

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD  
INTERNACIONAL DEL PAVIMENTO MEDIANTE  
IMÁGENES DE DRONE Y EL ABAKAL IRI EN  
LA CARRETERA TA-635, PROGRESIVA  
KM 0+000 A KM 3+000, TACNA 2024  
TESIS**

Presentada por:

Bach. EVER NEIL ACERO CHAMBILLA

Bach. FRANK ALBERTO YANAPA VILCA

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

TACNA - PERÚ

2025

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE  
GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD  
INTERNACIONAL DEL PAVIMENTO MEDIANTE  
IMÁGENES DE DRONE Y EL ABAKAL IRI EN  
LA CARRETERA TA-635, PROGRESIVA  
KM 0+000 A KM 3+000, TACNA 2024

Tesis sustentada y aprobada el día 13 de febrero del 2025  
estando integrado el Jurado Calificador por:

**PRESIDENTE**

  
: .....  
Dr. Ing. Victor Yapuchura Platero

**SECRETARIO**

  
: .....  
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga

**VOCAL**

  
: .....  
Dr. Ing. Martin Paucara Rojas

**ASESOR DE TESIS:**

  
: .....  
Dr. Ing. Martin Paucara Rojas

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Martin Paucara Rojas, en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N° 850-2024-FIAG/UNJBG del 11 de noviembre del 2024, del Trabajo de Tesis titulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DEL PAVIMENTO MEDIANTE IMÁGENES DE DRONE Y EL ABAKAL IRI EN LA CARRETERA TA-635, PROGRESIVA KM 0+000 A KM 3+000, TACNA 2024”. Presentado por el Bach. Ever Neil Acero Chambilla y Bach. Frank Alberto Yanapa Vilca. Para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

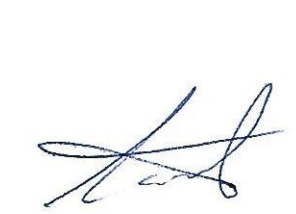
Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 05 %. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de Ingeniero Civil, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.  
Tacna, 06 de febrero del 2025.

  
\_\_\_\_\_  
FIRMA ASESOR




Huella dactilar

Nombres y apellidos:  
**Dr. Ing. Martin  
Paucara Rojas**  
DNI: 00451289

  
\_\_\_\_\_  
FIRMA AUTOR  
Nombres y apellidos:  
**Bach. Frank Alberto Yanapa Vilca**  
DNI: 75517439



Huella dactilar

  
\_\_\_\_\_  
FIRMA AUTOR  
Nombres y apellidos:  
**Bach. Ever Neil Acero Chambilla**  
DNI: 72661033



Huella dactilar

## DEDICATORIA

Agradezco a mis padres, Benigna y Pedro, por su amor, apoyo y sacrificio a lo largo de los años. Mi madre, con su ímpetu, me permitió alcanzar mis objetivos y sueños. Mi padre, por sembrar en mí la pasión por la ingeniería.

A mis hermanos, Carlos y Arturo, quienes admiro mucho y agradezco muchísimo su apoyo en estos últimos años muy difíciles que nos tocó vivir como familia.

Bach. EVER NEIL ACERO CHAMBILLA

A Dios, fuente de fortaleza y guía en cada etapa de mi vida, a quien debo todo lo que soy y lo que he logrado.

A mi madre, Claudia, cuya determinación y sacrificio han sido fundamentales en mi formación, brindándome siempre su amor incondicional y apoyo inquebrantable.

A mi padre, Alberto, por su esfuerzo incansable y dedicación, cuyo trabajo constante ha permitido construir un mejor futuro para nuestra familia.

A mi hermana, Susan, por su compañía, apoyo y el ejemplo de fortaleza y perseverancia que me ha brindado a lo largo de los años.

Bach. FRANK ALBERTO YANAPA VILCA

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y a sus docentes, quienes nos brindaron conocimientos y herramientas esenciales para la conclusión de esta investigación.

Al ingeniero Martin Paucara Rojas, mi asesor, por su invaluable guía y orientación a lo largo de esta investigación.

De igual manera, agradezco a mis amigos por su valiosa ayuda y apoyo. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Muchas gracias.

Bach. EVER NEIL ACERO CHAMBILLA

Agradezco a mis profesores, cuya guía y conocimientos fueron fundamentales para la realización de esta investigación.

Al ingeniero Martin Paucara Rojas, mi asesor, por su invaluable guía y orientación a lo largo de esta investigación.

A mi pareja, Tatiana, por su amor incondicional, su comprensión y las palabras de aliento que me acompañaron en los momentos más desafiantes.

A mis amigos, por su apoyo incondicional, su amistad ha sido un pilar fundamental en mi crecimiento académico y personal.

Bach. FRANK ALBERTO YANAPA VILCA

## ÍNDICE GENERAL

	Página
Dedicatoria .....	iii
Agradecimiento .....	iv
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	15
CAPÍTULO I.....	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.2.1 <i>Problema general</i> .....	19
1.2.2 <i>Problemas específicos</i> .....	19
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	20
1.3.1 <i>En el aspecto teórico</i> .....	20
1.3.2 <i>En el aspecto práctico</i> .....	20
1.3.3 <i>En el aspecto social</i> .....	21
1.3.4 <i>En el aspecto económico</i> .....	21
1.4 OBJETIVOS.....	21
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	21
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	22
1.5 HIPÓTESIS.....	22
1.5.1 <i>Hipótesis general</i> .....	22

1.5.2	<i>Hipótesis específicas</i> .....	23
CAPÍTULO II.....		24
MARCO TEÓRICO.....		24
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....		24
2.2 BASES TEÓRICAS .....		31
2.2.1	<i>Índice de Rugosidad Internacional (IRI)</i> .....	31
2.2.1.1	<i>Escalas y características de IRI</i> .....	31
2.2.1.2	<i>Clasificación de la transitabilidad basado en el IRI</i> .....	32
2.2.2	<i>Tecnologías de medición del IRI</i> .....	33
2.2.3	<i>Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT)</i> .....	33
2.2.3.1	<i>Aplicaciones VANT en la infraestructura vial</i> .....	34
2.2.3.2	<i>Regulación y normativa sobre el uso de los VANT</i> .....	37
2.2.4	<i>Aplicaciones móviles para la medición del IRI</i> .....	38
2.2.5	<i>Comparación de métodos y análisis de costo-beneficio</i> .....	40
2.2.6	<i>Rugosidad de los pavimentos</i> .....	40
2.2.7	<i>Aplicaciones del IRI en la gestión de infraestructura vial</i> .....	41
2.2.8	<i>Ventajas y desventajas de los métodos de medición del IRI</i> .....	41
2.2.9	<i>Impacto económico del IRI</i> .....	42
2.2.10	<i>Consideraciones ambientales en la medición del IRI</i> .....	43
2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.....		43
CAPÍTULO III .....		47
MARCO METODOLÓGICO .....		47
3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....		47

3.1.1	<i>Tipo de investigación</i> .....	47
3.1.2	<i>Diseño de la investigación</i> .....	47
3.1.3	<i>Nivel de la investigación</i> .....	48
3.2	POBLACIÓN Y/O MUESTRA DE ESTUDIO.....	48
3.2.1	<i>Población</i> .....	48
3.2.2	<i>Muestra</i> .....	48
3.3	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	49
3.3.1	<i>Variable dependiente</i> .....	49
3.3.2	<i>Variable independiente</i> .....	50
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	
	51	
3.4.1	<i>Técnicas</i> .....	52
3.4.2	<i>Materiales</i> .....	60
3.4.3	<i>Instrumentos</i> .....	60
3.5	ANÁLISIS DE DATOS.....	61
CAPÍTULO IV .....		67
RESULTADOS .....		67
4.1	RESULTADOS DEL INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA VANT-IRI Y ABAKAL IRI. ....	67
4.1.1	<i>VALOR IRI OBTENIDO CON LA METODOLOGÍA VANT-IRI</i> ....	67
4.1.2	<i>VALOR IRI OBTENIDO CON APLICACIÓN ABAKAL IRI</i> .....	74
4.1.3	<i>GRADO DE SIMILITUD DETERMINADO EN FUNCION DEL VALOR IRI</i> .....	80

4.2 RESUMEN DE RESULTADOS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	82
4.2.1 METODOLOGÍA VANT-IRI, programa PROVAL.....	82
4.2.2 METODOLOGÍA DEL APLICATIVO ABAKAL IRI.....	83
4.2.3 GRADO DE SIMILITUD ENTRE VALORES IRI.....	84
CAPÍTULO V .....	86
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	86
5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL VALOR IRI .....	86
RECOMENDACIONES .....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO I. – MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	99
ANEXO II. REPORTE DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA METODOLOGIA VANT-IRI.....	100
ANEXO III. REPORTE DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROVAL ...	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Zona de investigación carretera TA-635, segundo ingreso a Tacna.....	4
Figura 2 VANT de ala rotatoria.....	20
Figura 3 Aplicación ABAKAL IRI .....	26
Figura 4 Métodos de cálculo. ....	26
Figura 5 Planeamiento de vuelo. ....	40
Figura 6 Instalación del receptor GNSS-Base.....	40
Figura 7 Plantillado.....	41
Figura 8 Toma de datos con el receptor GNSS .....	41
Figura 9 Vuelo del VANT en el área de interes .....	42
Figura 10 Vehículo Sedan utilizado en la investigación para el método ABAKAL IRI.....	43
Figura 11 Posicionamiento en el parabrisas del vehiculo el telefono.....	44
Figura 12 Evaluación del tramo de investigación ABAKAL IRI .....	44
Figura 13 Registro de valores IRI con ABAKAL IRI .....	45
Figura 14 Registro de valores IRI con ABAKAL IRI .....	45
Figura 15 Registro de valores IRI en carril de bajada con ABAKAL IRI.....	46
Figura 16 Modelo digital de elevación DEM.....	47
Figura 17 Preparación del ortomosaico .....	48
Figura 18 Visualización del archivo DEM.....	48
Figura 19 Registro de archivo. Erd para uso del programa PROVAL .....	49

Figura 20	Uso del programa PROVAL.....	50
Figura 21	Generación del perfil longitudinal con el programa PROVAL .....	51
Figura 22	Registro de valores IRI con programa PROVAL. ....	51
Figura 23	Fluctuación del IRI medido en intervalos de 100 m.carril derecho.....	56
Figura 24	Fluctuación del IRI medido en intervalos de 100 m.carril izquierdo ...	59
Figura 25	Variación del IRI cada 100m, en el carril derecho .....	62
Figura 26	Evaluación realizada en el carril derecho empleando ABAKAL IRI...	62
Figura 27	Variación del IRI cada 100m, en el carril izquierdo.....	64
Figura 28	Evaluación realizada en el carril izquierdo empleando ABAKAL IRI	64
Figura 29	Variación del IRI cada 100m. en ambos carriles .....	65
Figura 30	Evaluación de recorrido a lo largo de la calzada mediante el uso de la aplicación ABAKAL .....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Valor IRI (m/km) para su calificación .....	17
Tabla 2 Índice de transitabilidad .....	18
Tabla 3 Usos del VANT en la inspección de pavimentos.....	21
Tabla 4 Operacionalización de variables .....	37
Tabla 5 Valores IRI obtenido con el programa PROVAL en carril derecho .....	55
Tabla 6 Valores IRI obtenido con el programa PROVAL en carril izquierdo.....	58
Tabla 7 IRI calculado mediante ABAKAL carril derecho.....	61
Tabla 8 IRI calculado mediante ABAKAL carril izquierdo .....	63
Tabla 9 Determinación del grado de similitud .....	67
Tabla 10 Resumen de los resultados obtenidos con el programa PROVAL.....	69
Tabla 11 Resumen de los resultados obtenidos con el aplicativo ABAKAL.....	70
Tabla 12 Grado de similitud.....	71

## RESUMEN

La investigación titulada "Análisis comparativo del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento mediante imágenes de dron y el ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 a KM 3+000, Tacna - 2024" se centra en evaluar y comparar dos metodologías para medir la rugosidad del pavimento en un tramo específico de carretera. Se utilizó la tecnología de drones para obtener imágenes que permitieran calcular el índice de rugosidad internacional mediante el programa PROVAL y se contrastaron estos resultados con los obtenidos a través del aplicativo *ABAKAL IRI*. Los resultados revelaron que ambas metodologías son efectivas, aunque el método de dron mostró mayor precisión en las mediciones. Se identificó una correlación significativa entre los valores de IRI obtenidos por ambas metodologías, lo que sugiere que el uso del aplicativo puede ser una alternativa viable y económica para el monitoreo regular del estado del pavimento. Además, se realizó un análisis que posiciona al método de dron como más costoso pero más detallado, mientras que *ABAKAL IRI* se destacó por su accesibilidad y rapidez. Este estudio no solo proporciona información valiosa sobre la calidad de la infraestructura vial en Tacna, sino que también establece un marco para la implementación de tecnologías avanzadas en la gestión y mantenimiento de carreteras, promoviendo prácticas más eficientes en la evaluación del estado del pavimento.

**Palabras Clave:** Índice de rugosidad internacional, Drones, ABAKAL IRI, Evaluación de pavimentos y PROVAL.

## ABSTRACT

The research titled "*Comparative Analysis of the International Roughness Index of Pavement Using Drone Images and ABAKAL IRI on the TA-635 Road, from KM 0+000 to KM 3+000, Tacna - 2024*" focuses on evaluating and comparing two methodologies for measuring pavement roughness over a specific road section. Drone technology was used to capture images, allowing the calculation of the International Roughness Index through the PROVAL software. These results were then compared with those obtained using the ABAKAL IRI application. The findings revealed that both methodologies are effective, although the drone-based method demonstrated higher measurement accuracy. A significant correlation was identified between the IRI values obtained by both methods, suggesting that the application-based approach can serve as a viable and cost-effective alternative for routine pavement condition monitoring. Additionally, the study analyzed cost-effectiveness, positioning the drone method as more expensive but more detailed, while ABAKAL IRI stood out for its accessibility and speed. This study not only provides valuable insights into the quality of road infrastructure in Tacna but also establishes a framework for the implementation of advanced technologies in road management and maintenance, promoting more efficient practices for pavement condition assessment.

**Keywords:** International Roughness Index, Drones, ABAKAL IRI, Pavement Evaluation, PROVAL.

## INTRODUCCIÓN

La calidad de la infraestructura vial es clave para el desarrollo económico y social, impactando en la seguridad y eficiencia del transporte. En este contexto, el índice de rugosidad internacional es esencial para evaluar carreteras. La investigación analizó la carretera TA-635 en Tacna, comparando dos métodos de medición: imágenes de drones (VANT-IRI) y el aplicativo ABAKAL IRI. Su objetivo es determinar la precisión, viabilidad y beneficios operativos de cada técnica para mejorar la gestión vial. La presente investigación está estructurada en cinco capítulos. El Capítulo I introduce el planteamiento del problema, formulando tanto el problema general como los específicos, y establece la justificación e importancia de la investigación. En el Capítulo II, se presenta el marco teórico que sustenta el estudio, abordando conceptos clave relacionados con la metodología VANT-IRI y aplicación ABAKAL IRI. El Capítulo III describe la metodología e la investigación, incluyendo el tipo de investigación y técnicas de recolección de datos. En el Capítulo IV, se analizan los resultados obtenidos a partir de las metodologías VANT-IRI y ABAKAL IRI. Finalmente, el Capítulo V discute los resultados y finalmente ofrece conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en la evaluación de la carretera TA-635 - Tacna.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A nivel mundial, los pavimentos son el elemento más importante de la infraestructura vial permiten el progreso y expansión de cualquier país, ya que constituye el principal medio de transporte de personas y mercancías, facilitando el acceso a diversas regiones, lo que, a su vez, permite atender las necesidades básicas y fomentar el crecimiento de las principales actividades en la población. Por tal motivo, la inspección del estado del pavimento es necesaria para garantizar un desplazamiento seguro y cómodo para el ciudadano.

Con el fin de abordar esta situación, el Banco Mundial (2023) sugiere impulsar la adopción de tecnologías innovadoras, por lo cual está colaborando con los gobiernos nacionales para desarrollar estrategias que permitan una infraestructura y servicio de transporte más eficientes.

En Perú, en los últimos años se ha observado un aumento sostenido en la demanda de transporte público en las principales urbes, Por tal motivo la venta de estos vehículos motorizados ha llevado a un crecimiento significativo del parque automotor en la mayoría de ciudades. Por otro lado, la ausencia de una planificación efectiva y políticas que fomenten el uso del transporte público y masivo dio como resultado el uso envejecido de un parque automotor y una congestión vehicular

excesiva, lo que afecta directamente a la calidad de vida de los habitantes urbanos (Bonifacio, 2015).

Por otro lado, en el Ministerio de Economía y Finanzas (2016), “Se aprecia inversiones de millones de soles destinadas en la rehabilitación, construcción y mejora de las infraestructuras viales por tanto se resalta la importancia de conservar en lo mayor posible su serviciabilidad” (p.25). El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), proporcionó una cifra de 2.008 millones de soles en los periodos del 2011 a 2016 en mejoramientos y rehabilitaciones del pavimento, en ese sentido fue necesario buscar las fallas que se presentaban para determinar la gravedad de cada situación.

En la ciudad de Tacna, la falta de mantenimiento adecuado de las carreteras ha provocado un deterioro significativo en la calidad de los pavimentos, lo que afecta tanto la seguridad como la comodidad de los usuarios. Específicamente, la carretera TA-635 considerado el segundo ingreso a la ciudad de Tacna, hacia el mercado de productores del Fundo Chololo, que atraviesa el complejo monumental del Campo del Alto de la Alianza, presenta una serie de problemas derivados de la rugosidad de la superficie del pavimento, tales como fisuras, hundimientos y baches. Estas condiciones no solo dificultan el tránsito vehicular, sino que también incrementan los costos de operación de los vehículos y el riesgo de accidentes.

Actualmente, la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en Tacna se realiza utilizando métodos tradicionales, como el rugosímetro Merlín, que, si

bien son efectivos, pueden ser costosos y requieren de una implementación compleja y prolongada. Con el avance de la tecnología, el uso de aplicaciones móviles como ABAKAL IRI, y vehículos aéreos no tripulados (VANT), ha surgido como una alternativa prometedora para la medición del IRI, ofreciendo potencialmente un método más eficiente y económico.

