



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Título

Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida

útil de vías mediante el método IRI

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autores:

Martínez Pacheco Lizbeth Maité

Narváez Tobar Santiago David

Tutor:

Mgs. Vladimir Pazmiño

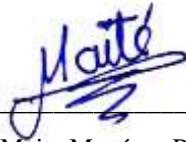
Riobamba, Ecuador. 2023

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Martínez Pacheco Lizbeth Maite**, con cédula de ciudadanía **060435786-3**, y **Narváez Tobar Santiago David**, con cédula de ciudadanía **100451767-6** autores del trabajo de investigación titulado: **“POTENCIAL DEL USO DE EQUIPOS VANT CONVENCIONALES PARA IDENTIFICAR EL CICLO DE VIDA ÚTIL DE VÍAS MEDIANTE EL MÉTODO IRI”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

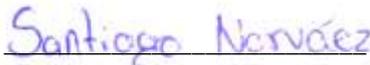
Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 14 de febrero 2024.



Lizbeth Maite Martínez Pacheco

C.I: 060435786-3



Santiago David Narváez Tobar

C.I: 100451767-6



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 18 días del mes de enero de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **Martínez Pacheco Lizbeth Malté con CC: 0604357863** y **Narvárez Tobar Santiago David con CC: 1004517676**, de la carrera **Ingeniería Civil** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **"Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de las vías mediante el método IRI"**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.


Ing. Vladimir Pazmiño Chiluza MSc
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación "POTENCIAL DEL USO DE EQUIPOS VANT CONVENCIONALES PARA IDENTIFICAR EL CICLO DE VIDA UTIL DE VIAS MEDIANTE EL METODO IRI" por Lizbeth Maite Martínez Pacheco, con cédula de identidad número 060435786-3 y Santiago David Narváez Tobar, con cédula de identidad número 100451767-6, bajo la tutoría de Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza MSc; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 23 del mes de febrero de 2024.

Ing. Jorge Eugenio Núñez Vivar, Mgs.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Ángel Edmundo Paredes García, Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección
Académica
VICE RECTORADO ACADÉMICO

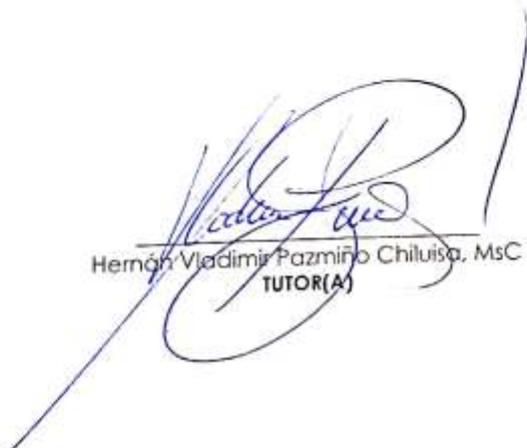


UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **MARTÍNEZ PACHECO LIZBETH MAITE** con CC: **0604357863** y **SANTIAGO DAVID NARVÁEZ TOBAR** con CC: **0604357863**, estudiantes de la Carrera **INGENIERIA CIVIL**, Facultad de **INGENIERIA**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"POTENCIAL DEL USO DE EQUIPOS VANT CONVENCIONALES PARA IDENTIFICAR EL CICLO DE VIDA ÚTIL DE VÍAS MEDIANTE EL MÉTODO IRI"**, cumple con el **9 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 14 de febrero de 2024



Hernán Vladimir Pazmiño Chiluisa, MSc
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada:

A mis padres Johana Tobar y Ricardo Narváez por todo el esfuerzo que realizaron para darme una educación digna y ayudarme a cumplir mis objetivos, demostrando siempre el gran respaldo y cariño hacia sus hijos.

A mi abuela Esmeralda Chafuel por ser parte fundamental a lo largo de mi carrera universitaria, brindándome su apoyo incondicional para poder cumplir un logro más en mi vida.

A todos los miembros de mi familia y amigos que siempre me han brindado su apoyo, su tiempo y los valores necesarios para mi formación profesional.

Santiago David Narváez Tobar

Quiero dedicar esta tesis a las personas que han sido mi mayor apoyo y motivación a lo largo de este camino:

A Dios, fuente inagotable de amor, sabiduría y fortaleza, quien ha sido mi guía y sostén en cada paso de este camino académico.

A mis queridos papás, Juan Martínez y Marcia Pacheco, cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificio han hecho posible este logro. Su ejemplo de dedicación y perseverancia siempre será mi inspiración.

A mi amado hermano Josué Martínez, compañero de risas, consejero incondicional y pilar fundamental en mi vida. Gracias por estar siempre presente y por creer en mí.

A mis fieles compañeros de cuatro patas, Marqueza, Toby y mi angelito Santino, quienes con su lealtad y cariño han llenado mis días de alegría y compañía inigualables.

A mis amigos, quienes han compartido conmigo alegrías, sueños y desafíos a lo largo de esta travesía. Su amistad ha sido un regalo invaluable que atesoro con todo mi corazón.

Esta tesis es el fruto del esfuerzo conjunto de todos ustedes. Con profundo agradecimiento y cariño, dedico este trabajo a cada uno de ustedes. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

Con amor y gratitud infinita,

Lizbeth Maité Martínez Pacheco

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por haberme dado salud, fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Johana Tobar y Ricardo Narváez quienes con ejemplo y esfuerzo me han permitido llegar a culminar esta etapa de mi vida, brindándome su apoyo incondicional y respaldándome en los momentos difíciles a lo largo de mis estudios. A mis hermanos Leonardo y Damián por siempre estar presentes para mí con consejos y apoyo para seguir adelante y nunca rendirme al tratar de cumplir mis metas y objetivos.

A todos los amigos que hice a lo largo de mi trayecto universitario por hacer que esta etapa sea una de las mejores de mi vida.

A mi tutor Ing. Vladimir Pazmiño, por su invaluable orientación y apoyo durante la elaboración de este proyecto de investigación.

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería Civil por las enseñanzas y valores impartidos, los cuales han contribuido a mi formación académica y profesional.

Santiago David Narváez Tobar

Quiero agradecer a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Juan Martínez y Marcia Pacheco, por su amor incondicional y apoyo constante, sin ustedes nada de esto habría sido posible, los amo infinitamente.

A mi hermano Josué Martínez, por motivarme en cada paso del camino, su presencia ha iluminado mi vida y ha hecho más dulces mis victorias.

