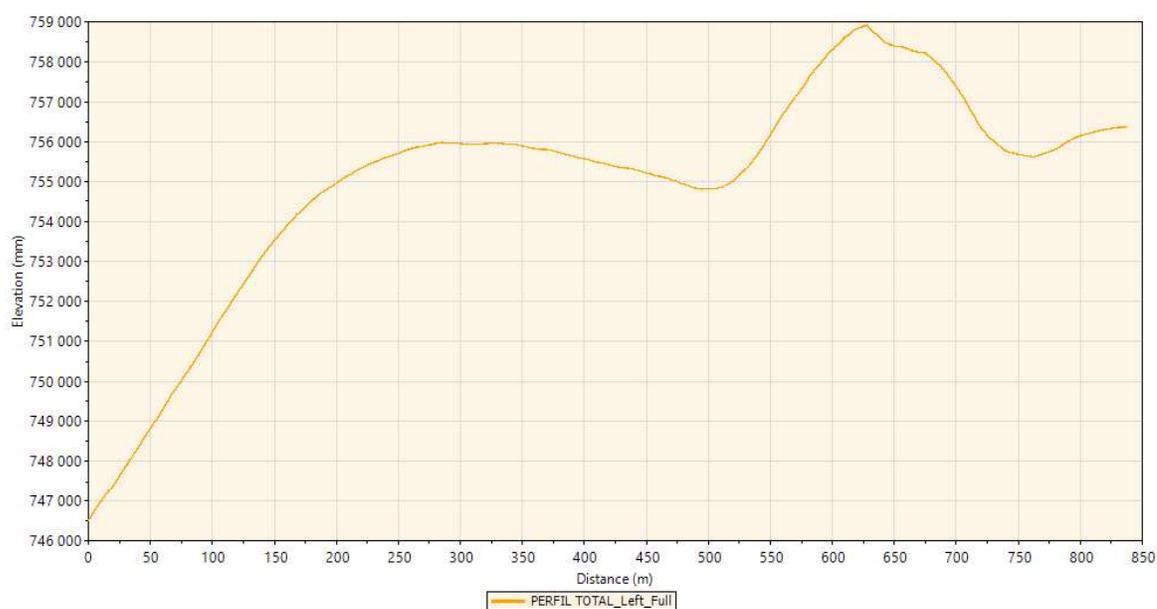


Figura 69. Visualizador del perfil longitudinal en ProVAL.

## 6.2. Cálculo del IRI a partir de las fotografías aéreas capturadas sobre el parque VIVA.

Teniendo en cuenta que la regularidad superficial del circuito de competencias del parque VIVA fue ampliamente caracterizada en el desarrollo de esta investigación, el presente apartado tiene el objetivo de comparar la regularidad superficial obtenida mediante el uso de perfilómetros inerciales con respecto a la regularidad superficial obtenida a partir de la captura de fotografías aéreas mediante VANT.



Figura 70. Modelo de nube de puntos del circuito de competencias del parque VIVA.

A partir de la comparación realizada se observó que el perfil longitudinal obtenido de las imágenes aéreas reflejó, en términos generales, mayores valores de regularidad superficial. Como se desconoce qué aspectos del perfil longitudinal medido con drone son los que generan las diferencias y aumentos en la regularidad superficial, se procedió a evaluar distintos escenarios adicionales para evaluar si al aplicar filtros al perfil medido con drone era posible mejorar los resultados de IRI.

- **Escenario 1:** Al perfil medido con drone se le aplicaron filtros de paso alto (Butterworth), empezando con longitudes de onda de 100 m hasta longitudes de onda de 30 m. Como resultado, para este escenario no se observaron cambios visibles en el posterior cálculo del IRI, es decir los valores de IRI medidos con drone seguían siendo superiores a los valores de referencia.
- **Escenario 2:** Al perfil medido con drone se le aplicaron filtros de paso bajo (Butterworth), empezando con longitudes de onda de 1 m hasta longitudes de onda de 3,5 m. Como resultado, para este escenario sí se observó que el resultado final de IRI fue sensible ante la aplicación de los filtros, siendo que, conforme la magnitud de la longitud de onda aplicada al filtro de paso bajo aumentaba los valores de IRI medidos con drone disminuían y se aproximaban más a los valores de referencia.

Para ilustrar la tendencia señalada en el escenario 2, en la Figura 71 se muestra una gráfica comparativa con: los valores de IRI de referencia en el circuito de competencias, los valores de IRI obtenidos con drone sin la aplicación de filtros y los valores de IRI obtenidos con drone con la aplicación de dos de los filtros descritos en el escenario 2.

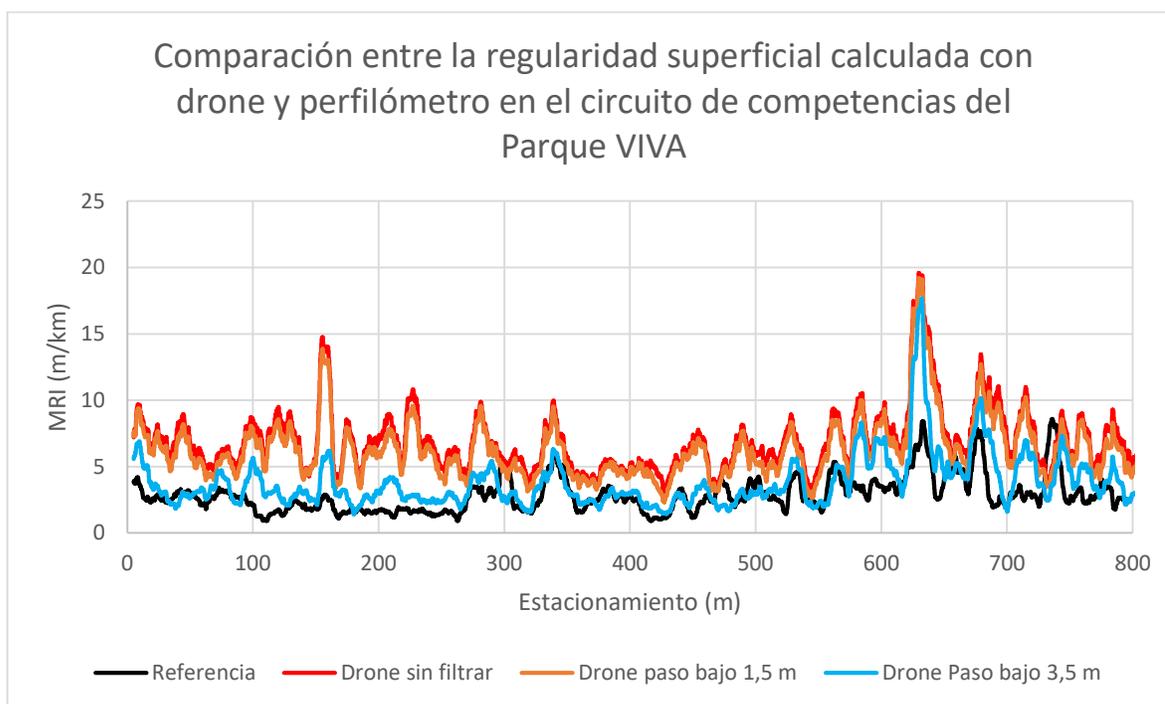


Figura 71. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en el circuito de competencias del parque VIVA