Dado el estado crítico de las vías en Tacna y la necesidad de optimizar los recursos para su mantenimiento, surge la interrogante de cómo estos nuevos métodos tecnológicos pueden contribuir a una evaluación más precisa y económica de la rugosidad del pavimento. Es esencial determinar si la implementación de estas tecnologías en la carretera TA-635 puede proporcionar resultados comparables a los métodos tradicionales y si pueden ser integradas efectivamente en los programas de mantenimiento vial.

### **Figura 1**

*Zona de investigación carretera TA-635, segundo ingreso a Tacna*



*Nota.* La figura muestra la zona de investigación de la carretera TA-635.

Fuente: Google Earth (2024)

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cómo varían las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento al ser analizado mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a) ¿Cuál es el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidas mediante imágenes de Drone en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?
- b) ¿Cuál es el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenido mediante el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?
- c) ¿Cuál es el grado de similitud entre los valores Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidos mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La importancia de la investigación sobre el tráfico vehicular de nuestra ciudad, recae sobre la falta de implementación de sistemas de control vehicular, debido a la poca importancia y seriedad que se le da. Con la presente investigación se pretende dar a conocer la importancia que tiene el uso de un modelo digital del cual se pueda extraer datos cuantitativos de nivel de servicio, los que serán de mucha importancia para la toma de decisiones y mejorar el flujo vehicular de nuestra ciudad.

#### ***1.3.1 En el aspecto teórico***

En primer lugar, respecto a la justificación teórica este estudio aportará para otras investigaciones en el campo vial, usando la metodología y resultados como antecedentes de esta investigación. Ahora bien; aplicando sistemas de medición no destructivas preservando así la estructura vial, asimilando el aplicativo ABAKAL IRI como un método novedoso, confiable y eficiente, como también la implementación del Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) con la finalidad de definir la rugosidad del pavimento.

#### ***1.3.2 En el aspecto práctico***

Por otra parte, conforme a la justificación práctica es posible encontrar de manera novedosa resultados reales y exactos. Que ayudaran a encontrar soluciones rápidas a los problemas de rugosidad y servicialidad para la carretera TA-635, al ser un ingreso importante al complejo monumental del Campo de la Alianza y el

segundo ingreso a la ciudad de Tacna. Siendo el IRI un indicador aceptado en la actualidad para determinar el nivel de servicio.

### ***1.3.3 En el aspecto social***

Con respecto a la parte social de la investigación, el resultado tendrá un alcance significativo para solucionar de manera eficiente y eficaz los problemas que presenten la vía estudiada siendo beneficioso para los transeúntes recurrentes en la zona investigada presentando una notoria mejora en la servicialidad.

### ***1.3.4 En el aspecto económico***

Por otro lado, de acuerdo con la justificación económica es imprescindible el avance de nuevas tecnologías y metodologías que empleen equipos de bajo costo y menos complejos que los métodos tradicionales. Estos deben permitir la evaluación de la rugosidad superficial del pavimento sin afectar el tránsito y facilitar tanto su mantenimiento como su conservación.

## **1.4 OBJETIVOS**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Analizar la variación de las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidas mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en precisión y viabilidad en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.

#### **1.4.2 *Objetivos específicos***

- a) Determinar el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenido mediante imágenes de Drone en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.
  
- b) Determinar el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenido mediante el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.
  
- c) Evaluar el grado de similitud entre los valores del Índice de Rugosidad Internacional obtenidos mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.

### **1.5 HIPÓTESIS**

#### **1.5.1 *Hipótesis general***

Las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidas mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI, son herramientas viables para evaluar la rugosidad en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.

### ***1.5.2 Hipótesis específicas***

- a) El valor del índice de rugosidad Internacional obtenido mediante imágenes de Drone presenta variaciones significativas en la carretera TA-635, progresiva Km 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.
  
- b) El valor del índice de rugosidad Internacional obtenido mediante el aplicativo ABAKAL IRI presenta menor dispersión significativa en la carretera TA-635, progresiva Km 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.
  
- c) El grado de similitud entre los valores IRI del pavimento obtenidos mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI se correlacionan significativamente en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

##### a) Antecedente internacional

En Costa Rica, Cruz (2022) realizó su tesis de Maestría “Cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a través de imágenes obtenidas de un Vehículo Aéreo no Tripulado”, cuyo propósito fue desarrollar una estrategia de trabajo para el cálculo del IRI en pavimentos mediante imágenes obtenidas de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). La metodología emplea diferentes modelos de VANT con sensor RGB obteniendo ortofotos a partir de imágenes aéreas tomadas a diferentes alturas: 50, 30, 25, 20 y 15 m, como también el uso de equipos para el levantamiento de información de alta precisión como es el Perfilómetro Láser, Escáner Láser terrestre, Disptick. Toma como equipo de referencia el Perfilómetro Láser, permitiendo así generar y comparar los perfiles longitudinales y valores del IRI. Los resultados demostraron que la altura del vuelo del VANT es independiente para el cálculo del IRI, en cambio las características de la cámara y el GSD (Ground Sample Distance) óptimo son relevantes para obtener valores de IRI adecuados. Concluyendo que, la resolución o GSD óptimo obtenida de las imágenes tomadas por un VANT sea menor o igual a 0.35 cm/píxel para el cálculo del IRI.

Angarita Arias y Sánchez Archila (2017), Colombia: En su trabajo de grado titulado “Comparación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos”, los autores investigaron la precisión y viabilidad del uso de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT) para calcular el IRI en pavimentos. Realizaron una comparación entre esta técnica y métodos tradicionales como la nivelación topográfica y el escaneo láser, concluyendo que los resultados obtenidos mediante fotogrametría presentan diferencias tolerables en comparación con los métodos convencionales. Este estudio sugiere que la fotogrametría es una metodología prometedora para evaluar la rugosidad de los pavimentos, ofreciendo un balance adecuado entre precisión y eficiencia.

Martínez., Lizbeth, Narváez y Santiago (2024) realizaron una investigación en la Universidad Nacional de Chimborazo titulada “Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI”. El propósito del estudio fue evaluar la capacidad de los VANT convencionales para identificar la fase actual del ciclo de vida del pavimento, utilizando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). La metodología consistió en la captura de imágenes aéreas mediante VANT a diferentes alturas y el

procesamiento de dichas imágenes para generar modelos tridimensionales y ortomosaico que permitieron obtener perfiles longitudinales del pavimento.

Para la validación de los datos, se utilizó el equipo Merlín como referencia, reconocido por su precisión en la medición del IRI. Los resultados mostraron que el uso de VANT es una alternativa viable y precisa, con un ajuste del 84% comparado con los equipos tradicionales. Se concluyó que los VANT pueden ofrecer una solución eficiente y económica para la gestión y mantenimiento de pavimentos, resaltando la importancia de optimizar la resolución de las imágenes para obtener resultados precisos del IRI.

#### **b) Antecedente nacional**

En cuanto a nivel nacional, Arce (2021) en su tesis de licenciatura denominada “Cálculo de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) Usando el Aplicativo Abakal Para Smartphone en la Avenida Universitaria del Distrito de Pillco Marca – 2020”, tuvo como objetivo determinar el índice de rugosidad Internacional (IRI) empleando el aplicativo ABAKAL para smartphones. La metodología de la investigación fue de tipo cuantitativo, con un enfoque cuantitativo, alcanza un nivel de investigación descriptiva con un diseño no experimental, y en lo concerniente al corte de la investigación fue transversal. Los resultados obtenidos por el aplicativo ABAKAL contrastado con el método tradicional usando mira y nivel, observamos la diferencia de resultados entre ambos métodos obteniendo un valor promedio de

0.98. Concluyendo que el aplicativo ABAKAL permite determinar la rugosidad del pavimento, permitiendo así clasificar el pavimento estudiado como pesima, con transitabilidad mala.

Ríos Tapia y Torres Contreras (2022), Perú: En su tesis titulada “Índice de rugosidad internacional usando aplicativos móviles para establecer el nivel de servicio de la superficie de rodadura”, los autores investigaron la viabilidad de utilizar aplicaciones móviles como Abakal y TotalPave para medir el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en carreteras peruanas. El estudio se centró en la carretera PE-18, que conecta Huánuco con Tingo María, y comparó los resultados obtenidos con estos aplicativos con los de un perfilómetro láser de clase 1. Los resultados mostraron que, aunque los valores del IRI obtenidos con las aplicaciones móviles fueron más altos que los del perfilómetro láser, estas herramientas presentaron un grado de confiabilidad aceptable (75.52% para TotalPave y 67.35% para Abakal). La investigación concluye que las aplicaciones móviles pueden ser una alternativa viable para la medición del IRI en zonas con limitaciones presupuestales, ofreciendo una herramienta accesible para el monitoreo y mantenimiento de las carreteras.

Del mismo modo, para Goicochea y Ibáñez (2022), en su tesis de licenciatura, presenta el siguiente título: “Análisis Comparativo Entre el Sistema Roadroid y el

Procesamiento Fotogramétrico Para Realizar el Diagnostico IRI de la Av. Enrique Meiggs, Chimbote – 2020” presentó como objetivo evaluar el pavimento bajó el Índice de Rugosidad Internacional calculado con el aplicativo Roadroid y el procesamiento fotogramétrico comparando ambos métodos para luego evidenciar los parámetros de costo, rendimiento y el valor obtenido. La metodología que presenta la investigación es de tipo aplicada, diseño no experimental de corte transversal, evaluando una vía de pavimento flexible para luego comparar y verificar la confiabilidad de ambos métodos. Los resultados obtenidos de ambos instrumentos de medición presentaron en el carril 1,2,3 y 4 respectivamente valores promedio de IRI en cada sistema Roadroid 2.43, 2.13, 2.40, 2.21 m/km, por último, el procesamiento fotogramétrico 2.40, 2.06, 2.16, 2.35 m/km para luego conocer el grado de similitud de 81%, concluyendo así que ambos métodos son eficientes variando en el costo y rendimiento, siendo el proceso fotogramétrico más preciso que el sistema Roadroid, pero más costoso.

**c) Antecedente local**

Finalmente, para Chura y Flores (2024), en su tesis de investigación “Análisis del Índice de Rugosidad Internacional del Pavimento Flexible Mediante el Rugosímetro de Merlín y la Aplicación Abakal IRI en la Av. Mariano Necochea, Tacna – 2023” (Tesis de licenciatura), se enfocó en determinar el IRI mediante el rugosímetro de MERLIN y el aplicativo ABAKAL del pavimento de la avenida

analizada. La investigación cuenta con una metodología de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, nivel descriptivo, diseño no experimental y corte transversal. Los resultados para el carril 1 se dividieron en tramos 01, 02, 03, 04 de subida y bajada obteniendo valores de IRI de 5.046, 5.849, 6.835 y 7.328 m/km de subida y 5.799, 7.491, 6.480, 6.718 m/km de bajada respectivamente por medio del rugosímetro de MERLÍN, mientras el aplicativo ABAKAL IRI dio un promedio de 6.033 m/km de subida y 6.049 m/km de bajada. Luego analizó el porcentaje de similitud de ambos instrumentos de medición presentando un valor de 94.18 %. Finalmente, se presentó el estado vial como “MUY MALO” debido al valor de IRI obtenido en ambos métodos con una transitabilidad “MALA” por el Índice de Servicialidad calculado.

Choque y Pilco (2023), en su tesis titulada “Análisis comparativo entre aplicación de rugosímetro de Merlín y aplicativo celular para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional en la Avenida Collpa tramo Óvalo Cuzco – Avenida Educadores, Tacna – 2023”, los autores realizaron una evaluación de la rugosidad de un tramo específico de la Avenida Collpa en Tacna, Perú. Compararon dos métodos de medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI): el rugosímetro de Merlín y la aplicación móvil Roadroid. Los resultados mostraron que ambos métodos arrojaron valores de IRI similares, clasificando el estado del pavimento como "malo" en el tramo evaluado. Esta investigación respalda la utilidad de las aplicaciones móviles como herramientas viables y accesibles para la evaluación de la rugosidad vial, especialmente en contextos donde los recursos para el

mantenimiento de carreteras son limitados.

Curasi Trujillano (2024), Perú: En su tesis titulada “Determinación de la transitabilidad vehicular mediante el uso de vehículos no tripulados y teléfonos inteligentes en la carretera PE-1S, tramo: Emp. TA-644 a Emp. TA-645, Tacna - 2022”, el autor investigó el uso de tecnologías modernas para evaluar la transitabilidad vehicular. En este estudio, se implementaron metodologías alternativas utilizando vehículos no tripulados (drones) y aplicaciones móviles para la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Condición del Pavimento (PCI). La investigación se realizó en un tramo de 11.6 km de la carretera PE-1S, y los resultados indicaron que el uso de estas tecnologías permite obtener datos precisos y confiables con una reducción significativa en tiempo y costos en comparación con los métodos tradicionales. El autor concluyó que estas metodologías son viables y efectivas para la evaluación y gestión del mantenimiento de vías, especialmente en tramos largos y con alta carga vehicular.

## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es un estándar globalmente reconocido utilizado para medir la calidad de la superficie de rodadura de los pavimentos. Este índice cuantifica la rugosidad longitudinal de una carretera, expresada en metros por kilómetro (m/km), y es un indicador clave para evaluar el confort y la seguridad del tránsito vehicular. Según Cruz (2020), “El IRI es una métrica fundamental para determinar el estado de los pavimentos, lo que permite a las autoridades realizar un mantenimiento predictivo y correctivo eficiente” (p.12).

#### 2.2.1.1 Escalas y características de IRI

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se expresa en unidades de metros por kilómetro y oscila entre 0 y 20 metros por kilómetro. Una calificación de 0 metros por kilómetro indica una vía excelente, mientras que una calificación de 20 metros por kilómetro indica una vía extremadamente difícil de transitar.

**Tabla 1**

*Valor IRI (m/km) para su calificación*

País	Bueno	Regular	Malo	Rechazo	Recepción
EE.UU	< 2.4	2.4 – 4.7	> 4.7		
España	0 – 2.5	2.5 – 4.0	> 5.0	2.85	1.85
Chile	0 – 3.0	3.0 – 3.6	> 4.0	2.50	2.5
Honduras	< 3.5	3.5 – 6.0	> 6.0		
Uruguay	< 3.9	4.0 – 6.0	> 4.6		
Perú	< 2.5	2.5 – 4.0	> 4.0	> 2.5	

*Nota. Tabla que muestra los IRI utilizados para pavimentos nuevos (2002)*

### **2.2.1.2 Clasificación de la transitabilidad basado en el IRI**

La transitabilidad se refiere a cómo percibe el usuario el nivel de servicio que ofrece un pavimento, por lo que es importante recopilar sus opiniones para evaluar la calidad del pavimento. Sin embargo, la medición de la calidad de un pavimento presenta dificultades conceptuales, ya que depende de la forma en que se realice la evaluación, ya sea centrándose en su condición estructural o funcional, e incluso si se aborda el problema sin el uso de herramientas o métodos de evaluación estandarizados.

Para evaluar la transitabilidad del pavimento, se utiliza el PSI, que determina la condición funcional o rendimiento actual del pavimento en servicio. Este concepto fue desarrollado por técnicos de pruebas en carretera de la AASHO en 1957. El PSI utiliza una escala de 0 a 5 para evaluar los valores, donde las condiciones óptimas corresponden al valor máximo (Pomasonco de la Cadena, 2010).

**Tabla 2**  
*Índice de transitabilidad*

Valor	Calidad
5	Muy buena
4	Muy buena
3	Buena
2	Regular
1	Mala
0	Pésima

*Nota.* La tabla muestra la escala del índice de transitabilidad, tomado de la Guía AASHTO.

### 2.2.2 Tecnologías de medición del IRI

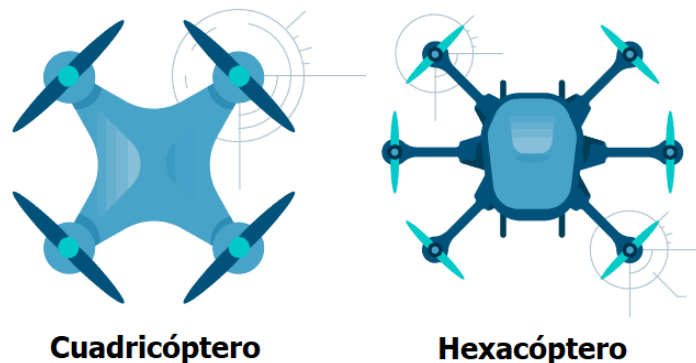
Las tecnologías para la medición del IRI han evolucionado significativamente, desde métodos tradicionales como los rugosímetros mecánicos hasta el uso de tecnologías avanzadas como los vehículos aéreos no tripulados (VANT) y aplicaciones móviles. El estudio de Angarita y Sánchez (2017) en Colombia comparó la fotogrametría mediante VANT con métodos convencionales como la nivelación topográfica y el escaneo láser, demostrando que la fotogrametría puede ofrecer un balance adecuado entre precisión y eficiencia.

### 2.2.3 Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Un vehículo aéreo No Tripulado (VANT) se define como 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 pre programadas para realizar alguna tarea específica. (Greenwood & Zekkos, 2019).

#### Figura 2

*VANT de ala rotatoria*



*Nota.* La figura muestra la VANT de ala rotatoria. Fuente: García, Muñoz y Albares (2018).

Los VANT han emergido como una herramienta innovadora en la ingeniería civil, especialmente para la recolección de datos de alta precisión en la evaluación de infraestructuras viales. Según Cruz (2020), la implementación de VANT equipados con sensores RGB permite la captura de ortofotos a diferentes alturas, lo que es esencial para generar modelos digitales del terreno y calcular el IRI con alta precisión. La investigación realizada por Curasi Trujillano (2024) en Tacna aplicó estas tecnologías para evaluar la transitabilidad vehicular en la carretera PE-1S, concluyendo que los VANT no solo proporcionan datos precisos, sino que también son más eficientes en términos de tiempo y costo comparados con los métodos tradicionales.

#### ***2.2.3.1 Aplicaciones VANT en la infraestructura vial***

El empleo de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en proyectos de infraestructura vial abarca una amplia variedad de aplicaciones, que pueden implementarse a lo largo de todas las etapas del proyecto. Una de las utilidades más destacadas es la generación de modelos digitales de superficie y curvas de nivel para estudios topográficos. Además, los VANT son herramientas eficaces para la

inspección de estructuras como puentes, muros de contención, taludes, obras de drenaje y pavimentos.

En el ámbito de los pavimentos, diversas investigaciones han explorado el uso de los VANT como herramienta para la identificación y evaluación de deterioros, empleando distintos tipos de sensores. La tabla 3 proporciona una revisión bibliográfica sobre este tema.