A mis amigos, por su aliento y comprensión en los momentos difíciles. Su compañía ha sido un bálsamo para el alma y una fuente constante de alegría y fortaleza.

A mi tutor, el Ing. Vladimir Pazmiño, por su orientación experta, su paciencia infinita y su invaluable guía a lo largo de este proceso. Su conocimiento y dedicación han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A todos aquellos que, de una u otra forma, han contribuido a mi crecimiento y desarrollo, les expreso mi más sincero agradecimiento. Sus palabras de aliento, gestos de apoyo y presencia constante han sido el motor que me ha impulsado a alcanzar esta meta.

¡Gracias a todos por ser parte de este logro!

Lizbeth Maité Martínez Pacheco

INDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Planteamiento del Problema	16
1.3 Justificación	16
1.4 Objetivos	17
1.4.1 General	17
1.4.2 Específicos	17
2. CAPITULO II. MARCO TEORICO	18
2.1 Pavimento	18
2.2 Índice de Regularidad Internacional (IRI)	19
2.2.1 Niveles de la regularidad de la superficie	20
2.2.2 Equipos para la medición del IRI	20
2.3 VANT	24
2.3.1 Clasificación de los VANT	24
2.3.2 Tipos de sensores	27
2.3.3 Normativa y regulación del uso de los VANT en Ecuador	28
2.3.4 Potencial del uso de los equipos VANT	28
2.3.5 Aplicaciones para procesamiento de datos VANT	29
2.4 Determinación del IRI mediante Roadroid	32
2.5 Índice de Serviciabilidad del pavimento	33
2.5.1 Relación entre PSI – IRI	33
2.6 Ciclo de vida	35
3. CAPITULO III. METODOLOGIA	37
3.1 Tipo de Investigación	37
3.2 Diseño de Investigación	37
3.3 Población de estudio y tamaño de muestra	38

3.4	Técnicas de recolección de datos	38
3.4.1	Recolección de datos rugosímetro Merlín.....	38
3.4.2	Recolección de datos metodología VANT – IRI	39
3.4.3	Recolección de datos IRI con la aplicación Roadroid.....	47
3.5	Método de análisis y procesamiento de datos	47
4.	CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1	Tramo de evaluación.....	48
4.1.1	Levantamiento del IRI mediante equipo Merlín	49
4.1.2	Cálculo del IRI a partir de datos obtenidos con el equipo VANT	50
4.1.3	Cálculo de IRI con la aplicación ROADROID	52
4.2	Cálculo del PSI	53
4.3	Estimación del ciclo de vida útil.....	54
4.4	Comparativa entre equipos utilizados para la obtención del IRI	55
4.5	Discusión de resultados	57
5.	CAPITULO V. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	59
5.1	Conclusiones.....	59
5.2	Recomendaciones	60
	BIBLIOGRAFÍA	61
	ANEXOS.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Niveles del IRI para evaluar la lisura de pavimentos asfálticos de carreteras en servicio	20
Tabla 2	Clasificación de VANTs según su tamaño	24
Tabla 3	Características de Drones convencionales y no convencionales.	25
Tabla 4	Potencial de los VANT en inspección de pavimentos.....	29
Tabla 5	Estado de la vía según Roadroid	33
Tabla 6	Rangos de evaluación del PSI	35
Tabla 7	Especificaciones técnicas Phantom 4 Pro.....	40
Tabla 8	Especificaciones técnicas EVO II RTK.....	40
Tabla 9	Parámetros iniciales de importación de datos ProVAL.....	46
Tabla 10	Resumen IRI 8km levantados.....	49
Tabla 11	Datos del cálculo del IRI	50

Tabla 12 Densidad de pixelaje obtenida con la altura de Vuelo.....	51
Tabla 13 Resultados IRI ProVAL.....	51
Tabla 14 Datos obtenidos por la aplicación.....	53
Tabla 15 Calculo del PSI con los diferentes equipos utilizados en la obtención del IRI ...	54
Tabla 16 Edades del pavimento calculada con diferentes equipos.....	54
Tabla 17 Comparativa con respecto al tiempo	55
Tabla 18 Comparativa con respecto al costo	55
Tabla 19 Comparativa en función a la logística	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gráfico típico del avance del deterioro del IRI respecto al tiempo	19
Figura 2 Nivel y mira topográfico	21
Figura 3 Dipstick	21
Figura 4 Equipos Tipo Respuesta.....	22
Figura 5 Diagrama del perfilómetro estático Merlín.....	22
Figura 6 Histograma de la distribución de frecuencias	23
Figura 7 VANT de ala fija.....	26
Figura 8 Dron de ala rotatoria	26
Figura 9 VANT híbrido	26
Figura 10 Tipos de Sensores	27
Figura 11 Modelo 3D de una superficie con PIX4Mapper	30
Figura 12 Interfaz de inicio de Global Mapper	31
Figura 13 Interfaz Gráfica ProVAL	32
Figura 14 PSI en función al IRI aplicando diferentes formulas	34
Figura 15 Curva típica del ciclo de vida útil del pavimento.....	35
Figura 16 Ubicación de la población y muestra de estudio.....	38
Figura 17 Perfil longitudinal vía de la República.....	40
Figura 18 Plan de vuelo considerando el relieve del terreno.....	41
Figura 19 Planificación del vuelo Litchi	42
Figura 20 Importación de imágenes PIX4Dmapper.....	43
Figura 21 Base para la creación del MDS	43
Figura 22 Incumplimiento de relación entre parámetros iniciales y optimizados.....	44
Figura 23 Cumplimientos de parámetros en reporte de calidad	44
Figura 24 Nube de puntos de la superficie	45

Figura 25 MDS del tramo evaluado	45
Figura 26 Perfil de la superficie generado.....	46
Figura 27 Vía del Bicentenario y de la República.....	48
Figura 28 Tramo de evaluación.....	48
Figura 29 Histograma de valores obtenidos con el equipo Merlín.....	50
Figura 30 Histograma de valores obtenidos de la revisión de datos del equipo VANT	52
Figura 31 Histograma de valores obtenidos de la revisión de datos del equipo VANT RTK	52
Figura 32 Reporte grafico generado por el software Roadroid	53
Figura 33 Edad del pavimento calculada con diferentes equipos en base al PSI.....	54
Figura 34 Porcentaje de relación entre equipos en base al IRI obtenido.....	56
Figura 35 Porcentaje de relación entre la edad del pavimento obtenida con los diferentes equipos.....	57

RESUMEN

Este estudio explora la capacidad de utilizar equipos VANT convencionales y el procesamiento de datos para identificar la fase actual del ciclo de vida del pavimento mediante el método del IRI en las avenidas Bicentenario y de la República en la ciudad de Riobamba. La metodología VANT se centra en registrar la superficie del pavimento a través de la captura de imágenes georreferenciadas, las cuales se procesan para generar un modelo tridimensional, un ortomosaico y un modelo digital de superficie. Estos elementos permiten la obtención de perfiles longitudinales de las marcas dejadas por la circulación, facilitando así el cálculo del IRI.