A partir de la evaluación de los Escenarios 1 y 2 se observó que:

- Los valores de IRI obtenidos con drone (sin la aplicación de filtros) son superiores a los valores de IRI de referencia (ver Figura 71). Por lo tanto, el perfil longitudinal capturado con drone no reprodujo con exactitud las características de la superficie.
- Al aplicar filtros de paso bajo y de paso alto al perfil longitudinal medido se observó que el problema del perfil longitudinal medido con drone son las longitudes de onda corta. Las cuales se asocian a la resolución de la cámara utilizada y a la cercanía del drone con la superficie.
- Se observó que al aplicar un filtro de paso bajo de 1,5 m al perfil longitudinal medido con drone, el IRI resultante mejora levemente, no obstante, sigue siendo mayor a los valores de IRI de referencia (ver Figura 71).
- Se observó que al aplicar un filtro de paso bajo de 3,5 m al perfil longitudinal medido con drone, el IRI resultante tenía una tendencia similar al IRI de referencia (ver Figura 71). Sin embargo, en la práctica no se considera adecuado aplicar este filtro

pues con su uso hay una alta probabilidad de ocultar irregularidades del perfil real de la carretera, por ejemplo: defectos constructivos.

### 6.3. Evaluación del IRI en rutas de travesía a partir de la captura de imágenes aéreas.

Para complementar y validar los resultados obtenidos previamente respecto a la certeza de los datos de IRI que puedan obtenerse a través de las mediciones realizadas con drone, el presente apartado realiza una comparación similar a la presentada en la Figura 71 pero con cada una de las rutas de travesía propuestas preliminarmente para su estudio en la presente investigación.

Como resultado se observó una tendencia similar a obtenida para el caso de estudio sobre el circuito de competencias del Parque VIVA donde se observó que el problema del perfil longitudinal medido con drone son las longitudes de onda corta. Las cuales se asocian a la resolución de la cámara utilizada y a la cercanía del drone con la superficie.

#### 6.3.1. Ruta Nacional 10104

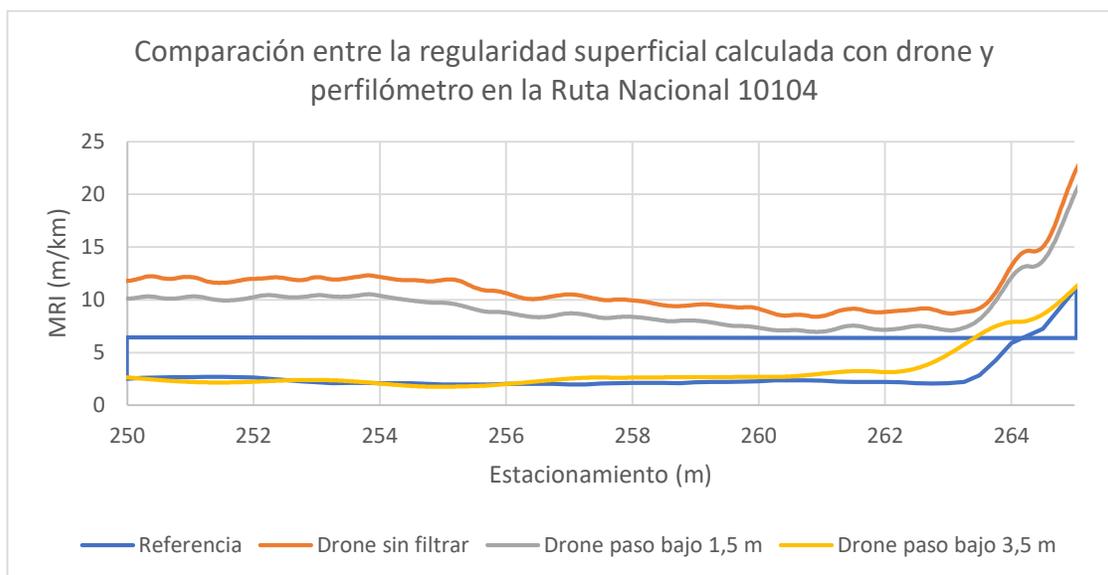


Figura 72. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en la Ruta Nacional 10104

### 6.3.2. Ruta Nacional 10802

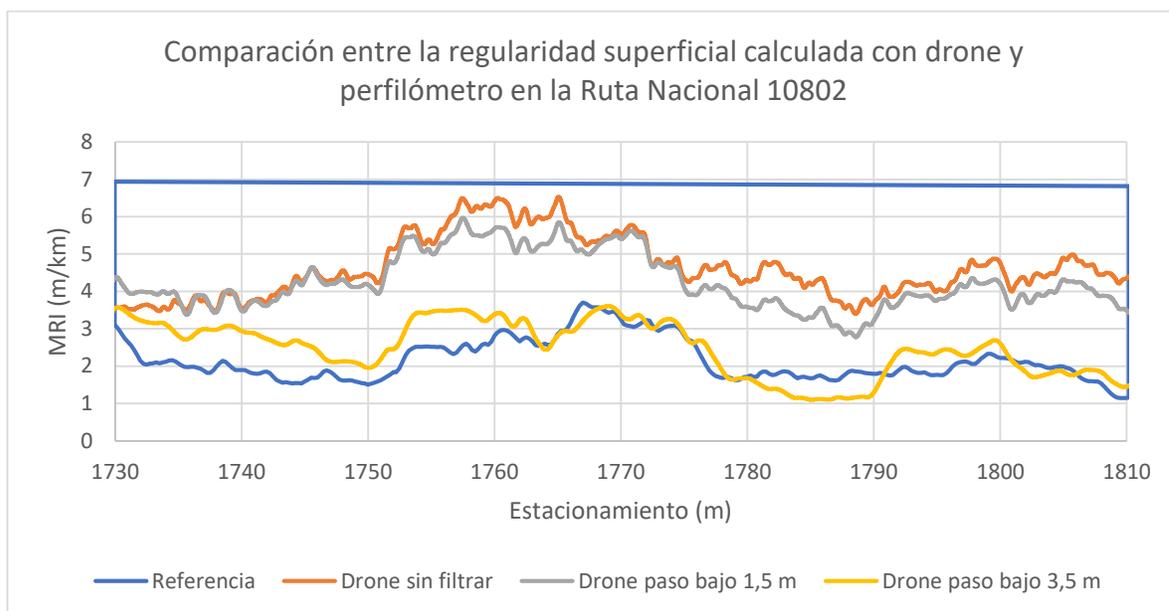


Figura 73. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en la Ruta Nacional 10802