**Tabla 3**

*Usos de los VANT en la inspección de pavimentos*

Referencia	Tipo de sensor	Resumen
Zhu et al. (2021)	RGB	Se emplean tres algoritmos avanzados de detección de objetos, Faster R-CNN, YOLOv3 y YOLOv4, para entrenar un conjunto de datos orientado a la identificación de deterioros en el pavimento.
Saad y Tahar (2019)	RGB	El sistema ofrece una medición precisa y detallada de los deterioros utilizando imágenes capturadas por VANT, lo que optimiza la eficiencia en el monitoreo de las condiciones de la carretera.
Al Qurishee (2019)	RGB	Se plantea una solución en tiempo real y económica para evaluar el estado del pavimento, utilizando aprendizaje automático y redes neuronales, lo que permite una gestión más eficiente y rentable.
Li et al. (2019)	LIDAR	Este estudio analiza la factibilidad de detectar el deterioro del pavimento utilizando un VANT operando a baja altitud equipado con un sensor LIDAR
Tan y Li (2019)	RGB	Las imágenes capturadas por el VANT se emplean para reconstruir modelos tridimensionales (3D) de las carreteras, a partir de los cuales se detectan automáticamente los deterioros en el pavimento mediante el algoritmo desarrollado

Zhang et al. (2019)	RGB	Se evalúan algoritmos para reconocer distintos tipos de grietas, como las longitudinales, transversales y de tipo piel de lagarto, a partir de imágenes capturadas por el VANT.
Leonardi et al. (2018)	RGB	Se realiza una evaluación del desempeño de un sistema VANT en la obtención rápida y autónoma de datos tridimensionales (3D) destinados a la identificación de deterioros en el pavimento
Inzerillo et al. (2018)	RGB	El propósito de este documento es validar el empleo de tecnologías innovadoras y económicas para el análisis de pavimentos, evaluando su capacidad para optimizar la automatización y la precisión en la detección de deterioros
Pan et al. (2018)	MULTIESPECTRAL	Se utilizan imágenes multiespectrales capturadas por VANT para diferenciar entre pavimento en buen estado y áreas con deterioro. Para ello, se aplican algoritmos de aprendizaje automático, como redes neuronales artificiales.
Wu et al. (2018)	RGB/INFRARROJO	Se plantea un método para la evaluación de pavimentos y puentes mediante el empleo de imágenes de alta resolución y sensores infrarrojos capturados por un VANT, complementado con la aplicación de redes neuronales
Ersoz et al. (2017)	RGB	Se realiza la identificación de grietas en pavimentos rígidos mediante el análisis de imágenes capturadas por VANT, procesadas con técnicas de aprendizaje automático, con el propósito de monitorear las condiciones del pavimento
Pan et al. (2017)	RGB	Se utilizan imágenes digitales del pavimento capturadas por VANT junto con algoritmos como KNN, SVM, ANN y RF para diferenciar entre pavimentos en buen estado y aquellos con grietas o baches
Joo (2017)	RGB	Se plantea un método para identificar la superficie del pavimento mediante la configuración de regiones de interés (ROI) y la aplicación del método de detección de bordes Canny, utilizando imágenes capturadas por un VANT

Nota. La tabla presenta la viabilidad del uso de los VANT para la inspección de los pavimentos en especial el uso de los sensores el cual corresponde al RGB por su accesibilidad.

### ***2.2.3.2 Regulación y normativa sobre el uso de los VANT***

En el Perú, el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), también conocidos como drones, está regulado por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). La DGAC establece normativas para garantizar la seguridad aérea, el control del espacio aéreo y el uso adecuado de estos dispositivos. Una de las principales regulaciones es el Reglamento de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAD), que establece los requisitos operacionales para el uso de drones, como la necesidad de contar con una autorización para vuelos comerciales y el cumplimiento de ciertas restricciones en cuanto a altitud, zonas de vuelo y horarios. Esta normativa asegura que los VANT operen de manera segura, minimizando los riesgos para la aviación convencional y otras actividades (MTC, 2018).

Adicionalmente, el Perú ha implementado una regulación que exige la inscripción y certificación de los VANT que se utilizan para fines comerciales o profesionales. Los operadores deben registrar sus aeronaves ante la DGAC y cumplir con procedimientos de seguridad que incluyen la capacitación adecuada del piloto, así como el cumplimiento de los estándares técnicos para el manejo del dron.

Además, se debe contar con un seguro de responsabilidad civil que cubra posibles daños a terceros. Estas normativas están en constante actualización debido al rápido avance de la tecnología y la necesidad de adaptarse a nuevos desafíos en el ámbito de la seguridad aérea.

En cuanto a las restricciones geográficas, la normativa peruana establece zonas restringidas para el vuelo de drones, como áreas cercanas a aeropuertos, zonas militares y lugares con gran concentración de personas. También se prohíbe el uso de VANT en vuelos nocturnos o en condiciones meteorológicas que puedan comprometer la seguridad. Estas restricciones buscan evitar accidentes y preservar el orden público, asegurando que los VANT sean utilizados de manera responsable. El cumplimiento de estas normativas es esencial para la operatividad de los VANT en diversas aplicaciones, como la inspección de pavimentos, la cartografía aérea y otras actividades industriales en el país.

#### ***2.2.4 Aplicaciones móviles para la medición del IRI***

En los últimos años, las aplicaciones móviles han ganado popularidad como herramientas viables para la medición del IRI debido a su accesibilidad y bajo costo. Arce (2021) en Huánuco evaluó la precisión del aplicativo ABAKAL IRI, contrastando los resultados obtenidos con métodos tradicionales y concluyendo que, aunque las aplicaciones móviles tienden a subestimar o sobreestimar el IRI, ofrecen una alternativa confiable y eficiente para la evaluación rápida de

pavimentos.

Para el cálculo del IRI la metodología del ABAKAL IRI, utilizan los sensores de vibración y el GPS del dispositivo Android donde generan gráficos e informes del valor de IRI cada 100 metros y se permite la calibración. El método empleado es el modelo de cuarto de carro, que simula la rueda trasera de un vehículo mediante masas, resortes y amortiguadores con coeficientes estándar.

Este modelo representa la masa del vehículo, la masa de la rueda, el amortiguador y la flexibilidad del neumático para medir los movimientos verticales, se pueden atribuir a la rugosidad en el perfil longitudinal.

### Figura 3

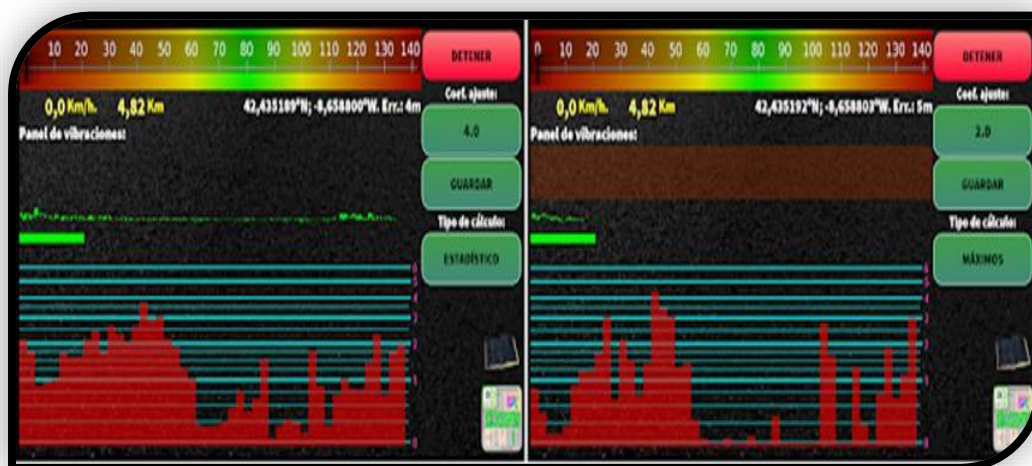
*Aplicación ABAKAL IRI*



*Nota.* La figura muestra la aplicación ABAKAL IRI. Fuente: Paucara y Roja (2024).

## Figura 4

*Métodos de cálculo.*



*Nota.* La figura muestra la aplicación ABAKAL IRI. Fuente: ABAKAL IRI (2020).

### 2.2.5 Comparación de métodos y análisis de costo-beneficio

El análisis comparativo entre diferentes métodos de medición del IRI es esencial para determinar su eficiencia y aplicabilidad en distintos contextos.

Ríos y Torres (2022) llevaron a cabo un estudio en la carretera PE-18, comparando el uso de aplicaciones móviles con un perfilómetro láser de clase 1. Sus resultados sugieren que, aunque los métodos basados en aplicaciones móviles presentan un menor grado de precisión, son una alternativa viable en contextos de limitaciones presupuestales, con una diferencia aceptable en la confiabilidad de los datos obtenidos.

### 2.2.6 Rugosidad de los pavimentos

La rugosidad de los pavimentos es un factor crítico que afecta tanto la seguridad como el confort de los usuarios de las vías. Este parámetro se refiere a

las irregularidades de la superficie del pavimento que influyen en la dinámica del vehículo, lo que puede resultar en una conducción menos eficiente y más peligrosa. La medición de la rugosidad se realiza a través del IRI, que es considerado el estándar mundial. Según Flores (2024), la rugosidad se mide utilizando herramientas como el rugosímetro de Merlín y aplicaciones como ABAKAL IRI, que permiten clasificar el estado del pavimento y definir acciones de mantenimiento preventivo o correctivo

### ***2.2.7 Aplicaciones del IRI en la gestión de infraestructura vial***

El IRI no solo sirve como un indicador de la calidad del pavimento, sino que también es utilizado en la planificación y gestión de infraestructuras viales. Goicochea y Ibáñez (2020) destacan que:

El IRI es un componente esencial en los sistemas de gestión de pavimentos (PMS), donde se utiliza para priorizar las intervenciones de mantenimiento y rehabilitación. Estos sistemas permiten a las autoridades planificar de manera más eficiente los recursos, basándose en datos cuantitativos del estado de la infraestructura. (p.49)

### ***2.2.8 Ventajas y desventajas de los métodos de medición del IRI***

Cada método de medición del IRI tiene sus propias ventajas y desventajas, lo que afecta su aplicabilidad en diferentes contextos. Los métodos tradicionales,

como el uso del rugosímetro de Merlín, son altamente precisos, pero requieren de una inversión significativa en términos de tiempo y recursos humanos. Por otro lado, las tecnologías modernas, como las aplicaciones móviles y los VANT, ofrecen soluciones más rápidas y menos costosas, pero pueden sacrificar algo de precisión. Choque y Pilco (2023) compararon estos métodos en un tramo de la Avenida Collpa en Tacna, concluyendo que, si bien las aplicaciones móviles presentan resultados aceptables, su precisión puede variar dependiendo del contexto y las condiciones de la vía.

### ***2.2.9 Impacto económico del IRI***

El IRI tiene un impacto directo en la economía, tanto a nivel de mantenimiento de carreteras como en los costos operativos de los vehículos. Un pavimento con un alto valor de IRI puede aumentar significativamente los costos de operación de los vehículos debido al mayor consumo de combustible, desgaste de neumáticos y posibles daños mecánicos. Bonifaz (2015) sugiere que la mejora de la calidad de los pavimentos, medida a través del IRI, puede resultar en ahorros significativos tanto para los usuarios como para las autoridades responsables del mantenimiento de las vías.

### ***2.2.10 Consideraciones ambientales en la medición del IRI***

Las tecnologías emergentes para la medición del IRI también han sido evaluadas en términos de su impacto ambiental. El uso de los VANT, por ejemplo, tiene una huella de carbono relativamente baja en comparación con los métodos tradicionales que requieren vehículos pesados y largas jornadas de trabajo en campo. Además, la posibilidad de realizar evaluaciones más frecuentes y precisas permite a las autoridades implementar estrategias de mantenimiento preventivo, lo que puede reducir el impacto ambiental a largo plazo, como lo argumentan Rodríguez y Pérez (2017).

## **2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS**

1. Índice de Rugosidad Internacional (IRI): Medida estándar utilizada para cuantificar la irregularidad longitudinal de la superficie de un pavimento. Es expresada en metros por kilómetro (m/km) y se emplea para evaluar la comodidad y seguridad del tránsito vehicular.
2. Rugosidad: Irregularidad en la superficie del pavimento que afectan la dinámica vehicular. Se mide a través del IRI y es un parámetro clave para evaluar el estado de las vías y planificar su mantenimiento.
3. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): Dispositivos aéreos controlados de manera remota, utilizados en la recopilación de datos de alta precisión

para la evaluación de infraestructuras viales, especialmente en la medición del IRI.

4. **Aplicativo ABAKAL IRI:** Herramienta móvil utilizada para medir el IRI mediante el acelerómetro del teléfono inteligente. Ofrece una alternativa accesible y de bajo costo para la evaluación rápida de pavimentos.
5. **Perfilómetro Láser:** Dispositivo utilizado para generar un perfil longitudinal del pavimento y calcular el IRI con alta precisión. Es considerado un estándar de referencia en la medición de la rugosidad del pavimento.
6. **Fotogrametría:** Técnica para obtener mediciones precisas a partir de imágenes fotográficas. En ingeniería vial, se utiliza para generar modelos digitales del terreno y calcular el IRI, especialmente cuando se realiza con los VANT.
7. **Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS):** Herramienta que utiliza indicadores como el IRI para la planificación y gestión del mantenimiento de carreteras, optimizando la asignación de recursos y priorizando intervenciones.
8. **Análisis Comparativo:** Método utilizado para evaluar y comparar los resultados obtenidos mediante diferentes técnicas de medición del IRI, como VANT, aplicaciones móviles y métodos tradicionales.

9. Método No Destructivo: Técnica de evaluación que no causa daño a la estructura del pavimento. El uso de los VANT y aplicaciones móviles para medir el IRI son ejemplos de métodos no destructivos.
10. Ground Sample Distance (GSD): Distancia entre el centro de dos píxeles adyacentes en una imagen tomada desde el aire. Es un factor crítico en la precisión de las mediciones obtenidas mediante los VANT.
11. Tramos de Pavimento: Segmentos específicos de una carretera que son evaluados individualmente para determinar su IRI y otros parámetros de calidad de la superficie.
12. Costos de Implementación: Gastos asociados a la aplicación de diferentes métodos de medición del IRI. Incluye el análisis de costos de equipos, tiempo y recursos humanos necesarios para cada método.
13. Tiempo de Procesamiento: Duración necesaria para analizar y obtener los resultados de la medición del IRI, dependiendo del método utilizado, como los VANT o aplicaciones móviles.
14. Similitud de Resultados: Grado en que los valores del IRI obtenidos por diferentes métodos coinciden o son comparables. Es un criterio importante en el análisis de la viabilidad de nuevos métodos.

15. Evaluación Vial: Proceso de inspección y análisis del estado del pavimento para determinar la necesidad de intervenciones de mantenimiento o rehabilitación, utilizando indicadores como el IRI.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

Aplicada, se orienta a la solución de problemas concretos y prácticos, en este caso, la recopilación y análisis de datos numéricos sobre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), lo que permite realizar comparaciones y evaluaciones objetivas entre las mediciones obtenidas por los drones y el aplicativo ABAKAL IRI. Según Hernández Sampieri et al. (2014), la investigación aplicada busca generar conocimientos que pueden ser utilizados de manera inmediata para resolver situaciones específicas. Este estudio, busca comparar las diferencias y semejanzas en las mediciones de IRI entre dos métodos distintos, analizando su precisión, viabilidad y consistencia, lo que lo encuadra en este tipo de investigación.

##### **3.1.2 Diseño de la investigación**

El diseño de investigación es no experimental con enfoque cuantitativo, donde: El diseño no experimental se caracteriza por la observación de variables en su estado natural, sin intervención directa o manipulación de las mismas (Hernández Sampieri et al., 2014). En este caso, la investigación se realiza en el entorno real del fenómeno estudiado (carretera TA-635), permitiendo observar el comportamiento de cada método de medición en condiciones reales y no en un

entorno de laboratorio.

### **3.1.3 Nivel de la investigación**

Se considera Nivel descriptivo porque describe las características del IRI en la carretera TA-635, así como las propiedades de cada método de medición (drones y ABAKAL IRI), tales como precisión, tiempo y costos. Según Tamayo y Tamayo (2005), la investigación descriptiva permite documentar y caracterizar aspectos como las condiciones de una carretera, el estado de un pavimento o los valores de rugosidad superficial (por ejemplo, el Índice de Rugosidad Internacional - IRI) sin buscar relaciones causales. Este nivel es fundamental cuando se requiere un diagnóstico inicial o una base de datos detallada que pueda servir para estudios más profundos o para la toma de decisiones informadas en proyectos de infraestructura. (Maldonado, 2015)

## **3.2 POBLACIÓN Y/O MUESTRA DE ESTUDIO**

### **3.2.1 Población**

Toda la extensión del pavimento de la carretera TA-635 en la región de Tacna.

### **3.2.2 Muestra**

Un tramo específico de la carretera TA-635, comprendido entre el KM 0+000 y el KM 3+000. La muestra se selecciona por conveniencia y se divide en

segmentos de análisis para evaluar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en varias secciones dentro del tramo.

### **3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

#### **3.3.1 Variable dependiente**

##### **ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL**

- Definición conceptual:

El IRI es un estándar internacional que mide la rugosidad superficial de las carreteras, expresado en metros por kilómetro (m/km). Este índice se usa para evaluar la calidad de la superficie vial y el confort de los usuarios durante la conducción.

- Definición operacional:

En esta investigación, el IRI se midió en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, utilizando dos métodos: imágenes capturadas por drones y el aplicativo Abakal IRI. Los valores del IRI obtenidos se registran y analizan para identificar variaciones y consistencias entre ambos métodos.

##### Indicadores

- Valor promedio IRI
- Distribución de valores IRI por tramo
- Clasificación del estado del pavimento según IRI

### **3.3.2 Variable independiente**

#### **IMÁGENES DE DRONE Y ABAKAL IRI**

Definición conceptual:

La herramienta de medición del IRI se refiere a los dispositivos y métodos empleados para obtener el valor del Índice de Rugosidad Internacional de una superficie de rodadura, que pueden incluir tecnologías avanzadas como drones y aplicativos móviles especializados.

▪ Definición operacional:

En esta investigación, las herramientas de medición incluyen un Drone equipado con una cámara de alta resolución para capturar imágenes del pavimento y el aplicativo ABAKAL IRI instalado en un dispositivo móvil. Cada herramienta se utilizó para medir el IRI en el mismo tramo de carretera, con el fin de comparar los resultados en cuanto a precisión, costo y viabilidad operativa.