Para respaldar la precisión de los datos, se utilizó el equipo Merlín, validado por el Banco Mundial por su capacidad para proporcionar resultados precisos. Este dispositivo llevó a cabo un levantamiento completo de la vía, permitiendo la identificación del tramo crítico a evaluar. Tras la aplicación de la metodología VANT, se demostró que el potencial de estos equipos para identificar el ciclo de vida útil actual, en función del PSI obtenido con el IRI, tiene un ajuste del 84% con respecto a los equipos tradicionales, validando la viabilidad de esta técnica innovadora en la determinación del ciclo.

Adicionalmente, se realizó una comparativa de parámetros como tiempo, costo y logística para evaluar la practicidad de implementar esta metodología. A pesar de estos resultados favorables, es esencial mantener un monitoreo constante, ya que estos equipos continúan evolucionando de manera continua.

Palabra clave: VANT, IRI, Merlín, PSI, Ciclo de vida útil.

ABSTRACT

This study explores the ability to use conventional UAV equipment and data processing to identify the current phase of the pavement life cycle using the IRI method on the *Bicentenario* and *República* avenues in Riobamba City. The UAV methodology focuses on recording the pavement surface by capturing georeferenced images, which are processed to generate three-dimensional, orthomosaic, and digital surface models. These elements allow longitudinal profiles of the marks left by traffic to be obtained, thus facilitating the calculation of the IRI. To support the accuracy of the data, the Merlin equipment, validated by the World Bank for its ability to provide precise results, was used. This device carried out a complete survey of the road, allowing the identification of the critical section to be evaluated. After the application of the UAV methodology, it was demonstrated that the potential of this equipment to identify the current useful life cycle, based on the PSI obtained with the IRI, has an 84% fit with respect to traditional equipment, validating the viability of this innovative technique in determining the cycle. Additionally, a comparison of parameters such as time, cost, and logistics was carried out to evaluate the practicality of implementing this methodology. Despite these favorable results, it is essential to maintain constant monitoring as this equipment continues to evolve continuously.

Keywords: UAV, IRI, Merlin, PSI, Useful life cycle.



Reviewed by:
Lic. Jenny Freire Rivera
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0604235036

GLOSARIO

IRI: Índice de Regularidad Internacional.

VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado.

NEVI: Norma Ecuatoriana Vial.

TRRL: Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras.

RTRRMS: Response-Type road Roghness Measuring System o Sistema de medición de rugosidad de carreteras de tipo respuesta.

DGAC: Dirección General de Aviación Civil.

GPS: Global Positioning System o Sistema de Posicionamiento Global

RGB: Red-Green-Blue o Rojo, Verde y Azul.

RTK: Real Time Kinematic o Navegación Cinética Satelital en Tiempo Real.

PPF: Pavement Profile Standard File o Archivo estándar de perfil de pavimento.

FHWA: Federal Highway Administration o Administración Federal de Carreteras.

LTPP: Long Term Pavement Performance Program o Programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo.

TRB: Transportation Research Board o Junta de Investigación de Transporte.

PSI: Present Serviceability Index o Índice de Servicio Presente.

ASSHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes.

GSD: Ground Sample Distance o Distancia de muestra del suelo.

MDS: Modelo Digital de la Superficie.

MERLIN: Machine Evaluating Roughness Low cost Instrumentation o Maquina de Evaluación de Regularidad de Bajo costo.

DIPSTICK: Instrumento empleado para evaluar la regularidad superficial de los pavimentos.

PIXEL: unidad más pequeña que compone una imagen digital, siendo un valor perteneciente a un conjunto que caracteriza el brillo y el color de un punto en una imagen.

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El desarrollo económico y social de las regiones de un país se promueve mediante la infraestructura vial, razón por la cual es necesario buscar nuevas herramientas y metodologías que permitan maximizar la vida útil de los activos y de esta manera optimicen los recursos mejorando la conectividad y calidad de vida de los ciudadanos (Valverde & Barrantes Jiménez, 2019). Existen diferentes técnicas de evaluación de pavimentos utilizadas para registrar y analizar la información de la condición de los mismos, herramientas de gestión que permiten conocer, controlar y mejorar su condición actual, y de igual manera las actividades de mantenimiento y/o rehabilitación a lo largo de la etapa de operación pueden ser evaluadas para determinar el ciclo de vida útil del mismo (Solminihac et al., 2010).

El Índice de Regularidad Internacional se emplea en el monitoreo, aprobación, recepción y restauración de superficies de carreteras. Este indicador tiene relación con los costos de operación y mantenimiento vehicular ya que evalúa el confort y seguridad que experimentan los usuarios al transitar por la vía (Solís, 2017).

Para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) existen diferentes técnicas y equipos diferenciados por su grado de precisión y la manera de obtener información, siendo una de sus problemáticas el hecho de que su adquisición sea por un costo elevado y la falta de capacitación para su uso, esto conlleva a que se de paso a la búsqueda de nuevas herramientas y metodologías innovadoras de fácil acceso que suministre información sobre la regularidad superficial del pavimento (Cruz, 2022).

Según PIARC (2018), el potencial del uso de vehículos aéreos no tripulados convencionales representa una opción viable en el estudio de redes viales, para generar modelos tridimensionales, gracias a su bajo costo, capacidad de capturar información en tiempo cortos, siendo útiles para diversas aplicaciones. Dicho lo anterior, el equipo VANT mejora la rentabilidad de los recursos, la gestión operativa y el mantenimiento oportuno de la superficie vial.