### 6.3.3. Ruta Nacional 10902

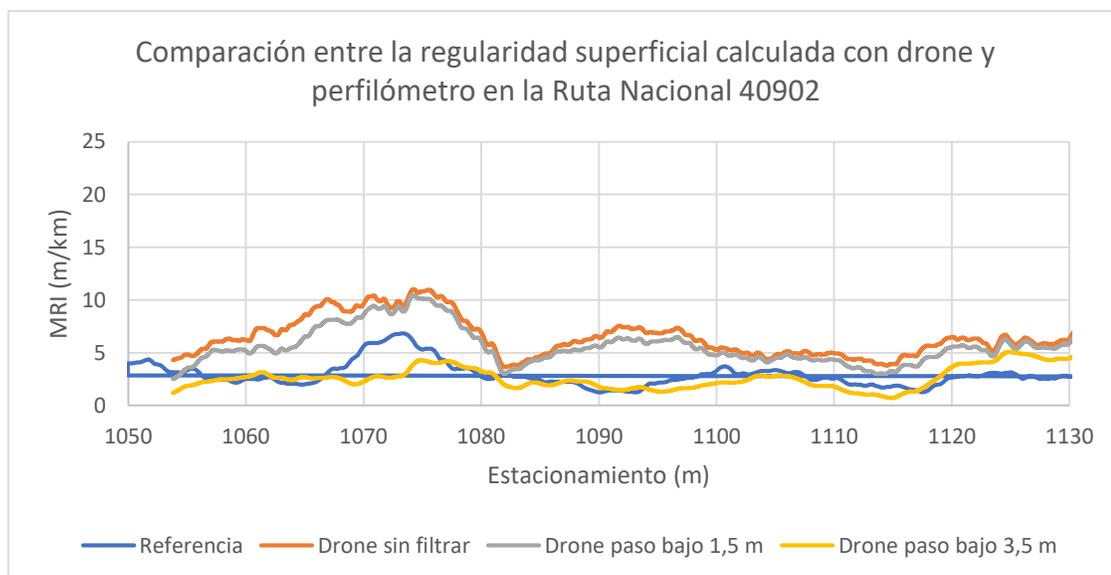


Figura 74. Comparación entre la regularidad superficial calculada con drone y perfilómetro en la Ruta Nacional 40902

A partir de la evaluación de estos escenarios se observó que el cálculo de IRI con drone, bajo las condiciones realizadas en esta investigación, no presentó resultados satisfactorios, ya que para aproximar los resultados obtenidos con drone a las mediciones de referencia fue necesario aplicar filtros de paso bajo cuyo uso no es recomendado pues podrían ocultar irregularidades del perfil real de la carretera, por ejemplo: defectos constructivos.

Por lo tanto, considerando que las mediciones del perfil longitudinal con drone son una potencial alternativa económica para medir el perfil longitudinal de una carretera, se recomienda el planteamiento de una investigación cuyo propósito sea determinar las condiciones óptimas para las cuales se podría medir el perfil longitudinal con drone, así como desarrollar un protocolo para determinar dichas condiciones según las distintas características del drone a utilizar, por ejemplo: alguna correlación entre la altura del vuelo y la resolución de la cámara.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Evolución de la regularidad superficial a lo largo del tiempo

- Luego del periodo de estudio, la regularidad superficial del pavimento evaluado presentó una desmejora que se reflejó en un incremento de 0,1 m/km en el MRI promedio del proyecto.
- Se considera que los resultados obtenidos sobre la evolución de la regularidad superficial son conservadores respecto a lo que se podría esperar en un proyecto de rehabilitación mayor que implique la atención del pavimento desde capas granulares.
- Se observó que la regularidad superficial está relacionada con la capacidad estructural del pavimento, especialmente con los tramos de mayor y menor capacidad estructural.
- Se observó que los coeficientes BLI y MLI fueron los que presentaron una mayor correlación con el avance de la regularidad superficial del pavimento. Por otra parte, la correlación entre el coeficiente LLI y el avance de la regularidad superficial fue prácticamente nula.
- La varianza de la pendiente asociada a longitudes de onda entre 0 y 3 m aumentó tras el periodo de estudio. Por otra parte, la varianza de la pendiente asociada a longitudes de onda superiores a los 3 m en algunos casos aumentó y en otros disminuyó, tras concluido el periodo de estudio.

### 7.2. Interlaboratorial

- Se observó que el perfilómetro utilizado por el laboratorio C realizó mediciones del perfil longitudinal asociadas a valores de MRI significativamente superiores al resto de los laboratorios.
- Al considerar el promedio de la desviación estándar obtenida a partir de las mediciones realizadas en el tramo recto o tangente se podría decir que, con un 90 % de confianza, el cálculo del MRI tuvo una precisión de  $\pm 0,1$  m/km.
- Por otra parte, al considerar el promedio de la desviación estándar obtenida a partir de las mediciones realizadas en el tramo curvo se podría decir que, con un 90 % de confianza, el cálculo del MRI tuvo una precisión de  $\pm 0,2$  m/km.

### 7.3. Evaluación del efecto de la velocidad y aceleración en el cálculo del IRI

#### 7.3.1. Caso 1: Velocidad constante

- Se pudo observar que los perfiles longitudinales medidos a velocidades de 20 km/h o superiores presentaron niveles similares de regularidad superficial, mientras que los perfiles longitudinales medidos a velocidades de 10 km/h presentaron valores inferiores de IRI.
- Se observó que para las longitudes de onda largas el PSD correspondiente al perfil medido a 10 km/h registró menores varianzas de la pendiente. Lo anterior, se justifica por el hecho de que a velocidades bajas las longitudes de onda más largas no provocan un estímulo de aceleración suficiente como para sobrepasar el umbral mínimo de "ruido" de los acelerómetros.

#### 7.3.2. Caso 2: Sin acelerar ni aplicar el freno

- Se pudo observar que para ninguno de los rangos de velocidades evaluado en este caso la diferencia promedio de MRI respecto al valor de referencia fue alarmantemente alta. Lo anterior, si se compara contra los resultados del Interlaboratorial realizado donde se podría concluir que las diferencias encontradas se ubican dentro de la dispersión esperada. Esto toma relevancia si se considera que al final de la recta, para ninguno de los casos se llegó a velocidades cercanas a los 10 km/h, donde previamente se habían detectado problemas asociados al cálculo del MRI.