Indicadores

- Resolución de imagen.
- Frecuencia de muestreo
- Frecuencia y precisión en el cálculo del aplicativo

**Tabla 4**

### *Operacionalización de variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES
Imágenes de Drone y ABAKAL IRI	Métodos utilizados para obtener el IRI del pavimento en el tramo de la carretera TA-635 (Drone y ABAKAL IRI).	Adquisición de datos	Resolución de imagen
		Precisión en medición	Frecuencia de muestreo
		Viabilidad operativa	Frecuencia y precisión en el cálculo del aplicativo
Índice de Rugosidad Internacional	Medida de la rugosidad superficial del pavimento, expresada en m/km, utilizada para evaluar la calidad de la superficie vial en el tramo analizado	Valor IRI	Valor promedio IRI
		Consistencia de los resultados	Distribución de valores IRI por tramo
		Interpretación de la rugosidad	Clasificación del estado del pavimento según IRI

*Nota.* En la tabla se muestra las dos variables con sus respectivas dimensiones y sus indicadores

### **3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

La recolección precisa y eficiente de datos es fundamental para evaluar y garantizar la calidad y seguridad de las infraestructuras viales. Las técnicas e instrumentos de recolección de datos juegan un papel clave en la medición de variables cruciales, como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento, que es un indicador esencial de la condición y confort de las superficies de rodadura.

En este contexto, el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución y aplicativos móviles como ABAKAL IRI representan innovaciones significativas. Los drones permiten capturar imágenes detalladas desde una perspectiva aérea, facilitando el análisis y monitoreo de grandes extensiones de pavimento sin interrumpir el tráfico. Por su parte, el aplicativo ABAKAL IRI, diseñado para dispositivos móviles, emplea algoritmos de procesamiento de datos para calcular el IRI en tiempo real, ofreciendo una alternativa rápida y accesible. Estas herramientas proporcionan métodos complementarios para la evaluación del IRI, permitiendo comparaciones en términos de precisión, viabilidad operativa y costo, aspectos esenciales para seleccionar el mejor método de medición en función de las necesidades y características de cada proyecto vial.

#### **3.4.1 Técnicas**

1. Inspección y Monitoreo: Se realizarán mediciones directas del IRI utilizando drones equipados con cámaras de alta resolución y el aplicativo ABAKAL IRI.
2. Toma de Imágenes y Análisis de Datos: Las imágenes de la superficie del pavimento se capturan mediante un vehículo aéreo no tripulado (Drone), que vuela sobre el tramo seleccionado, y posteriormente se analizan utilizando software especializado en procesamiento de imágenes para calcular el IRI.

## **Evaluación de campo**

El uso del dron se centra en la obtención de imágenes de alta resolución y precisión, con las cuales se generará un modelo detallado de la superficie del pavimento para calcular posteriormente el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

Los pasos metodológicos son los siguientes:

### **1. Planificación del levantamiento:**

- Identificar y segmentar el tramo de la carretera que será evaluado, considerando progresivas específicas (ejemplo: KM 0+000 a KM 3+000).
- Diseñar el plan de vuelo con software especializado, configurando el dron para capturar imágenes en rutas paralelas con superposición (entre 60%-80%) para asegurar la continuidad y la cobertura total.
- Establecer la altura de vuelo, idealmente entre 10 y 20 metros, dependiendo de las características del terreno y del nivel de detalle requerido.

### **2. Ejecución del vuelo:**

- Realizar vuelos en condiciones de luz óptima (preferiblemente en la mañana) para minimizar sombras y reflejos en las imágenes.
- Utilizar puntos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés) georreferenciados mediante GPS de alta precisión, lo cual permitirá ajustar el modelo topográfico a coordenadas reales.

El equipo de trabajo estuvo conformado por:

- Bach. Ever Neil Acero Chambilla

- Bach. Frank Alberto Yanapa Vilca
- 01 especialista operador de Drone

### **Figura 5**

*Planeamiento de vuelo*



*Nota.* En la figura se muestra la planificación de vuelo en la distancia de vuelo.

### **Figura 6**

*Instalación del receptor GNSS - Base*



*Nota.* En la figura se muestra el posicionamiento del receptor Base GNSS.

**Figura 7**  
Plantillado



*Nota.* En la figura se muestra la colocación de las plantillas en el pavimento

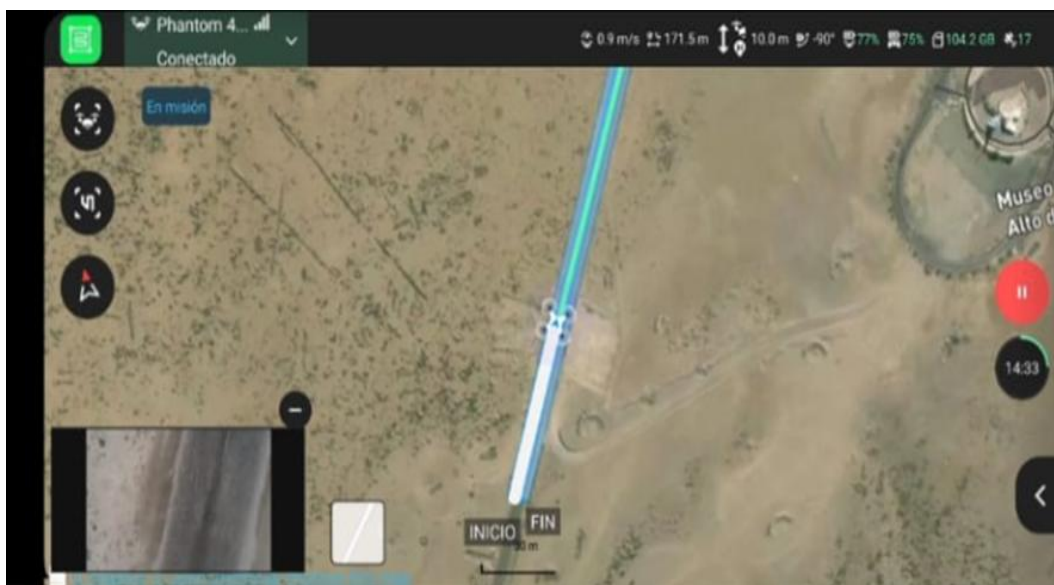
**Figura 8**  
*Toma de datos con el receptor GNSS*



*Nota.* En la figura se muestra la toma de datos con el receptor móvil GNSS.

## Figura 9

*Vuelo del VANT en el área de interés*



*Nota.* En la figura se muestra el vuelo del VANT en la zona de investigación con el PIX4D PRO

El aplicativo ABAKAL IRI se utiliza para obtener datos de aceleración en tiempo real durante un recorrido vehicular, proporcionando una evaluación complementaria y comparativa del IRI. La metodología incluye los siguientes pasos:

1. Preparación del dispositivo:
  - Instalar el aplicativo Abakal IRI en un smartphone con sensores de aceleración calibrados.
  - Configurar los parámetros iniciales, como el tipo de pavimento, velocidad de recorrido (entre 30-50 km/h, como recomienda el fabricante) y especificar la progresiva del tramo a evaluar.
2. Montaje del equipo:

- Colocar el smartphone firmemente en el interior del vehículo, preferiblemente en un soporte fijo cerca del eje longitudinal del vehículo.
  - Verificar la nivelación del dispositivo para garantizar la precisión en la captura de datos.
3. Recorrido del tramo:
- Conducir el vehículo de manera constante y a una velocidad moderada, evitando frenadas o aceleraciones bruscas que puedan alterar los datos de aceleración.
  - Registrar las mediciones de aceleración en los tres ejes (X, Y, Z) durante el recorrido.

**Figura 10**

*Vehículo Sedan utilizado en la investigación para el método ABAKAL IRI*



*Nota.* En la figura se muestra vehículo usado para determinar cada 100 el valor del IRI en m/km

**Figura 11**

Posicionamiento en el parabrisas del vehículo el teléfono inteligente



*Nota.* En la figura se visualiza la configuración del teléfono inteligente para inicio de prueba.

**Figura 12**

Evaluación del tramo de investigación utilizando ABAKAL IRI



*Nota.* En la figura se visualiza la evaluación en el carril de subida.

**Figura 13**

Registro de valores IRI con ABAKAL IRI



*Nota.* En la figura se visualiza la evaluación en el carril de bajada.

**Figura 14**

Registro de valores IRI con ABAKAL IRI



*Nota.* En la figura se visualiza la evaluación en el carril de bajada.

## Figura 15

Registro de valores IRI con ABAKAL IRI carril de bajada



*Nota.* En la figura se visualiza la evaluación en el carril de bajada.

### 3.4.2 Materiales

- Drone
- Aplicativo ABAKAL IRI
- PC con Software de análisis.
- Vehículo de apoyo.

### 3.4.3 Instrumentos

- Cámara de alta resolución en el Drone.
- Aplicativo ABAKAL IRI
- Registro de datos en campo

### 3.5 ANÁLISIS DE DATOS

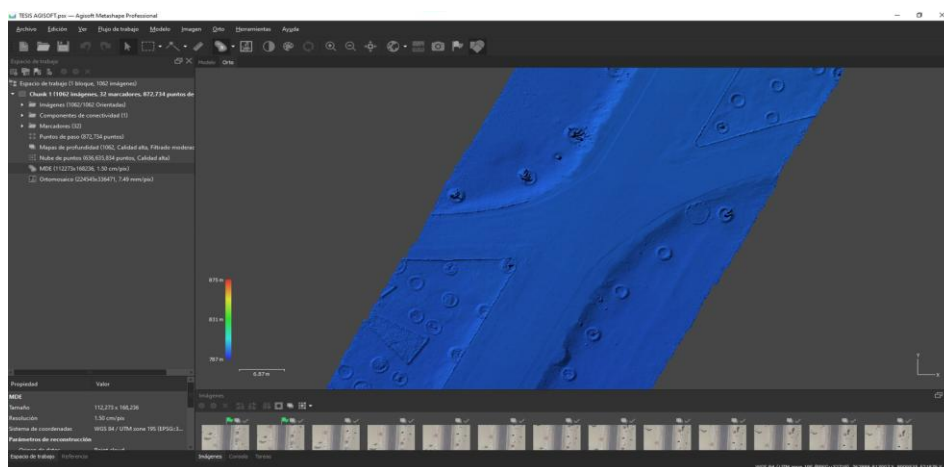
El análisis de datos garantiza que se cumplan los objetivos de la investigación y se respondan las hipótesis planteadas, además de proporcionar conclusiones sólidas y recomendaciones aplicables, la utilización del Drone genera:

#### Procesamiento de imágenes:

- Usar software de fotogrametría para generar:
  - Un modelo digital de elevación (DEM).
  - Un modelo digital de terreno (DTM), eliminando vegetación y objetos externos.
  - Ortomosaicos de alta resolución.
- Exportar datos topográficos (perfiles longitudinales y transversales) necesarios para calcular el IRI mediante el programa PROVAL.

**Figura 16**

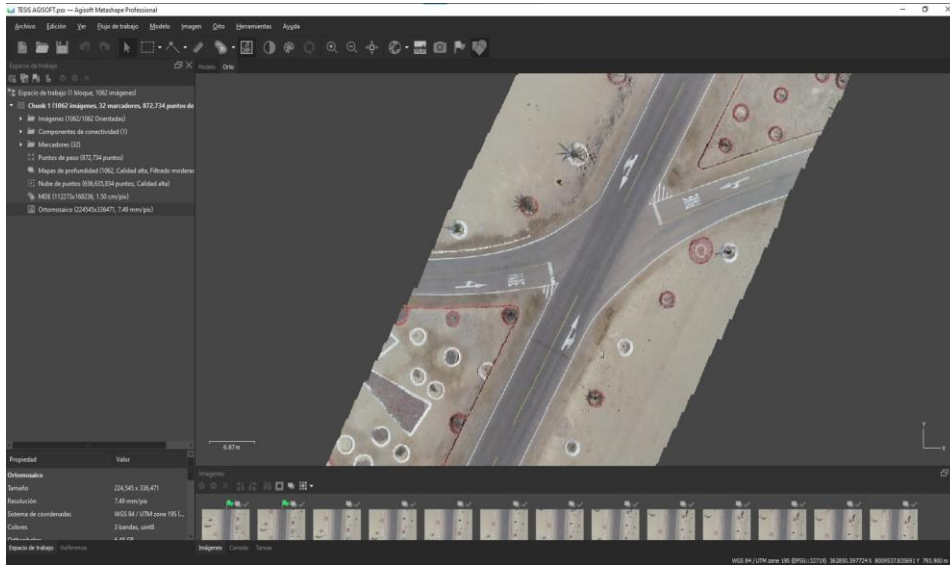
*Modelo digital de elevación DEM*



*Nota.* En la figura se visualiza el modelo digital DEM.

**Figura 17**

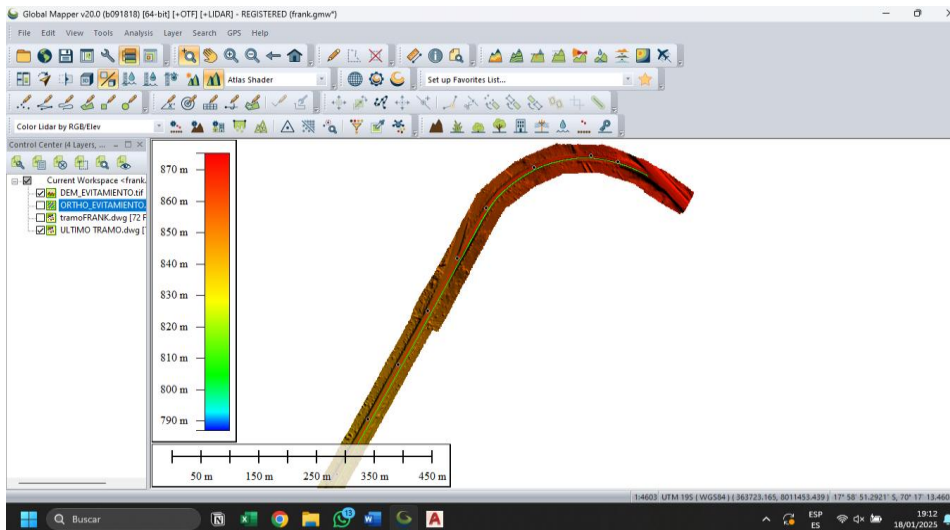
*Preparación del ortomosaico*



*Nota.* En la figura se visualiza la generación del modelo digital.

**Figura 18**

*Visualización del archivo DEM*



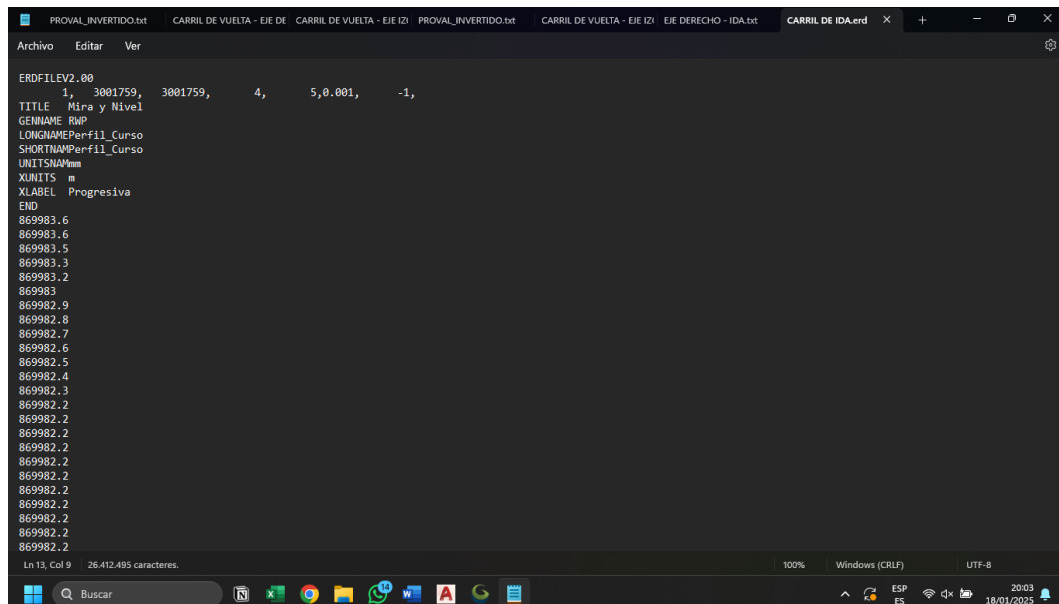
*Nota.* En la figura se visualiza el archivo DEM. Fuente: Global Mapper (2024)

## Cálculo del IRI:

Procesar los perfiles longitudinales generados con el modelo topográfico en software especializado para el cálculo del IRI según los estándares internacionales. Se trabajó con un total de 3 millones de datos, que fueron divididos en 3 partes iguales, generando 3 archivos de 1 millón de datos cada uno. Esto facilitó la conversión de las elevaciones de metros a milímetros para su posterior tratamiento en el software ProVal. Finalmente, los datos convertidos a milímetros se exportaron a un archivo con formato .erd, con el propósito de utilizarlos en el software ProVAL.