Ramírez (2017) menciona que, en la era digital actual, las aplicaciones para Smartphone están transformando la gestión vial al facilitar el acceso eficiente y asequible a datos precisos sobre el estado de las carreteras. Una de estas aplicaciones destacadas es Roadroid, que agiliza el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

El presente proyecto de investigación pretende identificar la edad actual dentro del ciclo de vida operacional de la avenida Bicentenario y la avenida de la República de la ciudad de Riobamba a través de la determinación del índice de Regularidad Internacional, mediante la aplicación de equipos VANT y herramientas digitales para Smartphone, potenciando su uso en la gestión vial.

1.2 Planteamiento del Problema

La calidad de un pavimento se mide a través de la cantidad de irregularidades presentes en el mismo, siendo el indicador del Índice de Regularidad Internacional (IRI) uno de los más empleados en esta evaluación, el cual se relaciona con el desempeño de una estructura de pavimento a lo largo de su vida útil, ya que a medida la regularidad aumenta, las cargas dinámicas originadas por el tráfico también se incrementan, generando impactos que son transmitidos a la estructura del pavimento, acelerando su deterioro, por lo que es necesario realizar el cálculo de este parámetro de una manera eficaz y económica (Bardales & Cheng, 2013).

Existen diferentes equipos capaces de levantar información de campo clasificándolos según su nivel de precisión y obtención de información, teniendo así a los dispositivos de alta precisión como es el perfilómetro laser, que brindan la opción de generar información de forma rápida, de igual manera, tenemos el nivel, mira topográfica, equipo merlín y Disptick. Sin embargo, estos instrumentos para la detección de la calidad de las vías son lentos y requieren personal calificado, cabe mencionar que estos son de acceso limitado por su disponibilidad en el mercado y a su vez tienen un costo elevado.

Por lo tanto, es necesario potenciar el uso de técnicas modernas de bajo costo que permitan hacer el seguimiento de la condición del pavimento de forma eficiente, optimizando los recursos, sin generar interrupciones al tránsito y precautelando la seguridad de los operarios.

1.3 Justificación

Debido al constante avance de la tecnología en el mundo se ha creado diferentes metodologías que posibilitan la determinación de las características y condiciones del pavimento de una forma eficiente y eficaz, siendo así que la utilización de vehículos aéreos no tripulado (VANT) permite mejorar la eficiencia de los procesos de recolección de datos salvaguardando al operario y sin obstruir el tráfico, se menciona también a herramientas digitales para Smartphone como una alternativa asequible para la gestión vial.

Actualmente el potencial del uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) son amplios, brindando beneficios en el área de la ingeniería debido a la gran cantidad de aplicaciones que estos equipos proporcionan a través de los diferentes tipos de sensores y cámaras que pueden transportar. Debido a su bajo costo, la mejora en la capacidad y accesibilidad de estos dispositivos ha generado que muchas agencias de transporte y contratistas comiencen a implementar esfuerzos en el uso de los VANT en su flujo de trabajo diario (Rogers, 2019).

En Ecuador los métodos utilizados para medir el índice de Regularidad Internacional (IRI) son métodos convencionales empleando procesos, equipos o

maquinaria que se han desarrollado en ambientes, condiciones y contextos distintos. Dentro de las normas ecuatorianas aplicadas para la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI) así como la determinación del ciclo de vida útil, no se especifica un método único, lo cual hace necesario la búsqueda de nuevas soluciones innovadoras para el control y monitoreo de los pavimentos, ofreciendo una metodología alternativa para la evaluación de la regularidad superficial empleando una herramienta accesible para cualquier administración y las consideraciones adecuadas para su aplicación (Cruz, 2022).

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Analizar las capacidades de equipos VANT convencionales y el procesamiento de información para determinar la etapa actual del ciclo de vida del pavimento mediante el método del índice de regularidad.

1.4.2 Específicos

- Identificar la altura de vuelo y densidad de pixelaje optimas en la determinación del IRI y compararlas con medidas de campo.
- Determinar las ventajas y desventajas de utilizar la metodología VANT y el método tradicional del IRI, aplicados a la avenida Bicentenario y avenida de la República de la ciudad de Riobamba.
- Aplicar el índice de serviciabilidad del pavimento para la identificación del ciclo de vida útil del pavimento de la zona de muestra.

2. CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1 Pavimento

El pavimento es un sistema compuesto por varias capas de materiales específicos que están diseñadas para recibir las fuerzas del tráfico y distribuirlas de manera gradual hacia las capas inferiores. Su principal objetivo es proporcionar una superficie de rodadura que funcione de manera efectiva (Rodríguez et al., 2019).

Para Reyes (2020), dentro de los tipos de pavimentos podemos encontrar a los siguiente:

- Pavimentos Flexibles o Asfálticos: Estos están conformados por materiales asfálticos o bituminosos junto con materiales granulares, lo que los hace más asequibles desde un punto de vista económico.
- Pavimentos de Concreto o Rígidos: Se componen de una losa de concreto hidráulico que descansa sobre diversas capas de materiales, en ocasiones con refuerzos de acero, y generalmente tienen un costo más elevado en comparación con los pavimentos flexibles.
- Pavimentos Semirrígidos: Representan una fusión de las características de los pavimentos flexibles y rígidos, a los cuales se les añaden aditivos como asfalto, emulsión, cemento, cal y productos químicos.
- Pavimentos Articulado: Estos se construyen utilizando bloques prefabricados idénticos que se colocan sobre una fina capa de arena.

Esta investigación se basa en los pavimentos Flexibles, los que se caracterizan por estar constituidos de una capa base y una capa de sub-base, las cuales reposan sobre una capa de suelo compactado, denominado subrasante. Para determinar el estado actual de la carpeta de rodadura de asfalto se llevan a cabo diferentes evaluaciones que nos permitan tomar decisiones sobre las acciones necesarias para rehabilitar, mantener o reconstruir la vía, con el objetivo de asegurar que cumpla con los estándares mínimos de serviciabilidad.

Al hablar del tipo de evaluación del pavimento se menciona que la regularidad es una factor que se considera de gran relevancia, ya que la falta de la misma en la superficie de rodadura se relaciona con la capacidad del asfalto para brindar calidad, seguridad y comodidad a los usuarios de la carretera en sus condiciones actuales (Saltos, 2023). La textura de una carretera se puede evaluar mediante pruebas y el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI), que refleja la irregularidad de la superficie de la misma. Esta medición se realiza con dispositivos altamente precisos, como son sensores, VANT, el rugosímetro de Merlín, nivel de mira, dipstick, entre otros.