#### 7.3.3. Caso 3: Frenado

- Se pudo observar que las mayores diferencias entre el perfil longitudinal de referencia y el perfil longitudinal medido para cada uno de los escenarios ocurren en las cercanías del punto final, es decir, en las cercanías del punto en que el vehículo deja de frenar para continuar a una velocidad constante (25 o 30 km/h según el escenario evaluado).
- Las diferencias observadas entre perfiles longitudinales básicamente consisten en que, en las cercanías del punto final, se registra un incremento en la elevación del perfil respecto al perfil de referencia. Esta diferencia de elevaciones incluso se extiende posterior al punto final, es decir cuando el vehículo deja de frenar y retoma nuevamente una velocidad constante.
- Se observó que entre mayor era la magnitud de la desaceleración mayor era diferencia de elevación con respecto al perfil longitudinal de referencia.

- Se observó que comparativamente los picos de elevación del perfil longitudinal eran mayores para los casos donde se pasó de 50 a 25 km/h respecto a los casos en donde se pasó de 70 a 30 km/h.
- En esta investigación se evidenció que para un mismo nivel de desaceleración se presentaron mayores afectaciones cuando la desaceleración se aplicaba en distancias más cortas.
- El único escenario en que no se observó irregularidad localizada en el punto final fue en el escenario 3.1, que corresponde al de desaceleración leve pasando de una velocidad de 70 km/h a 30 km/h.
- El escenario donde se observó la mayor irregularidad localizada en el punto final fue en el escenario 3.6, que corresponde al de desaceleración fuerte pasando de una velocidad de 50 km/h a 25 km/h, siendo que, para este caso que fue el más crítico la irregularidad localizada alcanzó valores de 2,4 m/km y en este punto el valor MRI de referencia era de 1,4 m/km.
- Al evaluar los escenarios de frenado en tramos base de 100 m se observó que las mayores diferencias respecto al MRI de referencia rondan los 0,1 m/km. Por lo tanto, si se consideran los resultados del Interlaboratorial realizado, donde se determinó que se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia, se podría concluir que los escenarios de frenado analizados no deberían influir para el cumplimiento de una especificación nacional.

#### *7.3.4. Caso 4: Aceleración*

- Al evaluar los escenarios de aceleración en tramos base de 100 m se observó que las mayores diferencias respecto al MRI de referencia rondan los 0,1 m/km. Por lo tanto, si se consideran los resultados del Interlaboratorial realizado, donde se determinó que se espera que el cálculo del MRI pueda variar en  $\pm 0,1$  m/km respecto al promedio o valor de referencia, se podría concluir que los escenarios de aceleración analizados no deberían influir para el cumplimiento de una especificación nacional.
- Se observó que las diferencias respecto al de MRI de referencia son similares para todos los escenarios evaluados, sin importar si se trataba de un escenario de aceleración suave o aceleración fuerte. De manera que, el efecto de la aceleración afectó longitudes de onda (particularmente longitudes de onda larga) que no influyen en el cálculo de IRI.

#### *7.3.5. Caso 5: Frenar – detenerse – acelerar*

- En los alrededores del punto donde el vehículo se detiene (estacionamiento 0+215) se produce irregularidad localizada que implica un incremento en los valores de regularidad respecto a los valores de referencia.
- Para todos los escenarios evaluados este incremento en la regularidad superficial ocurrió en una longitud de aproximadamente 30 m que se distribuye en 10 m antes y 20 m después del sitio de parada.
- El hecho de detener el perfilómetro durante la medición del perfil longitudinal podría influir en el cumplimiento de una especificación nacional.

#### *7.3.6. Caso 6: Detenerse y acelerar*

- Los perfilómetros evaluados, Dinatest Mark III y IV, requieren de una longitud inicial de calibración de 23 m.

### **7.4. Variabilidad de la regularidad superficial a lo ancho de la huella de los vehículos**

- Los valores de IRI obtenidos con drone (sin la aplicación de filtros) son superiores a los valores de IRI de referencia. Por lo tanto, el perfil longitudinal capturado con drone no reprodujo con exactitud las características de la superficie.
- Al aplicar filtros de paso bajo y de paso alto al perfil longitudinal medido se observó que el problema del perfil longitudinal medido con drone son las longitudes de onda corta. Las cuales se asocian a la resolución de la cámara utilizada y a la cercanía del drone con la superficie.
- Se observó que al aplicar un filtro de paso bajo de 1,5 m al perfil longitudinal medido con drone, el IRI resultante mejora levemente, no obstante, sigue siendo mayor a los valores de IRI de referencia.
- Se observó que al aplicar un filtro de paso bajo de 3,5 m al perfil longitudinal medido con drone, el IRI resultante tenía una tendencia similar al IRI de referencia. Sin embargo, en la práctica no se considera adecuado aplicar este filtro pues con su uso hay una alta probabilidad de ocultar irregularidades del perfil real de la carretera, por ejemplo: defectos constructivos.

## 8. RECOMENDACIONES

### 8.1. Evolución de la regularidad superficial a lo largo del tiempo

- Se recomienda que las especificaciones nacionales respecto al control de regularidad superficial en proyectos de infraestructura vial definan un periodo máximo, posterior a la construcción o rehabilitación del pavimento, para la medición del perfil longitudinal.
- Se recomienda evaluar la evolución de la regularidad a lo largo del tiempo en un proyecto de obra nueva y en un proyecto de rehabilitación mayor.

### 8.2. Interlaboratorial

- Se recomienda a la Administración exigir que los perfilómetros que realizan las mediciones del perfil longitudinal cuenten con dos láser. Lo anterior, con el objetivo de que las mediciones del perfil longitudinal en ambas huellas de la carretera se realicen al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones.
- Se recomienda a la Administración la revisión periódica de los certificados y procedimientos de calibración que llevan a cabo los laboratorios de verificación de la calidad. Lo anterior, con el objetivo de evitar diferencias significativas entre las mediciones del perfil longitudinal que realizan estos laboratorios.

### 8.3. Evaluación del efecto de la velocidad y aceleración en el cálculo del IRI

- Se recomienda que cada vez que un laboratorio adquiriera un perfilómetro inercial nuevo se determinen los límites de dicho perfilómetro, particularmente se considera importante identificar la velocidad mínima de operación (caso 1) y la distancia inicial requerida previo al inicio de una medición (caso 6).

#### *8.3.1. Caso 1: Velocidad constante*

- A partir de la investigación realizada, se recomienda el uso de los perfilómetros Mark III y Mark IV a velocidades superiores a los 20 km/h.

#### *8.3.2. Caso 2: Sin acelerar ni aplicar el freno*

- Para determinar en qué momento exacto la velocidad de operación del perfilómetro comienza a afectar la calidad de las mediciones, se recomienda replicar este caso hasta llegar a velocidades cercanas a los 10 km/h.