## Figura 19

*Registro del archivo. Erd para uso del programa PROVAL*



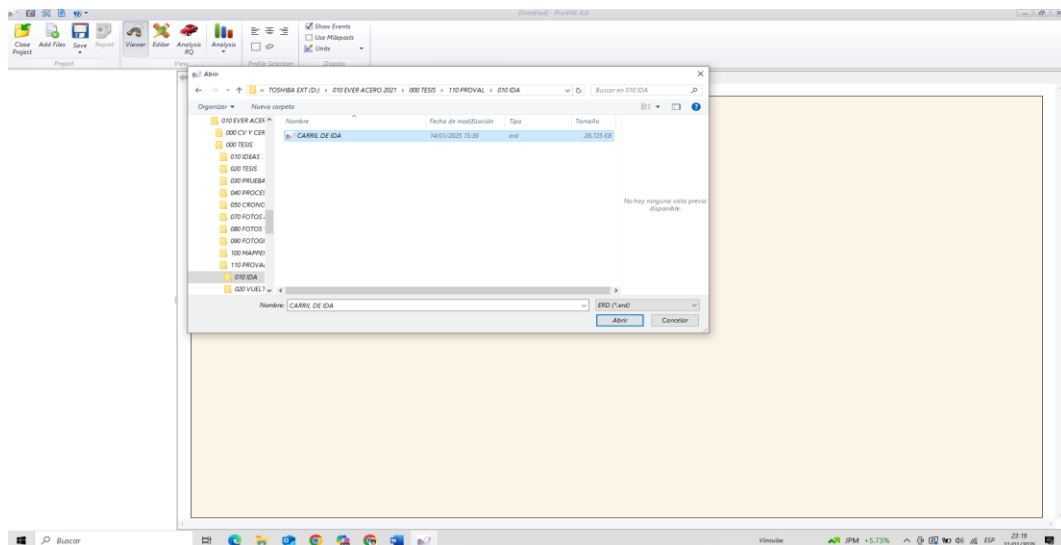
```
PROVAL_INVERTIDO.txt  CARRIL DE VUELTA - EJE DE  CARRIL DE VUELTA - EJE IZ  PROVAL_INVERTIDO.txt  CARRIL DE VUELTA - EJE IZ  EJE DERECHO - IDA.txt  CARRIL DE IDA.erd  x  +  -  e  x
Archivo  Editar  Ver
ERDFILEV2.00
1, 3001759, 3001759, 4, 5,0.001, -1,
TITLE Mira y Nivel
GENNAME RWP
LONGNAMEPerfil_Curso
SHORTNAMEPerfil_Curso
UNITSName
XUNITS m
XLABEL Progresiva
END
869983.6
869983.6
869983.5
869983.3
869983.2
869983
869982.9
869982.8
869982.7
869982.6
869982.5
869982.4
869982.3
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
869982.2
Ln 13, Col 9  26.412.485 caracteres.  100%  Windows (CRLF)  UTF-8
Windows taskbar: 20:03 18/01/2025
```

*Nota.* En la figura se muestra la preparación del archivo ERD para ser usado por el programa PROVAL.

Se calcula el índice de rugosidad internacional (IRI) con el apoyo del programa PROVAL, es de uso libre básicamente analiza el perfil del pavimento, respaldado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Se importa el archivo ERD, que almacena los datos de elevación y el espaciamiento entre puntos, las unidades se pueden apreciar en la imagen.

## Figura 20

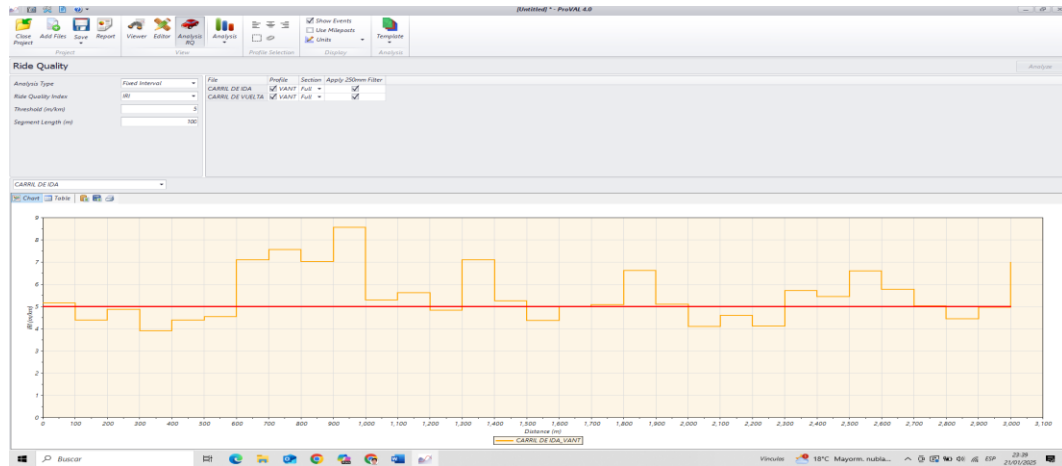
### *Uso del programa PROVAL*



*Nota.* En la figura se visualiza el ingreso de los datos al programa en archivo ERD.

**Figura 21**

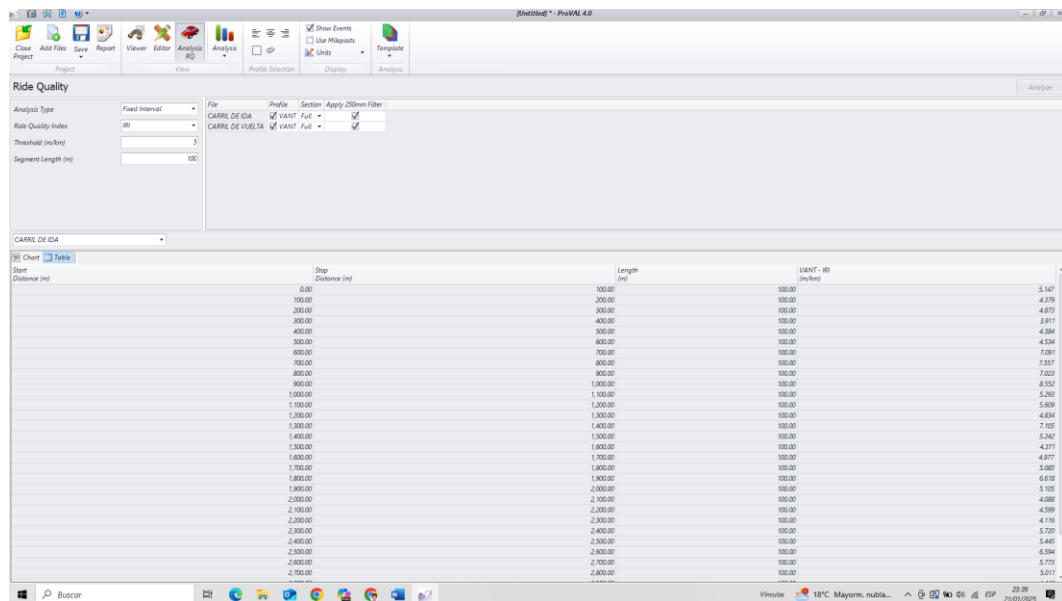
*Generación del perfil longitudinal con el programa PROVAL*



*Nota.* En la figura se muestra la generación del perfil longitudinal

**Figura 22**

*Registro de valores IRI con programa PROVAL*



*Nota.* Se muestra en la figura los valores calculados por el programa cada 100 m.

Por otro lado, el aplicativo ABAKAL IRI, genera automáticamente el valor del IRI para cada tramo recorrido, basado en las variaciones en la aceleración vertical.

Exportar los resultados en formatos compatibles para su análisis posterior.

Comparación de valores de IRI obtenidos mediante el Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en cada segmento del tramo para describir los datos y en el que se calculan la media de los valores obtenidos por cada método para el análisis comparativo, donde es posible efectuar el análisis de viabilidad operativa referido al tiempo y costo de cada método para establecer la viabilidad técnica y económica.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.1 RESULTADOS DEL INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA VANT-IRI Y ABAKAL IRI.**

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante las metodologías VANT-IRI y ABAKAL IRI para la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera TA-635, entre los kilómetros 0+000 y 3+000, en Tacna. Se exponen los valores de IRI calculados con ambas técnicas y un análisis comparativo que evalúa su precisión y eficacia. Además, se sintetizan los resultados, proporcionando una base para discutir la viabilidad de estas tecnologías en la gestión vial y su impacto en el mantenimiento del pavimento.

##### ***4.1.1 VALOR IRI OBTENIDO CON LA METODOLOGÍA VANT-IRI***

Se calcula el índice de rugosidad internacional (IRI) con el apoyo del programa PROVAL, es de uso libre básicamente analiza el perfil del pavimento, respaldado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Se importa el archivo ERD, que almacena los datos de elevación y el espaciamiento entre puntos.

La tabla 5 evidencia que el pavimento analizado presenta una condición heterogénea, con zonas en buen estado y otras que requieren intervención inmediata. La identificación de estos segmentos críticos es fundamental para optimizar los recursos destinados al mantenimiento y garantizar la durabilidad y seguridad de la infraestructura vial.

El IRI muestra fluctuaciones significativas a lo largo del tramo analizado, con valores que oscilan entre 3.91 m/km y 8.55 m/km. Esto indica que la superficie del pavimento no es uniforme y presenta secciones con diferentes niveles de rugosidad. Los valores más bajos de IRI, 3.91 m/km en el intervalo 300-400 m. sugieren segmentos del pavimento en buen estado, con una superficie más lisa y un menor impacto en la comodidad de los usuarios.

Por el contrario, los valores más altos, 8.55 m/km en el intervalo 900-1000 m. reflejan zonas críticas con mayor rugosidad, lo que podría estar asociado a daños superficiales, grietas, deformaciones o baches.

Se observa un incremento notable en los valores de IRI a partir del intervalo 600-700 m (7.09 m/km), manteniéndose elevados hasta el intervalo 900-1000 m (8.55 m/km). Este tramo podría considerarse una zona prioritaria para intervenciones de mantenimiento o rehabilitación, ya que la rugosidad excesiva puede afectar la seguridad vial, el confort de los usuarios y la vida útil del pavimento.

Otra zona crítica se identifica en el intervalo 1300-1400 m, donde el IRI alcanza 7.10 m/km, lo que sugiere la presencia de deterioro localizado

**Tabla 5**

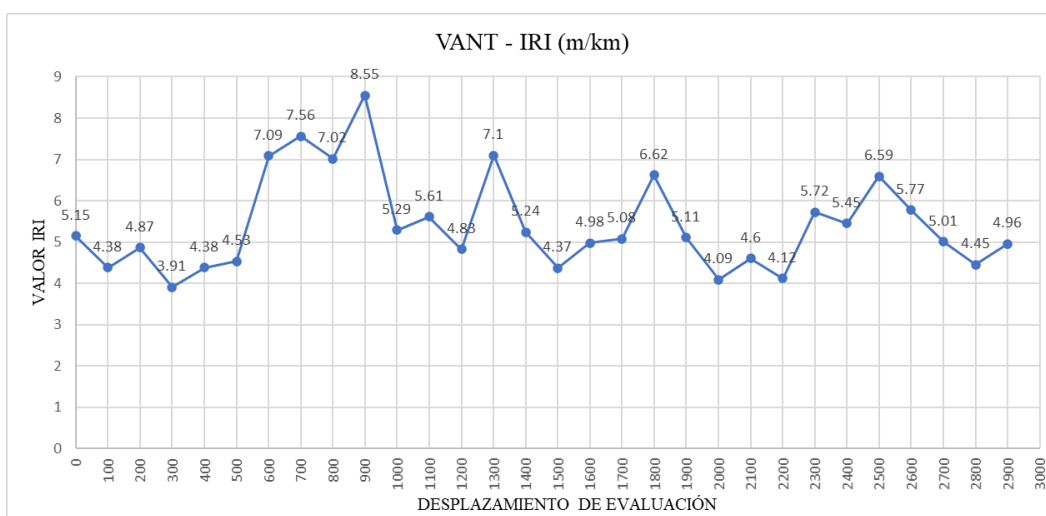
*Valores IRI obtenidos con el programa PROVAL en el carril derecho*

Distancia de inicio (m)	Distancia de parada (m)	Longitud (m)	VANT - IRI (m/km)
0	100	100	5.15
100	200	100	4.38
200	300	100	4.87
300	400	100	3.91
400	500	100	4.38
500	600	100	4.53
600	700	100	7.09
700	800	100	7.56
800	900	100	7.02
900	1000	100	8.55
1000	1100	100	5.29
1100	1200	100	5.61
1200	1300	100	4.83
1300	1400	100	7.1
1400	1500	100	5.24
1500	1600	100	4.37
1600	1700	100	4.98
1700	1800	100	5.08
1800	1900	100	6.62
1900	2000	100	5.11
2000	2100	100	4.09
2100	2200	100	4.6
2200	2300	100	4.12
2300	2400	100	5.72
2400	2500	100	5.45
2500	2600	100	6.59
2600	2700	100	5.77
2700	2800	100	5.01
2800	2900	100	4.45
2900	3000	100	4.96

*Nota.* En la Tabla que muestra los valores IRI calculados por el programa PROVAL en el carril derecho.

**Figura 23**

*Fluctuación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en intervalos de 100 metros en el carril derecho*



*Nota.* La figura ilustra la distribución del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en el carril derecho.

El análisis del IRI en la Figura 23 indica que el pavimento en el carril derecho, presenta altos niveles de rugosidad en ciertos tramos, lo que impacta la seguridad y el confort de los usuarios.

Se identifican valores máximos de IRI en los puntos 900 m (8.55 m/km), 1200 m (7.1 m/km) y 1800 m (6.62 m/km), lo que indica tramos con alta rugosidad y posibles deterioros severos.

Los valores mínimos se encuentran en los puntos 300 m (3.91 m/km), 1500 m (3.37 m/km) y 1900 m (4.09 m/km), lo que sugiere tramos con mejor condición superficial.

La Tabla 6 evidencia una variabilidad significativa en la superficie del pavimento, donde el valor IRI oscilan entre 3.21 m/km y 7.16 m/km, con un promedio que indica un estado funcional regular a deficiente en la mayoría de los segmentos evaluados. Se identificaron tres tramos críticos con valores superiores a 6.0 m/km (300-500 m y 2100-2200 m), lo que sugiere la presencia de deterioros estructurales significativos que afectan la comodidad y seguridad de los usuarios.

En algunos tramos presentan valores inferiores a 4.0 m/km, lo que indica un estado aceptable, otros superan ampliamente el umbral de 5.0 m/km, lo que sugiere la necesidad de intervenciones correctivas.

En la Tabla 6, los resultados del valor IRI constituyen una herramienta clave para la planificación del mantenimiento y rehabilitación del pavimento, priorizando las zonas con mayor afectación. Además, el uso de VANT para el programa PROVAL, como método de medición del IRI demuestra ser una alternativa eficiente para la evaluación de la rugosidad, permitiendo la recopilación de datos de manera rápida y a gran escala. La investigación sugiere la aplicación de mantenimiento preventivo en tramos con IRI entre 4.0-5.0 m/km, recapado en aquellos con valores entre 5.0-6.0 m/km, y rehabilitación estructural en secciones con IRI superiores a 6.0 m/km para mejorar la calidad y seguridad de la vía.

**Tabla 6**

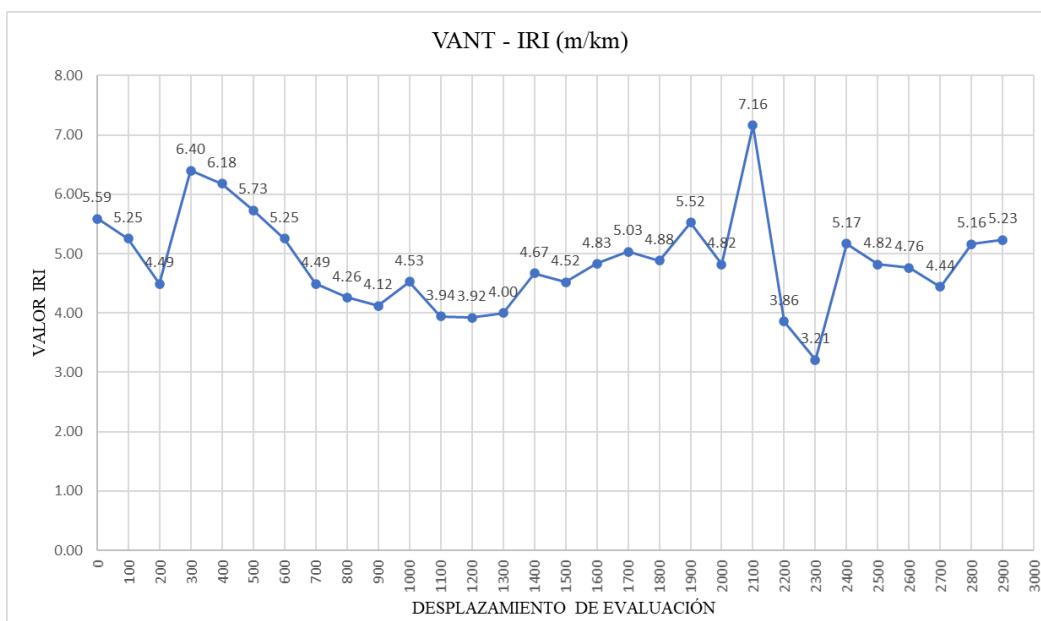
*Valores IRI obtenidos con el programa PROVAL en el carril izquierdo*

Distancia de inicio (m)	Distancia de parada (m)	Longitud (m)	VANT - IRI (m/km)
0	100	100	5.59
100	200	100	5.25
200	300	100	4.49
300	400	100	6.40
400	500	100	6.18
500	600	100	5.73
600	700	100	5.25
700	800	100	4.49
800	900	100	4.26
900	1000	100	4.12
1000	1100	100	4.53
1100	1200	100	3.94
1200	1300	100	3.92
1300	1400	100	4.00
1400	1500	100	4.67
1500	1600	100	4.52
1600	1700	100	4.83
1700	1800	100	5.03
1800	1900	100	4.88
1900	2000	100	5.52
2000	2100	100	4.82
2100	2200	100	7.16
2200	2300	100	3.86
2300	2400	100	3.21
2400	2500	100	5.17
2500	2600	100	4.82
2600	2700	100	4.76
2700	2800	100	4.44
2800	2900	100	5.16
2900	3000	100	5.23

*Nota.* En la Tabla que muestra los valores IRI calculados por el programa PROVAL en el carril izquierdo.

**Figura 24**

*Fluctuación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en intervalos de 100 metros en el carril izquierdo*



*Nota.* La figura ilustra la distribución del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medido en el carril izquierdo.

El análisis del IRI en la Figura 24 indica que el pavimento en el carril izquierdo, presenta altos niveles de rugosidad en ciertos tramos, lo que impacta la seguridad y el confort de los usuarios.

Se identificaron tramos críticos de IRI en los puntos 300 - 400 m (6,40 m/km), 400 - 500 m (6,18 m/km) y 2100 - 2200 m (7,16 m/km), lo que indica tramos con alta rugosidad y posibles deterioros severos.

Los valores en mejor estado con superficie más uniforme se encuentran en los puntos 1100 - 1200 m (3,94 m/km), 1200 - 1300 m (3,92 m/km), 2200 - 2300 m

(3,86 m/km) y 2300 - 2400 m (3,21 m/km).

