

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**GRADO DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DEL IRI DE
PAVIMENTO URBANO EMPLEANDO VANT EN LA PROLONGACIÓN
AVENIDA LA CULTURA KM 3+500 - KM 4+500 EN LA CIUDAD DEL
CUSCO, 2022**

PRESENTADO POR:

-Br. RODAS GUIZADO, ABEL

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

ING. ROMULO RIVERA QUIROGA

CUSCO – PERÚ
2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: " GRADO DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DEL IRI DE PAVIMENTO URBANO EMPLEANDO VANT EN LA PROLONGACIÓN AVENIDA LA CULTURA KM 3+500 - KM 4+500 EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2022" presentado por: Abel Rodas Guizado con DNI Nro: 48179155 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO CIVIL.

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 08 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 18 de Julio de 2024


Firma

Post firma: Ing. Rómulo Rivera Quiroga

Nro. de DNI: 23828120

ORCID del Asesor: 0009-0003-7757-8660

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:368917001

<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:368917001?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

GRADO DE CONFIABILIDAD DETERMINACION CON IRI

AUTOR

ABEL RODAS GUIZADO

RECUENTO DE PALABRAS

32487 Words

RECUENTO DE CARACTERES

162916 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

186 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.9MB

FECHA DE ENTREGA

Jul 18, 2024 10:56 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jul 18, 2024 10:58 AM GMT-5

● 8% de similitud general

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

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 18 palabras)

DEDICATORIA

A mis padres que desde el cielo me acompañan a celebrar este logro. Esta tesis es el resultado de su inmenso amor y dedicación que me brindaron.

A mis hermanos, quienes me dieron lecciones de vida importantes y me aconsejaron a lo largo de mi vida.

A mis docentes de la Facultad de Ingeniería Civil, quienes me dieron muchas lecciones de vida través de su conocimiento y experiencia.

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera.

Agradezco a mis padres Mauro y Rosa (†), por su amor incondicional. Su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles.

Agradecer a mis hermanos por su amor, amistad y apoyo en estos años difíciles que nos tocó vivir como familia.

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por permitirme formarme allí.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, y a cada uno de los docentes por habernos brindado todas las habilidades necesarias para poder realizar esta investigación.

A mis jurados, Dr. Ing. José Felipe Marín Loayza, DR. Ing. Miguel Ángel Ccorihuaman Quispe y Mgt. Ing. Juan Pablo Escobar Masías, quienes con sus comentarios y sugerencias me ayudaron a mejorar esta tesis.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
INTRODUCCIÓN	XX
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	22
1.1.1. <i>Situación Actual</i>	22
1.1.2. <i>Situación Futura</i>	22
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.1. <i>Problema General</i>	22
1.2.2. <i>Problema Especifico</i>	23
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	23
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	23
1.4.2. <i>Objetivo Especifico</i>	23
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.5.1. <i>Hipótesis General</i>	24

1.5.2. <i>Hipótesis Especifico</i>	24
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	26
2.1. LOS ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	26
2.1.1. <i>Antecedentes Internacionales</i>	26
2.1.2. <i>Antecedentes Nacionales</i>	30
2.2. BASE TEÓRICA	33
2.2.1. <i>Definición del Pavimento</i>	33
2.2.2. <i>Definición de Regularidad Superficial del Pavimento</i>	34
2.2.3. <i>Índice de Regularidad Internacional (IRI)</i>	34
2.2.4. <i>Clasificación de equipos según el banco mundial</i>	36
2.2.5. <i>Factores que Afectan la Precisión</i>	39
2.2.6. <i>Equipos para la Medición del Perfil Longitudinal</i>	43
2.2.7. <i>Equipos Dinámicos</i>	46
2.2.8. <i>Normativa de Organismos Internaciones Para la Medición del IRI</i>	49
2.2.9. <i>Especificaciones Técnicas Para la Medición del IRI en el Perú</i>	50
2.2.10. <i>Normatividad Peruana Respecto a la Metodología de Control del IRI</i>	51
2.2.11. <i>Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT)</i>	51
2.2.12. <i>Fotogrametría</i>	52
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	54
3.1. <i>ÁMBITO DE ESTUDIO: LOCALIZACIÓN POLÍTICA Y GEOGRÁFICA</i>	54
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	55
3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	55

3.5. UNIDAD DE ANÁLISIS	55
3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA	55
3.6.1. Población.....	55
3.6.2. Muestra.....	55
3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	55
3.8. PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	56
3.8.1. Consideraciones Generales.....	56
3.8.2. Colocación de Puntos de Control.....	56
3.8.3. Método Topográfico	57
3.8.4. Método Fotogramétrico.....	58
3.9. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	60
3.9.1. Método Topográfico	60
3.9.2. Método Fotogramétrico.....	61
3.10. Técnicas y Análisis de Datos	63
3.10.1. Procedimiento Para la Obtención del IRI.....	63
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
4.1. RESULTADOS DEL IRI CON MÉTODO TOPOGRÁFICO Y FOTOGRAMÉTRICO	67
4.1.1. Análisis de Resultados del Carril 1 y Huella Izquierda	67
4.1.2. Análisis de resultados del carril 1 y huella derecha	81
4.1.3. Análisis de Resultados del Carril 2 y Huella Izquierda	96
4.1.4. Análisis de Resultados del Carril 2 y Huella Derecha.....	111
4.1.5. Análisis de Resultados del Carril 3 y Huella Izquierda	126
4.1.6. Análisis de Resultados del Carril 3 y Huella Derecha.....	141

4.2. RESULTADOS DE COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN	157
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	158
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	160
RECOMENDACIONES.....	162
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163
ANEXOS	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías	36
Figura 2. Instrumentos para el levantamiento topográfico	44
Figura 3. Facedipstick.....	45
Figura 4. Rugosímetro Merlin	46
Figura 5. Perfilógrafo laser	47
Figura 6. Walking Profiler	48
Figura 7. Perfilómetro Inercial.....	49
Figura 8. Ámbito de estudio	54
Figura 9. Colocación de pintos de control	56
Figura 10. Levantamiento topográfico.....	57
Figura 11. Phantom 4 Pro V2.0	58
Figura 12. Perfil longitudinal a partir de las cotas obtenidos con el nivel topográfico	61
Figura 13. Zoom del a partir de las cotas obtenidos con el nivel topográfico	61
Figura 14. Perfil longitudinal obtenidos con VANT	62
Figura 15. Zoom del Perfil longitudinal obtenidos con VANT.....	62
Figura 16. Importación de puntos del perfil	63
Figura 17. Opción para generar el IRI	64
Figura 18. Tipo de análisis Overall para obtener los el IRI en cada huella	65
Figura 19. Perfil del IRI de las seis huellas	66
Figura 20. Histograma de los valores del IRI	66
Figura 21. Perfil del IRI del carril 1 y huella izquierda Nivel Topográfico vs VANT.....	67

Figura 22. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método topográfico	68
Figura 23. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico.....	68
Figura 24. Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 5m.....	69
Figura 25. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método topográfico	70
Figura 26. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico.....	71
Figura 27. Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 10m.....	72
Figura 28. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método topográfico	73
Figura 29. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico.....	74
Figura 30. Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 20m.....	75
Figura 31. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método topográfico	76
Figura 32. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico.....	76
Figura 33.	77
Figura 34. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método topográfico	78

Figura 35. Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico.....	79
Figura 36. Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 100m.....	80
Figura 37. Perfil del IRI del carril 1 y huella derecha Nivel Topográfico vs VANT	81
Figura 38. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método topográfico	82
Figura 39. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico.....	82
Figura 40. Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 5m	83
Figura 42. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método topográfico	84
Figura 43. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico.....	85
Figura 44. Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 10m	86
Figura 46. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método topográfico	87
Figura 47. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico.....	88
Figura 48. Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 20m	89
Figura 49. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método topográfico	90
Figura 50. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico.....	91

Figura 51. Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 50m	92
Figura 52. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método topográfico	93
Figura 53. Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico.....	94
Figura 54. Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 100m	95
Figura 55. Perfil del IRI del carril 2 y huella izquierda Nivel Topográfico vs VANT.....	96
Figura 56. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método topográfico	97
Figura 57. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico.....	97
Figura 58. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 5m.....	98
Figura 59. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método topográfico	99
Figura 60. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico.....	100
Figura 61. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 10m.....	101
Figura 62. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método topográfico	102
Figura 63. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico.....	103
Figura 64. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 20m.....	104

Figura 65. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método topográfico	105
Figura 66. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico.....	106
Figura 67. Correlación lineal de IRI del del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 50m..	107
Figura 68. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método topográfico	108
Figura 69. Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico.....	109
Figura 70. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 100m.....	110
Figura 71. Perfil del IRI del carril 2 y huella derecha Nivel Topográfico vs VANT	111
Figura 72. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método topográfico	112
Figura 73. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico.....	112
Figura 74. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 5m	113
Figura 75. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método topográfico	114
Figura 76. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico.....	115
Figura 77. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 10m	116
Figura 78. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método topográfico	117

Figura 79. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico.....	118
Figura 80. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 20m	119
Figura 81. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método topográfico	120
Figura 82. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico.....	121
Figura 83. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 50m	122
Figura 84. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método topográfico	123
Figura 85. Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico.....	124
Figura 86. Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 100m	125
Figura 87. Perfil del IRI del carril 3 y huella izquierda Nivel Topográfico vs VANT.....	126
Figura 88. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método topográfico	127
Figura 89. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método.....	127
Figura 90. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 5m.....	128
Figura 91. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método topográfico	129
Figura 92. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico.....	130

Figura 93. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 10m.....	131
Figura 94. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método topográfico	132
Figura 95. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico.....	133
Figura 96. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 20m.....	134
Figura 97. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método topográfico	135
Figura 98. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico.....	136
Figura 99. Correlación lineal de IRI del del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 50m..	137
Figura 100. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método topográfico	138
Figura 101. Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico.....	139
Figura 102. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 100m....	140
Figura 103. Perfil del IRI del carril 3 y huella derecha Nivel Topográfico vs VANT	141
Figura 104. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método topográfico.	142
Figura 105. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico.....	142
Figura 106. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 5m	143

Figura 107. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método topográfico.	144
Figura 108. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico.....	145
Figura 109. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 10m	146
Figura 110. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método topográfico	147
Figura 111. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método.....	148
Figura 112. .Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 20m	149
Figura 113. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método topográfico.	150
Figura 114. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico.....	151
Figura 115. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 50m	152
Figura 116. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método.....	153
Figura 117. Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico.....	154
Figura 118. Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 100m	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente	25
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente.....	25
Tabla 3. Requisitos de precisión para la medición perfilométrica de IRI de Clase 1 y 2	40
Tabla 4. Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 5m	70
Tabla 5. Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 10m	73
Tabla 6. Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 20m	75
Tabla 7. Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 50m	78
Tabla 8. Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 100m	81
Tabla 9. Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 5m	84
Tabla 10. Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 10m	87
Tabla 11. Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 20m	90
Tabla 12. Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 50m	93
Tabla 13. Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 100m	96
Tabla 14. Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 5m	99
Tabla 15. Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 10m	102
Tabla 16. Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 20m	105
Tabla 17. Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 50m	108
Tabla 18. Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 100m	111
Tabla 19. Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 5m	114
Tabla 20. Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 10m	117
Tabla 21. Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 20m	120
Tabla 22. Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 50m	123

Tabla 23. Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 100m	126
Tabla 24. Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 5m	129
Tabla 25. Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 10m	132
Tabla 26. Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 20m	135
Tabla 27. Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 50m	138
Tabla 28. Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 100m	141
Tabla 29. Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 5m	144
Tabla 30. Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 10m	147
Tabla 31. Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 20m	150
Tabla 32. Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 50m	153
Tabla 33. Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 100m	156
Tabla 34. Resultados de coeficiente de determinación de todas las huellas de la vía	157

RESUMEN

La presente investigación intitulada “GRADO DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DEL IRI DE PAVIMENTO URBANO EMPLEANDO VANT EN LA PROLONGACIÓN AVENIDA LA CULTURA KM 3+500 - KM 4+500 EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2022”, tuvo como objetivo evaluar el grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional IRI de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT), para lo cual se utilizó una nueva metodología para calcular el Índice de Regularidad Internacional (IRI) a través de imágenes georreferenciadas capturadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Este método captura toda la superficie de la vía, generando un modelo tridimensional y una ortofoto en la que se evalúa la superficie de la vía extrayendo el perfil longitudinal de cada uno de las huellas generadas por el tránsito vehicular, con el objetivo de determinar el IRI para cada uno de estas huellas. Para validar este nuevo instrumento se utilizó como patrón de comparación los perfiles obtenidos con el Nivel topográfico, ya que es un método Clase 1 de alta precisión, a partir de ello se concluyó que: el IRI calculado por métodos fotogramétricos nos mostró resultados del coeficiente de determinación de 92.67%, 92.89%, 92.23%, 93.50% y 93.40% a 5m, 10m, 20m, 50m y 100m respectivamente, indicándonos que el IRI determinado por el VANT es bueno.

Palabras clave: IRI, VANT, perfil longitudinal y coeficiente de determinación

ABSTRACT

The present investigation entitled "DEGREE OF RELIABILITY IN THE DETERMINATION OF THE URBAN PAVEMENT IRI USING UAV IN THE AVENIDA LA CULTURA PROLONGATION KM 3+500 - KM 4+500 IN THE CITY OF CUSCO, 2022", The objective of this project was to evaluate the degree of reliability in the determination of the international regularity index IRI of urban pavements using georeferenced images obtained with an unmanned aerial vehicle (UAV), for which a new methodology was used to calculate the International Regularity Index (IRI) through georeferenced images captured by an unmanned aerial vehicle (UAV). This method captures the entire road surface, generating a three-dimensional model and an orthophoto in which the road surface is evaluated by extracting the longitudinal profile of each of the tracks generated by vehicular traffic, with the objective of determining the IRI for each of these tracks. To validate this new instrument, the profiles obtained with the topographic level were used as a comparison standard, since it is a Class 1 method of high precision, from this it was concluded that: the IRI calculated by photogrammetric methods showed results of the determination coefficient of 92.67%, 92.89%, 92.23%, 93.50% and 93.40% at 5m, 10m, 20m, 50m and 100m respectively, indicating that the IRI determined by the VANT is good.

Keywords: IRI, UAV, longitudinal profile and coefficient of determination

INTRODUCCIÓN

La evaluación del índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanos es muy importante porque es un indicador de referencia en la medición de la calidad del estado del pavimento. Este valor garantiza la funcionalidad, seguridad y nivel de confort que ofrece la carpeta de rodadura. En ese sentido nace el interés de investigar el grado de confiabilidad del vehículo aéreo no tripulado para la determinación del índice de regularidad internacional de pavimentos urbanos, para lo cual se utilizó una nueva metodología para calcular el Índice de Regularidad Internacional (IRI) a través de imágenes georreferenciadas capturadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

La presente investigación consta de cuatro capítulos, los cuales fueron desarrollados de acorde al contenido:

Capítulo I: Muestra el planteamiento del problema a partir de la situación problemática desde una situación actual y futura, planteamiento del problema (general y específicos), justificación de la investigación, objetivos (general y específicos), finalmente las hipótesis (general y específicas).

Capítulo II: Muestra el marco teórico dando inicio con los antecedentes de la investigación (internacional y nacional), seguido de las bases teóricas y finalmente mostrando la operacionalización de variables.

Capítulo III: Muestra la metodología de investigación, desarrollándose el ámbito de estudio, tipo, diseño y nivel de investigación, unidad de análisis, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos t finalmente el procesamiento y recolección de datos.

Capítulo IV: Muestra el análisis de resultados y la discusión de estas con los antecedentes, se da inicio mostrando los resultados del IRI con el método topográfico y fotogramétrico, y finalmente se muestra los resultados del coeficiente de determinación.

La presentación de la investigación concluye con los apartados de conclusiones por objetivos y recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento y formulación del problema de investigación

1.1.1. Situación Actual

La superficie de carpeta de rodadura del pavimento de la prolongación de la Avenida La Cultura (tramo Enaco - Universidad Andina del Cusco) presenta deficiencias funcionales en la superficie, que ocasionan molestias a los usuarios que transitan por la vía. Los responsables de la gestión de la infraestructura vial carecen de información documentada por desconocimiento de nuevas tecnologías y por no tener acceso a los instrumentos de evaluación por los siguientes motivos: equipos de precios elevado, bajos.

Desde 1982 el Banco Mundial selecciono el IRI como parámetro de dedición de la regularidad del pavimento dejando abierto la metodología a usar.

1.1.2. Situación Futura

Utilizar el vehículo aéreo no tripulado para recopilar información del estado del pavimento a través de imágenes georreferenciadas para calcular el índice de rugosidad internacional (IRI) y desarrollar un plan operativo para la administración de la vía urbana.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es el grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT)?

1.2.2. Problema Especifico

¿Se puede determinar el índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanas utilizando métodos topográficos?

¿Se puede determinar el índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanas utilizando métodos fotogramétricos?

¿Qué relación existe entre los resultados del índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanas utilizando métodos topográficos y fotogramétricos?

1.3. Justificación de la Investigación.

En este trabajo de investigación se calibraran los datos obtenidos con el Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) que se está utilizando como método alternativo e innovador para calcular el índice de regularidad internacional (IRI) de los pavimentos urbanos, utilizando imágenes georreferenciadas, y se propondrá como una nueva herramienta para la evaluación superficial de los pavimentos a los gestores de las unidades locales y regionales para priorizar las decisiones de gestión de carreteras para utilizar eficientemente sus recursos.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional IRI de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

1.4.2. Objetivo Especifico

Determinar el índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanas utilizando métodos topográficos.

Determinar el índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanas utilizando métodos fotogramétricos.

Determinar la relación existe entre los resultados del índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanas utilizando métodos fotogramétricos y topográficos.

1.5. Hipótesis de la Investigación

1.5.1. Hipótesis General

El grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional IRI de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas es muy alta para una altura de vuelo de 20m.

1.5.2. Hipótesis Especifico

EL método topográfico se usa como patrón de calibración para la determinación del índice de rugosidad internacional (IRI) de pavimentos urbanos.

El método fotogramétrico permite optimizar considerablemente el cálculo del índice de rugosidad internacional (IRI) en costo y tiempo.

Existe una relación de grado muy alto estadísticamente entre los resultados del índice de rugosidad internacional (IRI) por métodos fotogramétricos y topográficos.

1.6. Operacionalización de Variables

1.6.1. Variable independiente

Imágenes Georreferencias obtenidas con un Vehiculo Aereo No Tripulado (VANT).

En la tabla 1. Se muestran las unidades

Tabla 1

Operacionalización de la variable independiente

DIMENSIONES	INDICADORES	RANGO/Medición
Flujo vehicular	Vehículos / hora	Veh/h
Plan de vuelo	Altura de vuelo	20-50m
	Solape	75-90%
Características de dron	Resolución de cámara	Pixeles
	Giroscopio	Rad/s
	Acelerómetro	m/s ²
Condiciones ambientales	Velocidad de viento	m/s
	Luz solar	nm

1.6.2. Variable Dependiente

Índice de rugosidad internacional (IRI)

En la tabla 2. Se muestran las unidades

Tabla 2

Operacionalización de la variable dependiente

DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	RANGO/ Medición
Indice de rugosidad internacional	Desviaciones del perfil longitudinal	IRI	Muy bueno (0-1)
			Buena (1-1.9)
			Regular (1.9-3.6)
			Mala (3.6-6.4)
			Muy mala (>6.4)

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.

2.1. Los Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Badilla (2009), indicó que “diferentes investigaciones realizadas revelan que los costos de operación de los vehículos dependen de la magnitud de las irregularidades superficiales del pavimento, afectando la velocidad de circulación, el deterioro de los vehículos y el consumo de combustible. Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades viales pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en cambios en el estado de tensiones y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación. Conocer la regularidad superficial del pavimento desde el inicio de su período de servicio o en cualquier momento de su vida útil permitirá definir las actuaciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente. Debido a que el Índice de Regularidad Internacional (IRI) es geográficamente transferible, repetible y estable en el tiempo, se ha convertido en una medida atractiva y conveniente para el control de calidad de la construcción de nuevos pavimentos. Además de permitir evaluar la regularidad superficial de la vía y reflejar el confort y seguridad de los usuarios, garantiza indirectamente el desempeño estructural del pavimento. Recientemente, en Costa Rica, la Administración ha venido introduciendo la medición del IRI como parámetro de aceptación para diferentes obras viales. Sin embargo, el desconocimiento u omisión de detalles del método de cálculo del IRI no han permitido una adecuada implementación de este índice. Debido a esto, este artículo presenta los principales detalles, cuidados y procedimientos involucrados en el cálculo del IRI, con el fin de que sean tomados en cuenta en la definición de especificaciones de aceptación de proyectos viales o evaluación de la red vial. De esta manera, la implementación de estas mediciones puede generar

la introducción de nuevas tecnologías en las obras de pavimentación y con ello beneficios para la infraestructura vial del país” (Badilla, 2009).

Cruz (2022), el objetivo de esta investigación fue desarrollar una metodología para calcular el Índice Internacional de Regularidad (IRI) en pavimentos, utilizando imágenes obtenidas del vehículo aéreo no tripulado (VANT) conocido como drone. “El VANT permite registrar la superficie del pavimento mediante la captura de imágenes georreferenciadas que se procesan para generar un modelo ortomosaico tridimensional de alta resolución y un modelo digital de superficie. El análisis de estos modelos nos permite extraer el perfil longitudinal de las vías de circulación del pavimento para calcular el IRI en cada una de ellas” (Cruz, 2022).

Para validar el proceso se establece el equipo de referencia mediante la medición del perfil longitudinal mediante tres equipos de alta precisión: Laser Profiler, Dipstick y LIDAR Scanner. “Las imágenes se capturan mediante Drones a diferentes alturas y las imágenes se procesan bajo dos escenarios: sin puntos de control y con puntos de control en tierra. Los resultados en comparación con datos del equipo de referencia nos permiten determinar la resolución óptima o GSD de 0,35 cm/píxel para el cálculo del IRI y valores más exactos con un mejor comportamiento del perfil IRI con el uso de puntos de control” (Cruz, 2022).

Además, “la ejecución de 40 vuelos a la resolución óptima en la sección de prueba procesada con los datos originales y los puntos de control mostró una mejor correlación con el uso de puntos de control y una regresión lineal con un coeficiente $R^2=0,791$, mientras que la regresión lineal con los datos originales presentó un $R^2=0,644$. Además, considerando el promedio de la desviación estándar de los valores del IRI calculados cada 10m en ambas vías de circulación, se espera con un 95% de confianza que el valor del IRI tenga una precisión de ± 0.091 m/km con el uso de control de puntos y $\pm 0,121$ m/km con los datos originales” (Cruz, 2022).

El proyecto busca innovar el cálculo del IRI a partir de un equipo accesible y de bajo costo, determinar el estado de regularidad superficial del pavimento en proyectos nuevos y/o de rehabilitación para su aceptación y, en caminos existentes establecer las actividades necesarias de Mantenimiento para mantener las carreteras en óptimas condiciones de funcionamiento.

Sánchez et al. (2018), una buena regularidad de la superficie de los pavimentos brinda condiciones de comodidad y seguridad para los usuarios de las vías. “Una mala regularidad, además de afectar los aspectos anteriores, refleja daños y deterioro de carácter funcional y estructural de los pavimentos que influyen negativamente en su estado de condición y vida útil. El Índice de Regularidad Internacional (IRI) surgió como una necesidad de unificar los criterios para la medición de la regularidad superficial de las carreteras, constituyéndose hoy en día en uno de los parámetros de mayor aceptación y utilización para medir el deterioro superficial de los pavimentos. Permite valorar la calidad del estado de los pavimentos, siendo utilizado tanto para el diseño como para la planificación de la conservación y mantenimiento de los mismos” (Sánchez et al., 2018).

Para la obtención de este parámetro se “utilizan disímiles equipos y procedimientos, los cuales se clasifican en dependencia de su precisión. En el presente trabajo se exponen los primeros resultados de la investigación realizada para la determinación del IRI en pavimentos flexibles, utilizando procedimientos fotogramétricos basados en el empleo del software Agisoft PhotoScan. Los trabajos de toma fotográfica fueron realizados de dos formas: manual y a partir de un equipamiento especial elaborado para la realización de los mismos. Se compararon los perfiles longitudinales obtenidos por método fotogramétrico y por el topográfico (mira-nivel) obteniéndose valores de cotas que difieren milimétricamente, con desviaciones estándar que oscilan en el orden de los centímetros. Luego, se determinaron los valores de IRI en los tramos analizados a intervalos

de 20m para ambos métodos y se compararon, tomando con parámetro de aceptación una relación entre 95-105%. Los resultados obtenidos, marcan las pautas para perfeccionar el procedimiento y los parámetros de toma fotográfica con el fin de lograr mejores resultados. Los valores de diferencia media de altura entre los perfiles muestran diferencias milimétricas mientras que las desviaciones estándar oscilan en el orden de los centímetros. Solamente cumplieron el indicador de aceptación el 20% de los resultados de IRI. Los procedimientos realizados ofrecen valores agregados como lo es la orto fotografía de alta resolución abriendo así la posibilidad de identificar daños o deterioros sobre el pavimento tales como piel de cocodrilo, exudación, grietas, ahuellamiento y baches” (Sánchez et al., 2018).

Angarita y Sánchez (2017), el objetivo de este proyecto ha sido obtener el IRI mediante métodos fotogramétricos y métodos topográficos tradicionales, en un trazado vial compuesto por pavimento flexible, utilizando la información recopilada en el desarrollo y avance del cálculo del IRI y su resultados respectivo, aplicar métodos topográficos para recolectar la información que el IRI evaluó en un tramo de carretera que reúne las condiciones necesarias realizar el proceso fotogramétrico sobre el trayecto seleccionado, para su posterior postprocesamiento documentar los procedimientos y resultados obtenidos durante la recolección de la información. Donde “registraron a través de imágenes la superficie de un tramo de pavimento flexible ubicado en la Universidad Militar de Nueva Granada en Bogotá, Colombia. Se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado DJI Phantom 4, el cual fue preconfigurado para realizar misiones de vuelo en red y en red dual para obtenga imágenes con resoluciones de 9 mm y 4 mm por píxel respectivamente. Además, se utilizaron puntos de apoyo mediante un receptor GPS de alta velocidad. precisión para mejorar la exactitud de los modelos. Las imágenes fueron procesadas utilizando el software PIX4D Mapper para producir una nube de puntos densa, que luego se se filtró cada 25 cm para generar

los perfiles de huella y calcular el IRI con el Software PROVAL. Los resultados del IRI se compararon con los datos obtenidos dos años detrás de un escáner láser, reportando diferencias entre 0,2 m/km y 1 m/km. Llegando a las siguientes conclusiones La metodología propuesta utilizando fotogrametría a través de sistemas aéreos no tripulado, ofrece valores añadidos como la fotografía orto de alta resolución, abriendo así la posibilidad de identificar daños o deterioros en el pavimento tales como piel de cocodrilo, exudaciones, grietas, surcos y baches, también Los tiempos de recolección de información a través de fotogrametría son más cortos en comparación con los métodos convencionales, minimizando impactos como el cierre de carreteras durante períodos de tiempo. Períodos prolongados de tiempo ya que esta captura de información solo toma unos minutos en secciones considerable y se minimiza el riesgo de accidentes laborales ya que no debe haber personal expuesto en la vía” (Angarita y Sánchez, 2017).

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Alvarado (2020), la presente investigación se realizó con el objetivo de determinar la precisión del levantamiento aerofotogramétrico realizado con el dron Ebee Plus, mediante la ayuda de los puntos de control y comparándolos con el levantamiento topográfico realizado con el GPS diferencial, determinando también el número de puntos de control que deben colocarse en toda el área de trabajo, para tener una buena precisión y exactitud. “El primer procedimiento de la investigación inició con la recolección de información visual del terreno, y se procedió con la ubicación de los puntos de control (benchmark) en todo el terreno a investigar, luego se continuó diseñando el plan de vuelo del dron con el Emotion. 3, posteriormente se realizó el levantamiento aerofotogramétrico con el dron Ebee Plus, este se realizó mediante cámaras digitales que se incorporan al dron, se utilizó una ficha técnica para recolectar los datos de campo a través de cada

vuelo del dron. Dron Ebee Plus, con el que posteriormente procesarlos mediante software” (Alvarado, 2020).

El procesamiento de datos, es decir “la fotometría y modelo digital (ortofoto) se realizó con el software Pix4D, se obtuvieron los datos de Norte, Este y Elevación de todos los puntos del terreno, además se realizó un levantamiento geodésico de los puntos. llevado a cabo. Control con GPS diferencial, que ayudó a la hora de procesar los datos en el programa Pix4D. El segundo procedimiento consistió en realizar el levantamiento topográfico con GPS, diferente a la técnica RTK (Real Time Kinematic) o navegación cinética satelital en tiempo real, del terreno a investigar, con lo que también se obtuvieron puntos topográficos, que incluyen el Norte, Este y Elevación” (Alvarado, 2020).

El nivel de precisión de los resultados está relacionado con la resolución espacial del vuelo del dron Ebee Plus. En esta investigación se obtuvieron mejores resultados con un GSD de 3,0 cm/píxel, debido a que la altura del vuelo se realizó a 117 metros de altura. y permitió mayor nitidez en las imágenes tomadas, además a estos resultados se suman los 09 puntos de control que se instalaron en el área de estudio, obteniendo así un 95% de grado de precisión y exactitud en los resultados obtenidos. Cabe señalar que con un GSD de 3,0 cm/píxel y con 09 puntos de control se logró un grado de precisión y exactitud del 91%, que no sale del rango permitido por las normas y regulaciones vigentes.

Guizado (2018), en este trabajo de investigación se realizó un levantamiento fotogramétrico de un pequeño sector en la zona de Cercado, en el distrito de Puente Piedra, en Lima Metropolitana, mediante el empleo de un VANT Profesional (de altas capacidades técnicas), mediante el cual obtendremos un producto cartográfico (Ortofotografía) georreferenciado gracias al apoyo de puntos colocados en campo (mediante uso de GPS

diferencial) para posteriormente aplicar los principales test de control posicional y determinar el grado de confiabilidad de los resultados mediante el uso de estas nuevas plataformas de vuelo. Tenía como objetivo principal determinar el nivel de precisión de un levantamiento cartográfico con VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) empleando diversos test para el control de calidad posicional como el Test NMAP (National Map Accuracy Standard), Test EMAS (Engineering Map Accuracy Standard) y el Test NSSDA (National Estándar for Spatial Data Accuracy). Indican que los resultados fueron satisfactorios ya que se logró superar los test NMAP y EMAS hasta una escala de 1/500 y el test NSSDA para una escala 1/1000.

Lanado (2021), El objetivo de esta tesis es determinar el estado actual del pavimento flexible de la vía Izcuchaca – Huarcocondo, aplicando los métodos del Índice de Servicio del Pavimento (PSI) y el Índice de Condición del Pavimento (PCI). Para determinar el PSI, “se midió la regularidad superficial de la vía mediante el rugosímetro Merlin, realizando 18 pruebas basadas en la norma ASTM E867 – 06 (Standard Terminology Relating To Vehicle – Pavement Systems). El trabajo de campo de este método consistió en registrar los datos de elevación y depresión que adopta el puntero en el tablero del Rugómetro Merlin. Para determinar el PCI se realizó el diagnóstico visual de fallas en el programa CIVIL 3D para las 12 unidades de muestreo aplicando el método PCI, con base en la norma ASTM D6433 – 07 (Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys). El trabajo por este método consistió en levantar imágenes georreferenciadas con ayuda del DRONE, para luego llevarlas a la oficina y realizar un inventario de fallas, registrando su gravedad y cantidad. Del estudio realizado se obtuvo un IRI de 4.87 m/km para el carril derecho, lo que representa que el Pavimento se encuentra en Rango de Calificación “Malo”, y para el carril izquierdo un IRI de 4.14 m/km, lo que representa que el Pavimento está en Rango de Calificación “Malo”, también se obtuvo un PSI para el carril derecho

de 2.11 m/km lo que representa que el Pavimento está en un Rango de Calificación “REGULAR” y para el carril izquierdo un PSI de 2.38 m/ Se obtuvo km lo que representa que el Pavimento se encuentra en un Rango de Calificación “REGULAR” El resultado del índice de condición del pavimento de la vía Izcuchaca-Huarocondo fue 45, lo que representa que el Pavimento se encuentra en un Rango de Calificación “REGULAR”, por lo tanto, la vía Necesita intervención de REHABILITACIÓN” (Lanado, 2021).

2.2. Base Teórica

2.2.1. Definición del Pavimento

Un pavimento está formado por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que técnicamente están diseñadas y construidas con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas descansan sobre la subrasante de un camino obtenido mediante movimientos de tierra en el proceso de exploración y deben resistir adecuadamente las fuerzas que le transmiten las cargas de tráfico repetidas durante el período para el cual se diseñó la estructura del pavimento (Montejo Fonceca, 2002, pág. 1).