#### *8.3.3. Caso 3: Frenado*

- Para validar la hipótesis de que: para un mismo nivel de desaceleración se presentan mayores afectaciones cuando la desaceleración se aplica en distancias más cortas, se recomienda evaluar un caso de frenado donde se compare una mayor cantidad de distancias de frenado.

#### *8.3.4. Caso 4: Aceleración*

- Pese a que no se evidenció que niveles altos de aceleración puedan causar problemas en el posterior cálculo del MRI de un proyecto, se considera recomendable que las mediciones del perfil longitudinal siempre se realicen procurando mantener una velocidad uniforme dentro de los rangos de operación del perfilómetro.

#### *8.3.5. Caso 5: Frenar – detenerse – acelerar*

- En tramos urbanos se recomienda tomar las previsiones necesarias para que durante la medición del perfil longitudinal se realice sin que el perfilómetro se detenga, para ello se podría considerar la coordinación de cierres de tránsito o la medición del perfil longitudinal en horas de la madrugada.

#### *8.3.6. Caso 6: Detenerse y acelerar*

- Se recomienda que los perfilómetros evaluados, en este caso Dinatest Mark III y IV, empiecen la medición del perfil longitudinal al menos 23 m antes del inicio del tramo que se desea evaluar.

### **8.4. Variabilidad de la regularidad superficial a lo ancho de la huella de los vehículos**

Considerando que el uso de técnicas de fotogrametría con drone son una potencial alternativa económica para medir el perfil longitudinal de una carretera, se recomienda el planteamiento de una investigación cuyo propósito sea determinar las condiciones óptimas para las cuales se podría medir el perfil longitudinal con drone. Esto considerando que, bajo las condiciones realizadas en esta investigación, el cálculo de IRI con drone no presentó resultados satisfactorios.

Específicamente se recomienda plantear una investigación en donde se controlen tanto los factores ambientales (luminosidad y viento) como las especificaciones técnicas de la cámara y la altura de vuelo del drone. Como resultado de esta investigación se podría concluir si la medición del perfil longitudinal con drone efectivamente es una alternativa viable, así como desarrollar un protocolo formal para su implementación.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alhasan, A., White, D. J., & De Brabanter, K. (2017). Spatial pavement roughness from stationary laser scanning. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1), 83-96.
2. ASTM (2009). E950/E950M-09: Standard test method for measuring the longitudinal profile of traveled surfaces with an accelerometer established inertial profiling reference. *ASTM E950/E950M-09*.
3. ASTM (2012). E867: *Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*, 542.
4. ASTM (2015). E1926-08: Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements. *West Conshohocken, PA: ASTM International*.
5. A.V, S., Michael W.Gillespie, Thomas D.Queiroz, Cesar. (1986). The International Road Roughness Experiment (IRRE): establishing correlation and a calibration standard for measurements, 1.
6. Chatti, K., & Zaabar, I. (2012). Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs. NCHRP Report 720. *Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC*.
7. Chin, Abby. Paving the Way for Terrestrial Laser Scanning Assessment of Road Quality. 2012.
8. Consejo Nacional de Vialidad (2015). Licitación Pública No. 2014LN-000018-0CV00 "MP Y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada". CONAVI, San José, Costa Rica.
9. Dyer, J. S., et al. (2009, May). Estimating International Roughness Index from noisy profilograph measurements. In 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (pp. 1110-1115). IEEE.
10. Gillespie, T. D., Sayers, M. W., & Segel, L. (1980). *Calibration of response-type road roughness measuring systems*. NCHRP Report, (228).
11. Herra Gómez, L., Guerrero Aguilera, S., Salas Chaves, M., Sequeira Rojas, W. (2018). Informe de Auditoría Técnica: LM-AT-150-2018 *Experiencia costarricense en la aplicación del parámetro de regularidad superficial IRI como criterio de aceptación en proyectos de conservación vial*. San José, Costa Rica, LanammeUCR.
12. Herra Gómez, L., Rodríguez Morera, J., Guerrero Aguilera, S., Salas Chaves, M., Sequeira Rojas, W., Loria Salazar, L. G. (2017). Informe de Auditoría Técnica: LM-PI-AT-029-2017 *Evaluación de parámetros de desempeño (IRI, FWD) en proyectos de rehabilitación de la Red Vial Nacional ejecutados mediante la Licitación Pública 2009LN-00003-CV*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
13. Oconitrillo Varela, E. (2018). Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular en diferentes secciones de la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica.
14. Jiménez, R. (2019). Desarrollo de un modelo para predecir la regularidad superficial (IRI) de una carretera considerando actividades de rehabilitación, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
15. Karamihas, S. M. (1999). Guidelines for longitudinal pavement profile measurement. NCHRP Report, (434).
16. Karamihas, S. M., "Development of Cross Correlation for Objective Comparison of Profiles." *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 36, Nos. 2/3 (2004) pp. 173-193.
17. Karamihas, S. M., Gilbert, M. E., Barnes, M. A., & Perera, R. W. (2019). Measuring, Characterizing, and Reporting Pavement Roughness of Low-Speed and Urban Roads. NCHRP Research Report, (914).
18. Kumar, Pankaj Pramod, et al. "An Algorithm for Automated Estimation of Road Roughness from Mobile Laser Scanning Data." *Photogrammetric Record*, vol. 30, no. 149, 2015, pp. 30-45.

19. LanammeUCR (2019). Memorias del simposio sobre regularidad superficial en proyectos de conservación vial de Costa Rica, Programa de Infraestructura y Transporte. San José, Costa Rica.
20. Leiva Padilla, P., Hidalgo Arroyo, A. (2014). Estudios técnicos realizados para la aplicación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
21. Li, Q., Qiao, F., & Yu, L. (2017). How the roadway pavement roughness impacts vehicle emissions?. *Environment Pollution and Climate Change*, 1(3).
22. Marcondes, J., Burgess, G. J., Harichandran, R., & Snyder, M. B. (1991). Spectral analysis of highway pavement roughness. *Journal of Transportation engineering*, 117(5), 540-549.
23. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2010). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR – 2010, Dirección General de Vialidad. San José, Costa Rica.
24. Mitchell, V. M., & Villacorta, F. L. (2016). Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 18(32), 7–7.
25. Nikolaidis, A. (2014). Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality.
26. Olsen, M. J. (2013). *Guidelines for the use of mobile LIDAR in transportation applications* (Vol. 748). Transportation Research Board.
27. Petrie, G., & Toth, C. K. (2017). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning, 1–28.
28. Prosser-Contreras, M., Atencio, E., Muñoz La Rivera, F., & Herrera, R. F. (2020). Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Photogrammetry to Obtain the International Roughness Index (IRI) on Roads. *Applied Sciences*, 10(24), 8788.
29. Sayers, M. W. (1986). *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements*. University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute.
30. Sayers, M. W. (1986). The international road roughness experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements. University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute.
31. Sayers, M. W., "Profiles of Roughness." Transportation Research Record 1260 (1990) pp. 1-12.
32. Sayers, M. W. (1995). On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. Transportation Research Record, (1501), 1–12.
33. Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles.
34. Sayers, M., Gillespie, T., y Paterson, W. (1982). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. Washington, D.C.: Banco Mundial.
35. Toribio, J. O. C., & Lazares, J. W. G. (2018). Evaluación superficial de vías urbanas empleando vehículo aéreo no tripulado (VANT). *Métodos y Materiales*, 8, 23-32.
36. Zhang C. & Elaksher A. (2012). "An unmanned aerial vehicle-based imaging system for 3D measurement of unpaved road surface distresses". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol 27, Issue 2. Pp. 118-129. Estados Unidos.