Cabe mencionar también que la calidad de servicio es el elemento que, de acuerdo con el modelo AASHTO, evalúa las condiciones presentes de una carretera, y esta

evaluación se basa en la regularidad y se lleva a cabo mediante métodos matemáticos. El concepto de serviciabilidad fue desarrollado como parte de la investigación en el AASHO ROAD TEST.

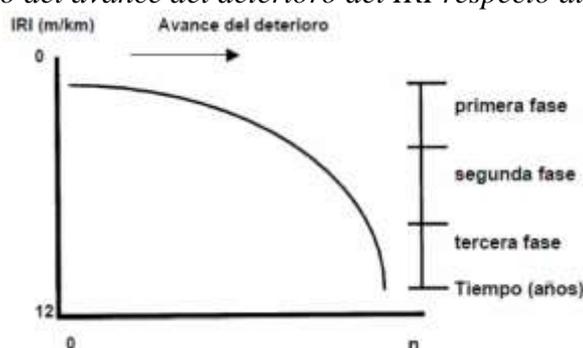
2.2 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

La regularidad se refiere a la variación de una superficie específica con respecto a una superficie plana ideal, y esto tiene un impacto en aspectos como el comportamiento de un vehículo, la experiencia de conducción, las fuerzas dinámicas y la capacidad de drenaje. Ejemplos de dimensiones que influyen en esto incluyen el perfil longitudinal y el perfil transversal (Montoya, 2013).

El Índice de Regularidad Internacional es el primer indicador de perfil que ha sido ampliamente aceptado y utilizado. Este método de análisis se adapta para funcionar con distintos tipos de equipos de medición de regularidad, y se puede considerar como una característica inherente al perfil de una carretera. El cálculo de este índice se fundamenta en un modelo matemático conocido como Cuarto de Carro (Quarter-Car). El sistema del Cuarto de Carro evalúa la flexión experimentada por la suspensión de un sistema mecánico simulado, imitando así la respuesta que tendría un pasajero. Los movimientos de la suspensión en el modelo se acumulan y luego se dividen por la distancia recorrida, lo que resulta en el Índice de Regularidad Internacional. Este valor se expresa en unidades como m/km, mm/m, in/mi, y similares. Cuanto mayor es el valor de IRI, más irregular y áspera es la superficie de la vía, lo que puede afectar negativamente la experiencia del usuario y el desgaste de los vehículos (Reyes, 2020).

Para abordar el comportamiento de la condición de una superficie de pavimento a lo largo de su vida útil, se utiliza una representación gráfica de forma parabólica, la cual divide la evolución del mismo en tres fases distintas. La primera etapa implica un deterioro inicial poco significativo durante los primeros años de uso. La segunda etapa, experimenta un deterioro más marcado considerando la implementación de un programa de mantenimiento para frenar este proceso de degradación. Finalmente, la tercera etapa se caracteriza por un deterioro acelerado, manifestándose en una disminución importante del nivel de servicio en pocos años. Ante esta situación, se hace imperativa una reconstrucción total del pavimento (Instituto Mexicano Del Transporte, 1998).

Figura 1 Gráfico típico del avance del deterioro del IRI respecto al tiempo



Nota. Recuperado de Instituto Mexicano Del Transporte, (1998).

Dentro del sexto tomo de la NEVI-12, que se enfoca en la “Conservación vial”, en su capítulo 6.200 titulado “Manual de estudios para programar obras de conservación de pavimentos de carreteras”, y en la subsección 6.203.3 denominada “Medición del perfil y de la regularidad superficial del pavimento”, se encuentran directrices, análisis y márgenes de aceptación para el índice de regularidad (IRI) destinados al mantenimiento o la restauración de la superficie del pavimento.

2.2.1 Niveles de la regularidad de la superficie

La uniformidad de la superficie de la carretera es esencial para garantizar una circulación de alta calidad. Cuando el IRI se clasifica en una de las dos últimas categorías, indica que el pavimento carece de funcionalidad adecuada. En consecuencia, el ingeniero debe considerar opciones viables de rehabilitación para mejorar la situación, a menos que se decida que los tramos afectados sean parte de intervenciones de naturaleza estructural que incluyan la corrección de las irregularidades superficiales.

Tabla 1 Niveles del IRI para evaluar la lisura de pavimentos asfálticos de carreteras en servicio

CLASIFICACIÓN	IRI (m/km)		CONDICIÓN TÍPICA
	TRANSITO BAJO NT1	TRANSITO MEDIO Y ALTO NT2 Y NT3	
Bueno	< 2.5	< 2	Pavimento con gran regularidad superficial circulación muy cómoda
Aceptable	2.5 – 4	2 – 3.5	Pavimento algo rugoso; el valor es superior advertido por los usuarios al circular a la velocidad de operación de la vía.
Pobre	4 – 5.5	3.5 – 5	Regularidad notoria; incomodidad para los conductores de los vehículos pesados.
Muy pobre	> 5.5	> 5	Pavimento muy rugoso y carente de confort para todos los usuarios.

Nota. La siguiente tabla proporciona una referencia de valores de IRI para evaluar la adecuación de la uniformidad en las carreteras nacionales pavimentadas, basada en experiencias locales y extranjeras (Ministerio De Transporte Y Obras Públicas Del Ecuador, 2013).

2.2.2 Equipos para la medición del IRI

Hay una amplia gama de dispositivos disponibles para evaluar la regularidad superficial del pavimento, y a medida que el tiempo ha avanzado, estos dispositivos han experimentado cambios y mejoras, lo que ha resultado en diferencias en términos de precisión, costos y velocidad entre ellos. Dentro de los cuales nos enfocaremos en el Merlín, VANT y sensores (smartphones).

- **Mira y Nivel**

Reyes (2020) menciona que este equipo es reconocido como uno de los métodos más precisos y económicos para la medición de perfiles longitudinales. Consiste en una mira de presión con unidades topográficas convenientes utilizadas para la recopilación de datos de línea horizontal. Se utiliza para levantar perfiles topográficos a intervalos de 0,25 metros con una precisión de 0,5 mm. Los valores obtenidos se convierten a unidades de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mediante un programa informático. A pesar de su

precisión, se le considera un método de rendimiento más bajo debido a que el proceso de recopilación de datos es relativamente lento en comparación con otros equipos disponibles.