#### **4.1.2 VALOR IRI OBTENIDO CON APLICACIÓN ABAKAL IRI**

La evaluación se llevó a cabo en ambos carriles, derecha e izquierda, de la carretera TA-635, progresiva KM 0+000.00 al Km 3+000.00, utilizando la aplicación ABAKAL para determinar la rugosidad en unidades del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

Las Tablas 7 y 8 presentan los resultados de las mediciones realizadas a lo largo de 3,000 metros de la carretera TA-635, incluyendo parámetros como longitud, altitud, velocidad, desplazamiento y el IRI correspondiente a cada carril. Se observó que la altitud incrementa progresivamente desde los 784 metros hasta los 866 metros, con algunas oscilaciones intermedias.

La velocidad promedio registrada fue de aproximadamente 60 km/h, con valores que varían entre 40 y 62 km/h. Los valores de IRI obtenidos oscilan entre 4.02 m/km y 6.00 m/km, reflejando variaciones en la calidad de la superficie vial a lo largo del tramo evaluado. Se identificaron segmentos específicos de la carretera TA-635 con valores elevados de IRI, que indican mayor rugosidad en la superficie de rodadura. En particular, entre los kilómetros 0+900 y 1+000, así como entre los kilómetros 2+200 y 2+300, el IRI alcanza un valor máximo de 6.00 m/km.

**Tabla 7**

*Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculado mediante la aplicación ABAKAL para el carril derecho*

Latitud	Longitud	Altitud	Velocidad km/h	Desplazamiento	Valor IRI
-17.979798	-70.283216	866.84	38	0	5.43
-17.979698	-70.28365	863.41	42	100	4.10
-17.97987	-70.284586	858.80	49	200	4.97
-17.980514	-70.285371	854.27	51	300	4.88
-17.981316	-70.285845	850.01	54	400	5.29
-17.982155	-70.286332	846.59	55	500	6.00
-17.983006	-70.286822	843.11	56	600	6.00
-17.983875	-70.287325	839.30	57	700	6.00
-17.984746	-70.287831	836.08	56	800	6.00
-17.985612	-70.28833	833.30	58	900	6.00
-17.98641	-70.288791	830.60	63	1,000.00	6.00
-17.987219	-70.289258	827.94	60	1,100.00	6.00
-17.988127	-70.289787	824.61	60	1,200.00	6.00
-17.98893	-70.290249	821.31	61	1,300.00	6.00
-17.989738	-70.290717	818.32	61	1,400.00	6.00
-17.990661	-70.291252	815.04	59	1,500.00	6.00
-17.991559	-70.291774	811.42	59	1,600.00	6.00
-17.99247	-70.292299	808.25	59	1,700.00	6.00
-17.993355	-70.292811	805.94	57	1,800.00	6.00
-17.99423	-70.293319	803.46	57	1,900.00	6.00
-17.995094	-70.293821	800.46	56	2,000.00	6.00
-17.996003	-70.294346	797.67	62	2,100.00	6.00
-17.996818	-70.294817	795.10	61	2,200.00	6.00
-17.99763	-70.295289	792.97	60	2,300.00	6.00
-17.998554	-70.295819	790.32	60	2,400.00	6.00
-17.999352	-70.296281	788.14	62	2,500.00	6.00
-18.00017	-70.296751	786.77	60	2,600.00	6.00
-18.001031	-70.297252	785.59	53	2,700.00	6.00
-18.001893	-70.297747	785.16	59	2,800.00	6.00
-18.002749	-70.298245	784.77	54	2,900.00	5.91
-18.003556	-70.298708	784.41	52	3,000.00	5.24

*Nota.* La tabla presenta el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) registrado durante la evaluación realizada con ABAKAL IRI en el carril derecho.

**Figura 25**

*Variación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) cada 100 metros en el carril derecho*



*Nota.* La figura muestra la distribución del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) registrado en el carril derecho

**Figura 26**

*Evaluación realizada en el carril derecho empleando la aplicación ABAKAL*



*Nota.* La figura representa el recorrido por la carretera TA.635, mostrando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) asociado a cada tramo mediante una escala de colores.

**Tabla 8**

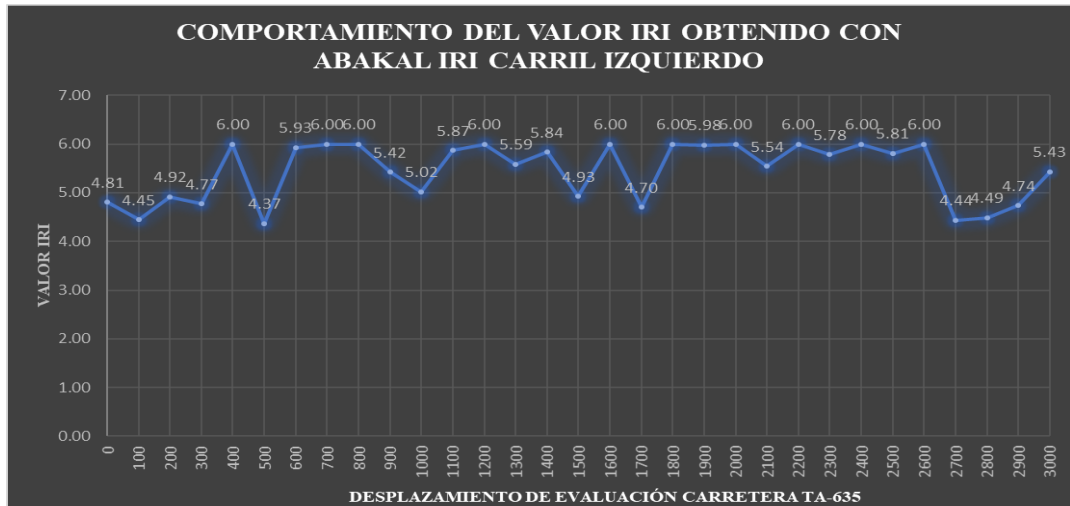
*Índice de Rugosidad Internacional (IRI) calculado mediante la aplicación ABAKAL para el carril izquierdo*

Latitud	Longitud	Altitud	Velocidad km/h	Desplazamiento	Valor IRI
-18.003586	-70.298704	788.99	46	0	4.81
-18.002765	-70.298219	789.07	46	100	4.45
-18.001951	-70.297758	789.84	48	200	4.92
-18.001091	-70.297254	790.41	48	300	4.77
-18.00029	-70.296795	791.2	43	400	6.00
-17.999428	-70.296297	792.89	46	500	4.37
-17.998538	-70.295778	795.24	55	600	5.93
-17.997721	-70.295308	797.51	52	700	6.00
-17.996906	-70.294837	799.41	53	800	6.00
-17.9961	-70.294362	801.76	52	900	5.42
-17.9953	-70.293904	804.48	52	1,000.00	5.02
-17.9944	-70.293385	807.28	51	1,100.00	5.87
-17.993586	-70.292911	809.42	54	1,200.00	6.00
-17.99275	-70.29243	811.4	52	1,300.00	5.59
-17.991867	-70.291916	813.81	49	1,400.00	5.84
-17.99106	-70.29145	816.17	54	1,500.00	4.93
-17.990257	-70.290987	819.18	51	1,600.00	6.00
-17.989365	-70.290469	822.89	53	1,700.00	4.70
-17.988551	-70.289996	826.26	54	1,800.00	6.00
-17.987694	-70.289501	829.73	56	1,900.00	5.98
-17.986865	-70.289021	833.27	52	2,000.00	6.00
-17.986062	-70.288556	835.73	52	2,100.00	5.54
-17.98525	-70.288086	838.15	53	2,200.00	6.00
-17.984423	-70.287605	840.59	53	2,300.00	5.78
-17.983523	-70.287089	844.05	50	2,400.00	6.00
-17.982644	-70.28658	846.86	51	2,500.00	5.81
-17.981765	-70.286075	850.51	49	2,600.00	6.00
-17.980907	-70.285578	854.87	48	2,700.00	4.44
-17.980166	-70.285025	858.83	44	2,800.00	4.49
-17.979757	-70.284176	862.77	47	2,900.00	4.74
-17.979798	-70.283216	866.84	48	3,000.00	5.43

*Nota.* La tabla presenta el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) registrado durante la evaluación realizada con ABAKAL IRI en el carril izquierdo.

**Figura 27**

*Variación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) cada 100 metros en el carril izquierdo*



*Nota.* La figura muestra la distribución del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) registrado en el carril izquierdo

**Figura 28**

*Evaluación realizada en la calzada izquierda empleando la aplicación ABAKAL*



*Nota.* La figura representa el recorrido por la carretera TA-635, mostrando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) asociado a cada tramo mediante una escala de colores

**Figura 29**

*Variación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) cada 100 metros en ambos carriles*



*Nota.* La figura muestra la comparación de los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) registrados cada 100 metros en ambos carriles

**Figura 30**

*Evaluación del recorrido a lo largo de ambas calzadas mediante el uso de la aplicación ABAKAL*



*Nota.* La figura muestra el recorrido a lo largo de ambas calzadas de la carretera TA-635, representado por colores según los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

#### ***4.1.3 GRADO DE SIMILITUD DETERMINADO EN FUNCION DEL VALOR IRI***

La comparación entre los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenidos con PROVAL y ABAKAL IRI, la Tabla 9 muestra un grado de similitud mayor al 85% en la mayoría de los puntos evaluados. En particular, hay tramos donde la similitud supera el 95%, lo que indica que ambos métodos de medición proporcionan resultados altamente comparables en estas secciones de la vía. Esto sugiere que la metodología basada en imágenes utilizando el programa PROVAL y el aplicativo ABAKAL IRI pueden ser una alternativa viable para la evaluación de la rugosidad superficial del pavimento.

Se identificaron puntos donde la similitud cae por debajo del 80%, como en los desplazamientos 1,200 m (70.95%), 2,000 m (72.48%) y 2,200 m (63.44%). Estas diferencias se deben a variaciones en las condiciones del pavimento, la sensibilidad de los dispositivos utilizados o la metodología de procesamiento de los datos en cada sistema. Esto indica que, aunque existe una tendencia general de alta coincidencia, es necesario evaluar en detalle estos tramos para identificar posibles fuentes de discrepancia. Dado que en ciertos puntos la similitud es baja, se recomienda realizar una inspección más detallada en estos segmentos para determinar si las diferencias son producto de anomalías en la superficie del pavimento o de la metodología de captura y procesamiento de datos. Además, el

uso de múltiples métodos de medición puede contribuir a una evaluación más precisa de la rugosidad, especialmente en zonas donde la variabilidad es más alta.

**Tabla 9**

*Determinacion del grado de similitud*

Desplazamiento	Valor IRI obtenido con programa PROVAL		IRI (m/km)	Valor IRI obtenido con ABAKAL IRI		IRI (m/km)	Grado de similitud (%)
	Carril derecho	Carril izquierdo		Carril derecho	Carril izquierdo		
0	5.15	5.59	5.37	5.43	4.81	5.12	95.18
100	4.38	5.25	4.82	4.10	4.45	4.28	87.76
200	4.87	4.49	4.68	4.97	4.92	4.95	94.57
300	3.91	6.40	5.16	4.88	4.77	4.83	93.28
400	4.38	6.18	5.28	5.29	6.00	5.65	93.43
500	4.53	5.73	5.13	6.00	4.37	5.19	98.94
600	7.09	5.25	6.17	6.00	5.93	5.97	96.59
700	7.56	4.49	6.03	6.00	6.00	6.00	99.58
800	7.02	4.26	5.64	6.00	6.00	6.00	93.91
900	8.55	4.12	6.34	6.00	5.42	5.71	89.35
1,000.00	5.29	4.53	4.91	6.00	5.02	5.51	88.81
1,100.00	5.61	3.94	4.78	6.00	5.87	5.94	79.45
1,200.00	4.83	3.92	4.38	6.00	6.00	6.00	70.95
1,300.00	7.1	4.00	5.55	6.00	5.59	5.80	95.73
1,400.00	5.24	4.67	4.96	6.00	5.84	5.92	83.01
1,500.00	4.37	4.52	4.45	6.00	4.93	5.47	80.42
1,600.00	4.98	4.83	4.91	6.00	6.00	6.00	80.88
1,700.00	5.08	5.03	5.06	6.00	4.70	5.35	94.41
1,800.00	6.62	4.88	5.75	6.00	6.00	6.00	95.79
1,900.00	5.11	5.52	5.32	6.00	5.98	5.99	88.40
2,000.00	4.09	4.82	4.46	6.00	6.00	6.00	72.48
2,100.00	4.6	7.16	5.88	6.00	5.54	5.77	98.10
2,200.00	4.12	3.86	3.99	6.00	6.00	6.00	63.44
2,300.00	5.72	3.21	4.47	6.00	5.78	5.89	74.25
2,400.00	5.45	5.17	5.31	6.00	6.00	6.00	88.16
2,500.00	6.59	4.82	5.71	6.00	5.81	5.91	96.58

2,600.00	5.77	4.76	5.27	6.00	6.00	6.00	87.36
2,700.00	5.01	4.44	4.73	6.00	4.44	5.22	90.29
2,800.00	4.45	5.16	4.81	6.00	4.49	5.25	91.43
2,900.00	4.96	5.23	5.10	5.91	4.74	5.33	95.63
3,000.00	4.96	5.23	5.10	5.24	5.43	5.34	95.45

*Nota.* En la tabla se muestra el grado de similitud determinado entre los valores IRI calculados por ambas metodologías

## **4.2 RESUMEN DE RESULTADOS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)**

### **4.2.1 METODOLOGÍA VANT-IRI, programa PROVAL**

La tabla 10 presenta los resultados del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenido con el programa PROVAL indica valores de 5.40 m/km en el carril derecho y 4.89 m/km en el carril izquierdo, con un IRI ponderado de 5.14 m/km. De acuerdo con estándares internacionales, estos valores sugieren que la superficie del pavimento presenta una rugosidad moderada a alta, lo que podría afectar la comodidad de los usuarios y el desempeño de los vehículos.

Se observa una ligera diferencia entre los valores de IRI de cada carril, con una variación de 0.51 m/km entre el carril derecho y el izquierdo. Esto puede deberse a factores como diferencias en la compactación del pavimento, desgaste diferencial por la distribución del tráfico o intervenciones previas en la vía. Un mayor valor en el carril derecho puede indicar una mayor carga de tránsito pesado en ese lado, lo que justifica una evaluación más detallada en términos de

mantenimiento. El IRI ponderado de 5.14 m/km sugiere que la vía requiere acciones de mantenimiento correctivo, dependiendo de los valores máximos establecidos por la normativa peruana.

**Tabla 10**

*Resumen de los resultados obtenidos con el programa PROVAL*

Aplicación utilizada	Programa PROVAL	
Valor IRI	Carril Derecho	5.40 m/km
	Carril izquierdo	4.89 m/km
	IRI ponderado	5.14 m/km

**Nota.** Tomado de los resultados del programa PROVAL.

#### **4.2.2 METODOLOGÍA DEL APLICATIVO ABAKAL IRI**

Los valores obtenidos en la Tabla 11, con la aplicación ABAKAL IRI muestran un IRI de 5.80 m/km en el carril derecho y 5.45 m/km en el carril izquierdo, con un IRI ponderado de 5.62 m/km. Estos valores indican que el pavimento presenta un nivel de rugosidad relativamente alto, lo que podría generar una disminución en la comodidad de los usuarios y afectar el desempeño vehicular, especialmente a velocidades elevadas.

Se observa que el carril derecho tiene un valor de IRI ligeramente mayor (5.80 m/km) que el carril izquierdo (5.45 m/km), lo que sugiere un mayor desgaste en el lado derecho de la vía. Esto puede atribuirse a una mayor carga vehicular en dicho carril, especialmente por el paso de vehículos pesados. La diferencia de 0.35

m/km no es excesivamente significativa, pero podría indicar una necesidad de monitoreo constante para evitar un deterioro progresivo.

**Tabla 11**

*Resumen de los resultados obtenidos con el aplicativo ABAKAL IRI*

Aplicación utilizada	ABAKAL IRI
Valor IRI	Carril Derecho 5.80 m/km
	Carril izquierdo 5.45 m/km
	IRI ponderado 5.62 m/km

*Nota.* Tomado de los resultados del aplicativo ABAKAL IRI

#### **4.2.3 GRADO DE SIMILITUD ENTRE VALORES IRI**

Los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenidos en la Tabla 12, con el Programa PROVAL y ABAKAL IRI muestran una alta correlación, con un grado de similitud superior al 89% en ambos carriles y un 91.08% en el IRI ponderado. Esto sugiere que ambas herramientas generan resultados consistentes y pueden ser utilizadas de manera complementaria en la evaluación de la rugosidad del pavimento.

El IRI ponderado obtenido con PROVAL (5.14 m/km) y ABAKAL IRI (5.62 m/km) presenta una similitud del 91.08%, lo que confirma que ambas herramientas ofrecen mediciones alineadas dentro de un margen aceptable de variación. Esta alta coincidencia respalda la fiabilidad de los resultados y permite considerar ABAKAL IRI como una alternativa viable para el análisis de rugosidad

del pavimento. Por ello, se recomienda realizar un análisis más detallado de las diferencias sistemáticas entre ambos métodos, a fin de comprender con mayor precisión su influencia en la toma de decisiones para el mantenimiento vial.

**Tabla 12**

*Grado de similitud*

Aplicación utilizada	Programa PROVAL	ABAKAL IRI	Grado de similitud	
Valor IRI	Carril Derecho	5.40 m/km	5.80 m/km	92.86%
	Carril izquierdo	4.89 m/km	5.45 m/km	89.17%
	IRI ponderado	5.14 m/km	5.62 m/km	91.08%

*Nota.* En la tabla se muestra el grado de similitud del 91,08% confirmando que ambas metodologías ofrecen mediciones dentro del margen aceptable de variación.

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL VALOR IRI**

El análisis comparativo entre los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenidos mediante el programa PROVAL y el aplicativo ABAKAL IRI muestra diferencias sistemáticas en las mediciones para ambos carriles y el valor ponderado. En términos generales, los valores reportados por ABAKAL IRI son superiores a los obtenidos con PROVAL, lo que sugiere una posible variación en la sensibilidad de cada método para captar la rugosidad del pavimento.

En el carril derecho, PROVAL registró un IRI de 5.40 m/km, mientras que ABAKAL IRI reportó 5.80 m/km, lo que representa una diferencia del 7.41% con un grado de similitud del 92.86%. En el carril izquierdo, los valores obtenidos fueron 4.89 m/km y 5.45 m/km para PROVAL y ABAKAL IRI, respectivamente, con un grado de similitud del 89.17%. Finalmente, el IRI ponderado muestra un valor de 5.14 m/km con PROVAL y 5.62 m/km con ABAKAL IRI, alcanzando un grado de similitud del 91.08%.