## 10. APÉNDICE

### 10.1. Evaluación de los parámetros estructurales del pavimento en la Ruta Nacional de Travesía 11505.

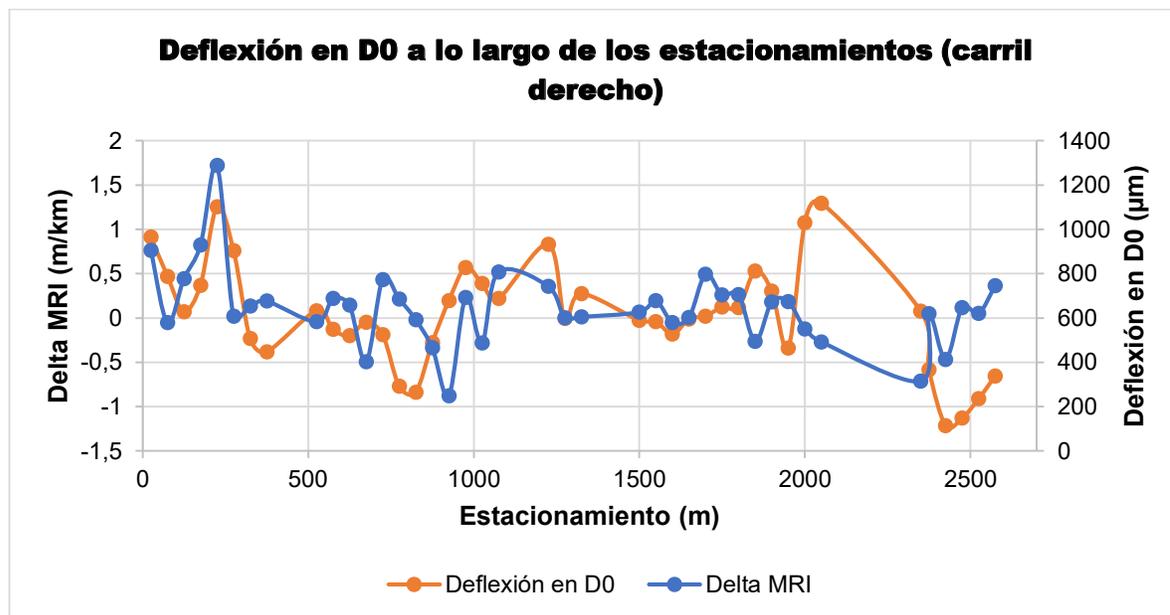


Figura 75. Deflexión en D0 a lo largo de los estacionamientos (carril derecho)

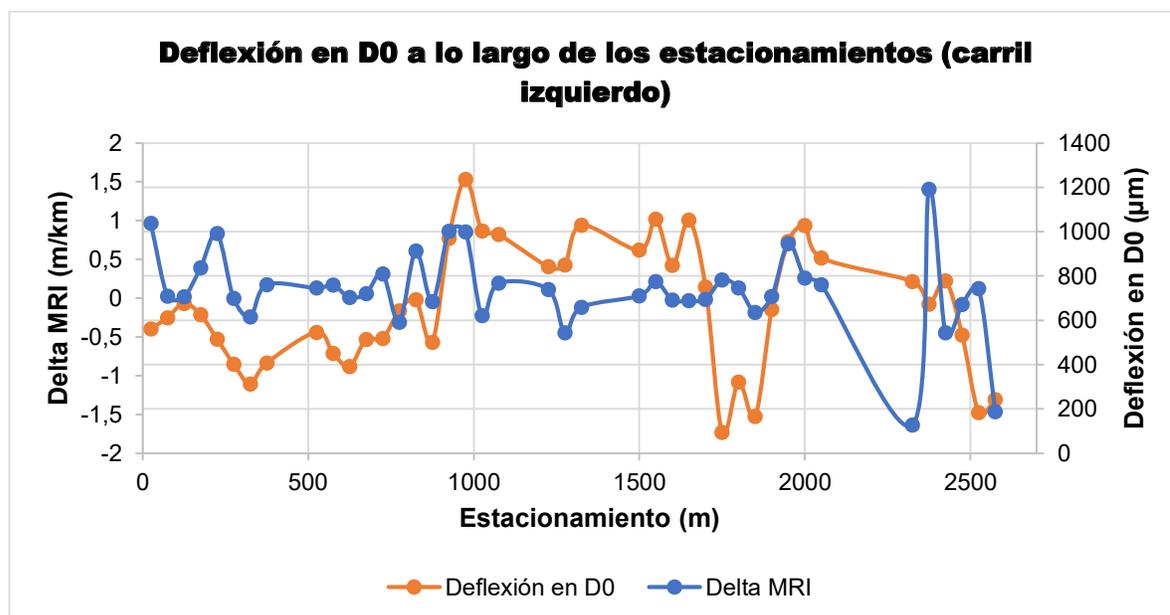


Figura 76. Deflexión en D0 a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo)