Figura 2 Nivel y mira topográfico



Nota. (Goequipos S.A., 2023)

- **Diptisck**

El dispositivo utiliza como parte medular de su composición un inclinómetro sostenido por dos puntos de apoyo, separados por una distancia de aproximadamente 300 mm. o 250 mm. Este sistema permite registrar la elevación de un punto de apoyo en relación con el otro, rotando el equipo de manera alternada sobre cada uno de los apoyos, a lo largo de una sección de pavimento previamente marcada. Es capaz de registrar entre 10 y 15 lecturas por minuto, con un margen de error de ± 0.127 mm en la medición del perfil longitudinal (Vea, 2019)

Se lo utiliza como apoyo para la calibración de otros dispositivos, entre los más importantes los que son de respuesta o también sirve para validar los resultados que se obtienen de los perfilómetros inerciales.

Figura 3 Dipstick

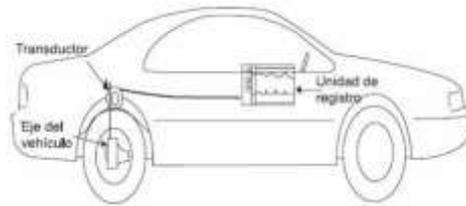


Nota. Kraftur® (2023).

- **Equipos Tipo Respuesta (RESPONSE-TYPE ROAD ROUGHNESS MEASURING SYSTEM – RTRRMS)**

Un equipo de tipo respuesta no se centra en medir directamente el perfil de la carretera, sino en registrar la respuesta del vehículo a las irregularidades de la superficie. Estos dispositivos son apropiados para la evaluación rutinaria de una red de carreteras y ofrecen una representación adecuada de su condición. Los resultados pueden ofrecer a los gestores una indicación general de la condición de la red para planificar labores de conservación. La principal limitación de estos equipos radica en que la medida del movimiento del eje en relación con el tiempo está influenciada por la dinámica específica del vehículo de medición, lo que impide la comparación de mediciones realizadas en diferentes momentos, dificultando el seguimiento temporal del estado del pavimento. (Vea, 2019)

Figura 4 Equipos Tipo Respuesta

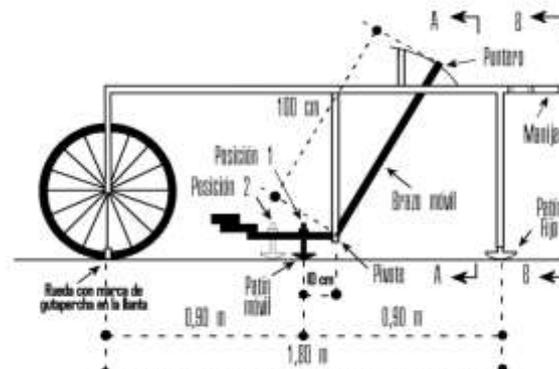


Nota. Badilla (2009).

- **Merlín**

El perfilómetro estático MERLIN, creado por el Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL, por sus siglas en inglés), se diseñó con la finalidad de analizar la regularidad de las carreteras y es usualmente empleado en naciones en desarrollo. Se distingue por su asequible precio, facilidad de construcción, ajuste, utilización y cuidado. Además, se utiliza de manera extensa como punto de referencia para calibrar otros sistemas de medición (Álvarez & Rivero, 2012).

Figura 5 Diagrama del perfilómetro estático Merlín



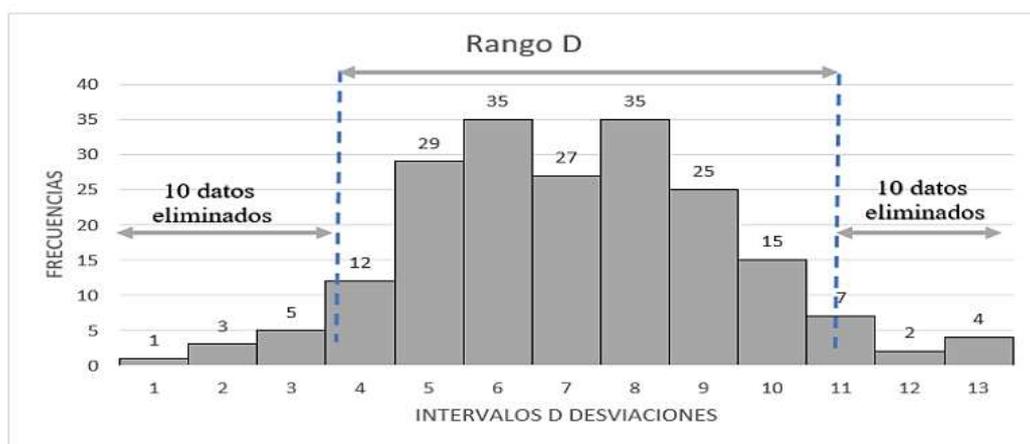
Nota. Recuperado de Álvarez & Rivero (2012).

El perfilómetro MERLIN funciona evaluando la diferencia en la altura del terreno con respecto a una línea recta trazada entre dos puntos situados antes y después del punto de medición. Para llevar a cabo esta tarea, utiliza un patín que hace contacto con la superficie de la carretera en el lugar de medición. Este patín está conectado a un brazo que puede pivotar, y en el extremo opuesto del brazo, el desplazamiento se amplifica en 10 veces para que pueda ser leído en una escala ubicada en un cuadrante. La escala está compuesta por 50 divisiones separadas por intervalos de 5 mm, lo que posibilita la detección de variaciones en la altura del terreno de hasta 0,5 mm, con un rango total de 25 mm que incluye la posición de referencia cero (Álvarez & Rivero, 2012).

Para evaluar la regularidad del pavimento, se emplea la distribución de frecuencia de las diferencias entre la superficie de la carretera y la línea promedio trazada entre el punto de apoyo de la rueda delantera y el punto de apoyo del pie trasero, que están separados por 1,80 metros. Para obtener una medición significativa, el método MERLIN requiere la recolección de 200 muestras de estas diferencias a lo largo de un tramo de 400 metros de la carretera, con un espaciado uniforme de 2 metros entre cada medición (Saltos, 2023).

Al construir un histograma que represente la frecuencia de estas 200 muestras, es posible obtener una medida de la variación en el perfil de la carretera y relacionarla con la escala estándar de regularidad. Esta medida de variación se conoce como el "rango de la muestra" (D), el cual se calcula después de eliminar el 10% de las mediciones en ambos extremos del histograma. El valor resultante de D se denomina regularidad en unidades "MERLIN".