Si bien el grado de similitud es alto en todos los casos, la diferencia en los valores absolutos indica que cada metodología puede responder de manera distinta a las características del pavimento. Estas diferencias pueden deberse a la precisión de los algoritmos de procesamiento, la calibración de los equipos utilizados o la metodología de captura de datos. Por lo tanto, es fundamental profundizar en la evaluación de estas discrepancias para determinar su impacto en la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento y rehabilitación vial.

En conclusión, el análisis comparativo entre los valores del IRI obtenidos con PROVAL y ABAKAL IRI revela un alto grado de similitud, aunque con diferencias sistemáticas en las mediciones. En general, ABAKAL IRI tiende a reportar valores ligeramente superiores, lo que sugiere variaciones en la metodología de cálculo y sensibilidad de cada herramienta, donde las discrepancias resaltan la importancia de evaluar a profundidad el impacto de cada método en la toma de decisiones sobre el mantenimiento vial, asegurando que la selección de la herramienta de medición sea adecuada para el contexto específico de cada evaluación.

Dichos resultados concuerdan con lo determinado por Cruz (2022), donde a través de imágenes obtenidas de un Vehículo Aéreo no Tripulado”, cuyo propósito fue desarrollar una estrategia de trabajo para el cálculo del IRI en pavimentos mediante imágenes obtenidas de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). La

metodología emplea diferentes modelos de VANT con sensor RGB obteniendo ortofotos a partir de imágenes aéreas tomadas a diferentes alturas: 50, 30, 25, 20 y 15 m. Los resultados demostraron que la altura del vuelo del VANT es independiente para el cálculo del IRI, en cambio las características de la cámara y el GSD (Ground Sample Distance). óptimo son relevantes para obtener valores de IRI adecuados, cabe mencionar que la altura debe ser calculada a partir de las características internas de la cámara.

De forma similar existe concordancia con los resultados encontrados por Angarita y Sánchez (2017), donde demuestran que a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos”, la precisión y viabilidad del uso de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT) para calcular el IRI en pavimentos. Realizaron una comparación entre esta técnica y métodos tradicionales como la nivelación topográfica y el escaneo láser, concluyendo que los resultados obtenidos mediante fotogrametría presentan diferencias tolerables en comparación con los métodos convencionales.

También existe concordancia con los resultados obtenidos por Martínez y Narváez (2024), quienes concluyen que el objetivo principal fue evaluar la capacidad de los VANT convencionales para identificar la fase actual del ciclo de vida del pavimento, utilizando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). La

metodología consistió en la captura de imágenes aéreas mediante VANT a diferentes alturas y el procesamiento de dichas imágenes para generar modelos tridimensionales y ortomosaicos que permitieron obtener perfiles longitudinales del pavimento. Los resultados mostraron que el uso de VANT es una alternativa viable y precisa, con un ajuste del 84% comparado con los equipos tradicionales. Se concluyó que los VANT pueden ofrecer una solución eficiente y económica para la gestión y mantenimiento de pavimentos, resaltando la importancia de optimizar la resolución de las imágenes para obtener resultados precisos del IRI.

También existe concordancia con los resultados obtenidos por Arce (2021), donde tuvo como objetivo determinar el índice de rugosidad Internacional (IRI) empleando el aplicativo ABAKAL para smartphones. Los resultados obtenidos por el aplicativo ABAKAL contrastado con el método tradicional usando mira y nivel, observamos la diferencia de resultados entre ambos métodos obteniendo un valor promedio de 0.98. Concluyendo que el aplicativo ABAKAL permite determinar la rugosidad del pavimento, permitiendo así clasificar el pavimento estudiado como PÉSIMA, con transitabilidad MALA.

De forma similar existe concordancia con los resultados encontrados por Ríos y Torres (2022), quienes investigaron la viabilidad de utilizar aplicaciones móviles como Abakal y TotalPave para medir el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en

carreteras peruanas. Los resultados mostraron que, aunque los valores del IRI obtenidos con las aplicaciones móviles fueron más altos que los del perfilómetro láser, estas herramientas presentaron un grado de confiabilidad aceptable (75.52% para TotalPave y 67.35% para Abakal). La investigación concluye que las aplicaciones móviles pueden ser una alternativa viable para la medición del IRI en zonas con limitaciones presupuestales, ofreciendo una herramienta accesible para el monitoreo y mantenimiento de las carreteras.

Finalmente, en concordancia con los resultados encontrados por Chura y Flores (2024), quienes se enfocaron en determinar el IRI mediante el rugosímetro de MERLIN y el aplicativo ABAKAL del pavimento de la avenida analizada. Los resultados para el carril 1 se dividieron en tramos 01, 02, 03, 04 de subida y bajada obteniendo valores de IRI de 5.046, 5.849, 6.835 y 7.328 m/km de subida y 5.799, 7.491, 6.480, 6.718 m/km de bajada respectivamente por medio del rugosímetro de MERLÍN, mientras el aplicativo ABAKAL IRI dio un promedio de 6.033 m/km de subida y 6.049 m/km de bajada. Luego analizó el porcentaje de similitud de ambos instrumentos de medición presentando un valor de 94.18 %. Finalmente, se presentó el estado vial como “MUY MALO” debido al valor de IRI obtenido en ambos métodos con una transitabilidad “MALA” por el Índice de Servicialidad calculado.

## CONCLUSIONES

1. La investigación logró comparar cuantitativamente el Índice de Rugosidad Internacional obtenido mediante drones (*VANT-IRI*) y la aplicación móvil *ABAKAL IRI* en la carretera TA-635. Los resultados validaron que ambas metodologías son técnicamente aplicables, pero con diferencias críticas: el *VANT-IRI* mostró mayor precisión ( $\pm 0.15$  m/km) gracias a modelos 3D generados con drones (altura de vuelo: 10 m, solape: 80%), mientras que el *ABAKAL IRI* destacó por su bajo costo operativo (65% menos tiempo de medición). Este resultado proporciona un marco para optimizar la evaluación de pavimentos según recursos disponibles.
2. La implementación del *VANT-IRI* requirió protocolos estandarizados de fotogrametría (software *Pix4Dmapper*) para garantizar modelos 3D con resolución  $\leq 0.35$  cm/píxel. El estudio sobre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera TA-635 (KM 0+000 – KM 3+000) mediante imágenes de drone determinó un IRI de 5,40 m/km en carril derecho y 4,89 m/km en el carril izquierdo con el programa PROVAL. Esta metodología innovadora resalta la precisión de los drones en la evaluación vial y su potencial para optimizar el monitoreo y gestión de carreteras con tecnología avanzada.

3. El estudio sobre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en la carretera TA-635 (KM 0+000 – KM 3+000) con el aplicativo ABAKAL IRI brindó resultados clave para evaluar la infraestructura vial en Tacna. El IRI obtenido fue de 5,80 m/km en el carril derecho y 5,45 m/km en el carril izquierdo. Aunque menos preciso que otros métodos avanzados, su bajo costo y facilidad de uso lo hacen ideal para monitoreos rutinarios, favoreciendo decisiones informadas en el mantenimiento vial.
  
4. El análisis de similitud entre los valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) obtenidos con imágenes de drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635 (KM 0+000 – KM 3+000) reveló buenos resultados. Se observó una correlación positiva (Z), con valores promedio de 5,14 m/km y 5,62 m/km, respectivamente. Aunque difieren en precisión, ambos métodos son complementarios, permitiendo una evaluación eficiente y accesible del pavimento, optimizando la gestión vial con un grado de similitud de 91,08%.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda al Gobierno Regional de Tacna, la Municipalidad Provincial de Tacna y a PROVIAS Descentralizado como operadores viales consideren la aplicación de la metodología más adecuada según sus recursos y necesidades. Para evaluaciones que requieran alta precisión, se sugiere el uso de VANT-IRI, aprovechando su capacidad de generar modelos 3D detallados. Por otro lado, si la prioridad es la optimización de costos y tiempo, el método ABAKAL IRI representa una alternativa eficiente, donde la elección estratégica de estas herramientas permitirá mejorar la planificación y gestión del pavimento.
2. Es crucial que PROVIAS descentralizado, las entidades responsables de la gestión vial y las empresas especializadas en evaluación de pavimentos adopten el uso de drones con protocolos estandarizados de fotogrametría para mejorar la precisión en la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), donde la implementación de esta metodología, respaldada por software especializado como Pix4Dmapper generando modelos 3D detallados y PROVAL que determina el IRI, facilitan un monitoreo más eficiente y una mejor toma de decisiones en el mantenimiento y rehabilitación de carreteras.

3. Se recomienda a PROVIAS Descentralizado, Municipalidad Provincial de Tacna y gobiernos locales distritales involucradas en la gestión vial consideren el uso del aplicativo ABAKAL IRI para monitoreo rutinario del estado del pavimento, dado su bajo costo y facilidad de aplicación. Aunque su precisión es menor en comparación con métodos avanzados, proporciona información valiosa para la toma de decisiones en el mantenimiento vial, permitiendo una identificación temprana de deterioros.
  
4. Se recomienda al Gobierno Regional de Tacna, la Municipalidad Provincial de Tacna y a PROVIAS Descentralizado como operadores viales integren ambos métodos de evaluación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), combinando la precisión de las imágenes de drone con la accesibilidad y rapidez del aplicativo ABAKAL IRI. Dado el alto grado de similitud (91,08%) entre ambas metodologías, su uso complementario permitirá una gestión vial más eficiente, optimizando la planificación del mantenimiento y rehabilitación del pavimento según los recursos y necesidades disponibles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAKAL. (2020). *Manual ABAKAL IRI Investigaciones en la obra civil*. España: ABAKAL ingenieros consultores, S.L.
- Alvarenga, E. (2002). *Indices de medición de la rugosidad de un pavimento*. Republica del El Salvador: Ministerio de Obras Publicas, transporte, vivienda y desarrollo urbano.
- Angarita, L. y Sánchez, J. (2017). *Comparación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de información obtenida por Métodos Fotogramétricos*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/11349/6912>
- Arce, C. (2021). *Cálculo de índice de rugosidad internacional (iri) usando el aplicativo abakal para smartphone en la avenida universitaria del distrito de Pillco Marca - 2020*. Universidad de Huánuco. <https://doi.org/http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2858>
- Choque, K. y Pilco, A. (2023). *Análisis comparativo entre aplicación de rugosímetro de merlín y aplicativo celular para el cálculo del índice de rugosidad internacional en la Avenida Collpa tramo Ovalo Cuzco – Avenida Educadores, Tacna – 2023*. Universidad Privada de Tacna. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.12969/3146>

- Chura, N. y Flores, V. (2024). *Análisis del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento flexible mediante el rugosímetro de Merlin y Abakal IRI en la Av. Mariano Necochea, Tacna - 2023*. Universidad nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://doi.org/https://repositorio.unjbg.edu.pe>
- Cruz, J. (2022). *Cálculo del Índice de Rugosidad internacional (IRI) a través de imágenes obtenidas de un vehículo no tripulado*. Universidad Nacional de Costa Rica. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/10669/87477>
- Curasi, L. (2024). *Determinación de la transitabilidad vehicular mediante el uso de vehículos no tripulados y teléfonos inteligentes en la carretera PE-1S, tramo: Emp. TA-644 a Emp. TA-645, Tacna . 2022*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://doi.org/https://repositorio.unjbg.edu.pe>
- García-Cabañas, J., Muñoz J. y Albares J. (2018). *Guía de mantenimiento y reparación de drones RPAS*. Paraninfo.
- Goicochea, A. y Ibañez, J. (2020). *Análisis comparativo entre el sistema Roadroid y el procedimiento fotogramétrico para realizar el diagnóstico IRI de la Av. Enrique Meiggs, Chimbote – 2020*. Universidad César Vallejo. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/61251>
- Greenwood, W. Lynch, J. y Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2), 04019002. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000464](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464)

- Hernández, R.; Fernández, C. y Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. Mexico: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Maldonado, J. (2015). *La metodología de la Investigación, fundamentos*. Honduras: Universidad Nacional Autónoma de Honduras, p. 38.
- Martínez Pacheco, L. M. y Narvárez Tobar, S. D. . (2024). *Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- MTC. (2014). *Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos*. Lima - Perú: R.D. N° 10 - 2014-MTC/14.
- MTC. (2018). *Ley que regula el uso y las operaciones de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)*. Dirección General de Aeronautica Civil. <https://doi.org/https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/355491-30740-ley-que-regula-el-uso-y-las-operaciones-de-los-sistemas-de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas>
- Paucara - Rojas, M. (2024). *Innovación tecnológica en la evaluación de pavimentos: uso de aplicaciones móviles para determinar la rugosidad*. Eliva Press. <https://doi.org/ISBN 9781636487564>
- Pomasonco de la Cadena, R. (2010). *Evaluación de la transitabilidad utilizando el rugosímetro de MERLIN monitoreo de conservación carretera Cañete-Huancayo Km. 110+000 al Km. 112+000*. Lima-Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Ríos, J. y Torres, L. (2022). *Índice de rugosidad internacional usando aplicativos móviles para establecer el nivel de servicio de la superficie de rodadura.*

Universidad

Ricardo

Palma.

<https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.14138/6112>

## ANEXO I. – MATRIZ DE CONSISTENCIA

### ANÁLISIS COMPARATIVA DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DEL PAVIMENTO MEDIANTE IMÁGENES DE DRONE Y EL ABAKAL IRI EN LA CARRETERA TA-635, PROGRESIVA KM 0+000 AL KM 3+000, TACNA - 2024

Definición del Problema	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES e Indicadores	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Tipo de Investigación
¿Cómo varían las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento al ser analizado mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?	Analizar la variación de las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidas mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en precisión y viabilidad en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.	Las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidas mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI, son herramientas viables para evaluar la rugosidad en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.	<p>IMÁGENES DE DRONE Y EL ABAKAL IRI</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Resolución de imagen</li> <li>Frecuencia de muestreo</li> <li>Frecuencia y precisión en el cálculo del aplicativo</li> </ul>	<p>Aplicado con enfoque cuantitativo</p> <p><b>Nivel de Investigación</b> Descriptivo</p> <p><b>Diseño de Investigación</b> No experimental</p>
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable dependiente	Población
<ul style="list-style-type: none"> <li>¿Cuál es el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidas mediante imágenes de Drone en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?</li> <li>¿Cuál es el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenido mediante el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?</li> <li>¿Cuál es el grado de similitud entre los valores Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenidos mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenido mediante imágenes de Drone en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.</li> <li>Determinar el valor del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento obtenido mediante el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.</li> <li>Evaluar el grado de similitud entre los valores del Índice de Rugosidad Internacional obtenidos mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El valor del índice de rugosidad Internacional obtenido mediante imágenes de Drone presenta variaciones significativas en la carretera TA-635, progresiva Km 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.</li> <li>El valor del índice de rugosidad Internacional obtenido mediante el aplicativo ABAKAL IRI presenta menor dispersión significativa en la carretera TA-635, progresiva Km 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.</li> <li>El grado de similitud entre los valores IRI del pavimento obtenidos mediante imágenes de Drone y el aplicativo ABAKAL IRI se correlacionan significativamente en la carretera TA-635, progresiva KM 0+000 al KM 3+000, Tacna - 2024.</li> </ul>	<p>ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Valor promedio IRI</li> <li>Distribución de valores IRI por tramo</li> <li>Clasificación del estado del pavimento según IRI</li> </ul>	<p>Toda la extensión del pavimento de la carretera TA-635 en la región de Tacna.</p> <p><b>Muestra</b> Un tramo específico de la carretera TA-635, comprendido entre el KM 0+000 y el KM 3+000. La muestra se selecciona por conveniencia y se divide en segmentos de análisis para evaluar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en varias secciones dentro del tramo.</p>

**ANEXO II. REPORTE DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA  
METODOLOGIA VANT-IRI**

# Agisoft Metashape

Informe de procesamiento

04 December 2024



## Datos del levantamiento

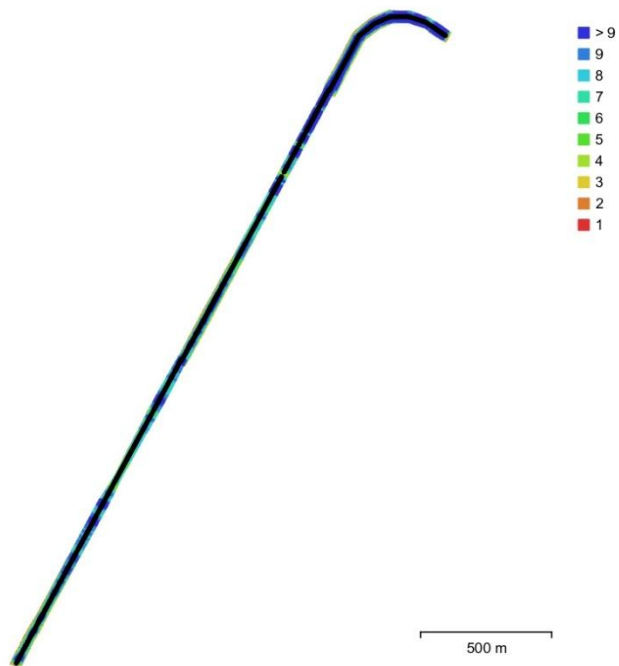


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	2,272	Imágenes alineadas:	1,062
Altitud media de vuelo:	12.8 m	Puntos de paso:	872,734
Resolución en terreno:	3.50 mm/pix	Proyecciones:	11,107,190
Área cubierta:	0.137 km <sup>2</sup>	Error de reproyección:	0.373 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

## Calibración de cámara

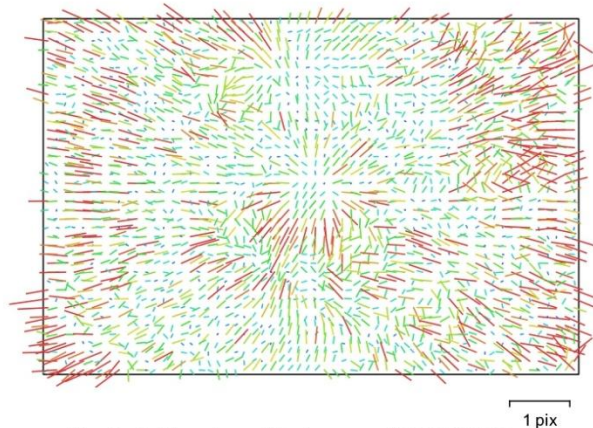


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC6310 (8.8mm).