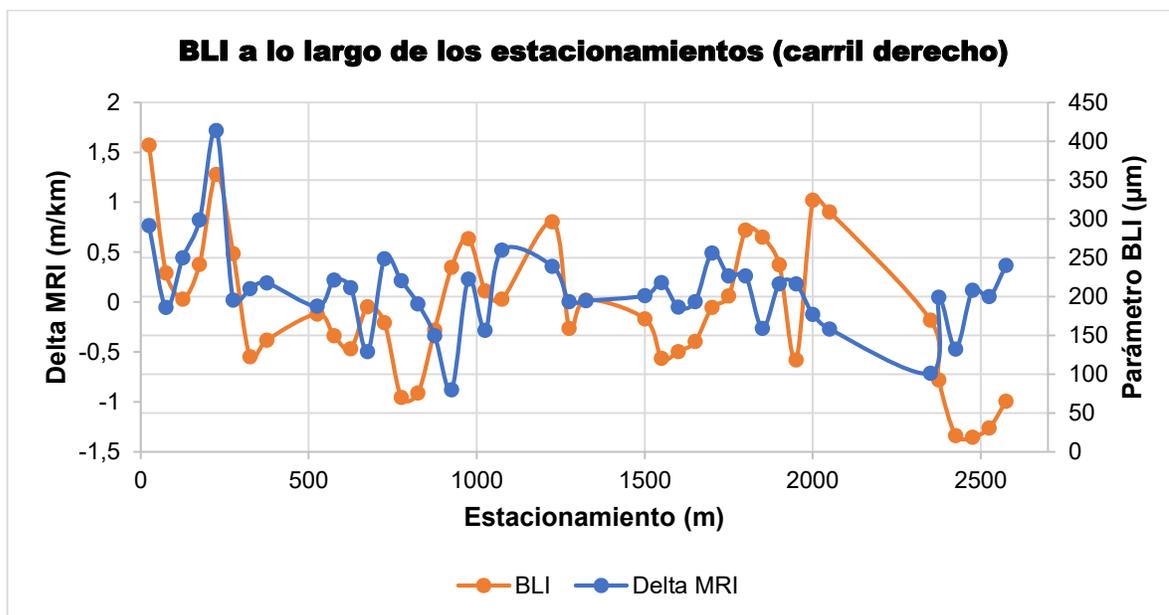


Figura 77. BLI a lo largo de los estacionamientos (carril derecho)

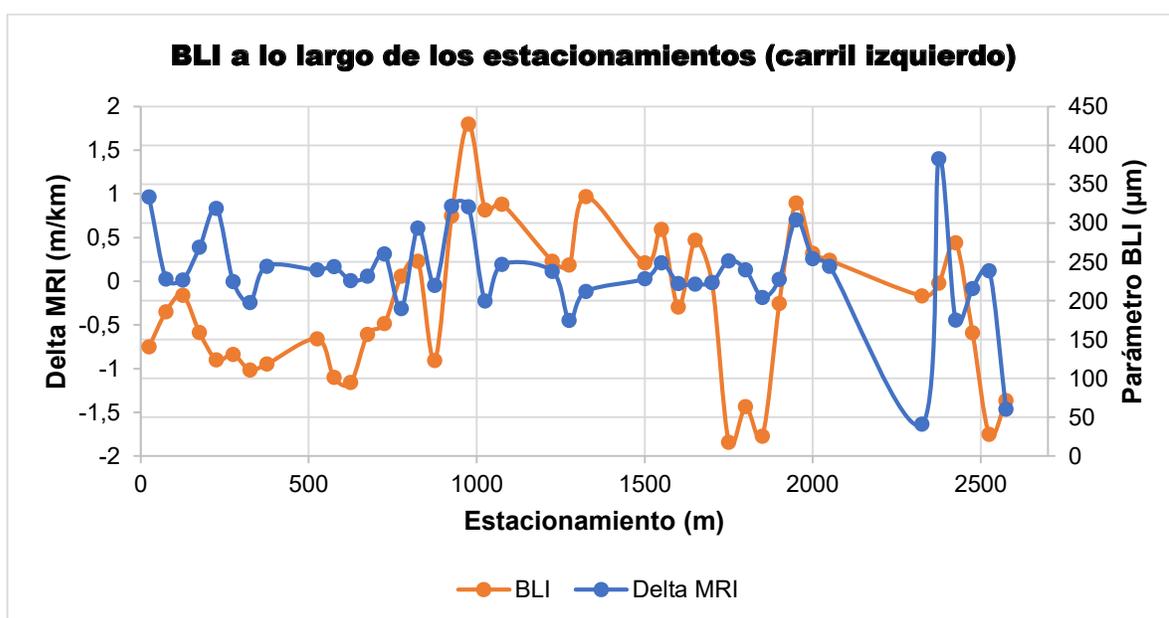


Figura 78. BLI a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo)

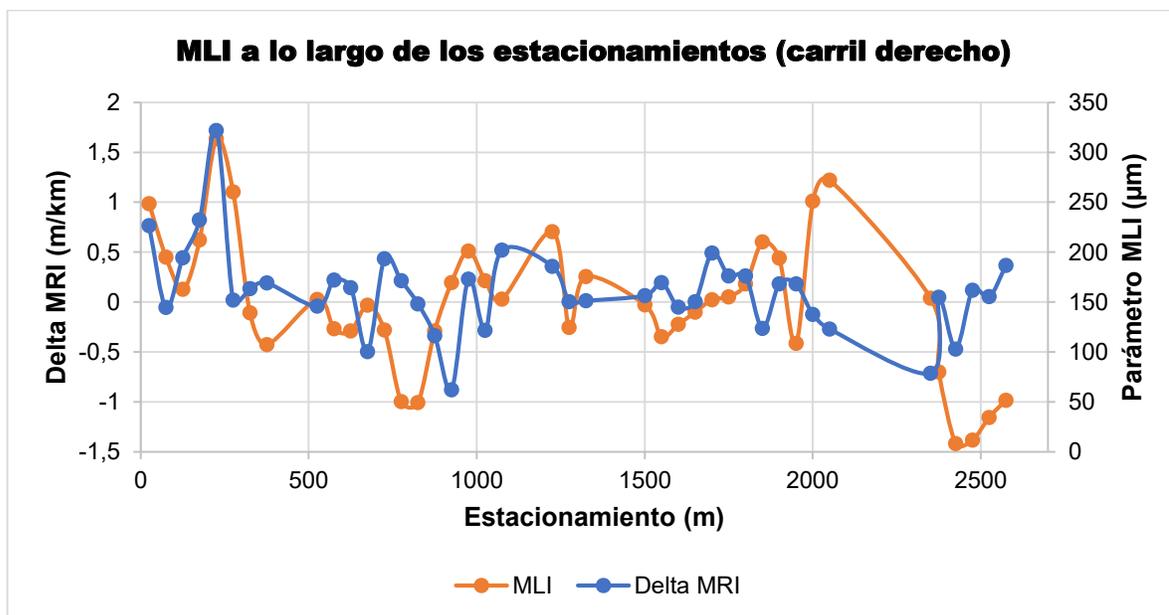


Figura 79. MLI a lo largo de los estacionamientos (carril derecho)