2.2.1.1. Pavimentos Flexibles

“Este tipo de pavimentos está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra” (Montejo Fonceca, 2002, pág. 2).

2.2.1.2. Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos “son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la sub-rasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina sub-base del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del

concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento”. (Montejo Fonseca, 2002, pág. 5).

2.2.2. Definición de Regularidad Superficial del Pavimento

“Desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal.” (ASTM E 867-06).

Badilla (2009) indicó que “en la década de los 70s, el Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Aún datos de un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo”. (pág. 3)

2.2.3. Índice de Regularidad Internacional (IRI)

Es una medida de la uniformidad de la superficie del pavimento y se expresa en unidades de pulgadas por milla o en metros por kilómetro. Resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la regularidad de un camino en un auto de pasajeros típico, producto de la simulación del modelo de cuarto de carro para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h. (Sayers y Karamihas , 1998).

Por lo tanto, el IRI está relacionada con la acumulación de desplazamientos en el sistema de suspensión de un vehículo, dividida entre la distancia recorrida por un vehículo a 80km/h.

En 1982, el proyecto “International Road Roughness Experiment” (IRRE) impulsado por el Banco Mundial realizó una reunión donde participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica, donde se seleccionó el Índice de Regularidad Internacional (IRI) como único parámetro para medir la regularidad superficial del pavimento.

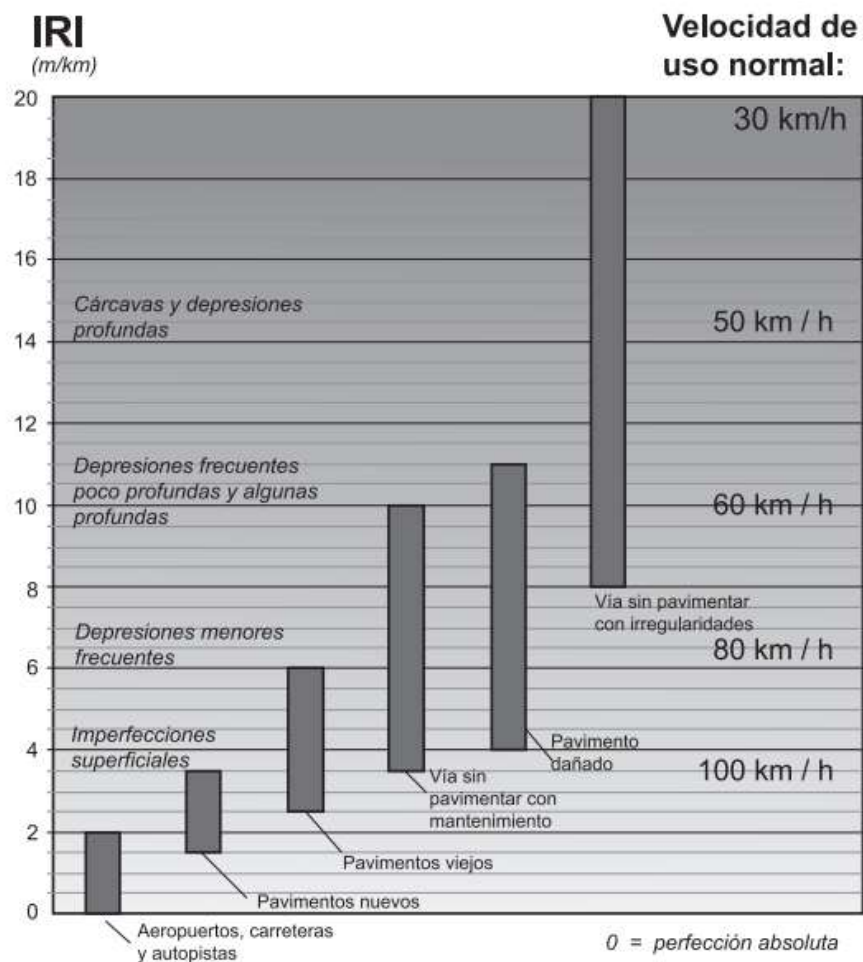
2.2.3.1. Escala y Características del IRI

El cálculo del IRI en los pavimentos es necesario para controlar el deterioro progresivo del pavimento. Este indicador permitirá programar las intervenciones de las vías y realizar una mejor inversión. Además, el mantenimiento óptimo del estado general de los pavimentos afecta el costo total de operación de los vehículos, la calidad del movimiento de las personas, el orden y la limpieza de la ciudad y la salud de los residentes. Por tanto, es importante que su valor sea invariable independientemente de la técnica o equipo utilizado.

A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías como se observa en la figura 1.

Figura 1.

Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías



Nota. Adaptado de (UMTRI Research Review, 2002).

2.2.4. Clasificación de equipos según el banco mundial

Existen diferentes clases para medir el IRI. Estos dependen de la relación entre sus mediciones y el IRI, sus requisitos de calibración y la precisión utilizada.

Según la norma ASTM - E950 - 98 los equipos de medición se clasifican en 4 clases según el intervalo de muestra.

Clase 1: menos que o igual a 25 mm (1 in)

Clase 2: más grande que 25 mm (1 in) a 150 mm (6 in)

Clase 3: más grande que 150 mm (6 in) a 300 mm (12 in)

Clase 4: más grande que 300 mm (12 in)

2.2.4.1. Clase 1: Perfiles de Precisión

Esta clase representa el mayor grado de precisión en la medición y cálculo del IRI. Para que un método pertenezca a esta clase, requiere una medición precisa del perfil longitudinal y debe estar definido por una serie de alturas en puntos separados por una pequeña distancia.

Esto requiere una medición precisa de las alturas del perfil longitudinal en cada distancia específica, preferiblemente a intervalos pequeños para que no haya muchas incertidumbres e inconsistencias y el IRI sea más preciso.

Los dispositivos estáticos pertenecen a este grupo porque son muy precisos, pero tienen un rendimiento bajo. No se recomiendan para distancias muy largas o en lugares donde el IRI debe determinarse rápidamente. Sin embargo, existen dispositivos dinámicos (buena precisión y alto rendimiento), como determinados perfilómetros, que permiten realizar mediciones IRI muy precisas y con buen rendimiento, pero su principal desventaja es que son muy caros. Como perfilómetros inerciales y ampliamente utilizados en el Perú, es la mira y nivel topográfico.

2.2.4.2. Clase 2: Otros Métodos Perfilométricos

Esta clase incluye todos los dispositivos que, al igual que la clase 1, calculan el IRI en función de la medición del perfil longitudinal, pero no tienen la exactitud o precisión requerida para ser considerados en esta clase. Como parte de sus requisitos, es necesario que los puntos del perfil a medir estén espaciados como máximo 500 mm; Además, la precisión de la medición de altura entre 1 mm y 6 mm para pavimentos IRI es de entre 1 y 3 m/km y de 10 a 20 m/km respectivamente. Finalmente, la diferencia en los valores del IRI debe ser inferior al 5%. (Sayers et al., 1986).

Algunos ejemplos de dispositivos de esta clase son: perfilómetros dinámicos como el analizador de perfil longitudinal (APL) y el perfilómetro inercial de General Motor Research (GMR). Este último ha sido validado por el IRRE para carreteras con un IRI inferior a 3 km/m.

2.2.4.3. Clase 3: Estimaciones del IRI Mediante Correlaciones

La mayoría de las mediciones de regularidad de superficies que se llevan a cabo actualmente utilizan sistemas de tipo respuesta (RTRRMS). Este método depende de las características dinámicas de cada vehículo, que evolucionan con el tiempo.

Esta clase requiere una transformación de las medidas recopiladas. Por lo tanto, los valores de pendiente media rectificadas originales obtenidos del RTRRMS deben corregirse y convertirse a la escala IRI utilizando ecuaciones de correlación obtenidas mediante calibración experimental de cada uno de los dispositivos con uno de los sistemas de clase 1 o 2.

Además, las propiedades mecánicas de los vehículos cambian con mucha facilidad, es necesario mantener controles muy estrictos tanto en el uso del vehículo como en su mantenimiento.

La repetibilidad asociada con un RTRRMS calibrado es de aproximadamente 0,5 m/km para caminos pavimentados en tramos de 320 m de longitud y aproximadamente 1,0 m/km para superficies no pavimentadas de esta longitud. Estas cifras de precisión son sólo promedios aproximados, ya que los errores generalmente varían según la rugosidad y el tipo de superficie. Es posible obtener una mayor precisión utilizando secciones de prueba más largas (Contreras , 2000).

2.2.4.4. Clase 4: valores subjetivos y medidas sin calibrar

Consiste en “el cálculo del IRI a partir de un equipo tipo respuesta sin calibrar con el cual se puede estimar el estado de la carretera o bien se puede valorar este mediante las sensaciones de confort y seguridad que experimenta una persona experta en la materia al circular por la carretera. La conversión a la escala IRI, se asocia a unas descripciones verbales y/o pictóricas del estado de la carretera en función del valor de IRI” (Sanchez y Solminihac, 1989).

Se utiliza principalmente para obtener datos de referencia sobre el grado de uniformidad de la superficie de la carretera y relacionarlos con el IRI sin requerir una alta precisión del resultado.

Cuando estas estimaciones subjetivas de rugosidad se convierten a la escala IRI, la resolución se limita a aproximadamente seis niveles de rugosidad con una precisión de entre 2 y 6 m/km en la escala IRI. (Sanchez y Solminihac, 1989).

2.2.5. Factores que Afectan la Precisión

El análisis IRI sólo se puede aplicar a información existente; no puede proporcionar información sobre la carretera que no se incluyó en la medición del perfil. Por lo tanto, existen requisitos mínimos que deben cumplirse para calcular el IRI válida utilizando un método perfilométrico. La tabla 3 resume los requisitos para los dos principales.

Tabla 3.

Requisitos de precisión para la medición perfilométrica de IRI de Clase 1 y 2

Roughness range IRI (m/km)	Maximum convenient sample interval between points (mm) ¹ /		Precision of elevation measures (mm) ² /	
	Class 1	Class 2	Class 1	Class 2
1.0 - 3.0	250	500	0.5	1.0
3.0 - 5.0	250	500	1.0	1.5
5.0 - 7.0	250	500	1.5	2.5
7.0 - 10.	250	500	2.0	4.0
10 - 20	250	500	3.0	6.0

Nota. Adaptado de (Sayers et al., 1986).

“Las fuentes de error se pueden dividir en tres categorías: errores de repetibilidad, errores de calibración y errores de reproducibilidad”. (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986).

2.2.5.1. Error de Repetibilidad (er)

No se puede esperar una concordancia exacta de mediciones repetidas con un instrumento porque el proceso de medición implica efectos aleatorios que varían de una medición a otra. Es posible que el grado de repetibilidad no siempre sea obvio, ya que los instrumentos a menudo implican una cuantificación de la salida, lo que enmascara los efectos de pequeñas variaciones.

Al medir la rugosidad de la carretera examinando cuidadosamente el perfil longitudinal, la precisión está limitada por: (1) la instrumentación utilizada para medir el perfil, (2) las ubicaciones aleatorias de los puntos específicos a lo largo de la huella de las ruedas donde se toman las medidas de elevación, y (3) la selección parcialmente aleatoria de la posición lateral de una vía de rodadura. Los primeros dos errores se reducen al especificar mediciones de perfil de mayor calidad (es decir,

mediciones de elevación más precisas y puntos topográficos más espaciados). Cuando se controlan estas fuentes de error, la imprecisión asociada con la identificación de la ubicación de las huellas de las ruedas se convierte en el factor más significativo, representando variaciones de hasta el 5% cuando la longitud de las huellas de las ruedas es de 320 m.

Los errores de repetibilidad son básicamente aleatorios por naturaleza y, por lo tanto, pueden controlarse ampliando el proceso de medición de modo que los errores aleatorios se cancelen debido al promedio. Esto se puede lograr de forma más sencilla utilizando secciones de prueba de suficiente longitud.

Una segunda forma de promediar se obtiene realizando mediciones repetidas en el mismo sitio de prueba. De esta manera, se puede reducir el error de repetibilidad en secciones más cortas que no son lo suficientemente largas para lograr un promedio suficiente. En general, el error de repetibilidad es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la longitud total cubierta, donde la longitud total es la longitud del sitio multiplicada por el número de mediciones repetidas. (Sayers et al., 1986).

2.2.5.2. Error de Calibración

Existen errores sistemáticos en los instrumentos. Esto hace que las mediciones de una persona difieran constantemente de las de otra persona o que un instrumento fluctúe con el tiempo. Esto se puede corregir mediante la calibración de modo que las mediciones de rugosidad se reescalen para compensar las diferencias sistemáticas y llevar las mediciones a una escala común. Sin embargo, si la calibración no cubre todas las variables que afectan la medición, es posible que el cambio de escala no sea correcto y persistirá un error de calibración. (Sayers et al., 1986).

2.2.5.3. Error de Reproducibilidad

Al medir una cualidad compleja como la rugosidad de una carretera utilizando un método distinto a la medición directa del perfil, es posible (y común) que dos instrumentos diferentes clasifiquen varias carreteras en un orden diferente según su rugosidad. Existe un error en la selección de ruta que es aleatorio pero sistemático para el instrumento. Aunque las mediciones realizadas con un instrumento (o método) pueden ser altamente repetibles, no lo son cuando las mediciones se realizan con otro instrumento. El problema es que los dos métodos de medición tienen diferencias que son más complejas que los simples factores de escala. Si bien los errores de repetibilidad se pueden controlar mediante pruebas y promedios repetidos, y los errores de calibración se pueden controlar mediante métodos de calibración válidos, los errores de repetibilidad ocurren siempre que el instrumento se desvía de la referencia.

Cuando las mediciones se obtienen a partir de mediciones de perfil de Clase 1, el error de repetibilidad del instrumento es esencialmente inexistente y la incertidumbre existe sólo debido a los límites de repetibilidad. Por lo tanto, se pueden utilizar controles de repetibilidad para mejorar la precisión general.

Otro paso que se puede dar para cualquier método de medición es medir la rugosidad en ubicaciones de carreteras más largas. Dado que el error de reproducibilidad es aleatorio para cada tramo de carretera, se puede reducir un poco promediando cuando se utilizan tramos de carretera más largos. A diferencia del error de repetibilidad, este error no necesariamente disminuye con la raíz cuadrada de la longitud. (Sayers et al., 1986).

2.2.5.4. Efecto de Singularidades

Cualquier falla no constructiva que incremente el valor del producto se denomina singularidad. Los más comunes son: puentes, alcantarillas, intersecciones de carreteras, óvalos,

cuñas y badenes. El valor IRI está influenciado por cualquier alteración del perfil longitudinal (Moyado, 2020).

2.2.6. Equipos para la Medición del Perfil Longitudinal

2.2.6.1. Nivel y Mira Topográfico

El método tradicional para medir perfiles es utilizar equipos topográficos convencionales. El equipo consta de una mira de precisión marcada en unidades de altura apropiadas (normalmente las divisiones principales son mm), un nivel de burbuja que se utiliza para establecer una línea de referencia horizontal y una cinta que se utiliza para marcar la distancia longitudinal a lo largo de la huella del carril. Este equipo está ampliamente disponible y generalmente se puede alquilar o comprar a un precio muy asequible en comparación con otros equipos de medición de rugosidad. Sin embargo, el método requiere mucho trabajo y generalmente es más adecuado cuando sólo es necesario medir unos pocos perfiles. Las instrucciones detalladas sobre el uso de una mira y un nivel están fuera del alcance de estas pautas; Sin embargo, dado que medir el perfil de una carretera no es una aplicación rutinaria de estos instrumentos.

Figura 2.*Instrumentos para el levantamiento topográfico***2.2.6.2. Fase Dipstick**

Originalmente desarrollado para “medir irregularidades particulares en losas de edificios. Consiste en un acelerómetro montado en una estructura con pequeños apoyos separados 300mm. Posee un mango que permite hacer " caminar " al Dipstick a lo largo de la huella a medida que pivotea en cada uno de sus pequeños apoyos y va rotando en 180 grados. Un microprocesador incorporado al Dipstick grava y permite calcular resúmenes estadísticos de la rugosidad. Un acelerómetro mide la inclinación del aparato. Conociendo la inclinación y la separación entre los apoyos, es posible determinar la diferencia de altura entre ellos” (Cáceres y Segura, 2018).

El rendimiento de las mediciones del Dipstick “puede sobrepasar los 250m por hora en una sola huella. Las ventajas de este dispositivo son su bajo costo inicial y su simplicidad de operación.

Aunque es más rápido que medir con mira y nivel de principales despertadas sigue siendo la lentitud. El Dipstick es aplicable especialmente para la evaluación de secciones cortas de pavimento o para la calibración de aparatos tipo respuesta” (Cáceres y Segura, 2018).

Figura 3.

Facedipstick



2.2.6.3. Rugosímetro De Merlin

Denominado así por la abreviatura de “Machine for Evaluating Roughness using Low cost Instrumentation”, este consiste de una estructura metálica de 1.8m de longitud, con una rueda al frente, un pie de apoyos fijo atrás y un apoyo central oscilante (Figura 4). Este último mide las desviaciones de cota de un punto respecto en la rasante que definen los otros dos puntos.

El apoyo central unido a un brazo que en su extremo superior posee un puntero que permite registrar estas desviaciones en una planilla de papel.

Por la gran exactitud de los resultados obtenidos, este rugosímetro es categorizado como Clase 3 de acuerdo a los parámetros del banco mundial, utiliza el concepto de dispersión de las desviaciones de una superficie pavimentada con respecto a una cuerda promedio.

Figura 4.

Rugosímetro Merlin



2.2.7. Equipos Dinámicos

Proporcionan perfiles a gran velocidad, aunque no son réplica exacta del perfil longitudinal del camino (filtran las componentes del perfil con longitudes de onda inferiores y superiores a ciertos valores) si son exactos en la zona de longitudes de onda que influyen en la regularidad superficial.

2.2.7.1. Perfilómetro Laser

Han sido ampliamente utilizados en la evaluación de la regularidad de pavimentos de hormigón. Existen muchos diseños de estos equipos operando bajo el mismo principio. El aparato consiste en un conjunto de patines con una rueda al centro que posee libertad de movimiento

vertical. Dicho movimiento vertical, relativo a las ruedas, queda registrado en una planilla continua los Perfilógrafos (Figura 5) han sido desarrollados por los departamentos de carretera de California y Texas y por el laboratorio de investigaciones de caminos en Inglaterra. El número y ordenamiento de los patines, así como el largo del equipo son las principales diferencias de diseño entre unos y otros. Las ventajas de los Perfilógrafos incluyen su bajo costo inicial, simplicidad de operación y una buena repetir repetitividad. Sus desventajas son su baja velocidad de operación y su incapacidad para medir rugosidad en longitudes de onda iguales a múltiplos del largo del patín.

Figura 5.

Perfilógrafo laser



2.2.7.2. Walking Profiler

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

desplazamiento. En la actualidad existen versiones que integran una computadora portátil al dispositivo a fin de realizar los procesamientos en campo.

Estos equipos, dependiendo del modelo y proveedor permiten:

Obtener distintos índices de rugosidad superficial de los firmes, haciendo posible la auscultación sistemática de la red de carreteras.

Alta precisión en la obtención del perfil longitudinal de evaluación.

Se pueden georeferenciar los resultados, puesto que también dispone de un equipo autónomo de posicionamiento global (GPS).

Figura 6.

Walking Profiler



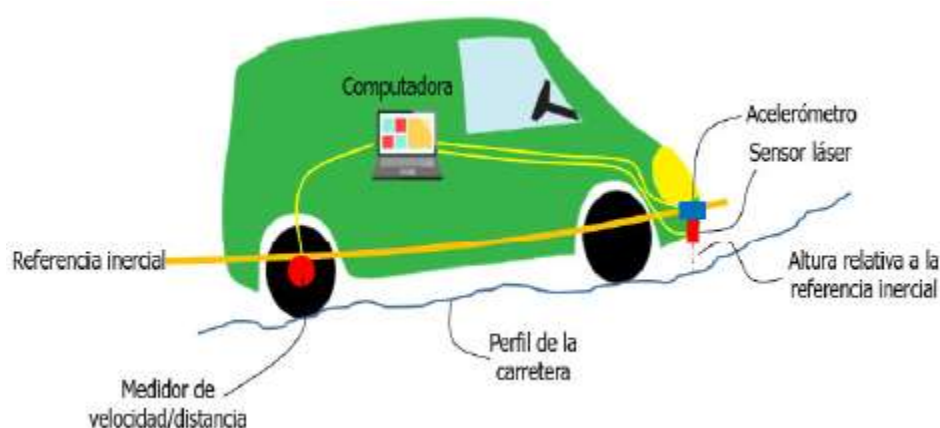
2.2.7.3. Perfilómetro inercial

A perfilómetro inercial es un instrumento de alto rendimiento utilizado para evaluar la regularidad superficial de los pavimentos. Estos dispositivos son fundamentales para medir la deformación de los pavimentos y evaluar la calidad de las superficies. Los perfilómetros inerciales utilizan el Índice de Regularidad Internacional (International Roughness Index, IRI) como parámetro de medición para determinar la regularidad de un pavimento.

Estos equipos ofrecen a los ingenieros una solución avanzada y de alta calidad para la medición de la superficie de los pavimentos de manera rápida y precisa. Los perfilómetros inerciales son esenciales en el control de calidad de carreteras, aeropuertos, y otras infraestructuras donde la regularidad superficial de los pavimentos es crítica para garantizar la seguridad y durabilidad de las vías de tránsito.

Figura 7.

Perfilómetro Inercial



2.2.8. Normativa de Organismos Internacionales Para la Medición del IRI

En la actualidad, existen diversas organizaciones que han normalizado las mediciones de rugosidad (IRI) entre ellas destacan AASHTO, ASTM y FWHA y el Banco Mundial quien

finalmente, es el principal agente interesado en la implementación de la aplicación de IRI en la administración de carreteras.

Sin embargo, estas agencias solo llegaron a definir más que todos los procedimientos de medición o escalas de valores en los cuales debían compararse las mediciones en función a la clasificación de la vía o tipo de superficie. Sobre la metodología de medición, la FWHA y el Banco Mundial referencian al IRI promedio como el valor absoluto representativo de la medición en una vía determinada.

2.2.9. Especificaciones Técnicas Para la Medición del IRI en el Perú

Las primeras especificaciones técnicas utilizadas para la medición de la rugosidad en Perú relacionaban los requisitos del IRI con el valor PSI, que se utilizaba para el diseño de nuevos pavimentos. Se suponía que este valor PSI, que según la escala de Sayers en valor IRI era igual a 1,23 m/km, debía alcanzarse con procesos constructivos convencionales. Sin embargo, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones emitió un dictamen al respecto, indicando que el valor propuesto como umbral era demasiado exigente, por lo que estableció, a su juicio, un límite más flexible para los pavimentos en obra nueva. En ese sentido, el requisito establecido solicitaba una rugosidad media máxima de 1,5 m/km. En el caso de pavimentos que habían sido repavimentados o con refuerzos asfálticos, se consideró que el grado de deformación del pavimento existente incidía negativamente en los resultados de rugosidad del pavimento final. Así, teniendo en cuenta que ya existía un criterio para diseñar los recubrimientos sólo para estructuras existentes con una rugosidad no superior a 3 m/km, se estableció un límite de 2,0 m/km.. En octubre de 1995, a través del Proyecto Especial de Rehabilitación de la Infraestructura de Transporte (PERT), se publicaron las nuevas especificaciones técnicas de rugosidad, las cuales fueron incluidas como parte del control para la recepción de las obras; donde se menciona que la

rugosidad de los pavimentos se controla mediante el cálculo de un parámetro denominado IRI Característico (IRIcar), el cual es igual al IRI promedio más el producto de 1.645 veces la desviación estándar.

2.2.10. Normatividad Peruana Respecto a la Metodología de Control del IRI

Como se mencionó anteriormente, el IRI en el Perú es actualmente uno de los controles de serviciabilidad más importantes, ya que se puede relacionar con el nivel de confort, seguridad y costos de operación y, por lo tanto, facilita la cuantificación de los beneficios obtenidos por el usuario. Asimismo, hemos visto que existen diversas metodologías de control; todas ellas implementadas por diferentes organismos en función de sus necesidades y requerimientos de control. Sin embargo, aun considerando que contamos con controles de recepción establecidos en la normatividad vigente, aún no existe una metodología estandarizada (como Norma Técnica Peruana o Ensayo MTC) de medición de rugosidad que utilicemos actualmente en el ámbito nacional.

En la actualidad, tomamos como referencia las directrices indicadas en el Boletín n° 46 del Banco Mundial para el uso de dispositivos de clase 3 y la norma ASTM E950 “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference” para el uso de dispositivos Clase 1, que tienen validez y respaldo en el contexto internacional, sin embargo, se requiere el apoyo de organizaciones o entidades nacionales que normalicen, actualicen, difundan y adapten las metodologías a nuestro medio.

2.2.11. Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT)

Greenwood et al., (2019) definieron como “un vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) a una aeronave que no lleva piloto a bordo, puede ser controlado mediante un operador desde una

estación remota o puede ser guiado autónomamente basado en misiones preprogramadas para realizar alguna tarea específica”.

2.2.11.1. Marco Legal que Regulan el uso del VANT

El aumento exponencial del uso de los drones en los últimos años y las mejoras tecnológicas en relación a las capacidades operativas para múltiples aplicaciones han generados desafíos para los operadores debido a la preocupación por parte de las autoridades de aviación civil con respecto a la privacidad, la protección de los datos y la seguridad pública (Wright et al. 2015). Con la finalidad de minimizar los riesgos de accidentes o incidentes provocados por los vehículos aéreos no tripulados se han introducido regulaciones o normativas nacionales e internacionales que permiten, prohíben o restringen las operaciones de estas aeronaves dentro del espacio aéreo segregado (Stöcker et al. 2017).

2.2.12. Fotogrametría

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS), menciona que: “La fotogrametría es la ciencia y tecnología de extraer información geométrica y temática tridimensional fiable, frecuentemente con el paso del tiempo, de objetos y escenas a partir de imágenes y conjuntos de datos. Los datos obtenidos mediante esta técnica pueden ser usados para desarrollar bases de datos espaciales y sistemas de información espacial (SIE) en formas digitales, gráficas y de imágenes.”

Por otro lado, Claros et al. (2016) definió a la fotogrametría como una técnica de medición indirecta que permite obtener las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales mediante el procesamiento de imágenes fotográficas.

2.2.12.1. Clasificación de la Fotogrametría

Hilario (2015), clasificó a la fotogrametría en:

La fotogrametría analógica, que aparece por los años 1930, está basada en aparatos de restitución, con este tipo de fotogrametría se levantó la mayor parte de la cartografía mundial. Consiste en la colocación de un par de fotografías en un restituidor óptico o mecánico. El operador realiza la orientación interna y externa de forma manual para crear el modelo estereoscópico, debidamente escalado y nivelado

La fotogrametría analítica, surgió por los años 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre los restituidores analógicos y los inicios de la computación. En ella, la obtención de información es analógica y el modelado geométrico es matemático.

La fotogrametría digital, vigente actualmente, surgió gracias al gran desarrollo en la programación, que dio origen al procesamiento fotogramétrico mediante el uso de ordenadores. Con la fotogrametría digital crece la posibilidad de obtener toda la información contenida dentro una fotografía, a la vez que simplifica y automatiza los procedimientos, permitiendo con ello la generación más rápida y eficiente de modelos de elevación del terreno, orto imágenes y estereortoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales etc.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica

Este estudio se realiza en la prolongación de la Avenida La Cultura km 3+500 - km 4+500 de la ciudad del Cusco, abarcando los distritos de San Sebastián y San Jerónimo, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8.

Ámbito de estudio



Nota. Adaptado de google earth

3.2. Tipo de Investigación

El tipo de investigación corresponde a aplicada porque tiene por objeto determinar el grado de confiabilidad del VANT y proponerlo como nueva herramienta para el cálculo del índice de regularidad internacional del pavimento para facilitar la evaluación de pavimentos.

3.3. Diseño de Investigación

Se trata de un diseño “experimental-corte transversal”, experimental debido a que se realizó manipulación de la variable IRI con datos obtenidos del levantamiento con VANT, fue de corte transversal debido a que los datos se recogieron una sola vez para calcular el IRI tanto para el método topográfico como para el fotogramétrico.

3.4. Nivel de Investigación

Esta investigación tiene un nivel correlacional porque se busca la relación que existe entre los resultados de los métodos topográfico y fotogramétrico. Para esta relación se realizaron ecuaciones de regresión lineal, determinando el coeficiente de correlación.

3.5. Unidad de Análisis

Son los pavimentos urbanos de la región del cusco.

3.6. Población y muestra

3.6.1. Población

Está constituida por los Pavimentos Urbanos de la Ciudad del Cusco.

3.6.2. Muestra

La muestra es de carácter intencional no probabilístico, se eligió prolongación avenida la Cultura km 3+500 - km 4+500 como tramo de prueba considerando el criterio del investigador.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada para recoger información fue la ficha de recolección de datos estructurada de acorde a las necesidades del estudio, que consistió en un registro sistemático de datos en la ficha. El instrumento utilizado fue el nivel topográfico y el vehículo aéreo no tripulado.

3.8. Proceso de Recolección de Datos

3.8.1. Consideraciones Generales

Para esta investigación, se tuvo en cuenta el método topográfico como patrón de comparación. Dado que este equipo es altamente preciso y se considera de Clase 1 para el cálculo del Índice Internacional de Regularidad del Pavimento.

3.8.2. Colocación de Puntos de Control

Se colocaron 20 puntos de apoyo distribuidos uniformemente a los lados de la zona de pruebas a criterio del investigador. Para este trabajo se utilizaron dos receptores GNSS de doble frecuencia del modelo 150 de CHCNAV. Para la lectura de los datos, se posicionó el GNSS durante cuatro horas en el punto principal y 20 minutos en los veinte puntos de apoyo como se muestra en la Figura 9.

Figura 9.

Colocación de puntos de control



3.8.3. Método Topográfico

Para este trabajo se utilizó la nivelación relativa, ya que la muestra estaba bien definida como zona de prueba y se utilizaron 20 puntos.

Se utilizó el método de nivelación de alta precisión según Mendoza (2019) la mira tenía una aproximación de 1 mm, el equipo se colocaba aproximadamente a la misma distancia entre los puntos de nivel de la poligonal, los puntos de apoyo eran superficies sólidas. El error máximo permitido es $E_{\max} = \pm 0.004\sqrt{k}$. La comprobación de esta nivelación geométrica fue satisfactoria $E = \pm 0.002$., Se procedió a repartir los errores del cierre total a cada una de las coordenadas considerando directamente proporcional a la distancia entre estos puntos.

Para el levantamiento de las cotas del perfil longitudinal, se hicieron marcas en el pavimento cada 25 cm para tomar lecturas como se muestra en la Figura 10.

Figura 10.

Levantamiento topográfico



3.8.4. Método Fotogramétrico

En la presente investigación se utiliza el método fotogramétrico como una propuesta alternativa para determinar el índice de regularidad internacional (IRI) a través de un vehículo aéreo no tripulado.

3.8.4.1. Características del Equipo Utilizado

Para la siguiente investigación se ha utilizado un vehículo aéreo no tripulado con las siguientes características.

Figura 11.

Phantom 4 Pro V2.0



Marca: DJI

Modelo: Phantom 4 Pro V2.0

Cámara: 20 megapíxeles

Lente: FOV 84*8.8 mm / 24 mm

Sistema de posicionamiento satelital: GPS / GLONASS

Sensores anticolidión

3.8.4.2. Misión de Vuelo

La misión de vuelo se realizó sobre el terreno utilizando la aplicación DJI Groud Station instalada en un Ipad. Con el fin de evitar accidentes ya que la zona es urbana y cuenta con la presencia de edificios, cables eléctricos de alta, media y baja tensión.

La aplicación ayuda a programar vuelos automáticos a través de su interfaz proporcionando los parámetros trayectoria de vuelo, altura de vuelo, solapamiento longitudinal y transversal, velocidad de vuelo y dirección de la cámara.

3.8.4.3. Ejecución de Vuelo

Antes de iniciar el vuelo, se situó el VANT en una zona libre de obstáculos para realizar las calibraciones de la unidad de medida inercial (IMU) y de la cámara, continuando con la colocación de las hélices y encendiendo tanto el VANT como el radio control, verificando su conexión. El radio control debe estar conectado por cable al Ipad para poder cargar la misión de vuelo y automáticamente la aplicación solicitará la verificación del check list para iniciar el vuelo.

Durante el vuelo, el piloto puede monitorizar la trayectoria y las coordenadas de localización del VANT, así como la conexión vía satélite, el porcentaje de batería, la velocidad, la distancia y la altitud de vuelo con respecto al punto de despeje. Las imágenes obtenidas a través del VANT se almacenan automáticamente en una memoria externa conectada al equipo.