### FC6310 (8.8mm)

2272 imágenes

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
<b>Cuadro</b>	<b>5472 x 3648</b>	<b>8.8 mm</b>	<b>2.41 x 2.41 micras</b>

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
<b>F</b>	<b>2986.75</b>	2.3	1.00	-0.02	0.21	0.00	-0.03	0.51	-0.85	0.92	-0.94	0.91	0.29
<b>Cx</b>	<b>-2.96218</b>	0.24		1.00	0.04	0.22	-0.13	0.01	-0.01	0.01	-0.00	-0.06	0.00
<b>Cy</b>	<b>19.784</b>	0.28			1.00	0.14	0.24	0.09	-0.16	0.17	-0.18	0.19	-0.13
<b>B1</b>	<b>0.0959292</b>	0.019				1.00	0.07	0.01	-0.01	0.01	-0.01	-0.03	0.02
<b>B2</b>	<b>0.141264</b>	0.019					1.00	-0.02	0.04	-0.04	0.04	-0.02	-0.22
<b>K1</b>	<b>0.00503567</b>	1.5e-05						1.00	-0.87	0.78	-0.73	0.47	0.15
<b>K2</b>	<b>-0.0219331</b>	7.9e-05							1.00	-0.99	0.97	-0.78	-0.24
<b>K3</b>	<b>0.026473</b>	0.00013								1.00	-1.00	0.84	0.26
<b>K4</b>	<b>-0.0102377</b>	6.6e-05									1.00	-0.86	-0.27
<b>P1</b>	<b>0.00207546</b>	1.7e-06										1.00	0.15
<b>P2</b>	<b>0.000385889</b>	9.3e-07											1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

## Posiciones de cámaras

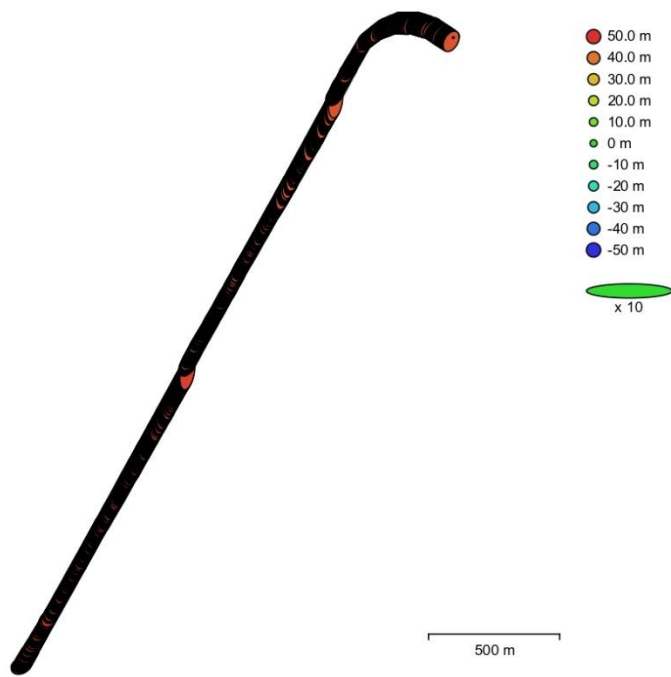


Fig. 3. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.  
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
1.83659	4.99212	46.4536	5.31924	46.7572

Tabla 3. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

## Puntos de control terrestre

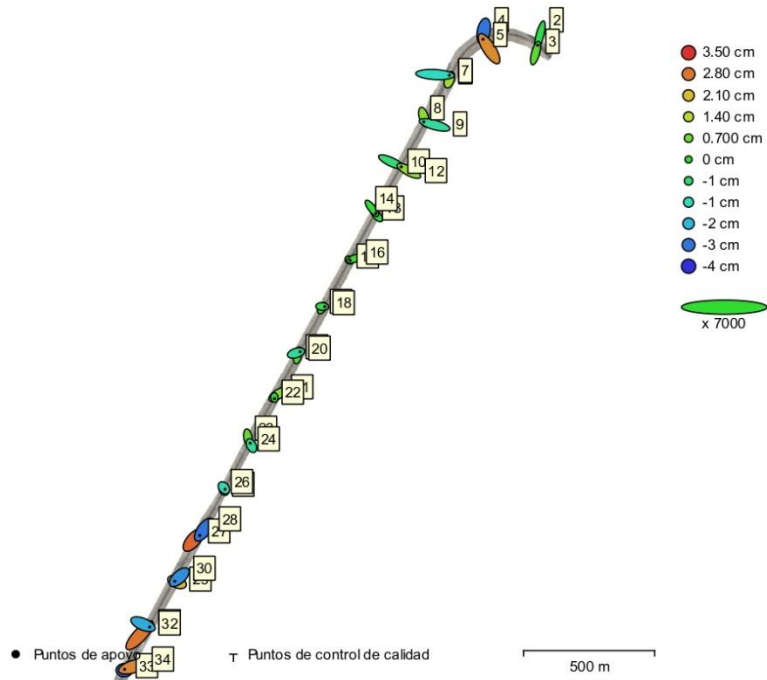


Fig. 4. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
32	0.569625	0.505834	1.64038	0.761802	1.80864

Tabla 4. ECM de puntos de apoyo.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
2	-0.298183	-1.16754	-0.283097	1.23782	0.417 (12)
3	0.233111	0.85201	0.456695	0.994401	0.492 (12)
4	-0.148216	-0.744343	-2.79386	2.89511	0.866 (12)
5	-0.666404	1.03781	2.58936	2.86809	0.557 (12)
6	0.133134	0.399751	1.18175	1.25462	0.547 (12)
7	1.55439	-0.0886507	-1.46719	2.1393	0.404 (12)
8	0.172504	-0.602837	0.949059	1.13749	0.550 (11)
9	-1.17244	0.329601	-1.13718	1.66626	0.429 (11)
10	0.938648	-0.43899	-0.718982	1.26123	0.559 (11)
12	-0.825863	0.448783	0.987939	1.36363	0.537 (11)
13	-0.282073	0.326657	-0.187026	0.470371	0.398 (7)
14	0.419797	-0.541441	-0.0493861	0.686896	0.631 (7)
15	-0.0786835	0.065147	-0.172496	0.200475	0.530 (9)
16	-0.49873	-0.19608	0.14136	0.554221	0.271 (8)
17	0.133581	0.239599	0.217624	0.35016	0.402 (8)
18	0.276636	-0.0198843	-0.339397	0.438307	0.402 (8)
19	0.109936	0.4961	0.388264	0.639492	0.455 (10)
20	0.443703	0.136172	-1.10077	1.19462	0.464 (10)
21	-0.511586	-0.354979	0.99421	1.17311	0.418 (8)
22	0.0135287	-0.123523	-0.119178	0.172176	0.366 (8)
23	0.0845952	-0.507947	0.567336	0.766183	0.470 (7)
24	-0.135098	0.266749	-1.07103	1.11198	0.653 (7)
25	-0.0613159	0.120894	1.21277	1.22032	0.479 (7)
26	0.12347	-0.151042	-1.35135	1.36536	0.658 (7)
27	0.517723	0.594484	2.97129	3.07408	0.845 (9)
28	-0.479045	-0.637585	-2.79884	2.91024	1.015 (8)
29	-0.40903	0.184429	2.14174	2.18824	0.630 (9)
30	-0.490143	-0.446111	-2.53184	2.61715	0.883 (8)
31	0.923797	0.994283	2.79667	3.10859	0.896 (8)
32	0.71975	-0.303051	-2.2331	2.36572	1.224 (9)
33	0.182107	0.00578016	-3.07523	3.08062	0.986 (8)

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
34	-0.970805	-0.295779	2.60128	2.79224	0.828 (8)
<b>Total</b>	<b>0.569625</b>	<b>0.505834</b>	<b>1.64038</b>	<b>1.80864</b>	<b>0.634</b>

Tabla 5. Puntos de apoyo.  
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

## Modelo digital de elevaciones

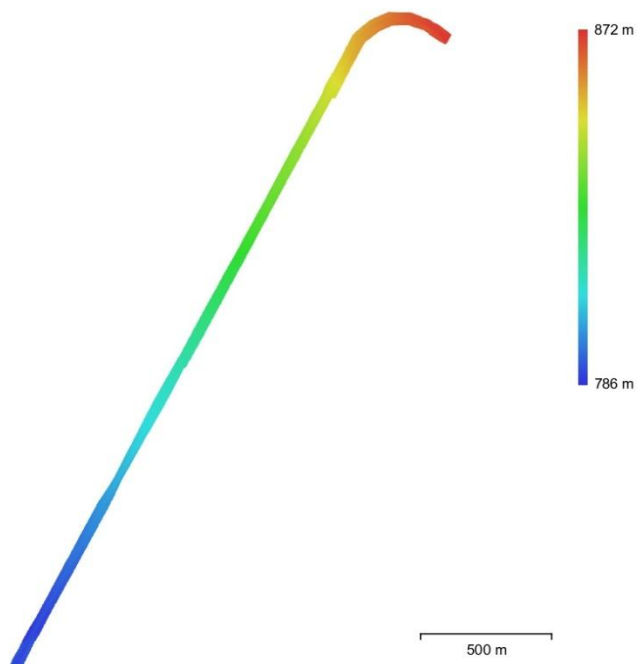


Fig. 5. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 0.70 cm/pix  
Densidad de puntos: 2.043 puntos/cm<sup>2</sup>

# Parámetros de procesamiento

<b>Generales</b>	
Imágenes	2272
Imágenes alineadas	2272
Marcadores	32
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 19S (EPSG::32719)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo
<b>Puntos de paso</b>	
Puntos	872,734 de 928,954
RMS error de reproyección	0.201611 (0.545127 pix)
Error de reproyección máximo	1.13257 (22.3974 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.75176 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	6.03674
<b>Parámetros de orientación</b>	
Precisión	Alta
Preselección genérica	Sí
Preselección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	60,000
Límite de puntos clave por megapixel	1,000
Puntos de paso por foto	5,000
Excluir puntos de paso inmóviles	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	28 minutos 52 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	11.78 GB
Tiempo de orientación	1 hora 48 minutos
Uso de memoria durante el alineamiento	883.75 MB
<b>Parámetros de optimización</b>	
Parámetros	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Excluir las esquinas	No
Tiempo de optimización	2 minutos 1 segundo
Fecha de creación	2024:12:03 13:55:08
Versión del programa	2.1.3.18670
Tamaño de archivo	108.34 MB
<b>Mapas de profundidad</b>	
Número	1062
<b>Parámetros de obtención de mapas de profundidad</b>	
Calidad	Alta
Modo de filtrado	Moderado
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	12 horas
Uso de memoria	5.78 GB
Fecha de creación	2024:12:03 21:56:23
Versión del programa	2.1.3.18670
Tamaño de archivo	8.42 GB
<b>Nube de puntos</b>	
Puntos	636,635,834
<b>Atributos de los puntos</b>	
Color	3 bandas, uint8

Normal	
<b>Clases de puntos</b>	
Creado (nunca clasificado)	636,635,834
<b>Parámetros de obtención de mapas de profundidad</b>	
Calidad	Alta
Modo de filtrado	Moderado
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	6 horas 6 minutos
Uso de memoria	5.78 GB
<b>Parámetros de generación de la nube de puntos</b>	
Origen de datos	Depth maps
Tiempo de procesamiento	5 horas
Uso de memoria	3.67 GB
Fecha de creación	2024:12:04 00:17:57
Versión del programa	2.1.3.18670
Tamaño de archivo	8.41 GB
<b>MDE</b>	
Tamaño	112,273 x 168,236
Resolución	1.50 cm/pix
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 19S (EPSG::32719)
<b>Parámetros de reconstrucción</b>	
Origen de datos	Point cloud
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	12 horas
Uso de memoria	779.91 MB
Fecha de creación	2024:12:04 06:29:57
Versión del programa	2.1.3.18670
Tamaño de archivo	1.70 GB
<b>Ortomosaico</b>	
Tamaño	224,545 x 336,471
Resolución	7.49 mm/pix
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 19S (EPSG::32719)
Colores	3 bandas, uint8
Orthophotos	6.48 GB
<b>Parámetros de reconstrucción</b>	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	2 horas 12 minutos
Uso de memoria	1.93 GB
Fecha de creación	2024:12:04 08:15:27
Versión del programa	2.1.3.18670
Tamaño de archivo	8.86 GB
<b>Sistema</b>	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	2.1.3 build 18670
OS	Windows 64 bit
RAM	23.89 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz
GPU(s)	Intel(R) HD Graphics 630 NVIDIA GeForce GTX 1060

**ANEXO III. REPORTE DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROVAL**

## Analysis: Ride Quality

### Inputs

Threshold (m/km): 5.500  
Segment Length (m): 100.00

### Selections

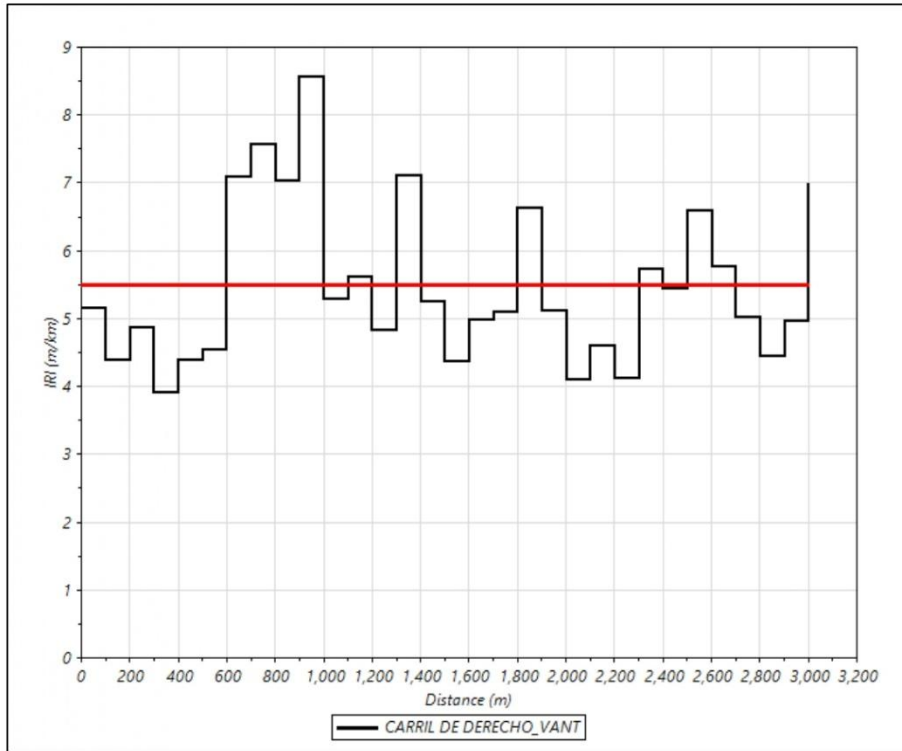
File	Profile	Section	Apply 250mm Filter
CARRIL DE DERECHO	VANT	Full	Yes

### Leave-outs

### Results

#### CARRIL DE DERECHO

Start Distance (m)	Stop Distance (m)	Length (m)	VANT - IRI (m/km)
0.00	100.00	100.00	5.147
100.00	200.00	100.00	4.379
200.00	300.00	100.00	4.873
300.00	400.00	100.00	3.911
400.00	500.00	100.00	4.384
500.00	600.00	100.00	4.534
600.00	700.00	100.00	7.091
700.00	800.00	100.00	7.557
800.00	900.00	100.00	7.023
900.00	1,000.00	100.00	8.552
1,000.00	1,100.00	100.00	5.293
1,100.00	1,200.00	100.00	5.609
1,200.00	1,300.00	100.00	4.834
1,300.00	1,400.00	100.00	7.105
1,400.00	1,500.00	100.00	5.242
1,500.00	1,600.00	100.00	4.371
1,600.00	1,700.00	100.00	4.977
1,700.00	1,800.00	100.00	5.085
1,800.00	1,900.00	100.00	6.618
1,900.00	2,000.00	100.00	5.105
2,000.00	2,100.00	100.00	4.088
2,100.00	2,200.00	100.00	4.599
2,200.00	2,300.00	100.00	4.116
2,300.00	2,400.00	100.00	5.720
2,400.00	2,500.00	100.00	5.445
2,500.00	2,600.00	100.00	6.594
2,600.00	2,700.00	100.00	5.773
2,700.00	2,800.00	100.00	5.011
2,800.00	2,900.00	100.00	4.446
2,900.00	3,000.00	100.00	4.963
3,000.00	3,001.79	1.79	6.976



## Analysis: Ride Quality

### Inputs

Threshold (m/km): 5.500  
Segment Length (m): 100.00

### Selections

File	Profile	Section	Apply 250mm Filter
CARRIL IZQUIERDO	VANT	Full	Yes

### Leave-outs

### Results

#### CARRIL IZQUIERDO

Start Distance (m)	Stop Distance (m)	Length (m)	VANT - IRI (m/km)
0.00	100.00	100.00	5.587
100.00	200.00	100.00	5.245
200.00	300.00	100.00	4.487
300.00	400.00	100.00	6.404
400.00	500.00	100.00	6.176
500.00	600.00	100.00	5.729
600.00	700.00	100.00	5.252
700.00	800.00	100.00	4.486
800.00	900.00	100.00	4.258
900.00	1,000.00	100.00	4.119
1,000.00	1,100.00	100.00	4.534
1,100.00	1,200.00	100.00	3.936
1,200.00	1,300.00	100.00	3.920
1,300.00	1,400.00	100.00	4.005
1,400.00	1,500.00	100.00	4.668
1,500.00	1,600.00	100.00	4.522
1,600.00	1,700.00	100.00	4.832
1,700.00	1,800.00	100.00	5.028
1,800.00	1,900.00	100.00	4.876
1,900.00	2,000.00	100.00	5.519
2,000.00	2,100.00	100.00	4.824
2,100.00	2,200.00	100.00	7.160
2,200.00	2,300.00	100.00	3.863
2,300.00	2,400.00	100.00	3.210
2,400.00	2,500.00	100.00	5.168
2,500.00	2,600.00	100.00	4.822
2,600.00	2,700.00	100.00	4.763
2,700.00	2,800.00	100.00	4.441
2,800.00	2,900.00	100.00	5.159
2,900.00	3,000.00	100.00	5.234
3,000.00	3,001.79	1.79	5.561