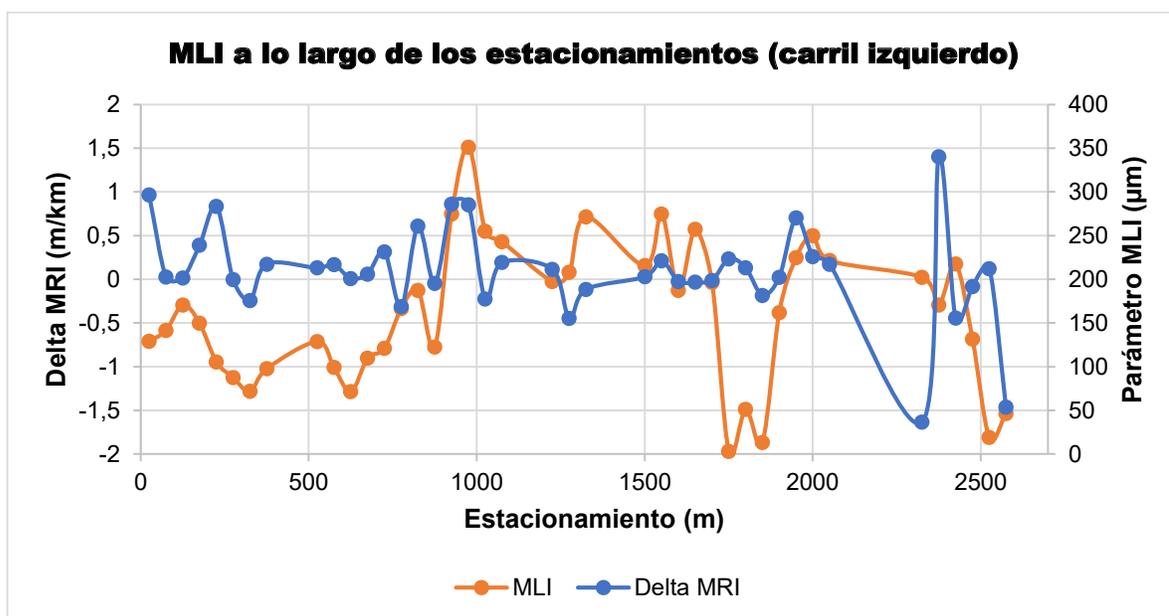


Figura 80. MLI a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo)

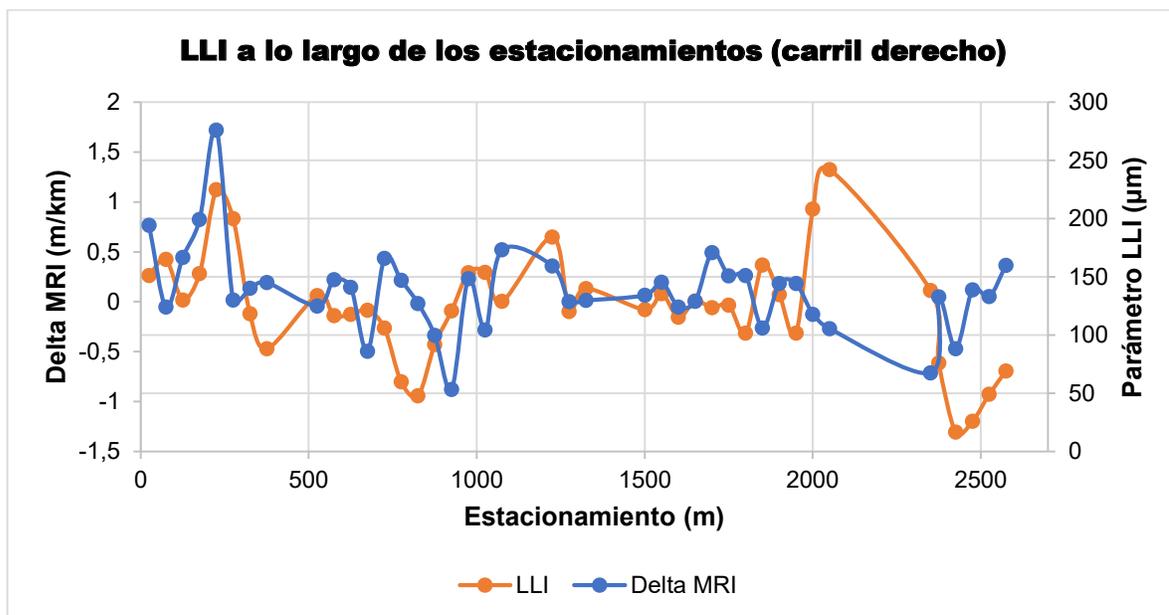


Figura 81. LLI a lo largo de los estacionamientos (carril derecho)

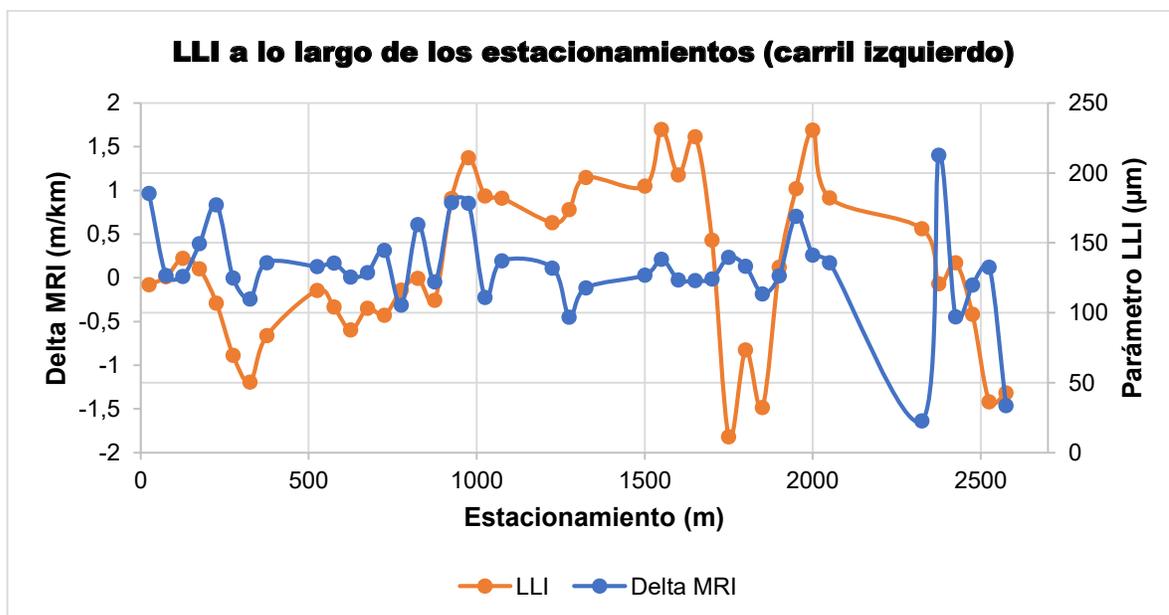


Figura 82. LLI a lo largo de los estacionamientos (carril izquierdo)