Figura 6 Histograma de la distribución de frecuencias



Nota. Recuperado de Del Aguila, (1999).

Los equipos VANT y sensores dentro de dispositivos Smartphone son parte de los equipos de medición del IRI de esta investigación. Dado que su aplicación es innovadora, se proporcionará una descripción más detallada a lo largo del marco teórico.

2.3 VANT

De acuerdo con Greenwood et al. (2019), los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), comúnmente conocidos como drones, se definen como aeronaves sin piloto a bordo, dirigidas por operadores desde lugares remotos o programadas para ejecutar acciones autónomamente. Estos drones han ganado popularidad en diversos campos, como la supervisión de infraestructuras, como carreteras, debido a sus características únicas. Estos dispositivos pueden almacenar grandes cantidades de datos, los cuales luego se procesan con técnicas avanzadas como la transformación de imágenes, fotogrametría e inteligencia artificial para obtener valiosos resultados sobre la condición de las vías, incluyendo el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

2.3.1 Clasificación de los VANT

La clasificación de los dispositivos VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados) se basa en las regulaciones y normativas establecidas por las autoridades de aviación civil de cada país. Debido a que en Ecuador la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) no integra aún en su normativa especificaciones detalladas sobre los dispositivos VANT, la presente investigación recopilará información de diferentes autores para describir la tipificación de estos equipos, describiendo lo más importante de acuerdo al tema de estudio.

Elmeseiry et al. (2021), proponen una clasificación analizando el tamaño de los drones la cual es descrita a continuación:

- Clasificación basada en el tamaño

Una de las formas más efectivas de categorizar los vehículos aéreos no tripulados (VANT) es considerando su tamaño, ya que estos dispositivos vienen en una amplia variedad de dimensiones para cumplir con una gama diversa de propósitos. Por lo tanto, es posible clasificar los VANT en cuatro categorías principales, que se detallan a continuación:

Tabla 2 Clasificación de VANTs según su tamaño

CLASE	DIMENSIÓN MÁXIMA
Ultra pequeño (NAV)	< 7.5 cm
Muy pequeño (MAV)	7.5 – 15 cm
Pequeño	15 – 200 cm
Medio	2 – 10 m
Grande	> 10 m

Nota. Recuperado de Elmeseiry et al., (2021).

En cuanto al enfoque de la investigación, la clasificación en la que se centrará será de alta y baja gama, entendiendo a la primera como “VANT convencional” y a la siguiente como “VANT no convencionales”, definiéndolos de forma puntual según sus especificaciones, teniendo así las siguientes:

Tabla 3 Características de Drones convencionales y no convencionales.

Características	VANT convencional	VANT no convencional
Precio	Son de costo más accesible.	Precio más alto debido a su tecnología avanzada y características superiores.
Calidad de cámara	Resoluciones limitadas, en el rango de HD (720p) o Full HD (1080p). Sensores pequeños que las condiciones de luz afectan negativamente la imagen. Modos de captura reducidos.	Resolución de 4K o superior. Sensores grandes, capturan más luz. Sistemas de estabilización con captura en formato RAW, HDR y modos de seguimiento de objetos.
Rendimiento de Vuelo	Tiene motores menos potentes y una menor duración de batería, lo que limita su velocidad, altitud máxima y tiempo de vuelo.	Con motores potentes y avanzada propulsión, logran altas velocidades, altitudes y estabilidad en viento, además de una batería de larga duración.
Sistemas de posicionamiento y navegación avanzados	GPS básico, limitaciones en detección de obstáculos, navegación de entornos simples.	GPS de alta precisión, sensores redundantes, sistema de evitación de obstáculos avanzado.
Durabilidad y Resistencia	Materiales más ligeros y menos costosos, como plástico. Pueden no ser adecuados para volar bajo lluvia o en vientos fuertes. Uso recreativo ocasional.	Materiales de alta calidad, como aleaciones de aluminio y fibra de carbono. Resisten climas adversos, agua y polvo.
Control y Conectividad avanzada	Controladores remotos más simples. Dependen de la banda de 2.4 GHz para la conectividad	Pueden tener pantallas integradas, joysticks precisos y controles ergonómicos. Transmisión de video en tiempo real a largas distancias. Uso dual de 2.4 GHz y 5.8 GHz para conexión estable."

Nota. Información recuperada de (Morales-Rodríguez et al., 2022)

Por lo general, los VANT se categorizan según su tipo de sustentación, como es:

- Ala fija

Los VANT de ala fija se caracterizan por su estructura de ala rígida, similar a la de aeronaves convencionales, generan sustentación principalmente a través de su diseño

aerodinámico y la forma de su ala. Estos son ideales para aplicaciones que requieren largos tiempos de vuelo y la cobertura de grandes áreas, pero tienen limitaciones en términos de maniobrabilidad y espacio necesario para el despegue y el aterrizaje.

Figura 7 VANT de ala fija

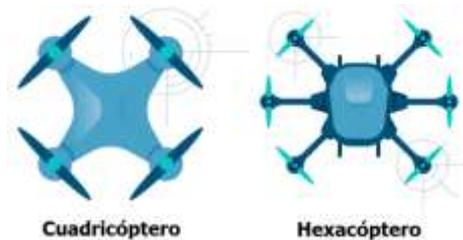


Nota. Recuperado de El vuelo del dron, (2020).

- Ala Rotatoria

Los VANT de ala rotatoria son conocidos por su versatilidad, maniobrabilidad y capacidad de despegue y aterrizaje verticales, lo que los hace ideales para una amplia variedad de aplicaciones, desde tareas de observación e inspección hasta operaciones de entrega y mapeo. Su diseño flexible y capacidad de vuelo estacionario los convierte en una opción popular en el campo de la aviación no tripulada.

Figura 8 Dron de ala rotatoria



Nota: Recuperado de UAV COACH, (2013).

- Híbrido

Este tipo de VANT combina las dos sustentaciones anteriormente vistas, proporcionando nuevas capacidades y maniobrabilidad para inspeccionar grandes áreas de terreno, sin embargo, su costo es elevado.