3.8.4.4. Procesamiento de Imágenes

Las imágenes obtenidas a través del VANT se procesó en gabinete utilizado una computadora con sistema operativo de 64 bits, con procesador AMD Ryzen 7 2700 Eight-Core.

Ese procesamiento se realizó en el software Pix4D Mapper donde creamos un nuevo proyecto e importamos las fotografías obtenidas del pavimento, este software automáticamente identifica las propiedades de cada fotografía mostrando descripción, grupo, latitud, longitud altitud etc. También nos reconoce el modelo de cámara que se usó.

Una vez cargadas las imágenes comenzamos con el procesado donde el software encuentra puntos característicos en común en las imágenes para realizar la triangulación y dar coordenadas 3D a los puntos X, Y, Z, y estos son corregidos por los puntos de apoyo colocados con el GPS Diferencial y generar modelos 3D y así generar una nube de puntos reconstruyendo las fotografías por puntos que representan píxeles.

Se procesaron un total de 539 imágenes, de las cuales 10 fueron descartadas por el software por presentar diferentes tipos de distorsión, quedando 529 fotos para la generación de la ortofoto y el modelo de elevación 3D. La distancia media de muestreo del terreno (GSD) fue de 0,49 cm.

3.9. Procesamiento de Información

Con las elevaciones obtenidas con el nivel topográfico y el DEM, se generaron perfiles longitudinales para cada huella de circulación de los vehículos.

3.9.1. Método Topográfico

Las coordenadas recogidas de las seis huellas se exportan independientemente en formato CSV UTF-8 (delimitado por comas), y se cargan en el software Proval. Para obtener el perfil longitudinal. Como se muestra en las figuras 12 y 13.

Figura 12.

Perfil longitudinal a partir de las cotas obtenidos con el nivel topográfico

**Figura 13.**

Zoom del a partir de las cotas obtenidos con el nivel topográfico



3.9.2. Método Fotogramétrico

El modelo digital de elevaciones (MDE) almacena datos de coordenadas X, Y y Z cada 0,49 cm. Para generar el perfil del pavimento de la carretera se tiene en cuenta el criterio de obtener

cotas por el método topográfico cada 25 cm. Y con estos datos se generaron los perfiles correspondientes como se muestra en las siguientes figuras 14 y 15.

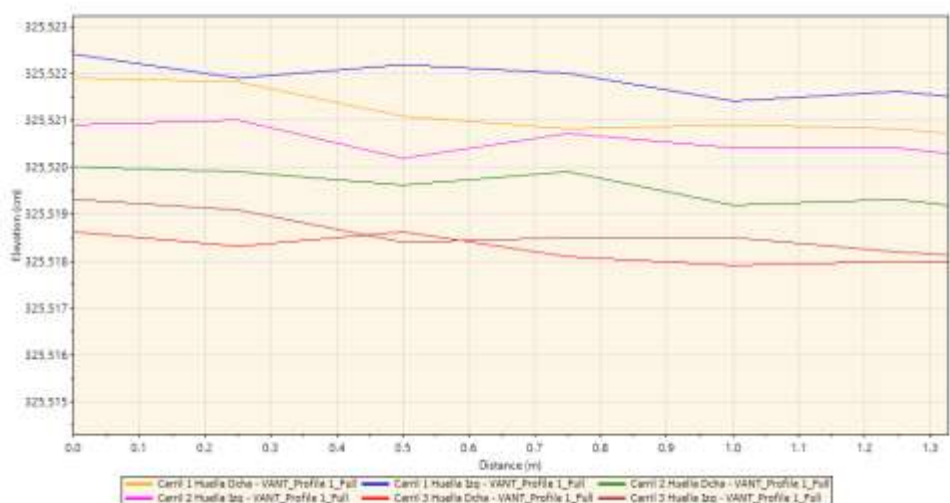
Figura 14.

Perfil longitudinal obtenidos con VANT



Figura 15.

Zoom del Perfil longitudinal obtenidos con VANT



3.10. Técnicas y Análisis de Datos

Para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) seguimos confiando en el programa informático Proval analizando con la opción de Ride Quality.

3.10.1. Procedimiento Para la Obtención del IRI

Para el cálculo del índice internacional de regularidad (IRI) de los perfiles obtenidos por el método topográfico y fotogramétrico utilizamos el software PROVAL. Se importan los puntos que componen el perfil de elevación indicando a que huella pertenecen, espaciado del intervalo de las coordenadas, unidad de elevación y tipo de dato a que huella pertenece (derecha o izquierda). Como podemos ver en la figura 16.

Figura 16.

Importación de puntos del perfil

The screenshot shows the 'File Import Wizard' dialog box with the following settings:

- File:** Carril 1 Huella Dcha - Nivel Top...
- Sample Interval:** 0.25
- Sample Interval Unit:** m
- Elevation Unit:** m
- Decimal Symbol:** Period
- Data Starting Row:** 1

The 'Type' dropdown is set to 'Right' and the 'Text' field contains '3255.218'. Below these settings is a preview table of the imported data points:

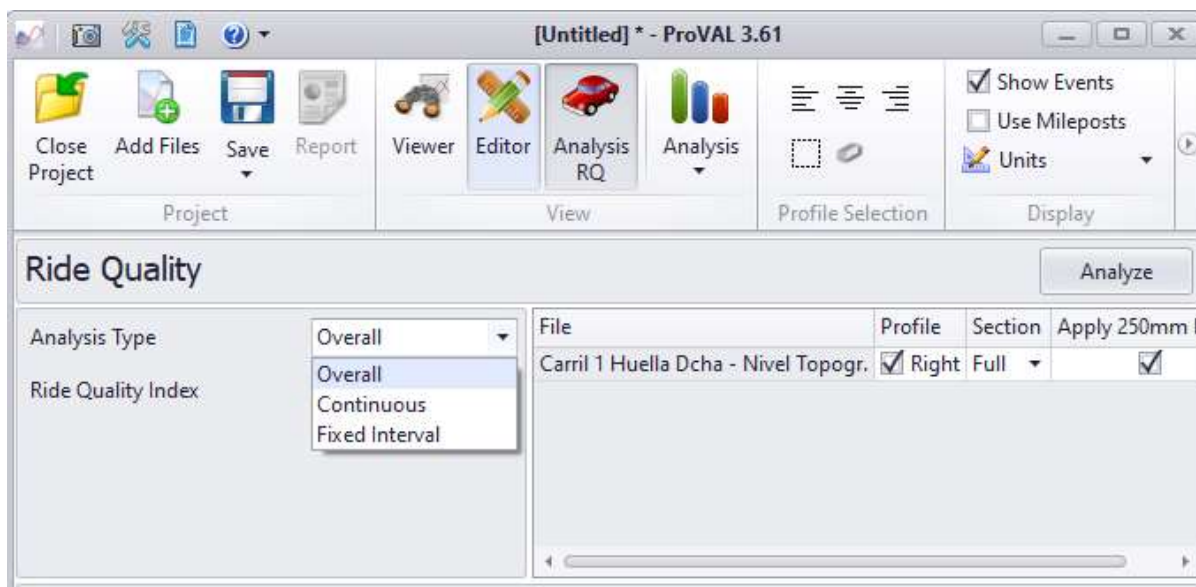
Row	Value
1	3255.218
2	3255.217
3	3255.21
4	3255.208
5	3255.209
6	3255.207
7	3255.205
8	3255.205
...	...

At the bottom of the dialog are three buttons: '< Back', 'Next >', and 'Cancel'.

Una vez importado las cotas calculamos el IRI mediante Analysis ride quality figura 17.

Figura 17.

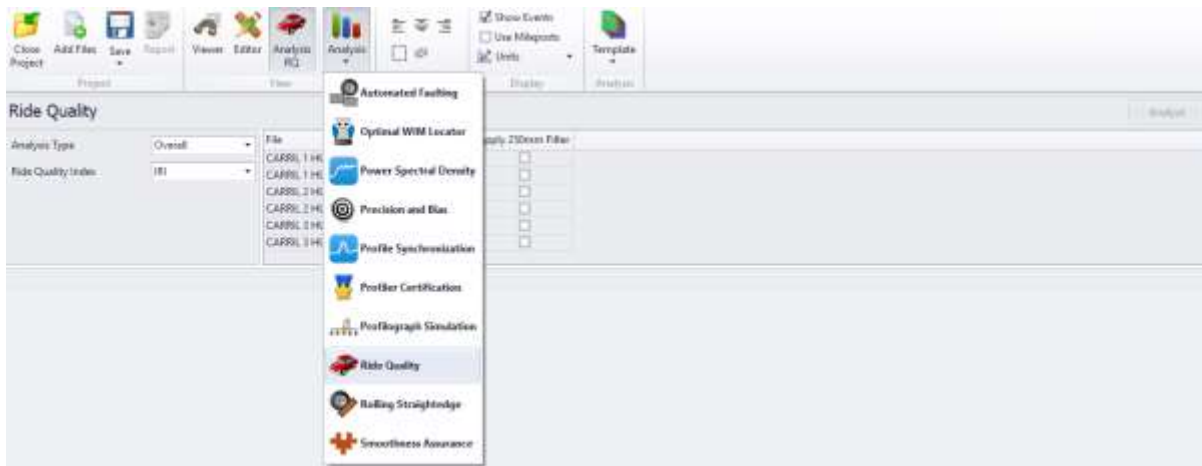
Opción para generar el IRI



Para obtener el IRI se escoge el tipo de análisis OVERALL y se selecciona los seis perfiles obtenidos con el nivel topográfico, y a través del VANT de forma independiente y hacemos clic en la opción de Analyze. Para obtener los resultados como se muestra en la Figura 18.

Figura 18.

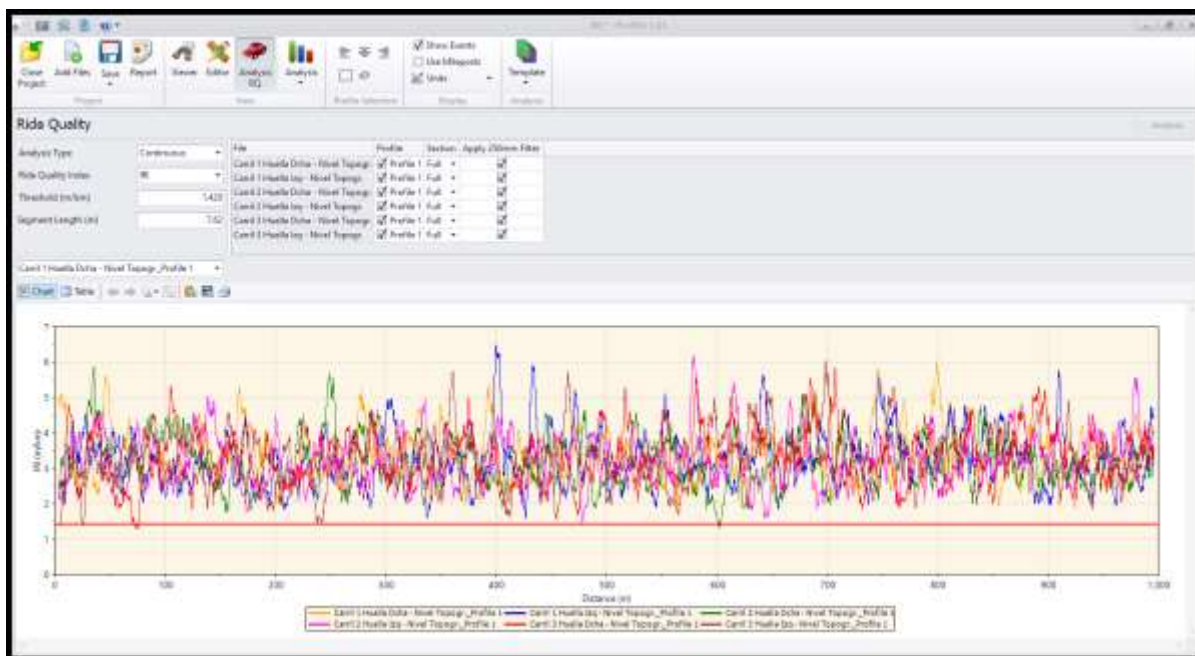
Tipo de análisis Overall para obtener los el IRI en cada huella



Para obtener el perfil longitudinal del IRI en cada huella del carril elegimos el tipo de análisis Continuous y seleccionamos los seis perfiles obtenidos con el nivel topográfico y VANT de forma independiente y hacemos clic en la opción de Analyze. Para obtener los gráficos como se muestra en la Figura 19.

Figura 19.

Perfil del IRI de las seis huellas



Para obtener el valor del IRI segmentado por tramos en cada huella del carril escogemos el tipo de análisis Fixed Interval y seleccionamos los seis perfiles obtenidos con el nivel topográfico y VANT de forma independiente y hacemos clic en la opción de Analyze. Para obtener los valores y los gráficos como se muestra en la Figura 20.

Figura 20.

Histograma de los valores del IRI



CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del IRI con método topográfico y fotogramétrico

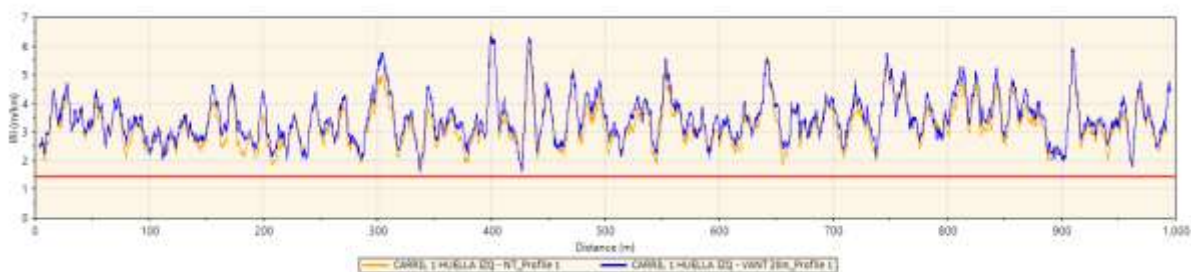
Se analizó los resultados del IRI para cada huella del pavimento mediante el método topográfico y fotogramétrico, se compraron los resultados obtenidos del IRI de los tres carriles y las seis huellas de forma independiente. Para garantizar los resultados, se analizaron muestras en tramos de 5, 10, 20, 50 y 100 metros.

4.1.1. Análisis de Resultados del Carril 1 y Huella Izquierda

Se analizó para segmentos de 20 metros de longitud, como se puede observar en la figura 21, los resultados del IRI son parecidos por ambos métodos; En la mayoría de tramos el IRI obtenido con el nivel topográfico es inferior al del VANT. Excepto algunos segmentos de prueba como la progresiva 0+100 a 0+120 y 0+220 a 0+240. El valor IRI más bajo calculado con el nivel topográfico es de 2.432m/km y con el VANT 2.711 m/km y el valor IRI más alto calculado con el nivel topográfico es 4.439m/km y con el VANT 4.451m/km y en promedio los valores IRI con el nivel topográfico es 3.243m/km y con VANT es 3.469m/km, con una variación de 0,225m/km.

Figura 21.

Perfil del IRI del carril 1 y huella izquierda Nivel Topográfico vs VANT



Los resultados del IRI se analizaron en cinco escenarios a intervalos de 5, 10, 20, 50 y 100 metros.

4.1.1.1. Intervalo de 5 Metros Carril 1 y Huella Izquierda.

Las Figuras 22 y 23 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 5 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 22.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método topográfico

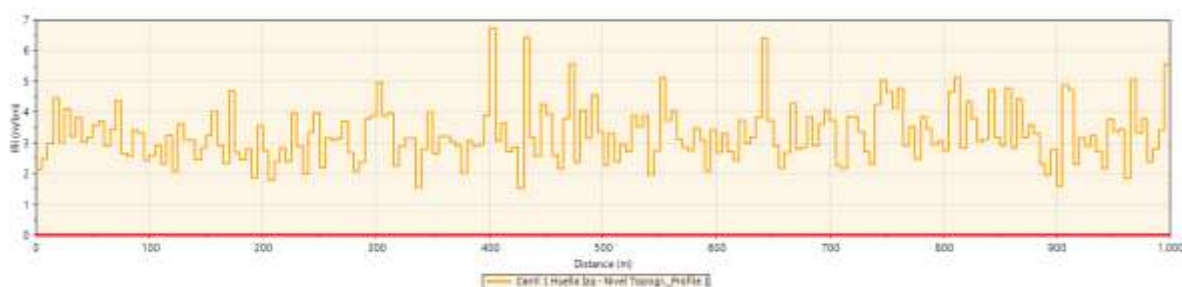
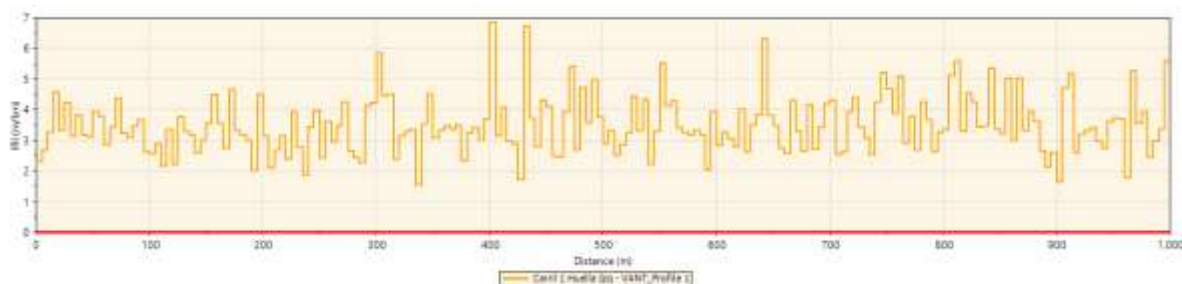


Figura 23.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico



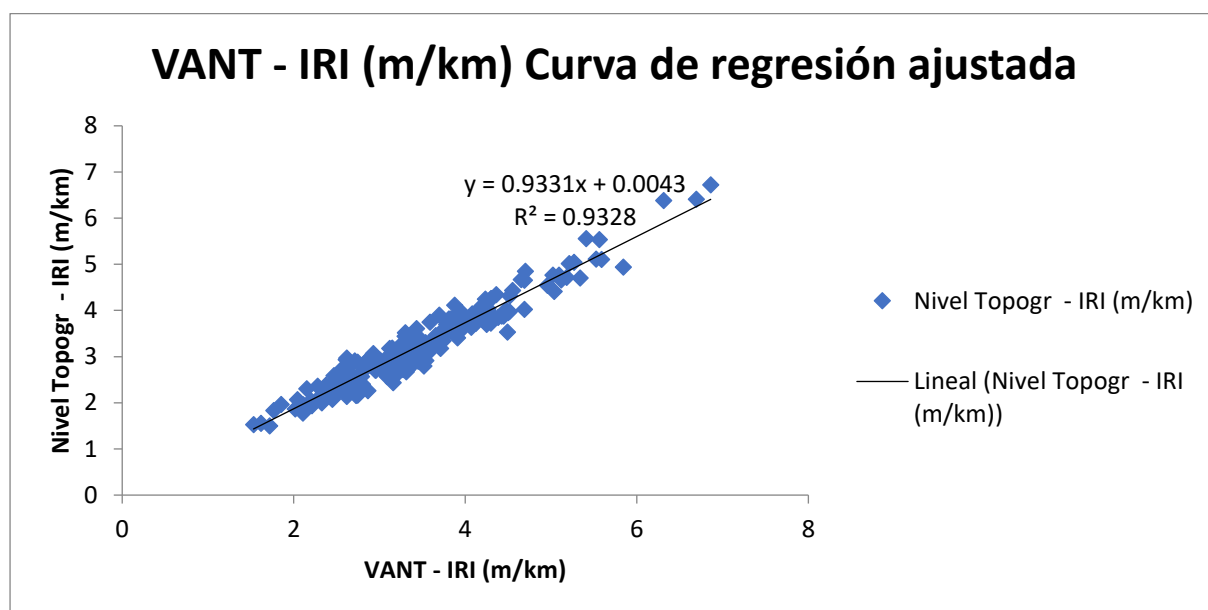
Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 5 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos

por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 24 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 24.

Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 5m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella izquierda es de 0.9658 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 93.28 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.2333 m/km. Como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4.

Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 5m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9658
Coeficiente de determinación R ²	0.9328
R ² ajustado	0.9324
Error típico	0.2333
Observaciones	200

4.1.1.2. Intervalo de 10 metros carril 1 y huella izquierda

Las Figuras 25 y 26 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 10 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 25.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método topográfico

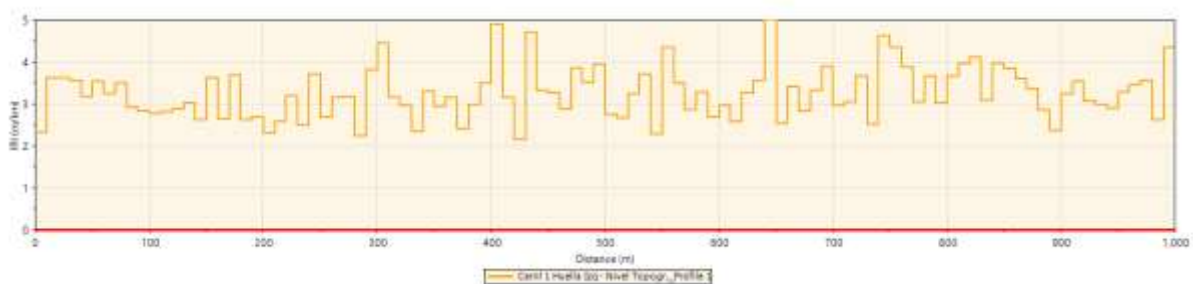
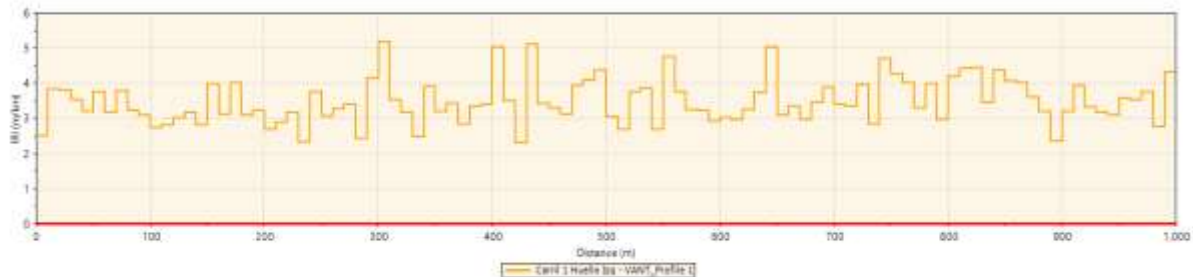


Figura 26.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico

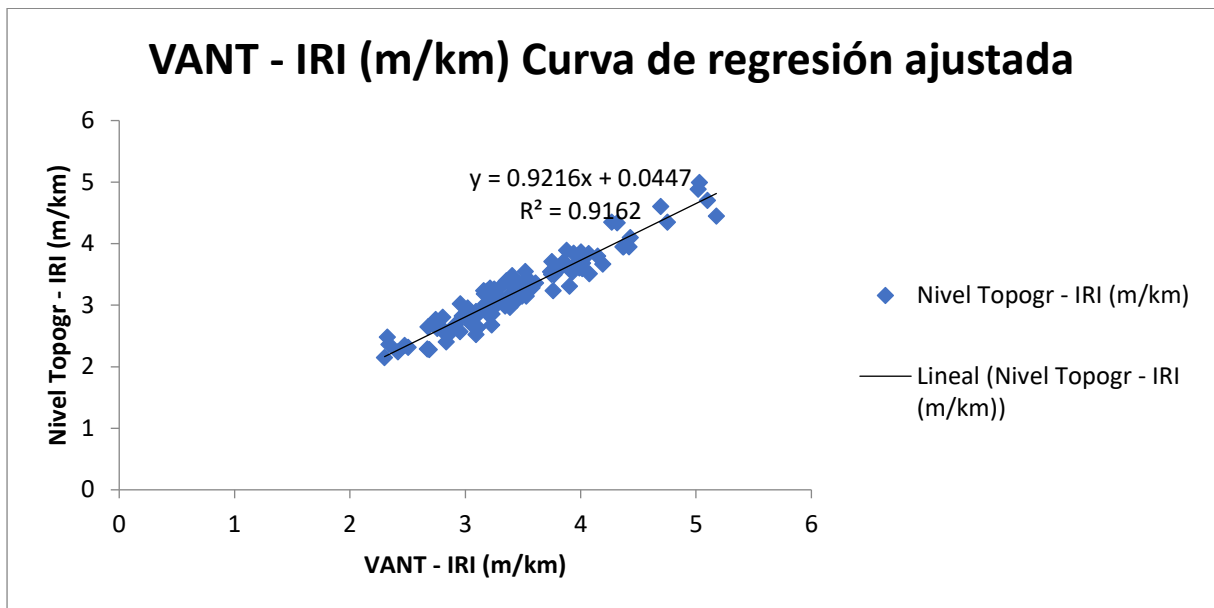


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 10 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 27 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 27.

Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 10m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella izquierda es de 0.9572 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 91.62 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1766 m/km. Como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5.

Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 10m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9572
Coeficiente de determinación R ²	0.9162
R ² ajustado	0.9154
Error típico	0.1766
Observaciones	100

4.1.1.3. Intervalo de 20 Metros Carril 1 y Huella Izquierda

Las Figuras 28 y 29 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 20 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

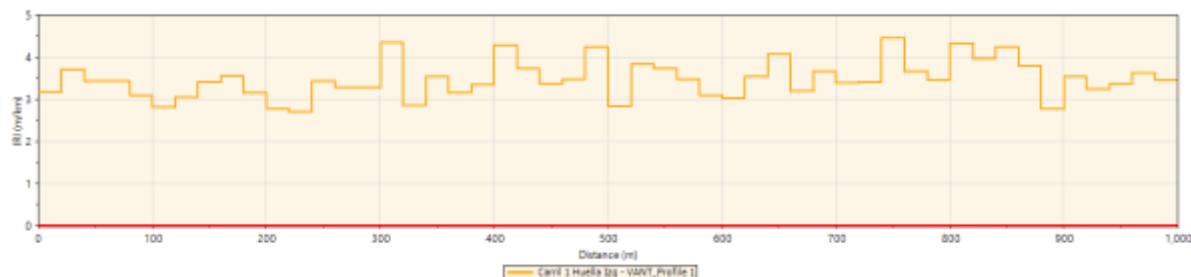
Figura 28.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método topográfico



Figura 29.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico

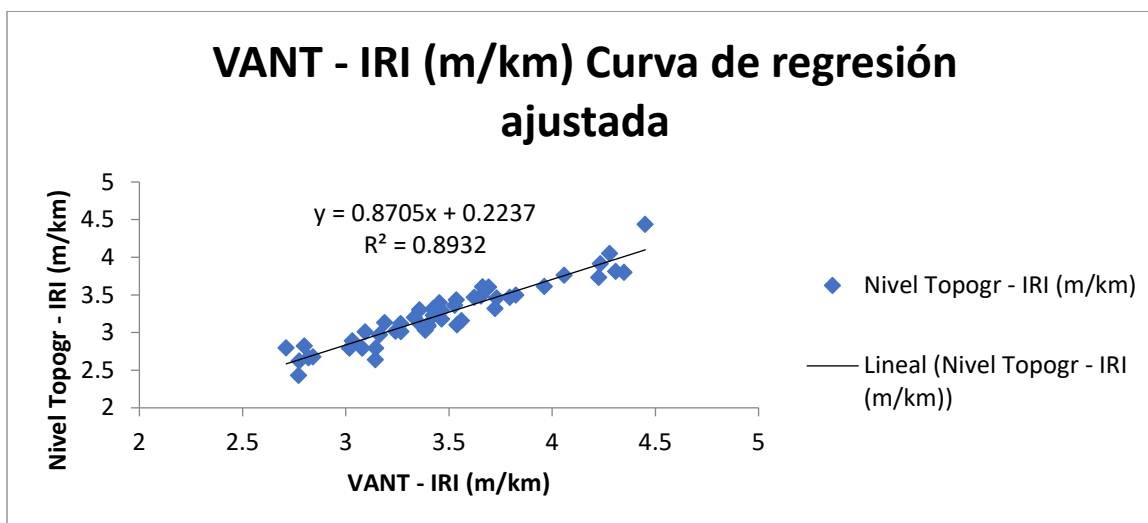


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 20 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 30 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 30.

Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 20m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella izquierda es de 0.9451 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 89.32 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1336 m/km. Como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.

Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 20m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9451
Coefficiente de determinación R ²	0.8932
R ² ajustado	0.8910
Error típico	0.1336
Observaciones	50

4.1.1.4. Intervalo de 50 Metros Carril 1 y Huella Izquierda

Las Figuras 31 y 32 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 50 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 31.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método topográfico

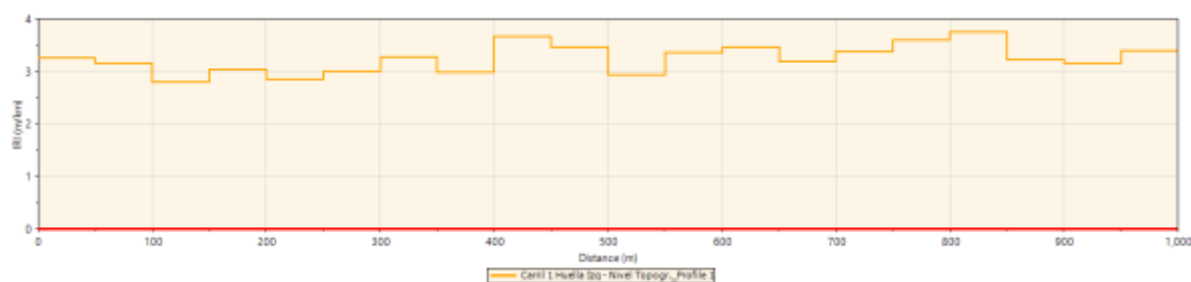


Figura 32.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico

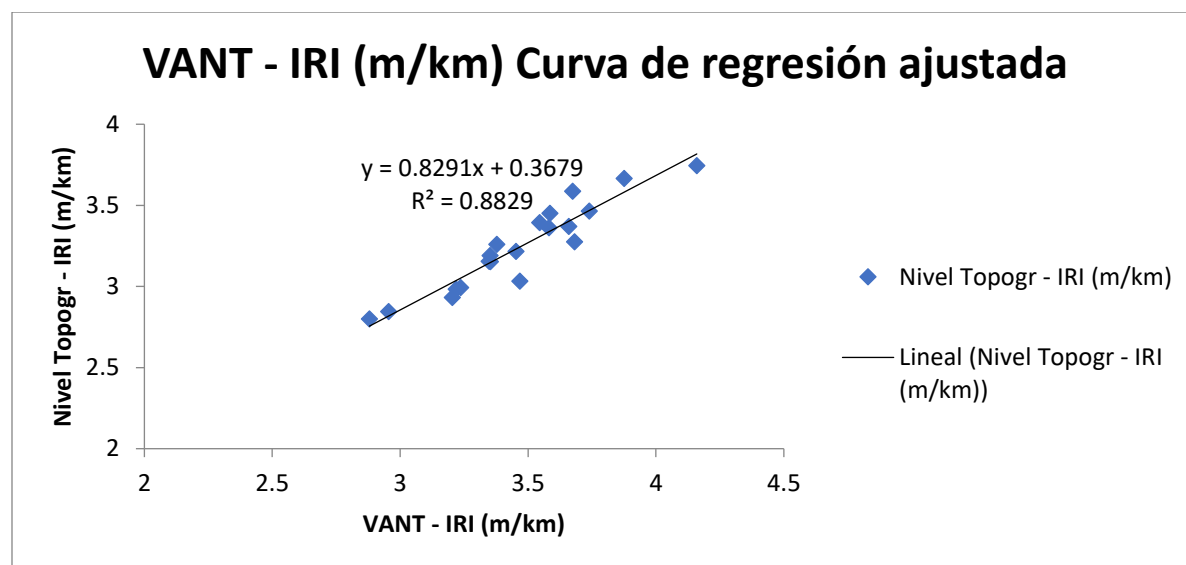


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 50 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 33 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 33.

Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 50m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella izquierda es de 0.9396 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 88.29 % de la variabilidad del IRI con el nivel

topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0934 m/km. Como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7.

Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 50m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9396
Coefficiente de determinación R ²	0.8829
R ² ajustado	0.8764
Error típico	0.0934
Observaciones	20

4.1.1.5. Intervalo de 100 Metros Carril 1 y Huella Izquierda

Las Figuras 34 y 35 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 100 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

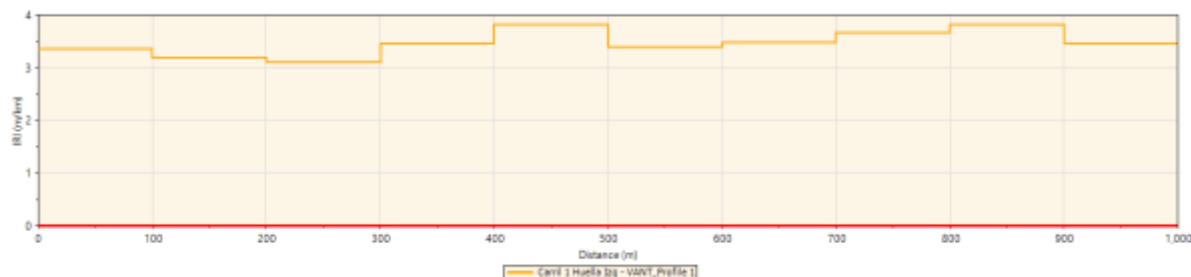
Figura 34.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método topográfico



Figura 35.

Valores de IRI del carril 1 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico

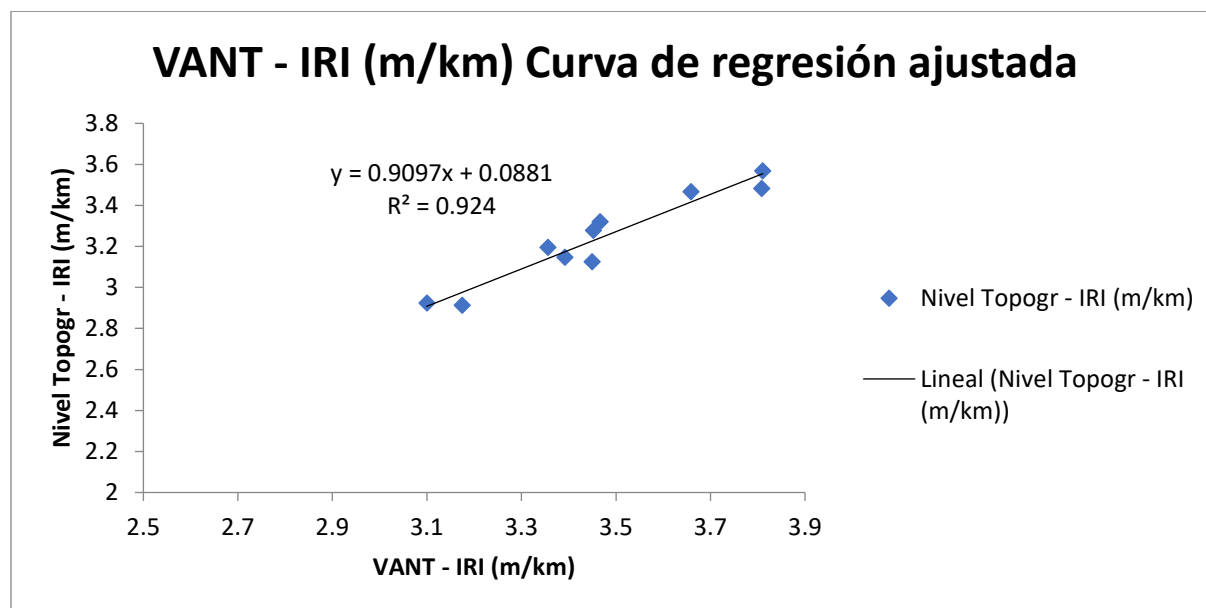


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 100 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 36 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 36.

Correlación lineal de IRI del carril 1 huella izquierda en intervalos de 100m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella izquierda es de 0.9613 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.40 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0659 m/km. Como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8.

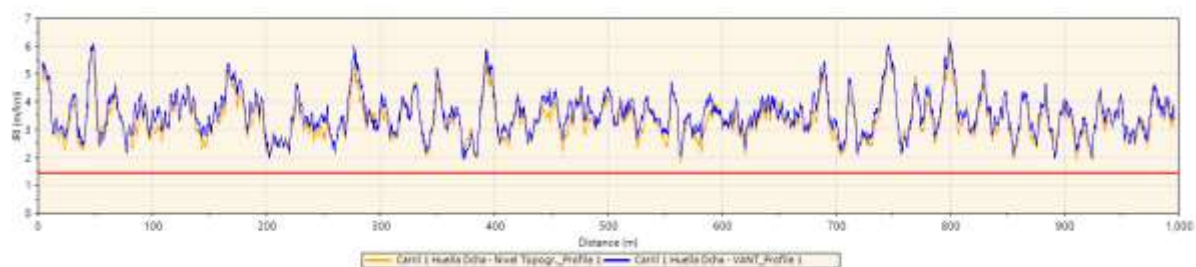
Regresión lineal del carril 1 huella izquierda en intervalos de 100m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9613
Coeficiente de determinación R ²	0.9240
R ² ajustado	0.9145
Error típico	0.0659
Observaciones	10

4.1.2. Análisis de resultados del carril 1 y huella derecha

Figura 37.

Perfil del IRI del carril 1 y huella derecha Nivel Topográfico vs VANT

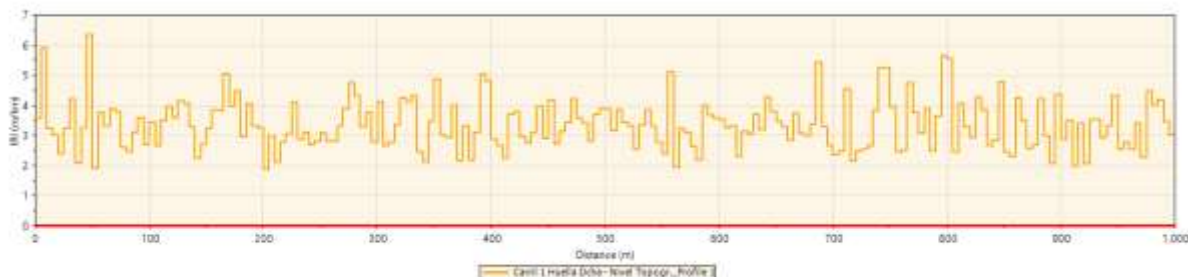


4.1.2.1. Intervalo de 5m Metros Carril 1 y Huella Derecha

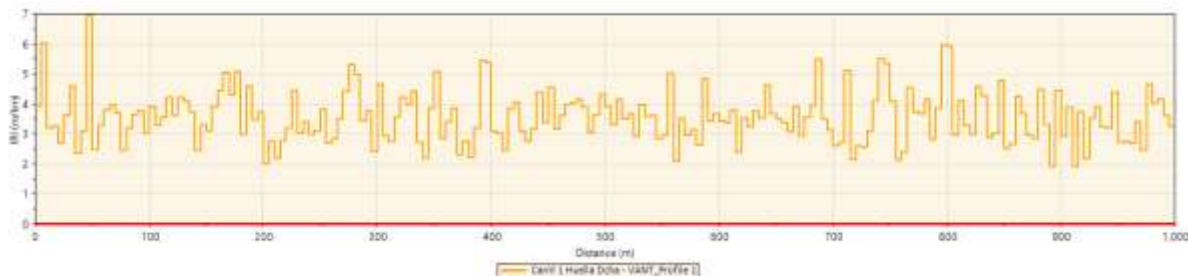
Las Figuras 38 y 39 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 5 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 38.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método topográfico

**Figura 39.**

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico

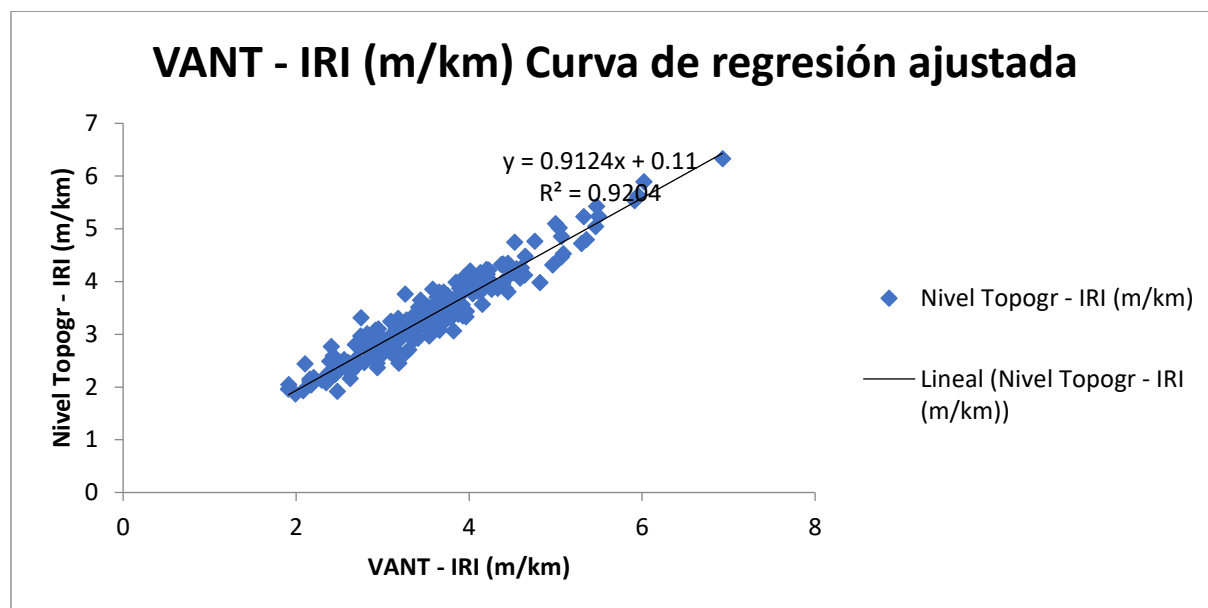


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 5 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 40 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 40.

Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 5m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella derecha es de 0.9594 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.04 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.2241 m/km. Como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. *Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 5m*

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9594
Coefficiente de determinación R ²	0.9204
R ² ajustado	0.9200
Error típico	0.2341
Observaciones	200

4.1.2.2. Intervalo de 10m Metros Carril 1 y Huella Derecha

Las Figuras 41 y 42 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 10 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 41.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método topográfico

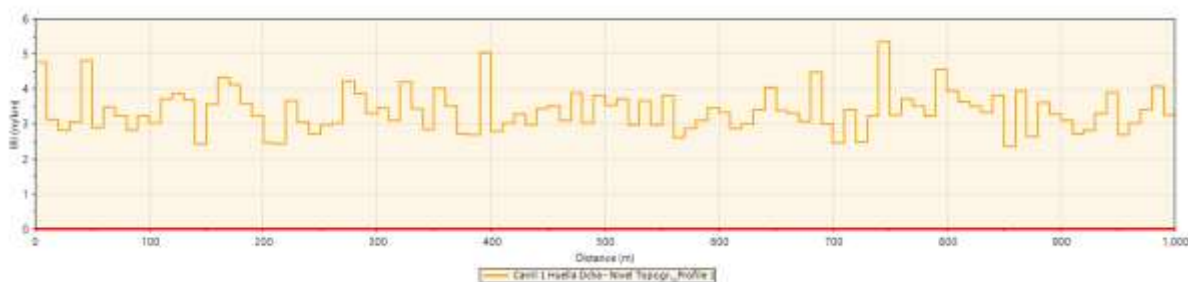
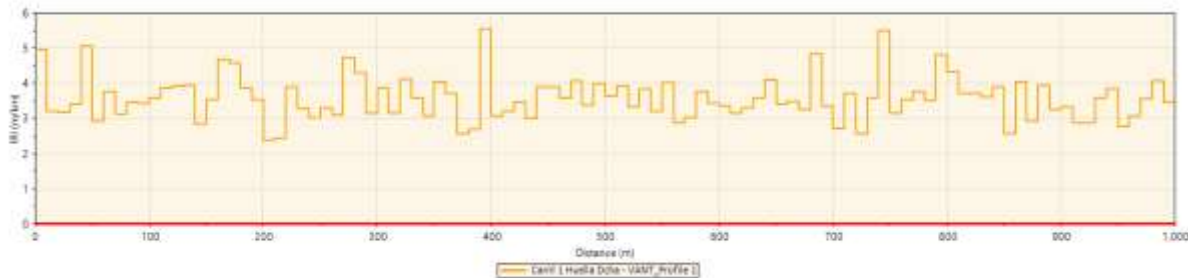


Figura 42.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico

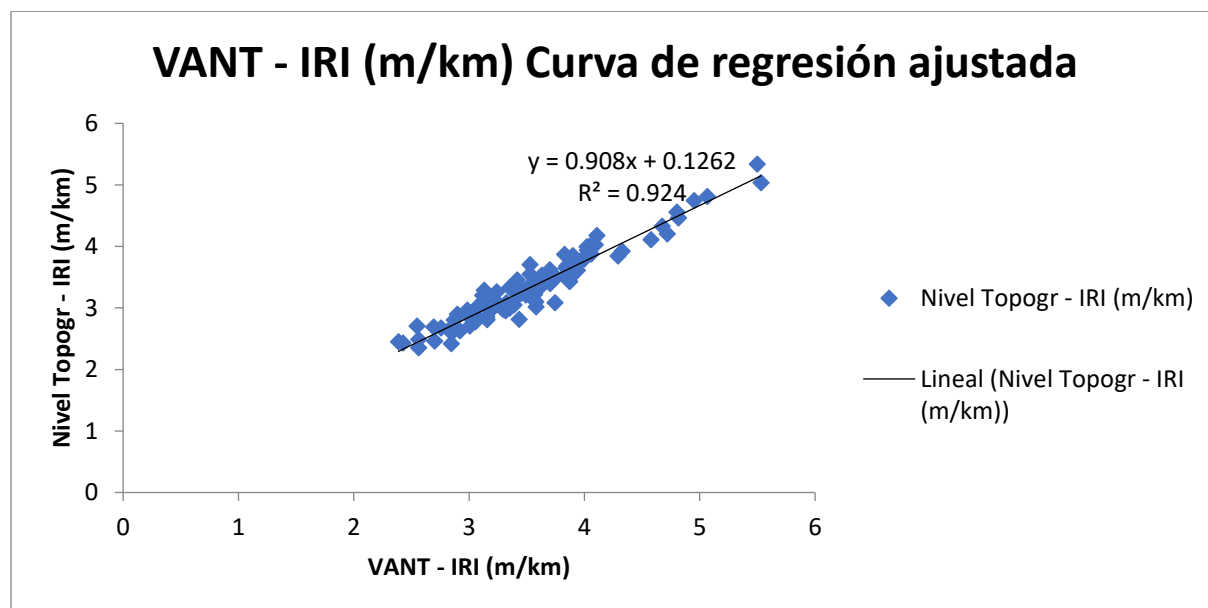


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 10 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colocalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 43 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 43.

Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 10m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella derecha es de 0.9613 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.40 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1620 m/km. Como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 10m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9613
Coeficiente de determinación R ²	0.9240
R ² ajustado	0.9233
Error típico	0.1620
Observaciones	100

4.1.2.3. Intervalo de 20m Metros Carril 1 y Huella Derecha

Las Figuras 44 y 45 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 20 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 44.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método topográfico

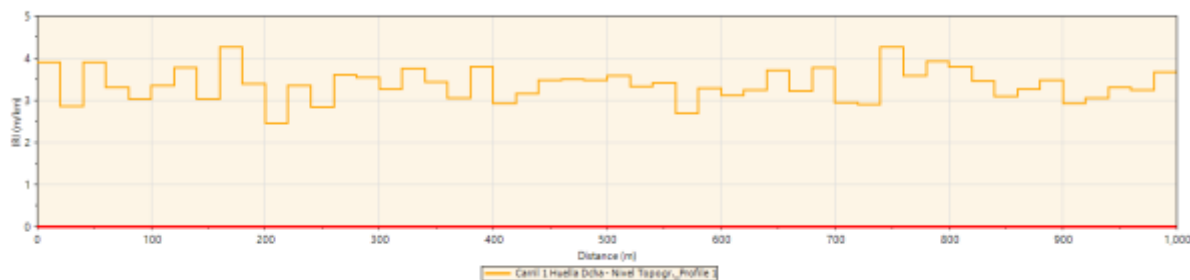
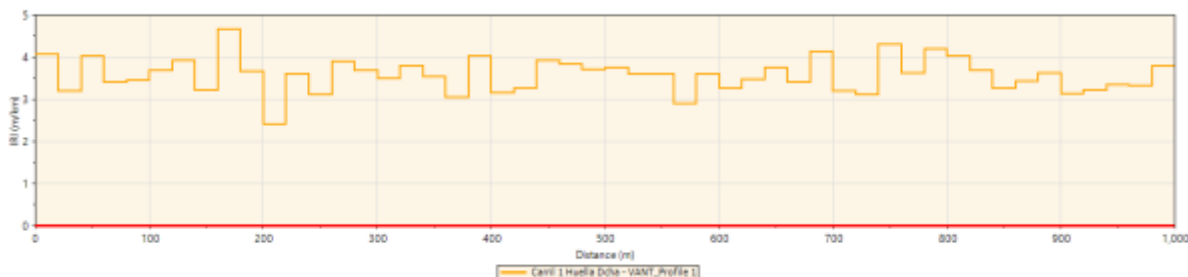


Figura 45.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico

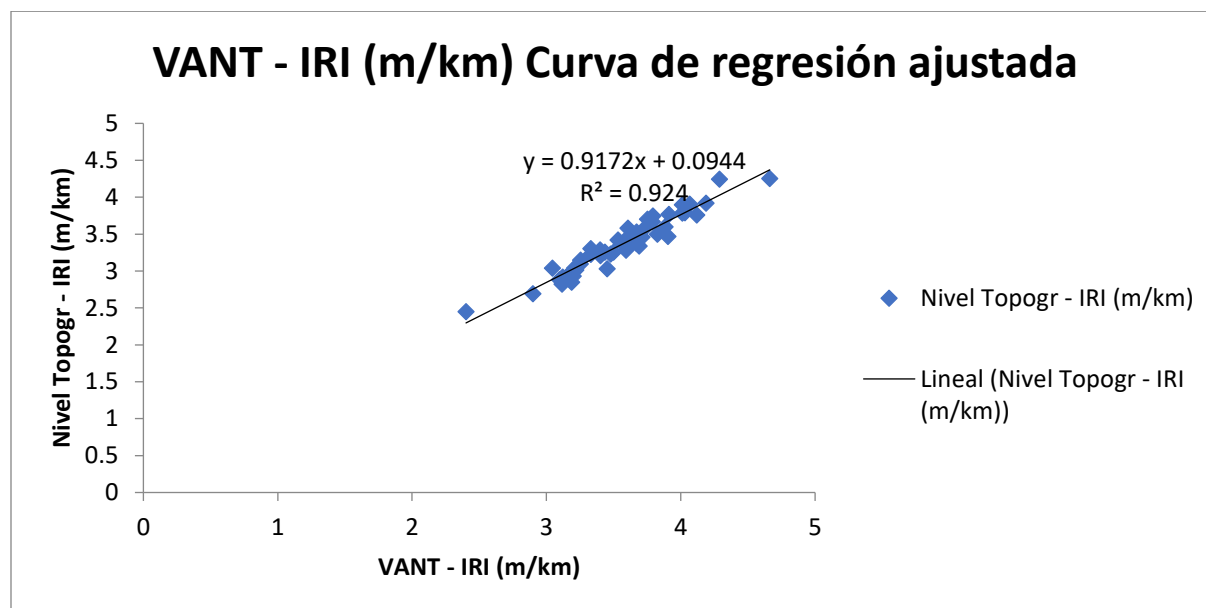


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 20 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 46 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 46.

Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 20m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella derecha es de 0.9612 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.40 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1062 m/km. Como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11.

Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 20m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9612
Coeficiente de determinación R ²	0.9240
R ² ajustado	0.9224
Error típico	0.1062
Observaciones	50

4.1.2.4. Intervalo de 50m Metros Carril 1 y Huella Derecha.

Las Figuras 47 y 48 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 50 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

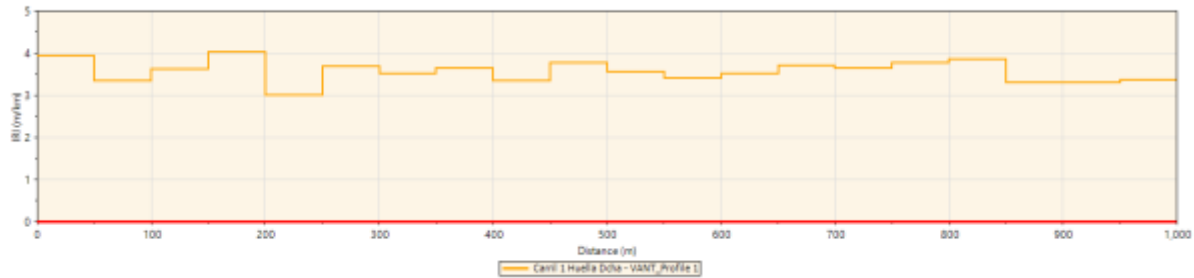
Figura 47.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método topográfico



Figura 48.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico

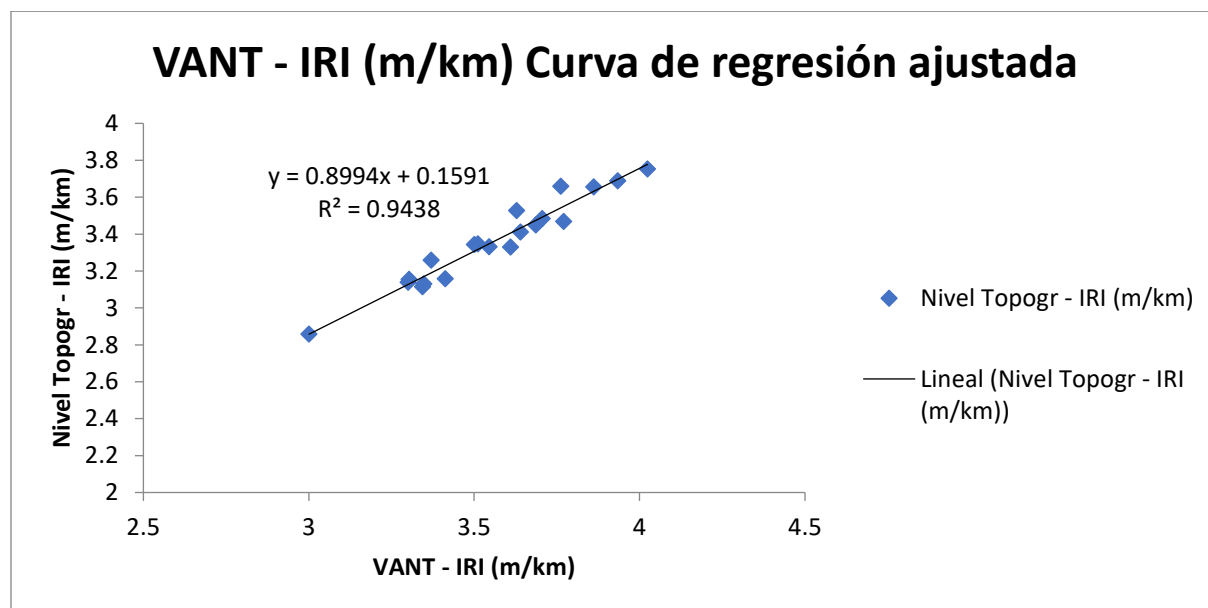


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 50 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 49 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 49.

Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 50m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella derecha es de 0.9715 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 94.38 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0562 m/km. Como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12.

Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 50m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9715
Coeficiente de determinación R ²	0.9438
R ² ajustado	0.9407
Error típico	0.0562
Observaciones	20

4.1.2.5. Intervalo de 100m Metros Carril 1 y Huella Derecha.

Las Figuras 50 y 51 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 100 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

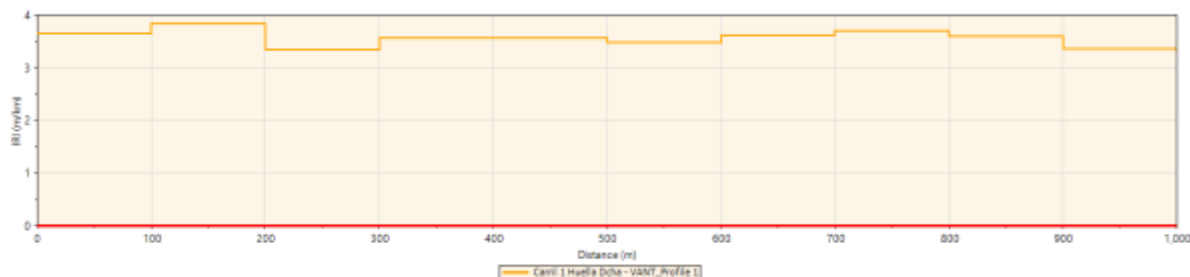
Figura 50.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método topográfico



Figura 51.

Valores de IRI del carril 1 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico

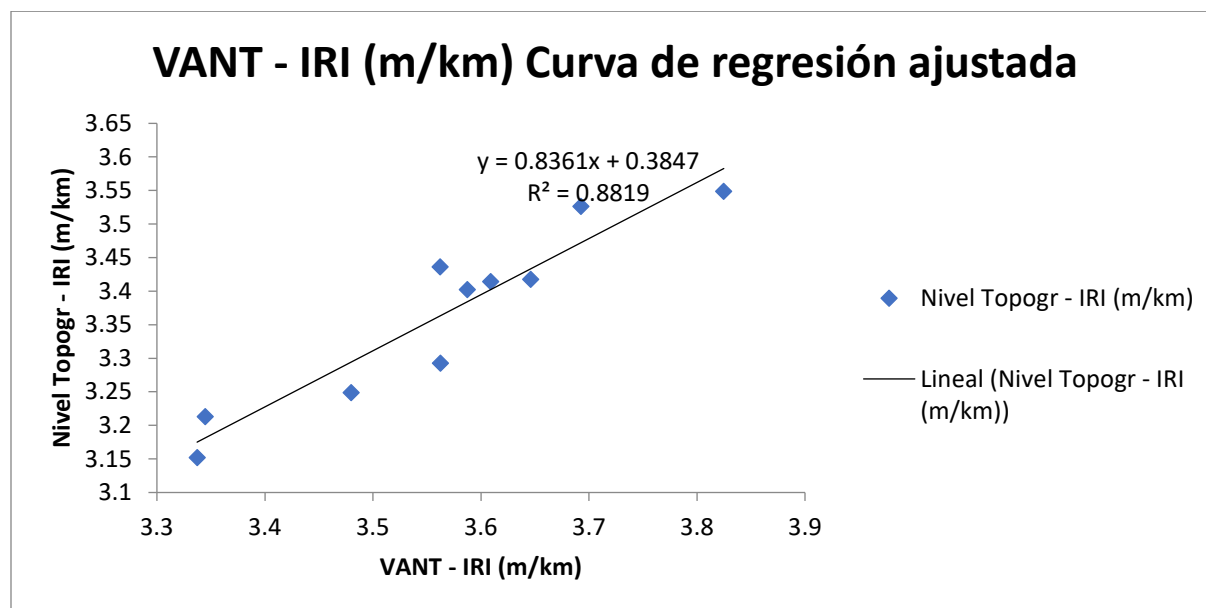


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 100 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 52 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 52.

Correlación lineal de IRI del carril 1 y huella derecha en intervalos de 100m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella derecha es de 0.9391 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 88.19 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0484 m/km. Como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13.

Regresión lineal del carril 1 huella derecha en intervalos de 100m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9391
Coefficiente de determinación R ²	0.8819
R ² ajustado	0.8672
Error típico	0.0484
Observaciones	10

4.1.3. Análisis de Resultados del Carril 2 y Huella Izquierda

Figura 53.

Perfil del IRI del carril 2 y huella izquierda Nivel Topográfico vs VANT

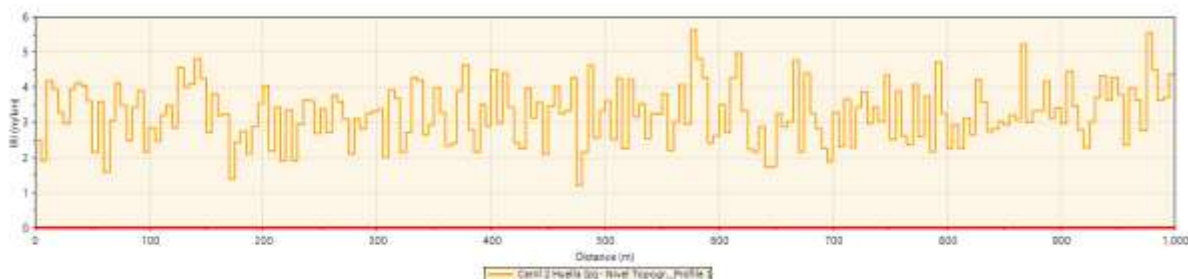


4.1.3.1. Intervalo de 5m Metros Carril 2 y Huella Izquierda

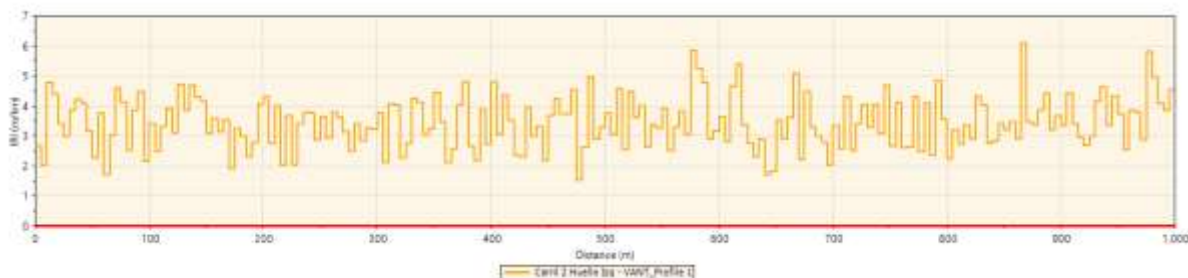
Las Figuras 54 y 55 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 5 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 54.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método topográfico

**Figura 55.**

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico

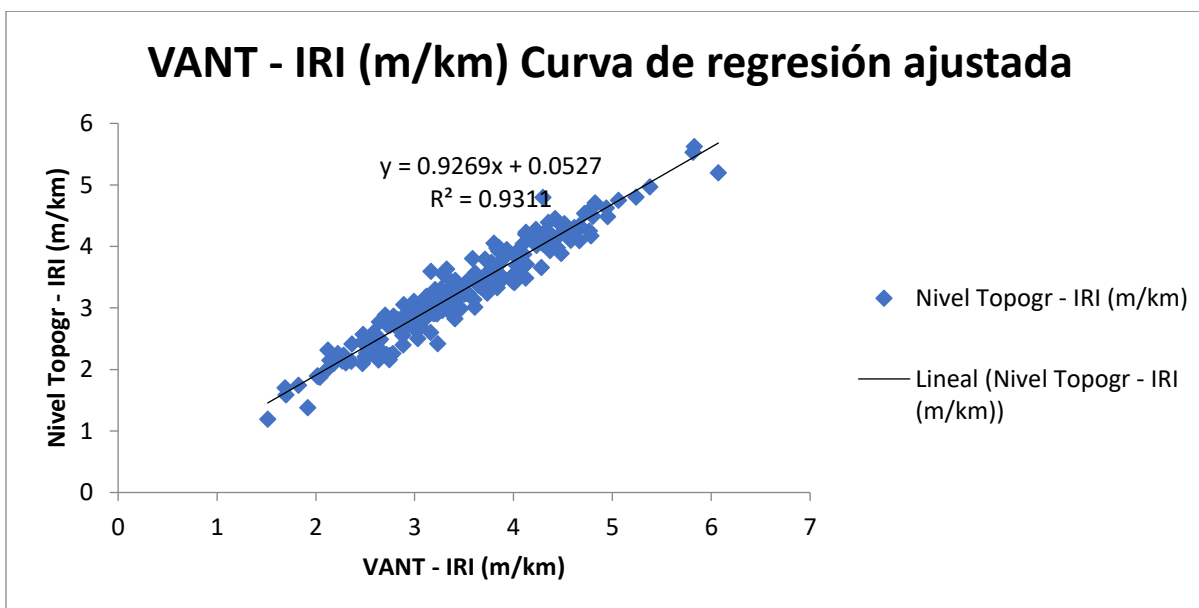


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 5 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 56 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 56.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 5m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella izquierda es de 0.9649 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 93.11 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.2167 m/km. Como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14.

Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 5m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9649
Coefficiente de determinación R ²	0.9311
R ² ajustado	0.9308
Error típico	0.2167
Observaciones	200

4.1.3.2. Intervalo de 10m Metros Carril 2 y Huella Izquierda

Las Figuras 59 y 60 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 10 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 57.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método topográfico

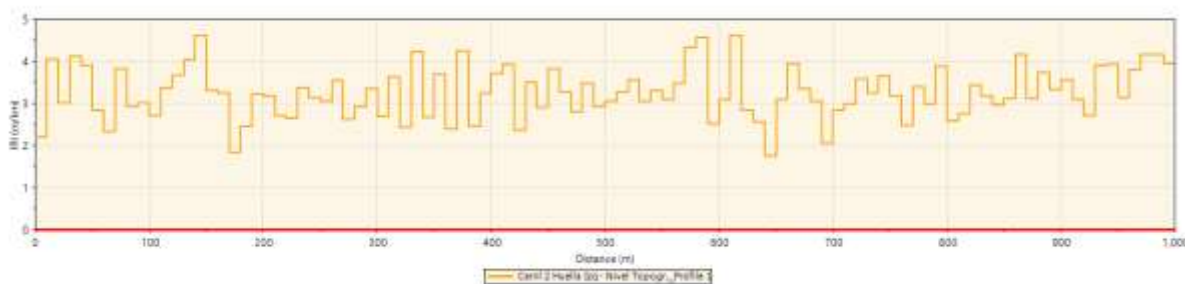
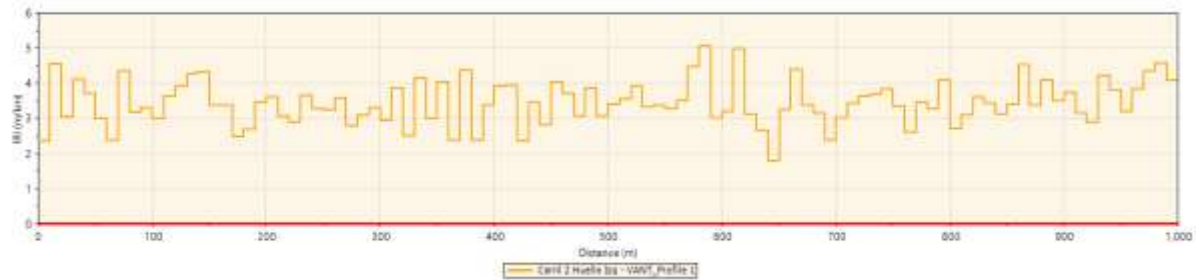


Figura 58.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico

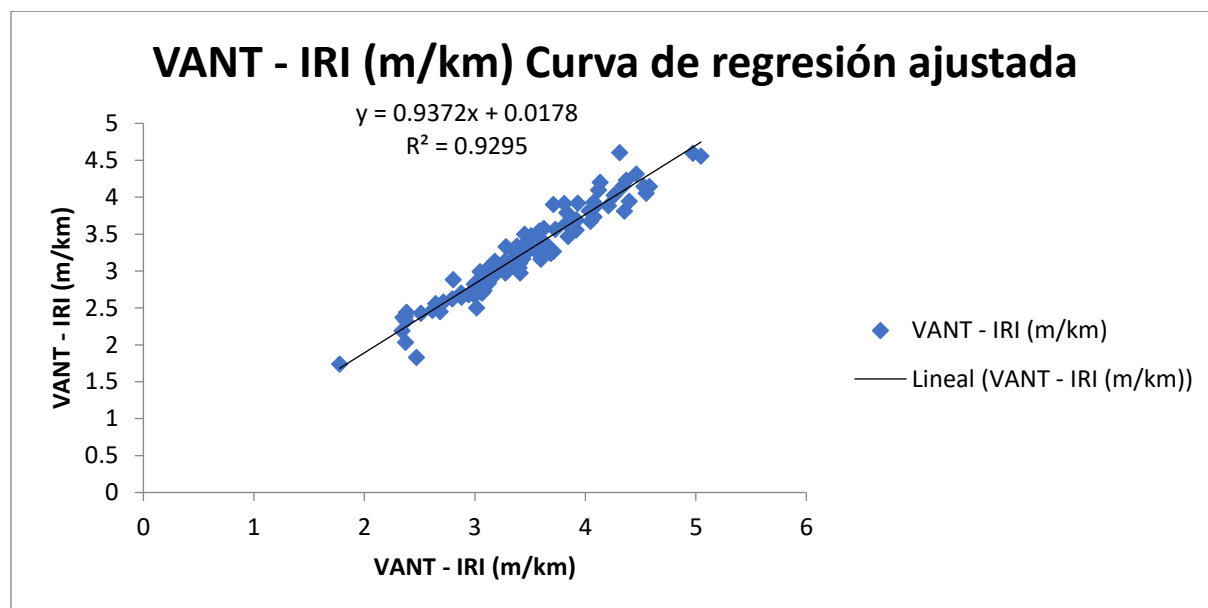


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 10 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 59 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 59.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 10m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella izquierda es de 0.9641 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.95 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1616 m/km. Como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15.

Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 10m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9641
Coeficiente de determinación R ²	0.9295
R ² ajustado	0.9288
Error típico	0.1616
Observaciones	100

4.1.3.3. Intervalo de 20m Metros Carril 2 y Huella Izquierda

Las Figuras 60 y 61 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 20 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 60.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método topográfico

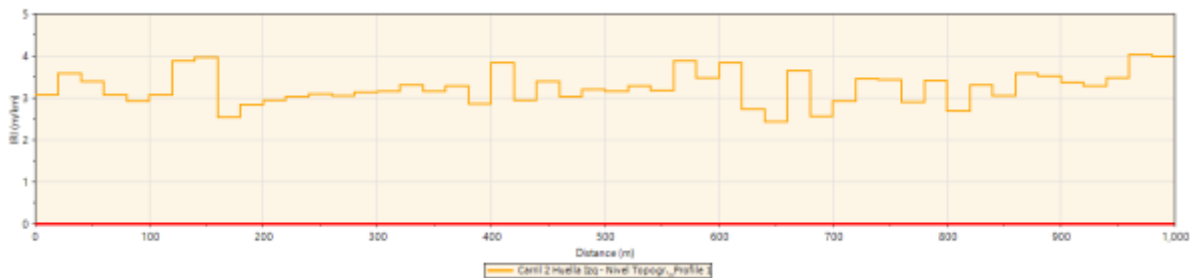
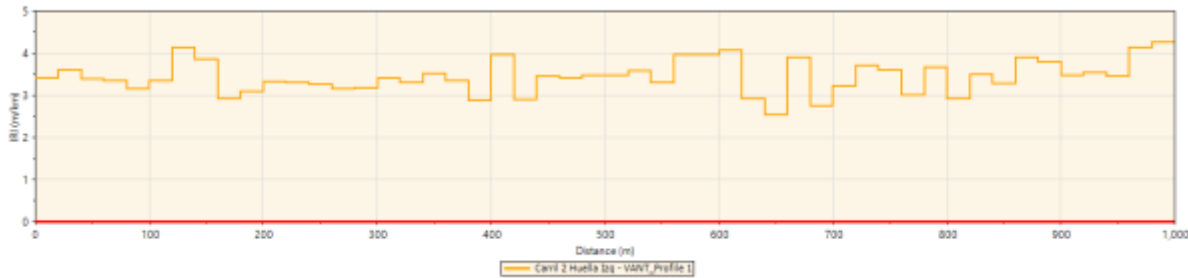


Figura 61.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico

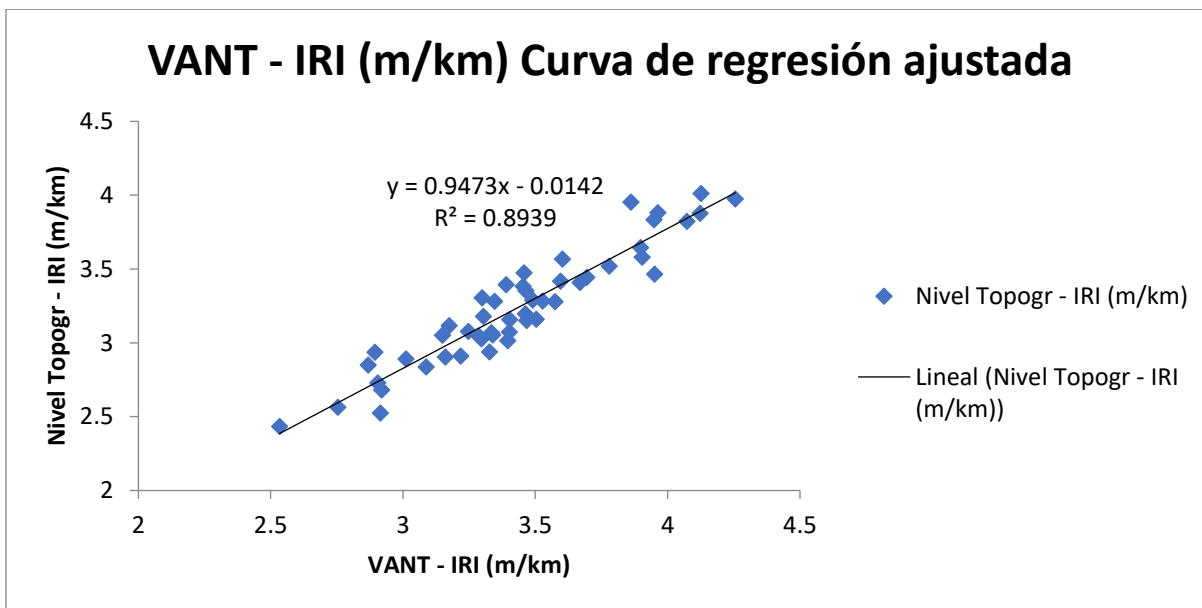


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 20 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 62 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 62.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 20m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella izquierda es de 0.9455 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 89.39 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1266 m/km. Como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16.

Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 20m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9455
Coeficiente de determinación R ²	0.8939
R ² ajustado	0.8917
Error típico	0.1266
Observaciones	50

4.1.3.4. Intervalo de 50m Metros Carril 2 y Huella Izquierda

Las Figuras 63 y 64 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 50 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 63.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método topográfico

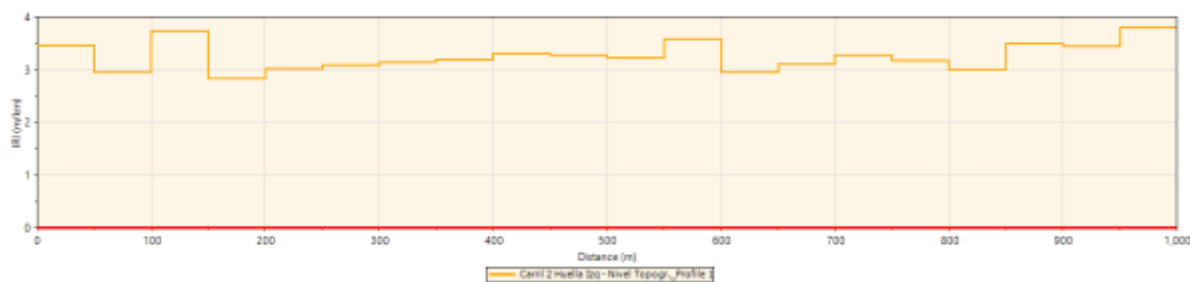
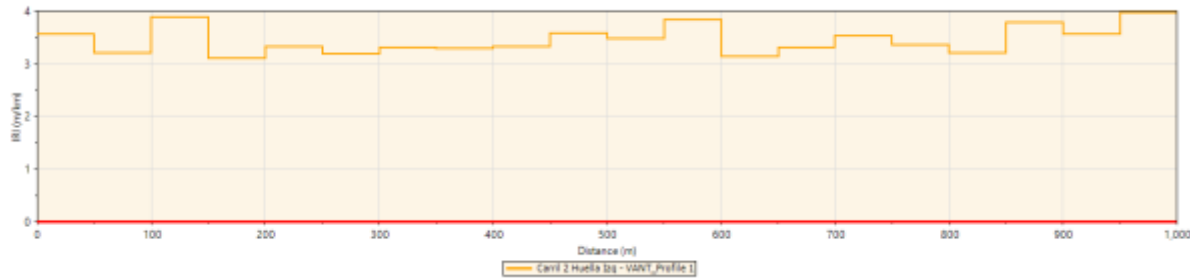


Figura 64.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico

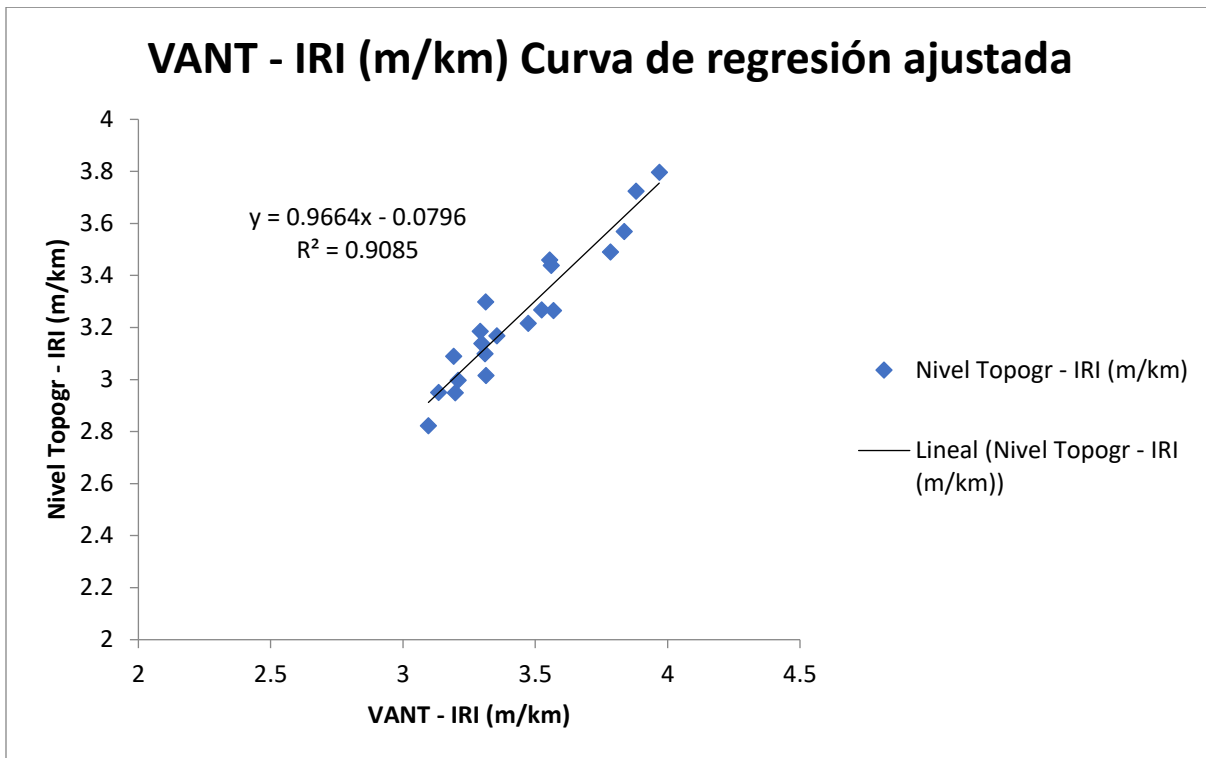


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 50 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 65 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 65.

Correlación lineal de IRI del del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 50m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella izquierda es de 0.9532 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 90.85 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0819 m/km. Como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17.

Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 50m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9532
Coeficiente de determinación R ²	0.9085
R ² ajustado	0.9034
Error típico	0.0819
Observaciones	20

4.1.3.5. Intervalo de 100m Metros Carril 2 y Huella Izquierda

Las Figuras 66 y 67 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 100 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

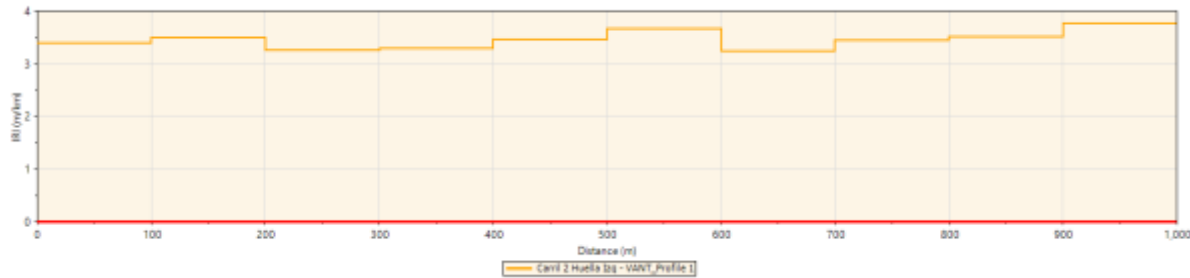
Figura 66.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método topográfico



Figura 67.

Valores de IRI del carril 2 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico

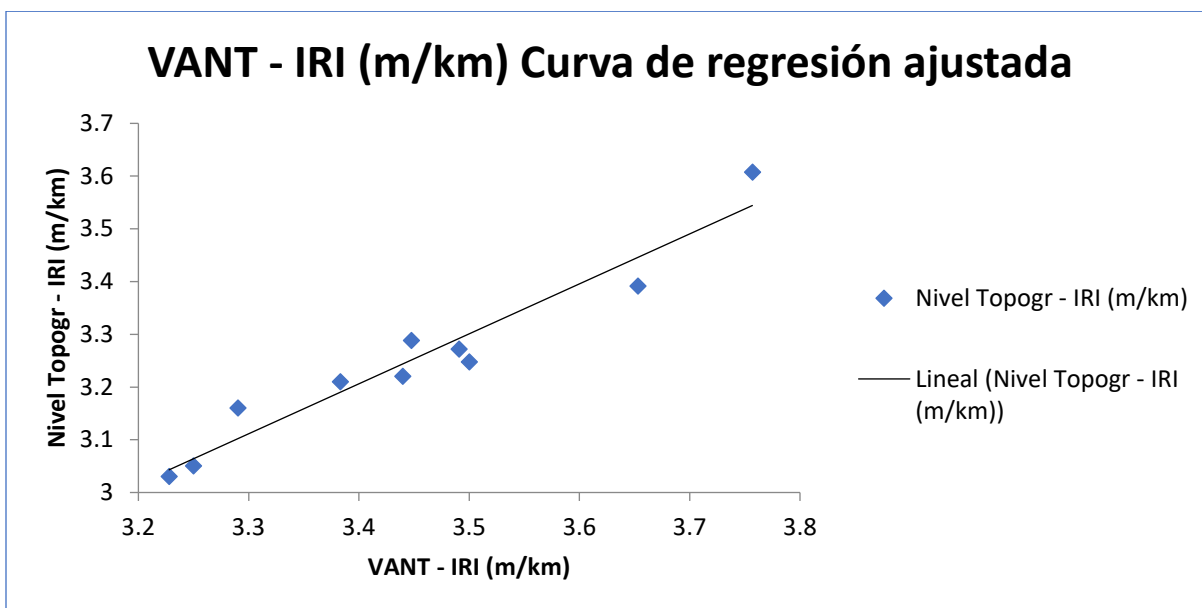


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 100 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 68 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 68.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 100m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella izquierda es de 0.9667 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 93.45 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0451 m/km. Como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18.

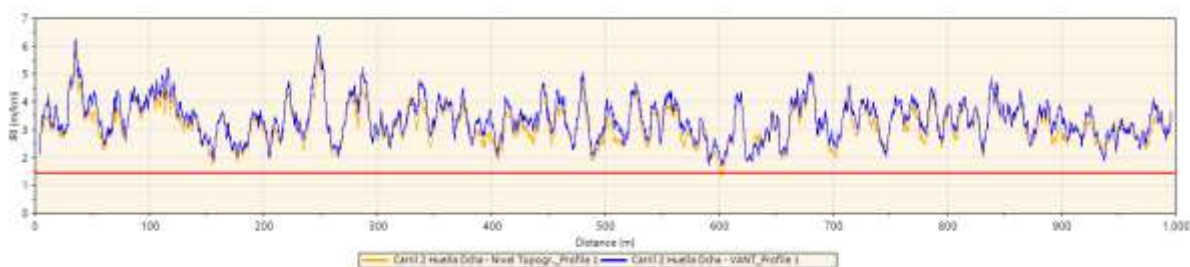
Regresión lineal del carril 2 huella izquierda en intervalos de 100m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9667
Coeficiente de determinación R ²	0.9345
R ² ajustado	0.9263
Error típico	0.0451
Observaciones	10

4.1.4. Análisis de Resultados del Carril 2 y Huella Derecha

Figura 69.

Perfil del IRI del carril 2 y huella derecha Nivel Topográfico vs VANT

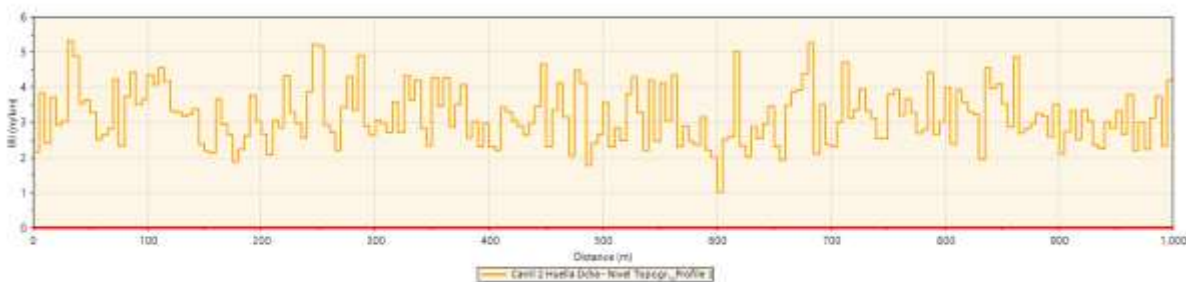


4.1.4.1. Intervalo de 5m Metros Carril 2 y Huella Derecha

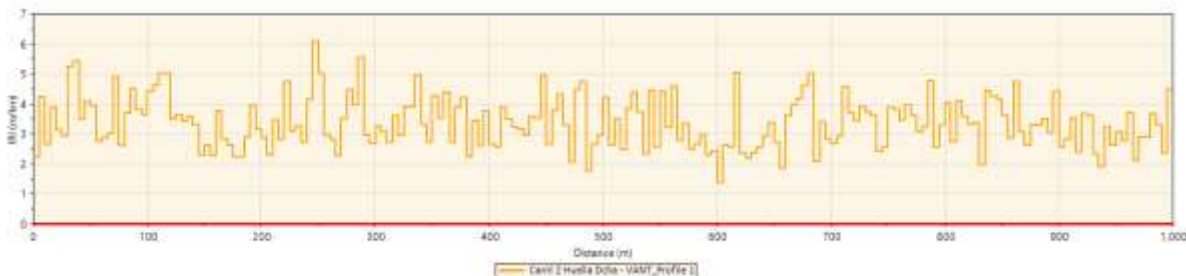
Las Figuras 70 y 71 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 5 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 70.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método topográfico

**Figura 71.**

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico

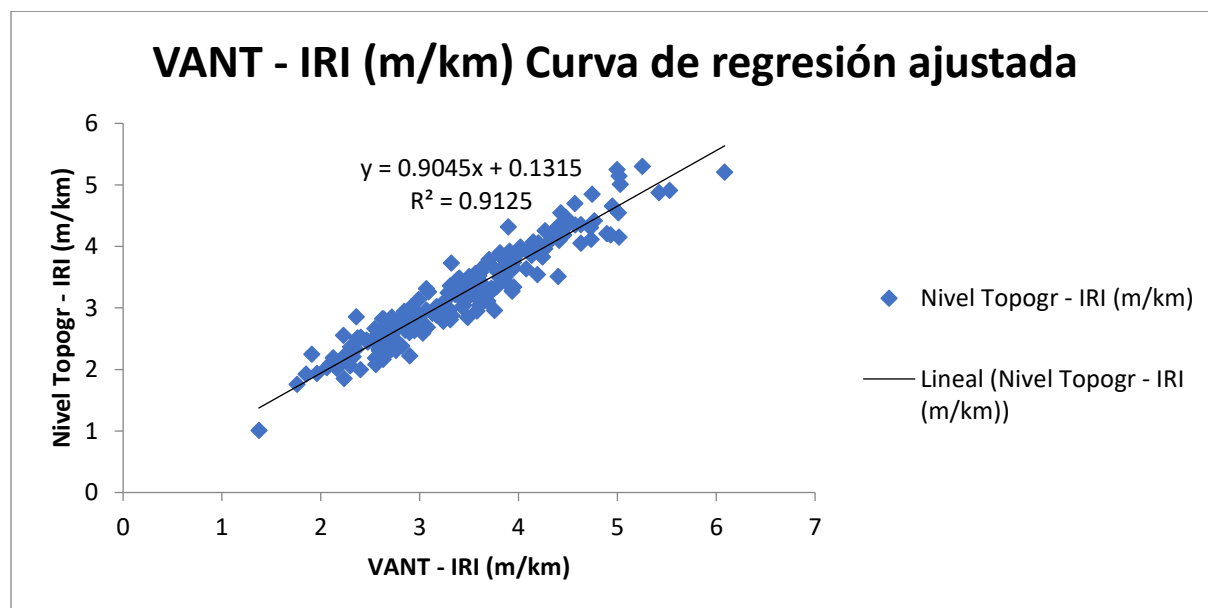


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 5 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 72 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 72.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 5m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella derecha es de 0.9553 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 91.25 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.2377 m/km. Como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19.

Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 5m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9553
Coeficiente de determinación R ²	0.9125
R ² ajustado	0.9121
Error típico	0.2377
Observaciones	200

4.1.4.2. Intervalo de 10m Metros Carril 2 y Huella Derecha

Las Figuras 73 y 74 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 10 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 73.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método topográfico

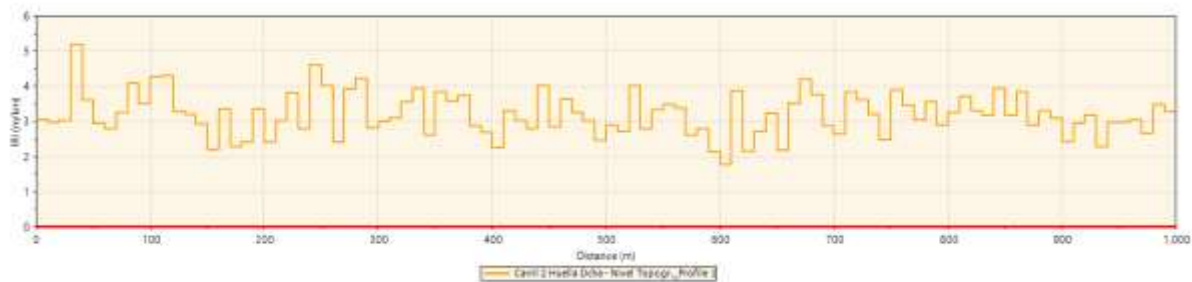
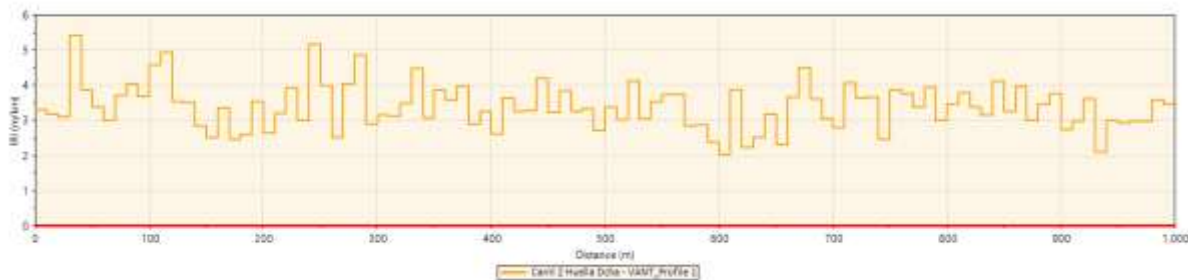


Figura 74.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico

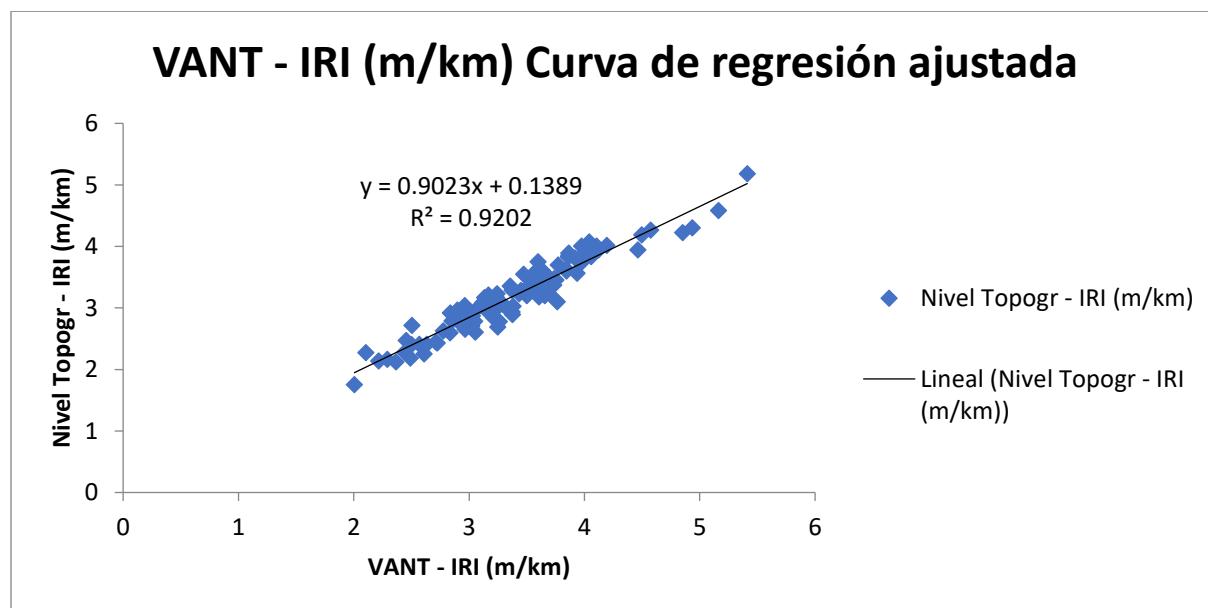


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 10 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 75 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 75.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 10m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella derecha es de 0.9593 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.02 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1720 m/km. Como se muestra en la tabla 20.

Tabla 20.

Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 10m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9593
Coefficiente de determinación R ²	0.9202
R ² ajustado	0.9194
Error típico	0.1720
Observaciones	100

4.1.4.3. Intervalo de 20m Metros Carril 2 y Huella Derecha

Las Figuras 76 y 77 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 20 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 76.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método topográfico

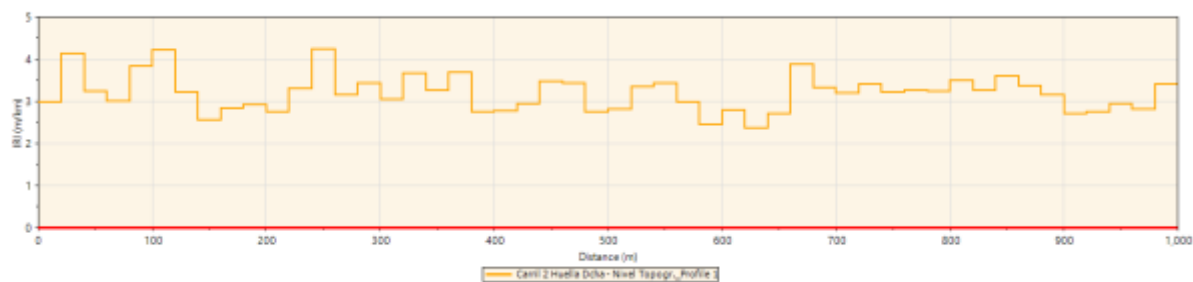
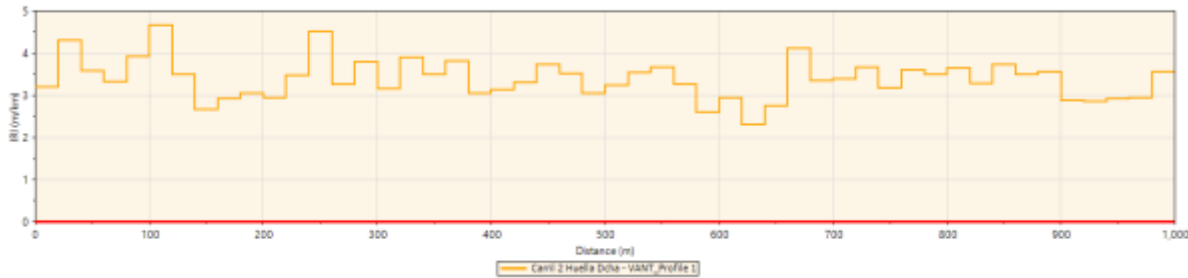


Figura 77.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico

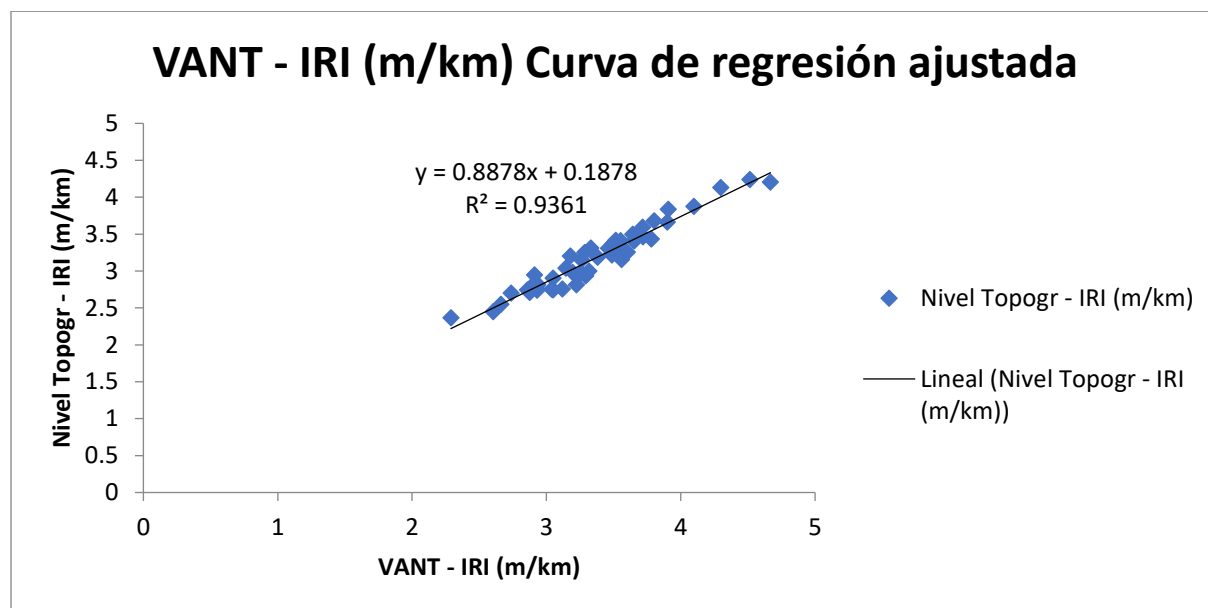


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 20 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 78 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 78.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 20m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella derecha es de 0.9675 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 93.61 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1100 m/km. Como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21.

Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 20m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9675
Coeficiente de determinación R ²	0.9361
R ² ajustado	0.9347
Error típico	0.1100
Observaciones	50

4.1.4.4. Intervalo de 50m Metros Carril 2 y Huella Derecha

Las Figuras 79 y 80 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 50 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 79.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método topográfico

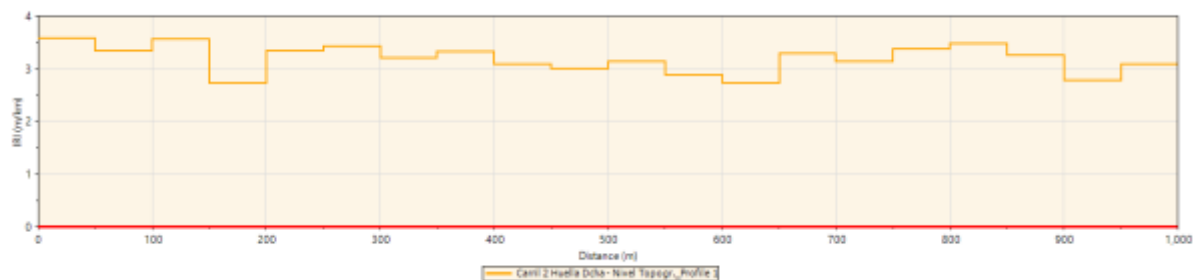
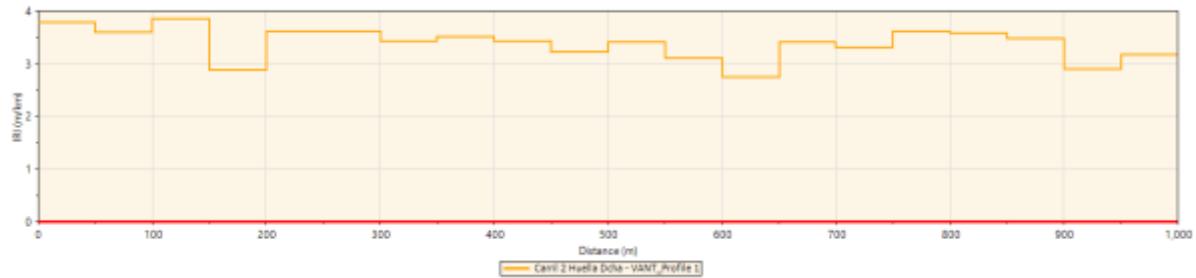


Figura 80.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico

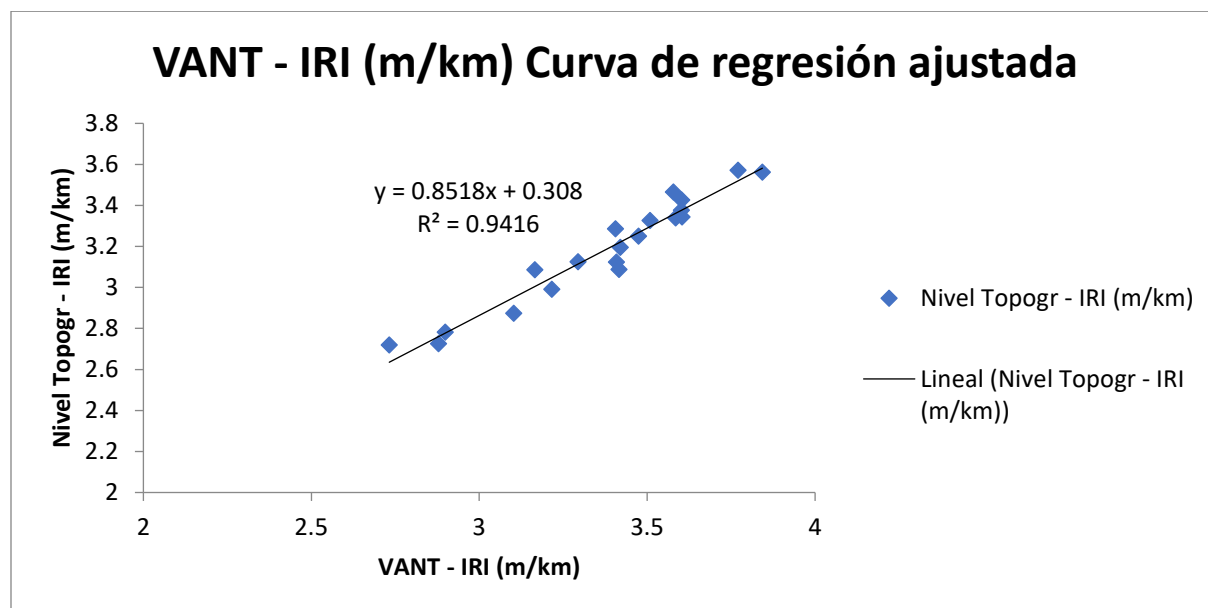


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 50 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 81 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 81.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 50m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella derecha es de 0.9704 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 94.16 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0649 m/km. Como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22.

Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 50m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9704
Coefficiente de determinación R ²	0.9416
R ² ajustado	0.9384
Error típico	0.0649
Observaciones	20

4.1.4.5. Intervalo de 100m Metros Carril 2 y Huella Derecha

Las Figuras 82 y 83 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 100 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

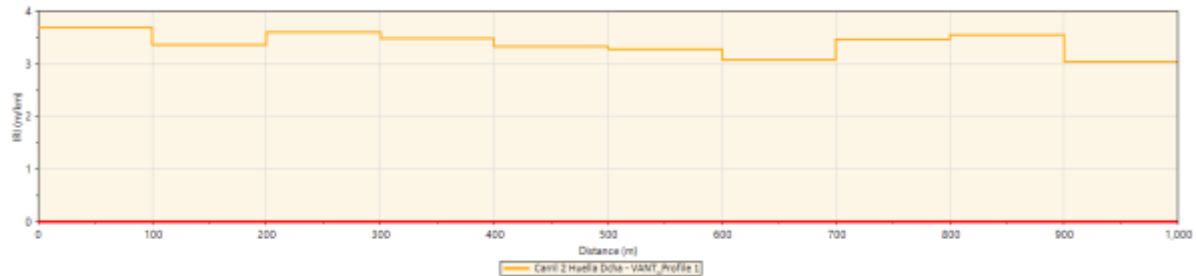
Figura 82.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método topográfico



Figura 83.

Valores de IRI del carril 2 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico

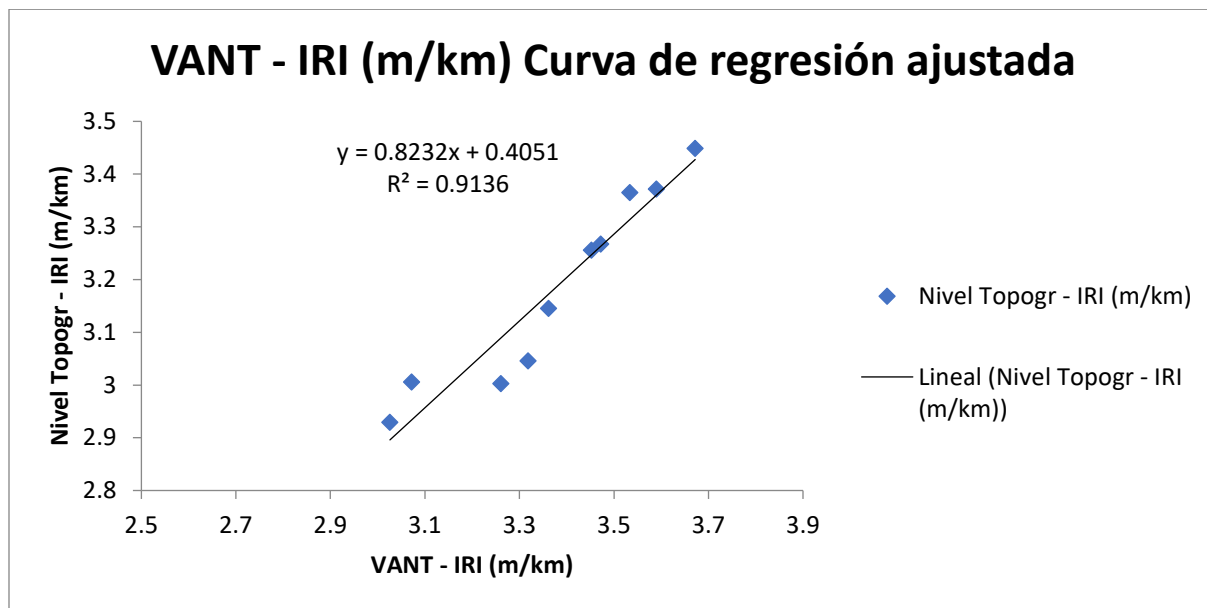


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 100 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 84 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 84.

Correlación lineal de IRI del carril 2 y huella derecha en intervalos de 100m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 2 y la huella derecha es de 0.9558 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 91.36 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0570 m/km. Como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23.

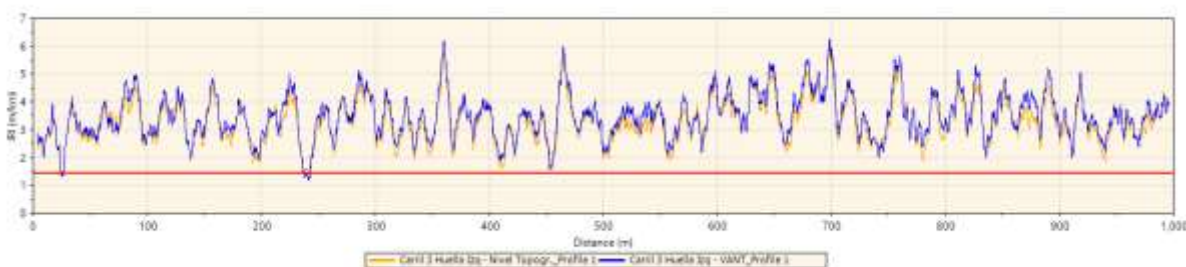
Regresión lineal del carril 2 huella derecha en intervalos de 100m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9558
Coeficiente de determinación R ²	0.9136
R ² ajustado	0.9028
Error típico	0.0570
Observaciones	10

4.1.5. Análisis de Resultados del Carril 3 y Huella Izquierda

Figura 85.

Perfil del IRI del carril 3 y huella izquierda Nivel Topográfico vs VANT

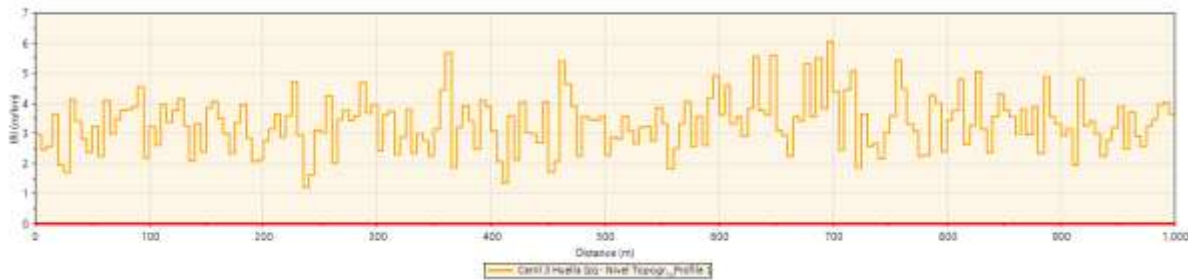


4.1.5.1. Intervalo de 5m metros carril 3 y huella izquierda

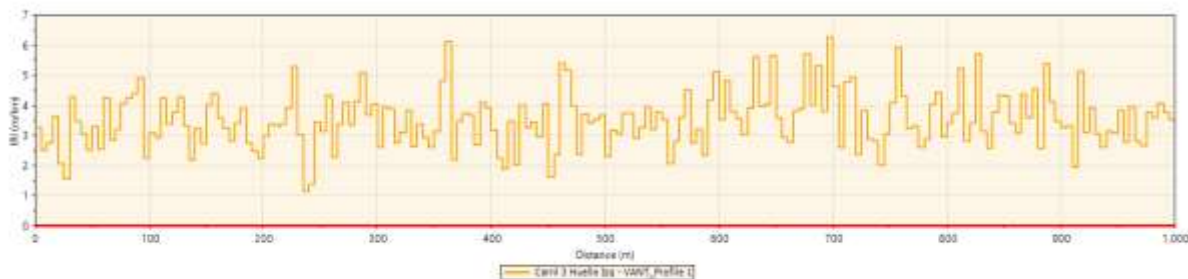
Las Figuras 86 y 87 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 5 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 86.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método topográfico

**Figura 87.**

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 5m por el método

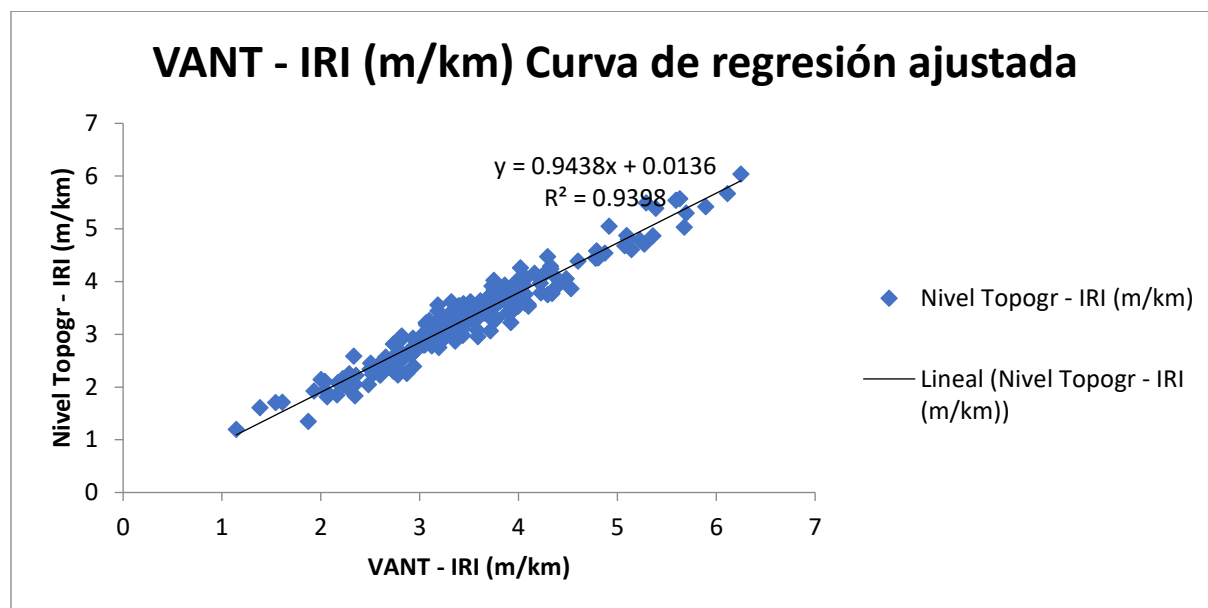


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 5 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 88 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 88.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 5m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella izquierda es de 0.9694 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 93.98 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.2197 m/km. Como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24.

Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 5m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9694
Coeficiente de determinación R ²	0.9398
R ² ajustado	0.9395
Error típico	0.2197
Observaciones	200

4.1.5.2. Intervalo de 10m Metros Carril 3 y Huella Izquierda

Las Figuras 89 y 90 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 10 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 89.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método topográfico

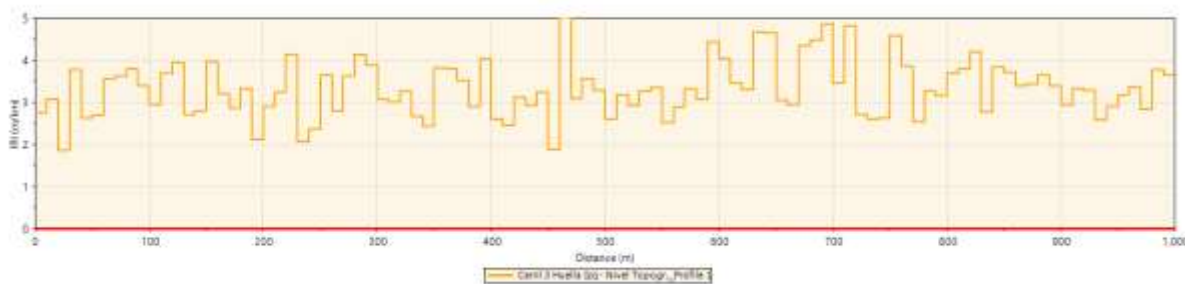
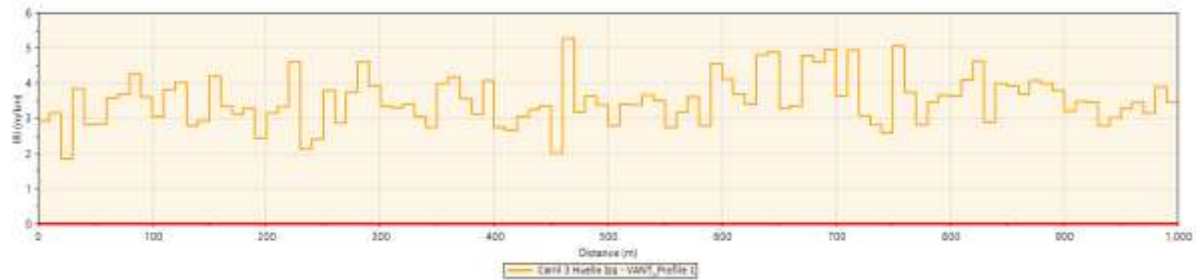


Figura 90.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico

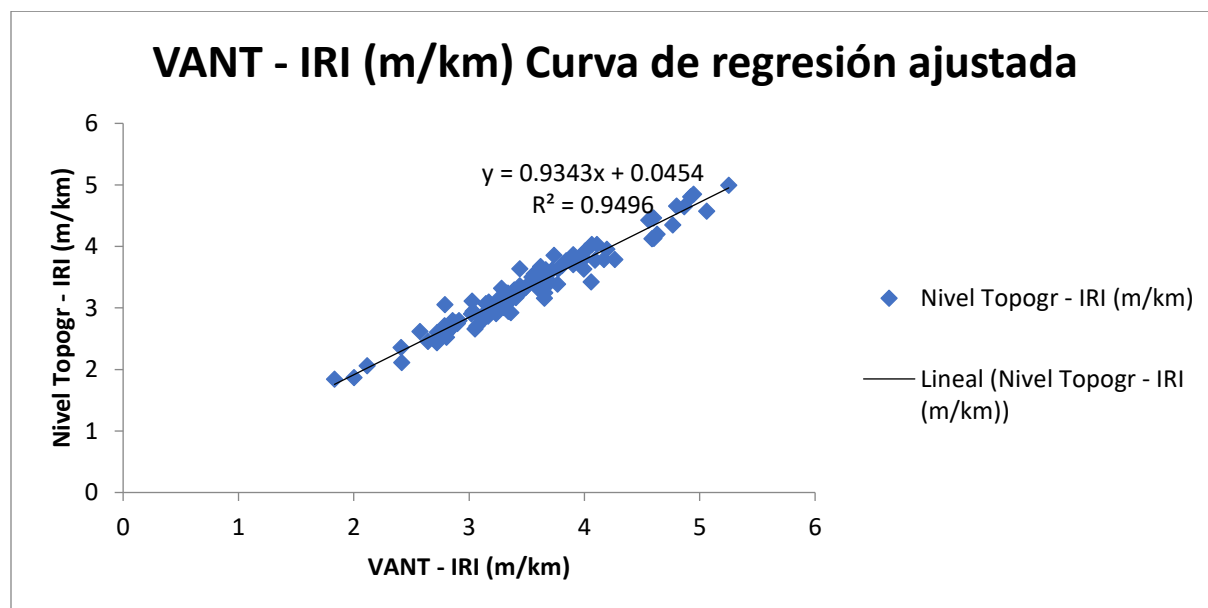


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 10 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 91 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 91.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 10m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella izquierda es de 0.9745 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 94.96 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1480 m/km. Como se muestra en la tabla 25.

Tabla 25.

Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 10m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9745
Coeficiente de determinación R ²	0.9496
R ² ajustado	0.9491
Error típico	0.1480
Observaciones	100

4.1.5.3 Intervalo de 20m Metros Carril 3 y Huella Izquierda

Las Figuras 92 y 93 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 20 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 92.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método topográfico

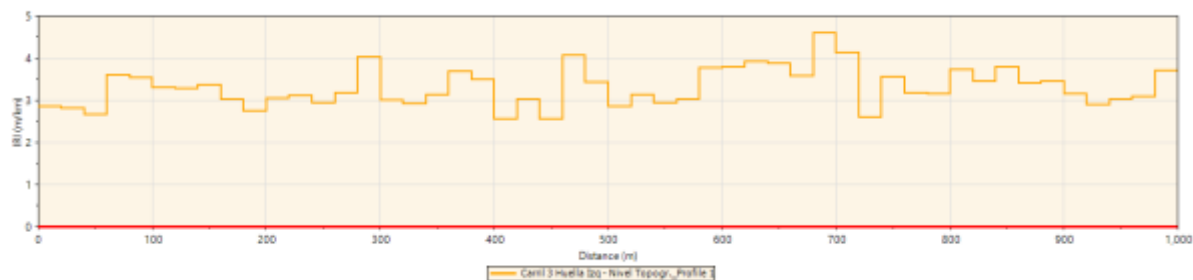
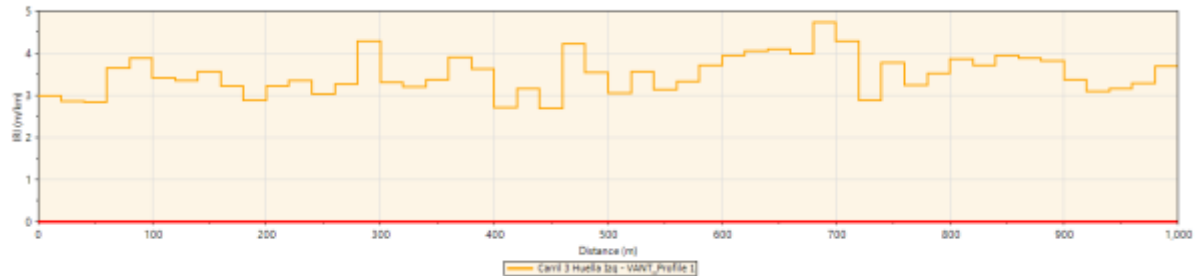


Figura 93.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 20m por el método fotogramétrico

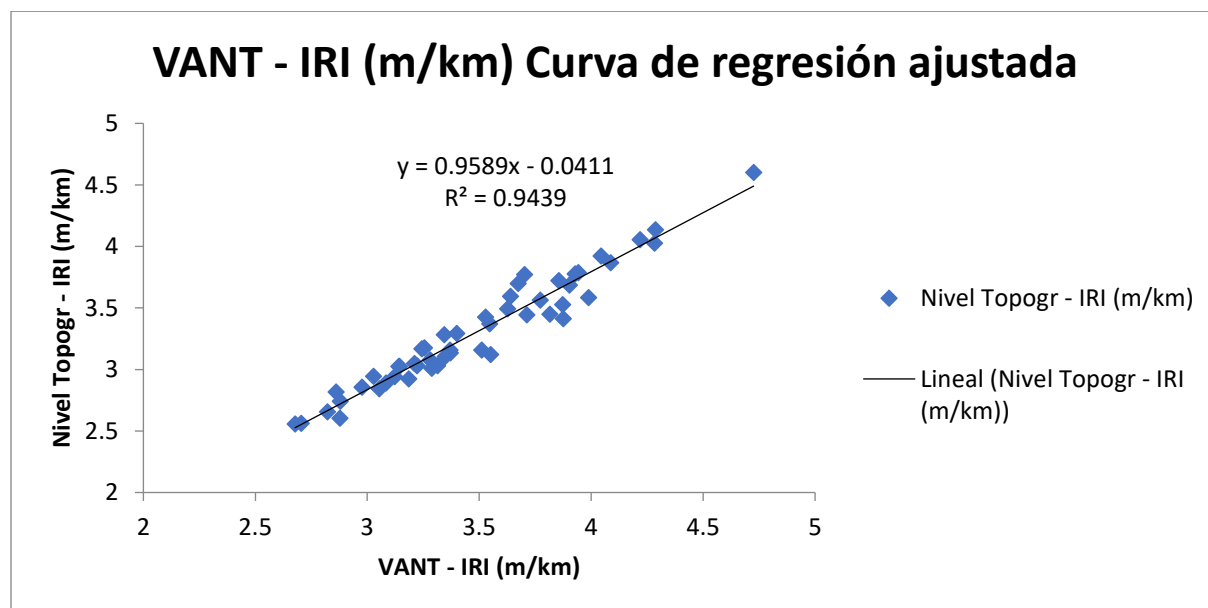


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 20 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 94 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 94.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 20m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella izquierda es de 0.9715 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 94.39 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1079 m/km. Como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26.

Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 20m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9715
Coeficiente de determinación R ²	0.9439
R ² ajustado	0.9427
Error típico	0.1079
Observaciones	50

4.1.5.4. Intervalo de 50m Metros Carril 3 y Huella Izquierda

Las Figuras 95 y 96 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 50 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 95.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método topográfico

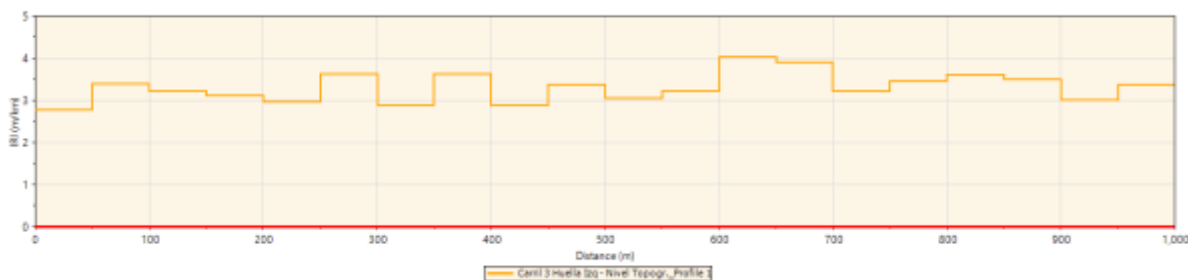
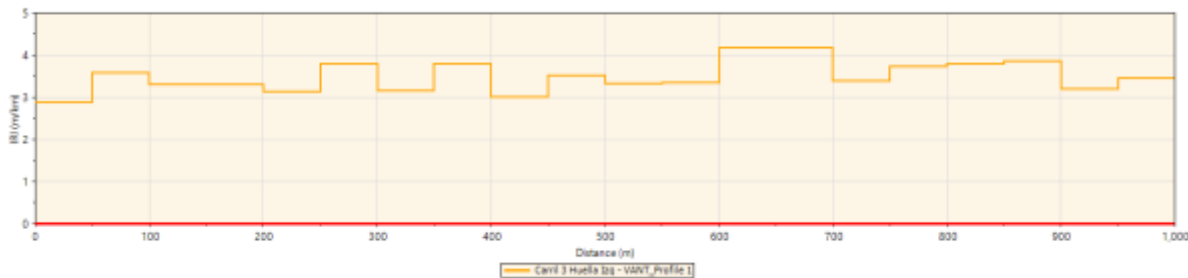


Figura 96.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico

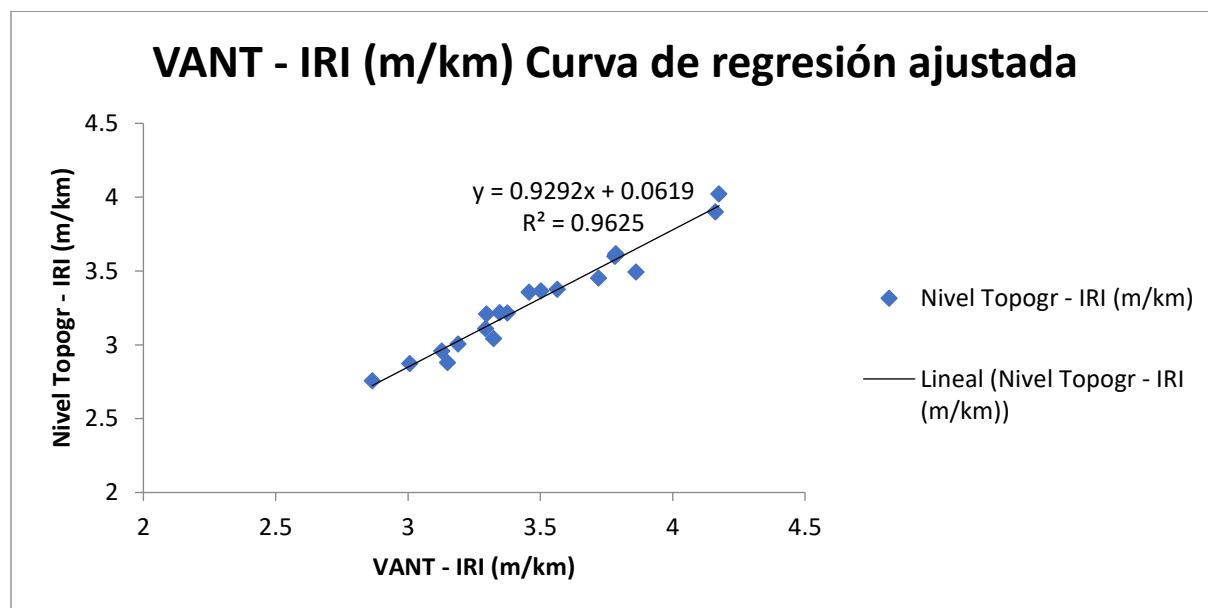


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 50 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 97 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 97.

Correlación lineal de IRI del del carril 2 y huella izquierda en intervalos de 50m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella izquierda es de 0.9811 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 96.25 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0680 m/km. Como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27.

Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 50m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9811
Coefficiente de determinación R ²	0.9625
R ² ajustado	0.9605
Error típico	0.0680
Observaciones	20

4.1.5.5. Intervalo de 100m Metros Carril 3 y Huella Izquierda

Las Figuras 98 y 99 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 100 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

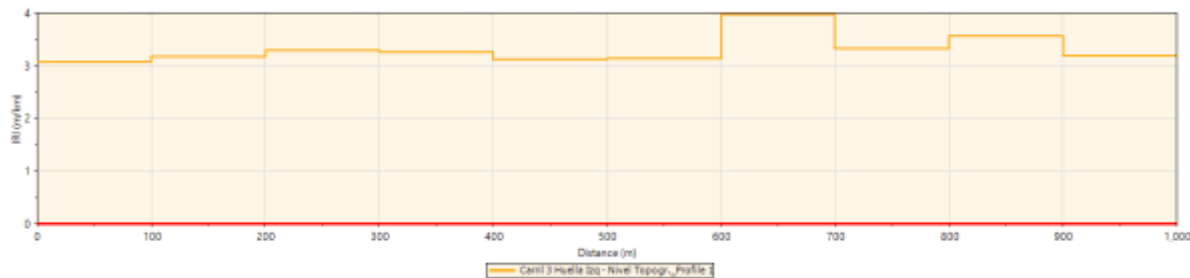
Figura 98.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método topográfico



Figura 99.

Valores de IRI del carril 3 y huella izquierda calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico

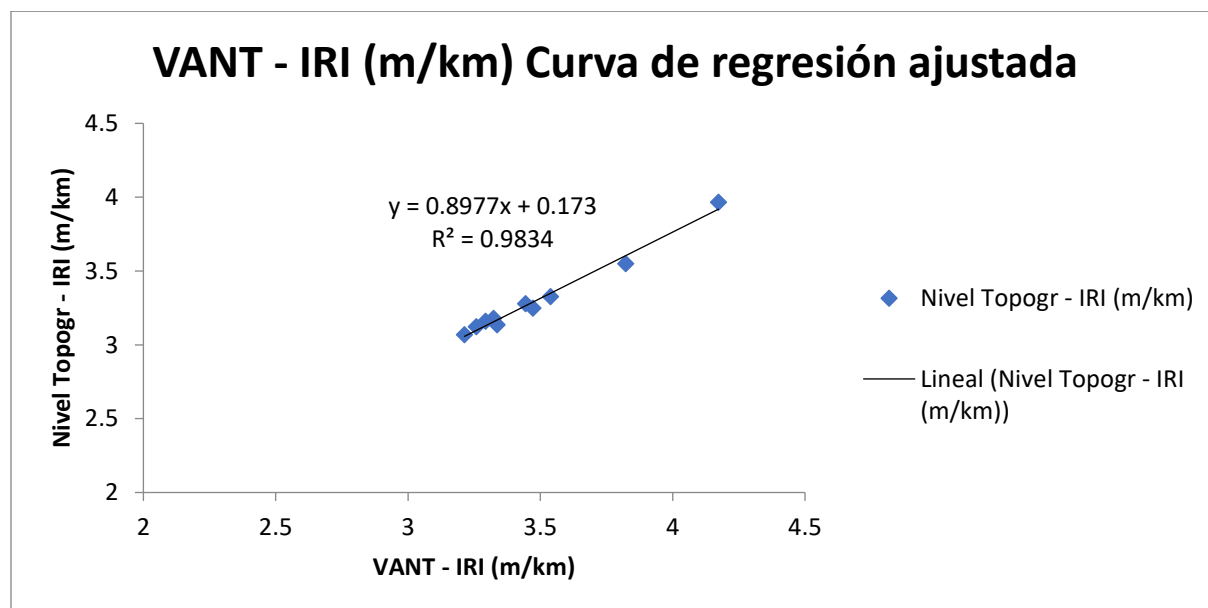


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 100 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 100 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 100.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella izquierda en intervalos de 100m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella izquierda es de 0.9917 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 98.34 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0369 m/km. Como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28.

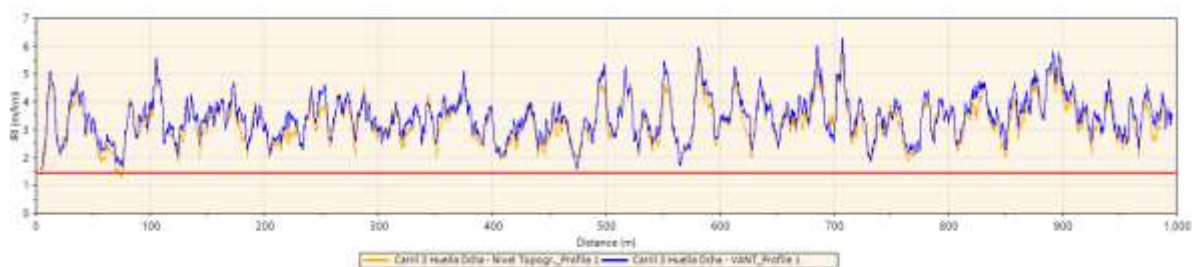
Regresión lineal del carril 3 huella izquierda en intervalos de 100m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9917
Coeficiente de determinación R ²	0.9834
R ² ajustado	0.9813
Error típico	0.0369
Observaciones	10

4.1.6. Análisis de Resultados del Carril 3 y Huella Derecha

Figura 101.

Perfil del IRI del carril 3 y huella derecha Nivel Topográfico vs VANT

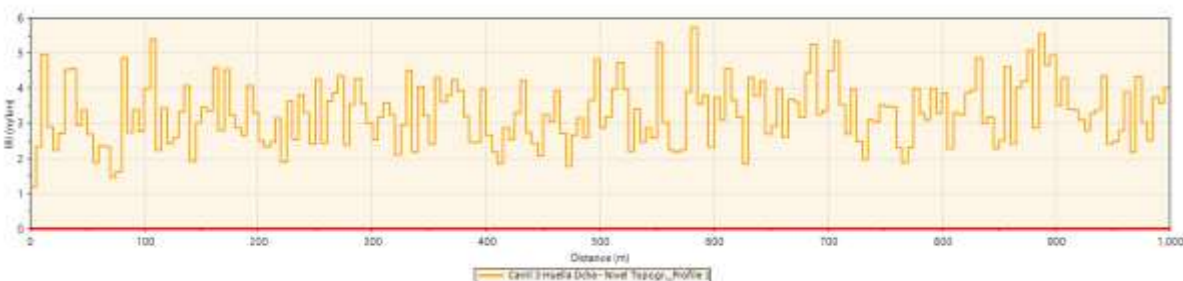


4.1.6.1. Intervalo de 5m Metros Carril 3 y Huella Derecha

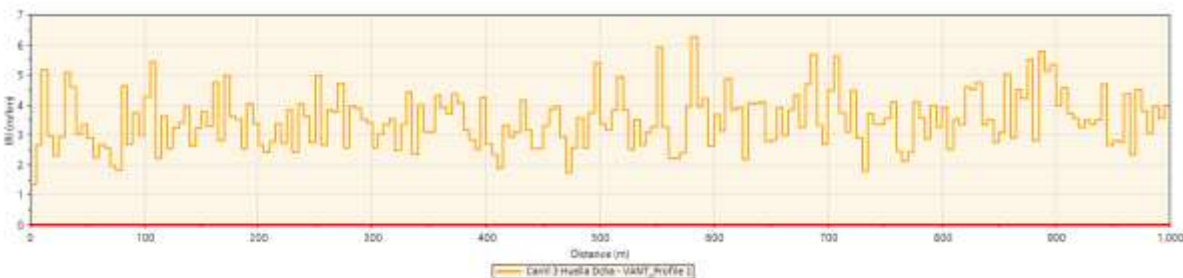
Las Figuras 102 y 103 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 5 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 102.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método topográfico.

**Figura 103.**

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 5m por el método fotogramétrico

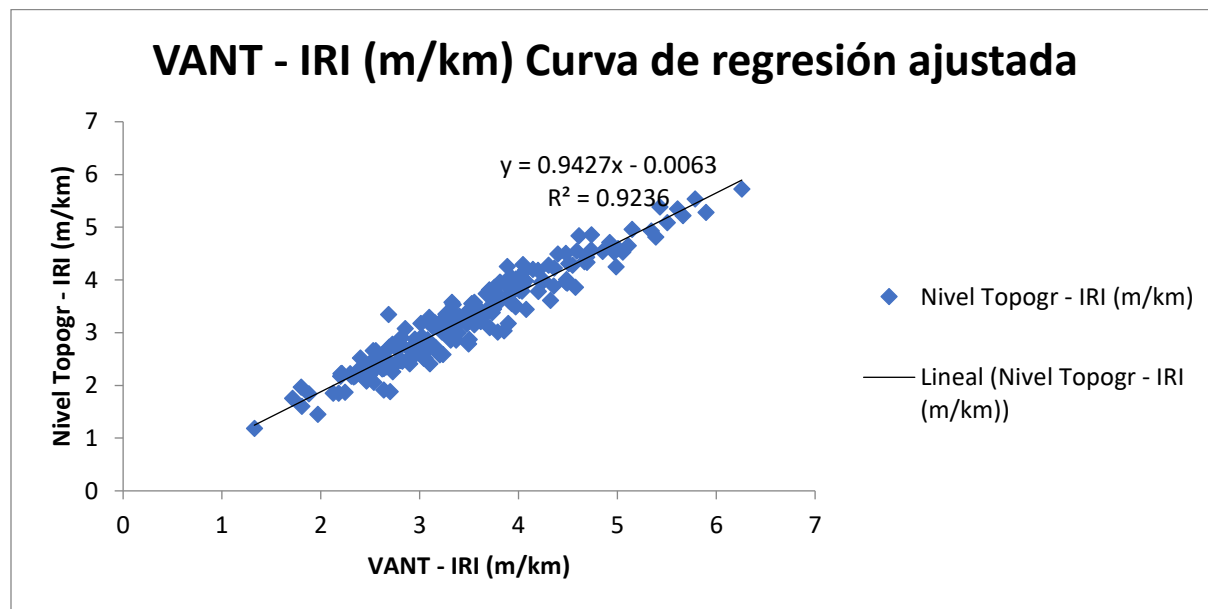


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 5 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 104 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 104.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 5m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella derecha es de 0.9610 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 92.36 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.2459 m/km. Como se muestra en la tabla 29.

Tabla 29.

Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 5m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9610
Coeficiente de determinación R ²	0.9236
R ² ajustado	0.9232
Error típico	0.2459
Observaciones	200

4.1.6.2. Intervalo de 10m Metros Carril 3 y Huella Derecha

Las Figuras 105 y 106 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 10 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 105.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método topográfico.

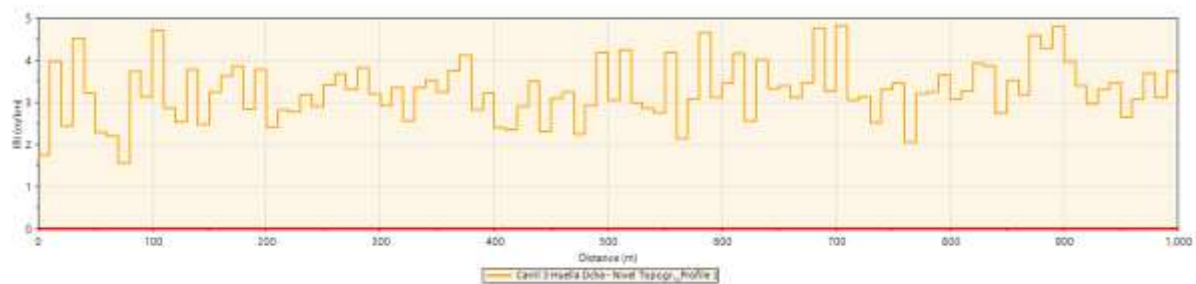
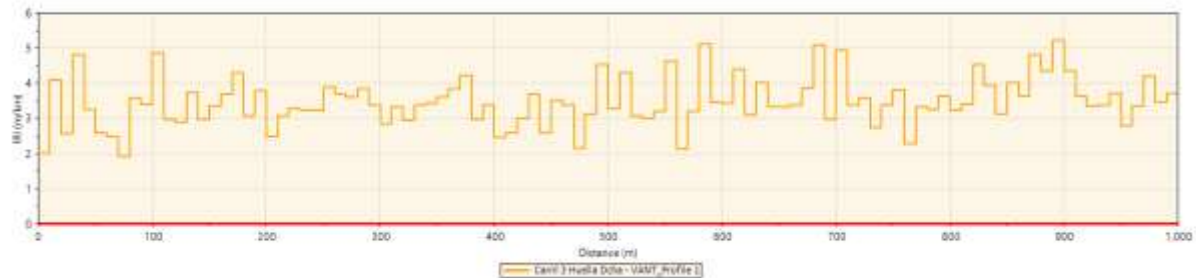


Figura 106.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 10m por el método fotogramétrico

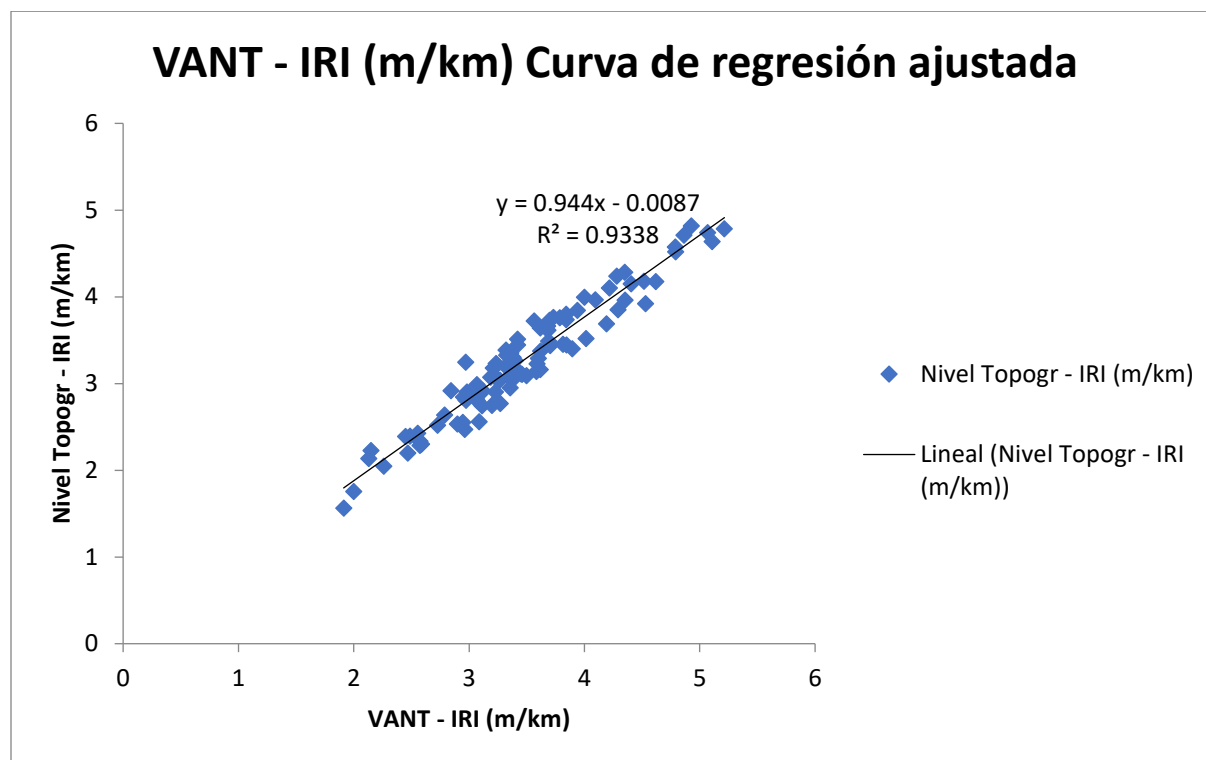


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 10 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 107 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 107.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 10m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 1 y la huella derecha es de 0.9663 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 93.38 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1752 m/km. Como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30.

Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 10m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9663
Coefficiente de determinación R ²	0.9338
R ² ajustado	0.9331
Error típico	0.1752
Observaciones	100

4.1.6.3. Intervalo de 20m Metros Carril 3 y Huella Derecha

Las Figuras 108 y 109 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 20 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 108.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método topográfico

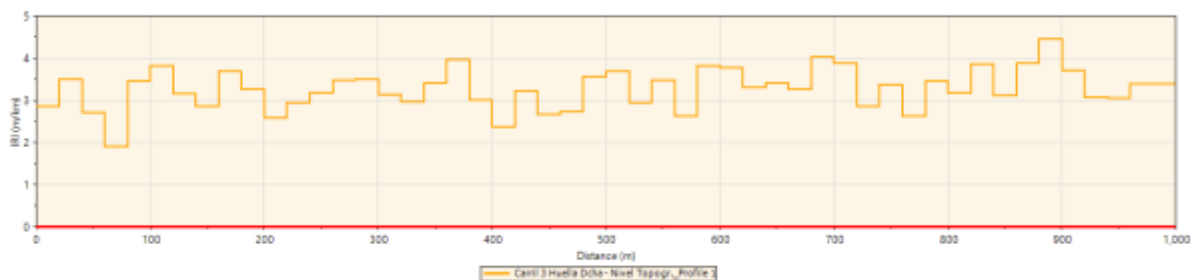
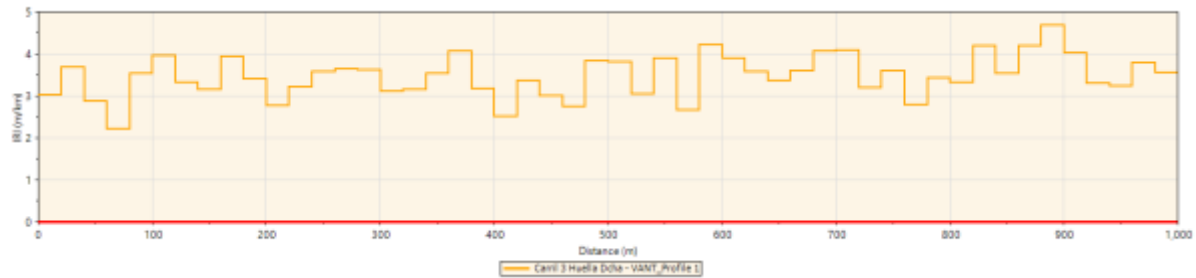


Figura 109.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 20m por el método

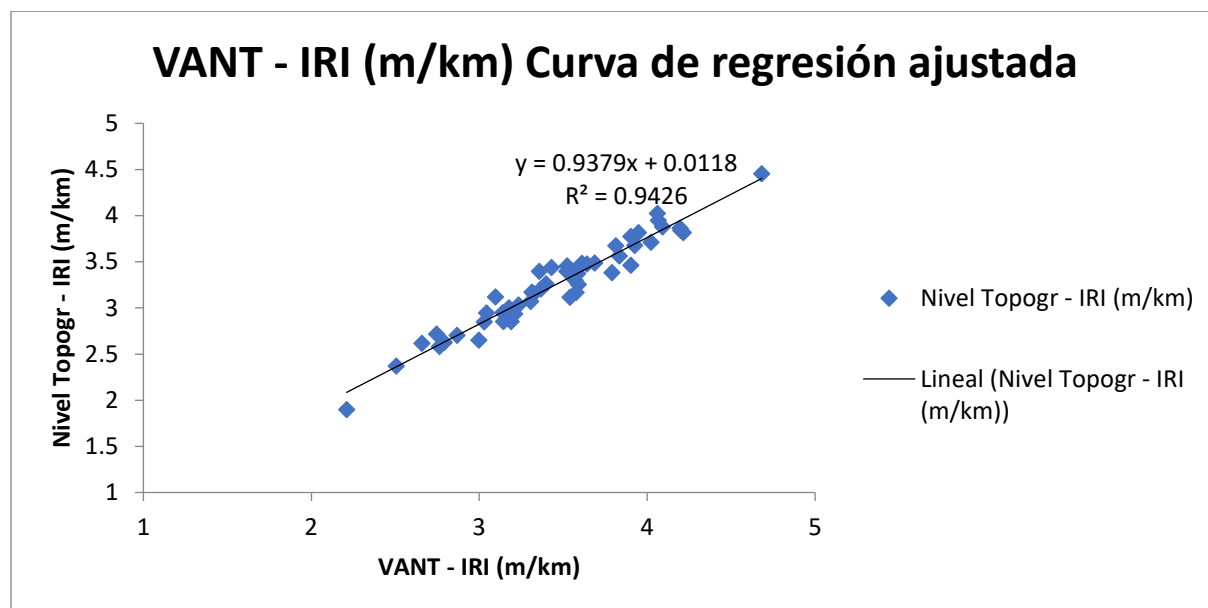


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 20 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 110 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 110.

.Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 20m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella derecha es de 0.9709 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 94.26 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.1166 m/km. Como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31.

Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 20m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9709
Coefficiente de determinación R ²	0.9426
R ² ajustado	0.9414
Error típico	0.1166
Observaciones	50

4.1.6.4 Intervalo de 50m Metros Carril 3 y Huella Derecha

Las Figuras 111 y 112 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 50 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 111.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método topográfico.

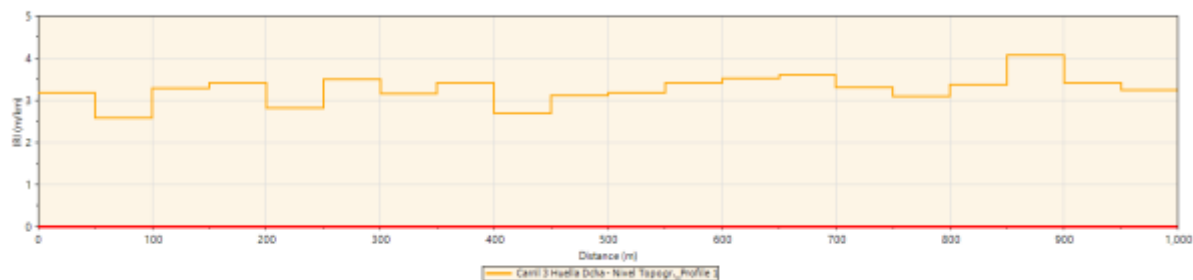
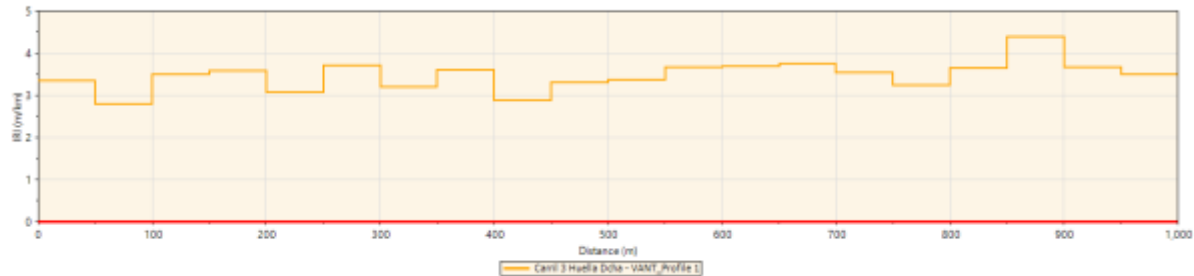


Figura 112.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 50m por el método fotogramétrico

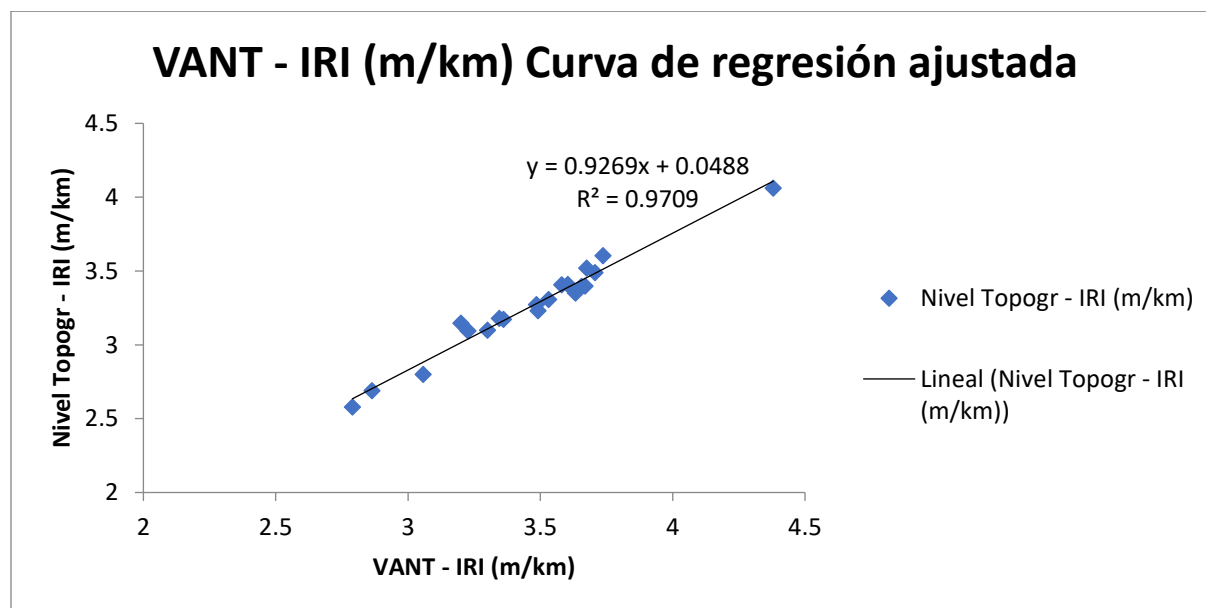


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 50 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 113 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 113.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 50m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella derecha es de 0.9853 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 97.09 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0576 m/km. Como se muestra en la tabla 32.

Tabla 32.

Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 50m

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9853
Coefficiente de determinación R ²	0.9709
R ² ajustado	0.9693
Error típico	0.0576
Observaciones	20

4.1.6.5. Intervalo de 100m Metros Carril 3 y Huella Derecha

Las Figuras 114 y 115 presentan los histogramas de los resultados del IRI evaluados en segmentos de 100 metros utilizando los métodos topográfico y fotogramétrico. Se puede observar que los resultados son parecidos.

Figura 114.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método.



Figura 115.

Valores de IRI del carril 3 y huella derecha calculados en intervalos de 100m por el método fotogramétrico

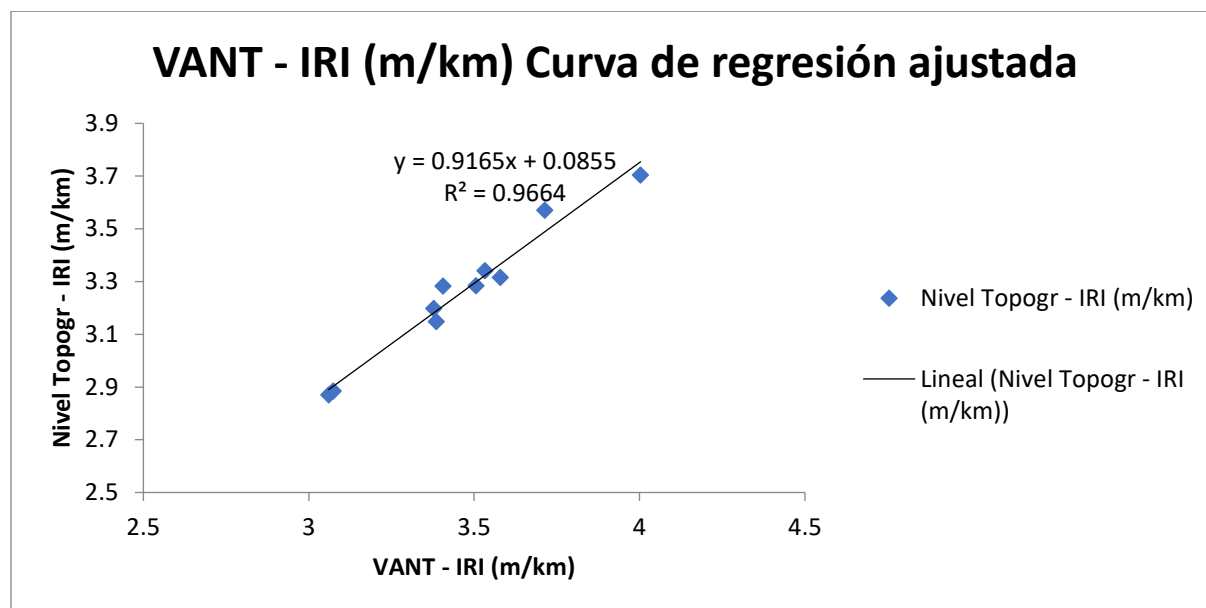


Con los resultados del IRI obtenidos en muestras de segmentos de 100 metros por el método topográfico y fotogramétrico, se realizó una regresión lineal para ver el grado de asociación que existe entre el IRI obtenido por ambos métodos en el eje X colocamos los resultados obtenidos por el método fotogramétrico y en el eje Y colócalos los valores obtenidos por el método topográfico los puntos de dispersión se aproximan a una línea recta ascendente como podemos observar en la figura 116 y se definió con la siguiente ecuación:

$$IRI_{NIV\ TOPOG} = \alpha * IRI_{VANT} + \beta + \varepsilon$$

Figura 116.

Correlación lineal de IRI del carril 3 y huella derecha en intervalos de 100m



La relación que existe entre los valores del IRI por el método topográfico y el método fotogramétrico del carril 3 y la huella derecha es de 0.9831 lo que indica que es una relación imperfecta positiva cuyo grado es muy alta. El 96.64 % de la variabilidad del IRI con el nivel topográfico puede ser explicada con el IRI obtenido con el VANT. La predicción del IRI con el nivel topográfico puede variar en ± 0.0507 m/km. Como se muestra en la tabla 33.

Tabla 33.*Regresión lineal del carril 3 huella derecha en intervalos de 100m*

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9831
Coeficiente de determinación R ²	0.9664
R ² ajustado	0.9622
Error típico	0.0507
Observaciones	10

4.2. Resultados de coeficiente de determinación

En la tabla 34. se muestra los resultados del coeficiente de determinación analizados para las seis huellas del pavimento.

Tabla 34. Resultados de coeficiente de determinación de todas las huellas de la vía

Análisis de IRI	R ²	R ²	R ²	R ²	R ²
	5m	10m	20m	50m	100m
Análisis de resultados del carril 1 y huella izquierda	0.9328	0.9162	0.8932	0.8829	0.9240
Análisis de resultados del carril 1 y huella derecha	0.9204	0.9240	0.924	0.9438	0.8819
Análisis de resultados del carril 2 y huella izquierda	0.9311	0.9295	0.8939	0.9085	0.9345
Análisis de resultados del carril 2 y huella derecha	0.9125	0.9202	0.9361	0.9416	0.9136
Análisis de resultados del carril 3 y huella izquierda	0.9398	0.9496	0.9439	0.9625	0.9834
Análisis de resultados del carril 3 y huella derecha	0.9236	0.9338	0.9426	0.9709	0.9664
promedio	0.9267	0.9289	0.9223	0.9350	0.9340

Discusión de Resultados

La presente investigación tuvo como objetivo “calcular el grado de confiabilidad en la determinación del IRI de vías urbanas a partir de imágenes georreferenciadas captadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT)”, para lo cual se realizó ecuaciones de regresión lineal simple, a partir de ello se concluyó que: el IRI del VANT con el IRI del nivel topográfico presentaron un alto nivel de asociación, debido a que el R^2 fue de 0.9294, lo significó que, el IRI obtenido a partir del método de fotogramétrico explicó el IRI topográfico en un 92.94%.

En consonancia, en el contexto internacional respalda nuestros hallazgos la investigación de Cruz (2022) el cual tuvo como objetivo desarrollar una metodología para calcular el Índice Internacional de Regularidad (IRI) en pavimentos, utilizando imágenes obtenidas del vehículo aéreo no tripulado (VANT) conocido como dron. “El VANT permite registrar la superficie del pavimento mediante la captura de imágenes georreferenciadas que se procesan para generar un modelo ortomosaico tridimensional de alta resolución y un modelo digital de superficie. El análisis de estos modelos nos permite extraer el perfil longitudinal de las vías de circulación del pavimento para calcular el IRI en cada una de ellas. Para validar el proceso se establece el equipo de referencia mediante la medición del perfil longitudinal mediante tres equipos de alta precisión: Laser Profiler, Dipstick y LIDAR Scanner. Las imágenes se capturan mediante Drones a diferentes alturas y las imágenes se procesan bajo dos escenarios: sin puntos de control y con puntos de control en tierra. Los resultados en comparación con datos del equipo de referencia nos permiten determinar la resolución óptima o GSD de 0,35 cm/píxel para el cálculo del IRI y valores más exactos con un mejor comportamiento del perfil IRI con el uso de puntos de control” (de Cruz, 2022). En el contexto nacional corroboró nuestros resultados la investigación de Guizado (2018) en el cual se realizó un levantamiento fotogramétrico de un pequeño sector en la zona de Cercado, en el

distrito de Puente Piedra, en Lima Metropolitana, mediante el empleo de un VANT Profesional (de altas capacidades técnicas), mediante el cual obtendremos un producto cartográfico (Ortofotografía) georreferenciado gracias al apoyo de puntos colocados en campo (mediante uso de GPS diferencial) para posteriormente aplicar los principales test de control posicional y determinar el grado de confiabilidad de los resultados mediante el uso de estas nuevas plataformas de vuelo, indican que los resultados fueron satisfactorios ya que se logró superar los test NMAS y EMAS hasta una escala de 1/500 y el test NSSDA para una escala 1/1000.

La variabilidad en los resultados es explicada por el instrumento utilizado para la medición del IRI sin conocer la precisión y exactitud de este equipo.

Por otro lado, en el contexto internacional, nacional y local no se encontró evidencia opuesta a los resultados que se encontró en la presente investigación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación se propone una nueva herramienta para la recolección de datos y cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) de pavimentos, así como para verificar el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos con instrumentos de alta precisión. La aplicación se desarrolló en un tramo de prueba en la Avenida la Cultura entre el KM 3+500 y el KM 4+500 de la ciudad del Cusco. En este sentido, a continuación, se presentan las conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

Según el Banco Mundial y la norma ASTM E950 el nivel topográfico está clasificada como un equipo de Clase 1. Porque con este instrumentó se puede recolectar directamente las cotas del perfil longitudinal del pavimento y a partir de este calcular el IRI. Por tal razón se calculó en seis huellas a través de datos tomados con los dos equipos el nivel topográfico y VANT. Se observó que los resultados del IRI obtenidos con el nivel topográfico son inferiores a los resultados obtenidos con el VANT.

Los resultados del IRI utilizando el método topográfico se consideraron como un patrón de comparación ya que es un método Clase 1 muy preciso. El rendimiento de la recopilación de datos es muy lento, peligroso y, por tanto, muy caro.

Al calcular el IRI mediante el método fotogramétrico se redujeron los tiempos de adquisición de información creando el modelo 3D y una ortofoto con una resolución óptima de 0,49 cm/píxel, facilitando así el cálculo del IRI para cada una de las huellas.

Los valores del IRI obtenidos con el método topográfico y fotogramétrico tienen una estrecha relación positiva imperfecta, cuyo grado de relación es muy alto, donde la variabilidad del IRI con el nivel topográfico se puede explicar con el IRI obtenido con el VANT.

Las grietas de los pavimentos con aberturas menores a la base de la mira y menores que el tamaño del GSD no afectan en el cálculo del IRI por el método topográfico y fotogramétrico. En esta investigación donde la base de la mira era mayor que el tamaño del GSD, los valores del IRI obtenidos por el método topográfico son menores que por el método fotogramétrico.

Si se obtiene el IRI con diferentes instrumentos no se podrá obtener los mismos valores, porque no siempre muestran la repetibilidad que uno espera. porque el ancho de la línea del pavimento no es estándar.

El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado a partir del perfil longitudinal, cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil. El equipo utilizado debe estar calibrado con un patrón para que los datos recolectados sean corregidos.

Recomendaciones

Para determinar el IRI mediante el método fotogramétrico se puede realizar una inspección preliminar para confirmar los cambios que presenta en relieve el pavimento, determinar un GSD óptimo e identificar obstáculos como edificios, cables, árboles y sombras; Esto puede afectar las operaciones de vuelo y la nitidez de la imagen.

Se recomienda calcular los valores de IRI en intervalos pequeños para detectar todos los niveles de regularidad y evitar ocultar los niveles altos de irregularidades de las superficies de los pavimentos.

Implementar perfiladores a los drones para producir perfiles instantáneos y de esa manera obtener los valores del IRI a tiempo real.

Muchas investigaciones se centran en la presión del equipo de medición y no en el uso. en la mayoría de las veces cometemos más errores por no saber usar el equipo.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures 1993. Washington.
- Alvarado Calderon, C. R. (2020). ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN ENTRE LOS LEVANTAMIENTOS AEROFOTOGRAMETRICO REALIZADO CON EL DRON EBEE PLUS Y TOPOGRÁFICO REALIZADO CON EL GPS DIFERENCIAL EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZAN HUANUCO – 2019. Huánuco, Perú.
- Angarita Arias, L. F., & Sánchez Archila, J. C. (18 de 09 de 2017). Comparación del índice de rugosidad internacional (IRI) a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos. BOGOTA, COLOMBIA: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- ASTM E 867-06. (s.f.). Standard Terminology Relating to Vehicle Pavement Systems.
- Badilla Vargas, G. (28 de Enero de 2009). Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). San Jose, Costa Rica: Unidad de Investigación en Infraestructura Vial Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica .
- Castaño Martínez, F., Herrera Betín, J., Gómez Sáenz, J., & Reyes Lizcano, F. (2009). Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C.
- Contreras Sauñe, J. (2000). Evaluación superficial de pavimentos aplicación del Índice. Lima, Peru: Evaluación superficial de pavimentos aplicación del Índice.
- Cruz Toribio, J. O. (2022). Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) a través de imágenes obtenidas de un Vehículo Aéreo No Tripulado. Costa Rica.

Guizado Mena, Y. (2018). APLICACIÓN DE TEST PARA CONTROL DE CALIDAD POSICIONAL AL PRODUCTO CARTOGRÁFICO OBTENIDO MEDIANTE VUELO AEROFOTOGRAMÉTRICO CON VANT. Lima, Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL.

Lanado Huacac, L. B. (2021). DETERMINACION DEL INDICE DE SERVICIABILIDAD E INDICE DE CONDICION DEL PAVIMENTO DE LA RUTA CU-100 TRAMO IZCUCHACA-HUAROCONDO, UTILIZANDO EL RUGOSIMETRO DE MERLIN Y DRON. CUSCO: UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO.

Mendoza Dueñas , J. (2019). Topografía y Geodesia. Lima, Perú: Editores Maraucano E.I.R.L.

Montejo Fonceca, A. (2002). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS. Bogota: Universidad Católica de Colombia.

Moyado Raygada, M. P. (Noviembre de 2020). Procedimiento para determinar el Índice de Rugosidad Internacional con una aplicación móvil en Piura. Piura, Perú: Universidad de Piura.

Sánchez Morales, M. C., Martínez Rojo, T. E., & Tejeda Piusseaut, E. (Octubre de 2018). MEDICIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL EN PAVIMENTOS. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Sanchez S, I., & Solminihac T, H. (Junio de 1989). El IRI: un indicador de la regularidad superficial.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements . Banco Mundial. Washington: Grup del Banco Mundial.

Sayers, M., & Karamihas , S. (1998). The Little Book of Profiling.

UMTRI Research Review. (2002). The Shape of Roads to Come: Measuring and Interpreting Road Roughness Profiles.

ANEXOS

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	RANGO/Medicion
GENERAL	GENERAL	GENERAL	INDEPENDIENTE			
¿Cuál es el grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional IRI de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT)?	Evaluar el grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional IRI de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT).	El grado de confiabilidad en la determinación del índice de regularidad internacional IRI de pavimentos urbanos utilizando imágenes georreferenciadas es muy alta para una altura de vuelo de 20m	Imágenes Georreferencias obtenidas con un Vehículo Aereo No Tripulado (VANT)	Flujo vehicular	Vehículos / hora	Veh/h
				Plan de vuelo	Altura de vuelo	20-50m
					Solape	75-90%
				Características de dron	Resolución de cámara	Píxeles
					Giroscopio	Rad/s
					Acelerómetro	m/s ²
				Condiciones ambientales	Velocidad de viento	m/s
Luz solar	nm					
ESPECIFICOS	ESPECIFICOS	ESPECIFICOS	DEPENDIENTE			
¿Se puede determinar el índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanos utilizando métodos fotogramétricos y	Determinar el índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanos utilizando métodos fotogramétricos y	•EL método topográfico se usa como patrón de calibración para la El método fotogramétrico permite optimizar Existe una relación de grado muy alto estadísticamente entre los resultados del índice de rugosidad internacional (IRI) por métodos fotogramétricos y	Indice de rugosidad internacional	Desviaciones del perfil longitudinal	IRI	Muy bueno (0-1)
						Buena (1-1.9)
						Regular (1.9-3.6)
						Mala (3.6-6.4)
¿Qué relación existe entre los resultados del índice de regularidad internacional (IRI) de pavimentos urbanos utilizando métodos fotogramétricos y						Muy mala (>6.4)

a) Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Izquierda

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Izquierda de 0 – 200 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)							
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m			
0	5	2.131	2.315	2.970	3.259	3.196			
5	10	2.466							
10	15	2.975							
15	20	4.430	3.615	3.605			3.196		
20	25	2.986	3.613						
25	30	4.098							
30	35	3.182	3.547	3.305	3.196				
35	40	3.814							
40	45	3.033	3.173					3.317	3.196
45	50	3.174	3.523						
50	55	3.541							
55	60	3.700	3.235	3.152				3.196	
60	65	2.890							
65	70	3.431							
70	75	4.343	3.496			2.794			
75	80	2.654							
80	85	2.568	2.912				2.833		
85	90	3.389							
90	95	3.322							
95	100	2.414	2.770	2.822	3.196				
100	105	2.597							
105	110	2.901							
110	115	2.306	2.806			2.799	3.196		
115	120	3.224							
120	125	2.050	2.876					2.892	3.196
125	130	3.600	3.024						
130	135	3.083							
135	140	3.066	2.627	3.103		3.196			
140	145	2.427							
145	150	2.807							
150	155	3.221	3.608					3.160	
155	160	4.011							
160	165	2.914	2.636		3.032				
165	170	2.335	3.685						
170	175	4.671							
175	180	2.674	2.626	2.640	3.196				
180	185	2.436							
185	190	2.790							
190	195	1.867	2.681				3.032	3.196	
195	200	3.532							

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Izquierda de 200 – 400 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
200	205	2.718	2.290	2.432	2.844	2.923
205	210	1.775				
210	215	2.378	2.568			
215	220	2.825				
220	225	2.382	3.186	2.798		
225	230	3.956				
230	235	2.879	2.481			
235	240	1.967				
240	245	3.347	3.707	3.229		
245	250	3.953				
250	255	2.176	2.689			
255	260	3.124				
260	265	3.066	3.149	2.992		
265	270	3.139				
270	275	3.698	3.169			
275	280	2.661				
280	285	2.073	2.243		3.015	
285	290	2.362				
290	295	3.772	3.799			
295	300	3.867				
300	305	4.941	4.448	3.799		
305	310	3.877				
310	315	3.955	3.148			
315	320	2.245				
320	325	2.886	2.952	2.677		
325	330	3.129				
330	335	3.131	2.344			
335	340	1.529				
340	345	2.794	3.308	3.105		
345	350	3.977				
350	355	2.634	2.938			
355	360	3.195				
360	365	3.193	3.144	2.793		
365	370	3.026				
370	375	2.904	2.404			
375	380	1.997				
380	385	3.040	2.986	3.199		
385	390	2.879				
390	395	2.923	3.482			
395	400	3.897				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha de 400 – 600 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
400	405	6.724	4.883	4.051	3.665	3.568
405	410	3.050				
410	415	3.639	3.149			
415	420	2.706				
420	425	2.843	2.147	3.458		
425	430	1.497				
430	435	6.410	4.705			
435	440	3.176				
440	445	2.567	3.310	3.302		
445	450	4.246				
450	455	3.927	3.264			
455	460	2.585				
460	465	2.143	2.880	3.295		
465	470	3.789				
470	475	5.557	3.843			
475	480	2.360				
480	485	4.027	3.513	3.733		
485	490	3.130				
490	495	4.541	3.946			
495	500	3.342				
500	505	2.264	2.754	2.666		
505	510	3.288				
510	515	2.390	2.650			
515	520	2.922				
520	525	2.691	3.233	3.497		
525	530	3.875				
530	535	3.520	3.709			
535	540	3.869				
540	545	1.934	2.281	3.319		
545	550	2.721				
550	555	5.115	4.348			
555	560	3.717				
560	565	4.036	3.499	3.181		
565	570	3.114				
570	575	2.846	2.854			
575	580	2.739				
580	585	3.444	3.278	3.009		
585	590	3.085				
590	595	2.068	2.684			
595	600	3.407				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Izquierda de 600 – 800 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
600	605	2.677	2.953	2.793	3.451	3.320
605	610	3.274				
610	615	2.687	2.569			
615	620	2.400				
620	625	3.714	3.261	3.436		
625	630	2.970				
630	635	3.153	3.543			
635	640	3.814				
640	645	6.382	4.992	3.764		
645	650	3.706				
650	655	2.898	2.524			
655	660	2.162				
660	665	2.671	3.397	3.135		
665	670	4.260				
670	675	2.788	2.825			
675	680	2.848				
680	685	3.820	3.330	3.607		
685	690	2.907				
690	695	3.609	3.893			
695	700	4.044				
700	705	3.727	2.965	3.030		
705	710	2.269				
710	715	2.138	3.051			
715	720	3.828				
720	725	3.847	3.667	3.085		
725	730	3.345				
730	735	2.687	2.510			
735	740	2.295				
740	745	4.247	4.606	4.439		
745	750	5.018				
750	755	4.653	4.351			
755	760	4.113				
760	765	4.768	3.867	3.487		
765	770	2.908				
770	775	3.504	3.033			
775	780	2.459				
780	785	3.837	3.664	3.322		
785	790	3.457				
790	795	2.933	3.021			
795	800	3.062				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Izquierda de 800 – 1000 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
800	805	2.729	3.669	3.813	3.743	3.482
805	810	4.659				
810	815	5.108				
815	820	2.805	3.948			
820	825	4.316	4.098	3.612		
825	830	3.786				
830	835	3.063	3.087			
835	840	3.110				
840	845	4.704	3.950	3.915		
845	850	3.164				
850	855	2.917	3.839			
855	860	4.763				
860	865	2.821	3.594	3.470		
865	870	4.413				
870	875	3.177	3.361			
875	880	3.567				
880	885	3.274	2.844			
885	890	2.291				
890	895	1.954	2.360	2.621		
895	900	2.755				
900	905	1.555	3.224	3.363		
905	910	4.847				
910	915	4.718	3.540			
915	920	2.283				
920	925	3.142	3.073	3.019		
925	930	2.882				
930	935	3.238	2.984			
935	940	2.707				
940	945	2.160	2.900	3.110		
945	950	3.749				
950	955	3.340	3.280	3.277		
955	960	3.437				
960	965	1.833	3.445			
965	970	5.045				
970	975	3.305	3.555			
975	980	3.773				
980	985	2.383	2.621		3.396	
985	990	2.801				
990	995	3.407	4.339			
995	1000	5.537				

b) Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha de 0 – 200 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
0	5	3.56	4.75	3.90	3.69	3.42
5	10	5.89				
10	15	3.21	3.10			
15	20	3.00				
20	25	2.37	2.81	2.85		
25	30	3.22				
30	35	4.19	3.05			
35	40	2.08				
40	45	3.25	4.81	3.90		
45	50	6.33				
50	55	1.92	2.90	3.13		
55	60	3.76				
60	65	3.32	3.48			
65	70	3.88				
70	75	3.80	3.21			
75	80	2.59				
80	85	2.45	2.82		3.03	
85	90	3.10				
90	95	3.58	3.21			
95	100	2.69				
100	105	3.43	3.02	3.34		
105	110	2.65				
110	115	3.49	3.69			
115	120	3.93				
120	125	3.58	3.85		3.77	
125	130	4.14				
130	135	4.06	3.68			
135	140	3.29				
140	145	2.24	2.42	3.01		
145	150	2.71				
150	155	3.23	3.55	3.75		
155	160	3.83				
160	165	3.80	4.33			
165	170	5.02				
170	175	3.96	4.11			
175	180	4.47				
180	185	2.94	3.56			
185	190	4.07				
190	195	3.31	3.21			
195	200	3.25				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha de 200 – 400 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
200	205	1.87	2.45	2.45	2.86	3.15
205	210	2.97				
210	215	2.11	2.43			
215	220	2.78				
220	225	3.05	3.65			
225	230	4.08				
230	235	2.86	3.03			
235	240	3.10				
240	245	2.68	2.71			
245	250	2.80				
250	255	3.07	2.97			
255	260	2.81				
260	265	2.81	3.01			
265	270	3.32				
270	275	3.86	4.20			
275	280	4.72				
280	285	4.31	3.84			
285	290	3.28				
290	295	3.74	3.29			
295	300	2.77				
300	305	4.12	3.45			
305	310	2.65				
310	315	2.76	3.08			
315	320	3.33				
320	325	4.23	4.18			
325	330	4.10				
330	335	4.33	3.42			
335	340	2.44				
340	345	2.11	2.84			
345	350	3.45				
350	355	4.86	4.00			
355	360	3.01				
360	365	2.93	3.49			
365	370	3.99				
370	375	2.13	2.71			
375	380	3.32				
380	385	2.18	2.69			
385	390	3.09				
390	395	5.04	5.04			
395	400	4.79				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha de 400 – 600 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
400	405	2.87	2.77	2.92	3.12	3.29
405	410	2.65				
410	415	2.25	3.02			
415	420	3.69				
420	425	3.77	3.27	3.15		
425	430	2.95				
430	435	2.75	2.97			
435	440	3.11				
440	445	3.96	3.43	3.47		
445	450	2.90				
450	455	4.17	3.50			
455	460	2.71				
460	465	3.13	3.10	3.50		
465	470	3.43				
470	475	4.20	3.88			
475	480	3.57				
480	485	3.38	3.02		3.46	
485	490	2.81				
490	495	3.70	3.81			
495	500	3.87				
500	505	3.88	3.53	3.58		
505	510	3.14				
510	515	3.83	3.69			
515	520	3.41				
520	525	3.31	2.95	3.33		
525	530	2.54				
530	535	3.33	3.65			
535	540	3.86				
540	545	3.30	2.96	3.40		
545	550	2.76				
550	555	2.37	3.79			
555	560	5.10				
560	565	1.93	2.60	2.69		
565	570	3.20				
570	575	3.10	2.85			
575	580	2.62				
580	585	2.16	3.08	3.28		
585	590	3.98				
590	595	3.65	3.46			
595	600	3.58				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha de 600 – 800 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
600	605	3.51	3.33	3.10	3.35	3.41
605	610	3.25				
610	615	3.32	2.86			
615	620	2.28				
620	625	3.12	3.00	3.23		
625	630	3.03				
630	635	3.70	3.39			
635	640	3.18				
640	645	4.26	4.03	3.70		
645	650	3.80				
650	655	3.46	3.38			
655	660	3.28				
660	665	2.83	3.28	3.21		
665	670	3.73				
670	675	3.08	3.06			
675	680	2.97				
680	685	3.35	4.46	3.76		
685	690	5.42				
690	695	3.28	3.00			
695	700	2.65				
700	705	2.35	2.46	2.93		
705	710	2.46				
710	715	4.53	3.40			
715	720	2.15				
720	725	2.47	2.49	2.88		
725	730	2.52				
730	735	2.66	3.22			
735	740	3.82				
740	745	5.24	5.34	4.25		
745	750	5.23				
750	755	3.92	3.23			
755	760	2.44				
760	765	2.49	3.70	3.58		
765	770	4.75				
770	775	3.76	3.50			
775	780	3.08				
780	785	3.86	3.21	3.92		
785	790	2.46				
790	795	3.63	4.56			
795	800	5.64				

Valores de IRI Con Nivel Topográfico del Carril 1 Huella Derecha de 800 – 1000 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con Nivel Topográfico (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
800	805	5.54	3.92	3.78	3.66	3.40
805	810	2.45				
810	815	4.04	3.62			
815	820	3.27				
820	825	2.91	3.50	3.44		
825	830	4.25				
830	835	3.85	3.32			
835	840	2.65				
840	845	2.82	3.79	3.09		
845	850	4.77				
850	855	2.44	2.35			
855	860	2.29				
860	865	4.22	3.94	3.25		
865	870	3.50				
870	875	2.57	2.63			
875	880	2.68				
880	885	4.21	3.61	3.47		
885	890	2.97				
890	895	2.04	3.26			
895	900	4.34				
900	905	2.87	3.08	2.92		
905	910	3.50				
910	915	1.96	2.70			
915	920	3.39				
920	925	2.04	2.81	3.04		
925	930	3.52				
930	935	3.52	3.29			
935	940	2.91				
940	945	3.30	3.87	3.30		
945	950	4.32				
950	955	2.53	2.67			
955	960	2.78				
960	965	2.53	3.02	3.23		
965	970	3.40				
970	975	2.25	3.39			
975	980	4.48				
980	985	3.99	4.05	3.67		
985	990	4.17				
990	995	3.46	3.24			
995	1000	3.00				

c) Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Izquierda

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Izquierda de 0 – 200 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
0	5	2.30	2.50	3.16	3.38	3.36
5	10	2.66				
10	15	3.25				
15	20	4.55	3.83	3.69		
20	25	3.31	3.81			
25	30	4.20	3.52	3.43		
30	35	3.15				
35	40	3.81	3.20		3.35	
40	45	3.16	3.76			
45	50	3.12				
50	55	3.93	3.16	3.35		
55	60	3.78				
60	65	2.84				
65	70	3.42	3.42			
70	75	4.36				
75	80	3.22	3.77		3.08	
80	85	3.09	3.21			
85	90	3.47				
90	95	3.66	3.10		2.88	
95	100	2.60				
100	105	2.56	2.74	3.17		
105	110	2.86				
110	115	2.15	2.80			
115	120	3.34				
120	125	2.20	3.01		3.47	
125	130	3.75				
130	135	3.28	3.18			3.40
135	140	3.16				
140	145	2.60	2.80			
145	150	3.00				
150	155	3.54	3.99	3.56		
155	160	4.47				
160	165	3.54	3.11			
165	170	2.73				
170	175	4.65	4.02		3.14	
175	180	3.31				
180	185	3.16	3.10			
185	190	3.00				
190	195	2.02	3.23			
195	200	4.49				

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Izquierda de 200 – 400 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
200	205	3.14	2.67	2.77	2.96	3.10
205	210	2.11				
210	215	2.68				
215	220	3.13	2.88			
220	225	2.37	3.16	2.71		
225	230	3.93				
230	235	2.75				
235	240	1.85	2.32			
240	245	3.43	3.75	3.42		
245	250	3.96				
250	255	2.40	3.05			
255	260	3.59	3.26	3.24		
260	265	2.93				
265	270	3.47				
270	275	4.25	3.39			
275	280	2.65				
280	285	2.45	2.42		3.27	
285	290	2.28				
290	295	4.12	4.15			
295	300	4.20	5.18		3.68	
300	305	5.84				
305	310	4.45				
310	315	4.50	3.53			
315	320	2.39				
320	325	3.15	3.15	2.84		
325	330	3.27				
330	335	3.33	2.47			
335	340	1.53	3.90	3.54		
340	345	3.52				
345	350	4.51	3.18			
350	355	3.07	3.43	3.22		
355	360	3.30				
360	365	3.45	3.15			
365	370	3.33				
370	375	3.49	2.83			
375	380	2.33				
380	385	3.23	3.34			
385	390	3.41				
390	395	3.00	3.33			
395	400	3.70				

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Izquierda de 400 – 600 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
400	405	6.86	5.02	4.28	3.88	3.81
405	410	3.13				
410	415	4.07	3.49			
415	420	2.95				
420	425	2.87	2.30	3.73		
425	430	1.72				
430	435	6.70	5.10			
435	440	3.71				
440	445	2.79	3.41	3.36		
445	450	4.30				
450	455	4.08	3.29		3.74	
455	460	2.47				
460	465	2.44	3.12			
465	470	3.93				
470	475	5.41	3.94	4.23		
475	480	2.68				
480	485	4.69	4.07			
485	490	3.57				
490	495	4.96	4.37	2.82		
495	500	3.74				
500	505	2.86	3.03			
505	510	3.33				
510	515	2.50	2.68		3.20	
515	520	2.86				
520	525	3.22	3.76	3.82		
525	530	4.43				
530	535	3.30	3.85		3.72	
535	540	4.33				
540	545	2.21	2.69	3.47		
545	550	3.28				
550	555	5.53	4.75			3.58
555	560	4.12				
560	565	4.27	3.75	3.09		
565	570	3.41				
570	575	3.26	3.23			
575	580	3.18				
580	585	3.30	3.22			
585	590	3.17				
590	595	2.04	2.91			
595	600	3.91				

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Izquierda de 600 – 800 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
600	605	2.81	3.02	3.02	3.59	3.47
605	610	3.26				
610	615	3.05	2.95			
615	620	2.80				
620	625	4.01	3.25	3.54		
625	630	2.62				
630	635	3.50	3.74			
635	640	3.83				
640	645	6.31	5.03	4.06		
645	650	3.79				
650	655	3.45	3.09	3.35		
655	660	2.74				
660	665	2.54	3.36			
665	670	4.30				
670	675	3.29	2.97			
675	680	2.66				
680	685	4.15	3.46		3.66	
685	690	2.71				
690	695	3.43	3.88			
695	700	4.17				
700	705	4.30	3.39	3.66	3.66	
705	710	2.53				
710	715	2.62	3.33			
715	720	3.91				
720	725	4.38	3.96			3.40
725	730	3.42				
730	735	3.09	2.84			
735	740	2.51				
740	745	4.23	4.69	4.45		
745	750	5.21				
750	755	4.69	4.27			
755	760	3.87				
760	765	5.09	4.00	3.66		
765	770	2.89				
770	775	3.77	3.29	3.67		
775	780	2.66				
780	785	4.24	3.99	3.44		
785	790	3.65				
790	795	2.61	2.96			
795	800	3.25				

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Izquierda de 800 – 1000 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
800	805	3.33	4.19	4.31	4.16	3.81
805	810	5.12				
810	815	5.59	4.42			
815	820	3.29				
820	825	4.52	4.43	3.96		
825	830	4.25				
830	835	3.44				
835	840	3.44				
840	845	5.34	4.37			
845	850	3.37				
850	855	3.19	4.07	3.45		
855	860	5.02				
860	865	2.98	4.01			
865	870	5.04				
870	875	3.30			3.61	
875	880	3.92				
880	885	3.61	3.20		2.78	
885	890	2.66				
890	895	2.11	2.34			3.53
895	900	2.57				
900	905	1.62	3.19	3.35		
905	910	4.70				
910	915	5.18			3.93	
915	920	2.58				
920	925	3.19	3.32		3.24	
925	930	3.32				
930	935	3.41	3.17	3.36		
935	940	2.96				
940	945	2.73	3.09		3.45	
945	950	3.59				
950	955	3.73	3.58			
955	960	3.68				
960	965	1.77		3.53		
965	970	5.27				
970	975	3.54	3.75	3.62		
975	980	3.92				
980	985	2.43	2.76			3.55
985	990	2.97				
990	995	3.34	4.32	3.45		
995	1000	5.56				

d) Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Derecha

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Derecha de 0 – 200 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)											
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m							
0	5	3.92	4.95	4.07	3.93	3.65							
5	10	6.02											
10	15	3.19	3.20	3.19	3.35								
15	20	3.26											
20	25	2.68	3.16	3.40									
25	30	3.60											
30	35	4.59	3.39	4.01									
35	40	2.35											
40	45	3.09	5.07	3.45									
45	50	6.93											
50	55	2.48	2.90	3.61									
55	60	3.26											
60	65	3.79	3.74				3.82						
65	70	3.97											
70	75	3.70	3.12					4.66					
75	80	2.43											
80	85	3.19	3.43					4.02					
85	90	3.64											
90	95	3.75	3.43						3.67				
95	100	3.02											
100	105	3.91	3.58			3.61							
105	110	3.27											
110	115	3.55	3.85		3.67								
115	120	4.19											
120	125	3.62	3.90						3.67				
125	130	4.21											
130	135	4.09	3.92							3.67			
135	140	3.74											
140	145	2.45	2.84								3.67		
145	150	3.30											
150	155	3.10	3.53	3.67									
155	160	3.92											
160	165	4.45	4.68				3.67						
165	170	5.04											
170	175	4.28	4.58									3.67	
175	180	5.07											
180	185	2.99	3.85					3.67					
185	190	4.59											
190	195	3.44	3.54										3.67
195	200	3.71											

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Derecha de 200 – 400 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
200	205	1.99	2.39	2.40	3.00	3.34
205	210	2.75				
210	215	2.16	2.43			
215	220	2.76				
220	225	3.18	3.88	3.59		
225	230	4.44				
230	235	3.00	3.27			
235	240	3.40				
240	245	2.99	3.01	3.12		
245	250	3.09				
250	255	3.82	3.30	3.69		
255	260	2.68				
260	265	2.84	3.08			
265	270	3.48				
270	275	4.42	4.72			
275	280	5.30				
280	285	4.97	4.29	3.67		
285	290	3.43				
290	295	3.75	3.13			
295	300	2.41				
300	305	4.64	3.86	3.50	3.56	
305	310	2.91				
310	315	2.74	3.15			
315	320	3.53				
320	325	4.20	4.11	3.79		
325	330	3.95				
330	335	4.39	3.58			
335	340	2.71				
340	345	2.19	3.07	3.53		
345	350	3.85				
350	355	5.07	4.02	3.63		
355	360	2.82				
360	365	3.41	3.69			
365	370	3.85				
370	375	2.29	2.55			
375	380	2.75				
380	385	2.20	2.69	4.03		
385	390	3.19				
390	395	5.46	5.53			
395	400	5.36				

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Derecha de 400 – 600 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
400	405	3.06	3.05	3.15	3.34	3.56
405	410	3.02				
410	415	2.45	3.20			
415	420	3.85				
420	425	4.04	3.46	3.25		
425	430	3.08				
430	435	2.73	2.98			
435	440	3.16				
440	445	4.39	3.87	3.90		
445	450	3.36				
450	455	4.52	3.88		3.77	
455	460	3.15				
460	465	3.62	3.58			
465	470	3.97				
470	475	4.01	4.06			
475	480	4.15				
480	485	3.88	3.36	3.71		
485	490	3.04				
490	495	3.63	3.99			
495	500	4.33				
500	505	3.89	3.63	3.73		
505	510	3.30				
510	515	4.15	3.90			
515	520	3.50				
520	525	3.66	3.32	3.55		
525	530	2.91				
530	535	3.97	3.84			
535	540	3.58				
540	545	3.60	3.19	3.60		
545	550	2.84				
550	555	2.94	4.00			
555	560	5.00				
560	565	2.08	2.85	2.90		
565	570	3.53				
570	575	2.95	3.01			
575	580	3.12				
580	585	2.62	3.74	3.41		
585	590	4.82				
590	595	3.44	3.42			
595	600	3.67				

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Derecha de 600 – 800 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
600	605	3.42	3.35	3.25	3.51	3.61
605	610	3.38				
610	615	3.79	3.15			
615	620	2.38				
620	625	3.50	3.29	3.48		
625	630	3.21				
630	635	3.75				
635	640	3.51	3.58			
640	645	4.61				
645	650	3.65				
650	655	3.47	4.09	3.75		
655	660	3.36				
660	665	3.08	3.41		3.71	
665	670	3.89				
670	675	2.92	3.48			
675	680	3.54				
680	685	3.93				
685	690	5.48	4.82	4.12		
690	695	3.49				
695	700	3.13	3.35			
700	705	2.58				
705	710	2.72				
710	715	5.09	2.70		3.20	
715	720	2.16				
720	725	2.60	3.70			
725	730	2.56				
730	735	3.09				
735	740	4.10	2.56	3.10		
740	745	5.50				
745	750	5.32	5.50			
750	755	4.07				
755	760	2.10				
760	765	2.39	3.15		4.29	
765	770	4.53				
770	775	3.73	3.53			
775	780	3.66				
780	785	4.13				
785	790	2.79	3.75	3.61		
790	795	3.83				
795	800	5.96	4.80			

Valores de IRI Con VANT del Carril 1 Huella Derecha de 800 – 1000 m

Estación Inicial	Estación Final	Valores de IRI Con VANT (m/km)				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
800	805	5.91	4.33	4.01	3.86	3.59
805	810	2.94				
810	815	4.12	3.70			
815	820	3.28				
820	825	2.98	3.70	3.68		
825	830	4.55				
830	835	4.26	3.61			
835	840	2.85				
840	845	3.01	3.89	3.25		
845	850	4.76				
850	855	2.51	2.56		3.30	
855	860	2.64				
860	865	4.23	4.02			
865	870	3.65				
870	875	2.95	2.92			
875	880	2.84				
880	885	4.47	3.94	3.61		
885	890	3.30				
890	895	1.92	3.24			
895	900	4.45				
900	905	2.93	3.32	3.12		
905	910	3.86				
910	915	1.91	2.86			
915	920	3.72				
920	925	2.17	2.87	3.30		
925	930	3.53				
930	935	3.87	3.59			
935	940	3.20				
940	945	3.18	3.83	3.33		
945	950	4.37				
950	955	2.70	2.76		3.34	
955	960	2.74				
960	965	2.69	3.07			
965	970	3.38				
970	975	2.45	3.54	3.37		
975	980	4.65				
980	985	4.00	4.07			
985	990	4.13				
990	995	3.61	3.45			
995	1000	3.24				