Figura 9 VANT híbrido

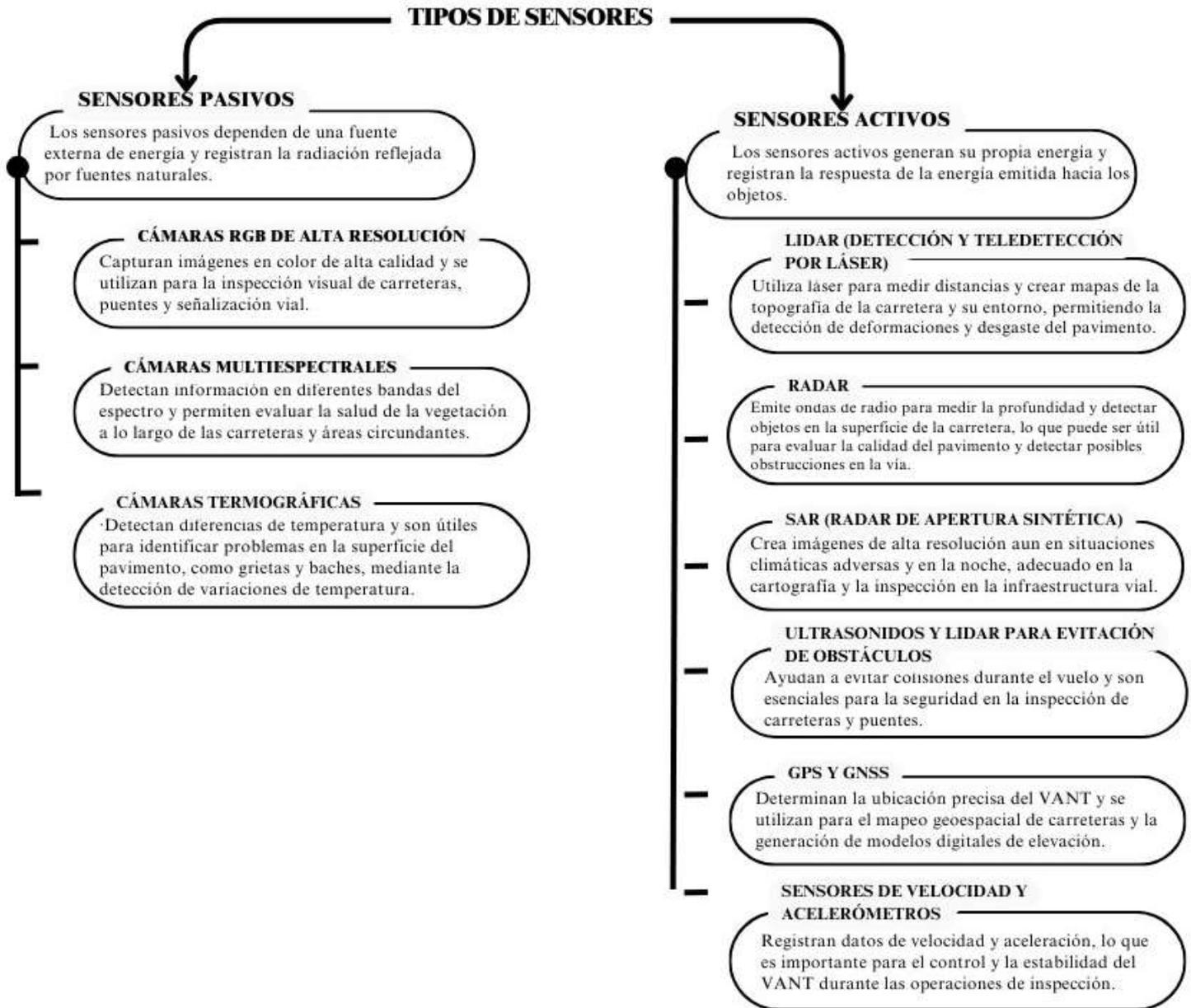


Nota: Recuperado Elmeseiry et al., (2021)

2.3.2 Tipos de sensores

Guevara et al. (2020) exponen que los VANT representan una plataforma versátil que se puede personalizar mediante la instalación de diversas cámaras o sensores de teledetección. Existen múltiples tipos de sensores disponibles para la recopilación de datos, y estos se dividen en dos tipos de sensores:

Figura 10 *Tipos de Sensores*



Nota: Información para la elaboración obtenida de Guevara et al., (2020).

Al estar enfocado el tema en cuanto a la infraestructura vial, es de gran importancia correlacionar la tecnología de los drones con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de alta precisión y en tiempo real. Lo que nos lleva a hablar sobre la incorporación de la

tecnología RTK la cual permite obtener datos georreferenciados con una precisión centimétrica durante los vuelos. Esto nos será de gran ayuda al momento de realizar el mapeo y fotogrametría de alta precisión, ya que permiten obtener modelos tridimensionales y ortofotos con una mayor exactitud.

Es importante destacar que el uso de VANT RTK requiere conocimientos especializados y la configuración adecuada del sistema, incluyendo la calibración precisa de los equipos. Además, es fundamental cumplir con las regulaciones locales y las mejores prácticas de seguridad al utilizar drones en cualquier aplicación.

2.3.3 Normativa y regulación del uso de los VANT en Ecuador

Para la DGAC (2020), “Las operaciones de trabajos aéreos, además de cumplir con las reglas de operación del Capítulo B y C, deben contar con el correspondiente permiso de operación de conformidad con la normativa vigente.” Por lo que en síntesis las disposiciones del reglamento, se prohíbe la operación de drones en las proximidades de aeródromos, áreas de seguridad gubernamental, helipuertos, zonas consideradas intangibles, entre otras ubicaciones. Se establece una distancia mínima de 9 kilómetros para aproximarse a estas áreas controladas en el espacio aéreo. Además, se fija una altitud máxima de vuelo de 400 pies (equivalentes a 122 metros) sobre el terreno, y se autoriza la operación únicamente durante el período que abarca desde el amanecer hasta el anochecer, siempre y cuando las condiciones meteorológicas permitan una visibilidad adecuada.

2.3.4 Potencial del uso de los equipos VANT

- **Inspección y Supervisión de Carreteras:** Estos dispositivos pueden realizar evaluaciones eficientes y económicas de la condición de las carreteras. Detectan problemas superficiales como grietas, baches y hundimientos, lo que permite a las autoridades de carreteras tomar medidas preventivas y correctivas antes de que los problemas se agraven.
- **Evaluación de Puentes:** Los drones pueden acceder a zonas de puentes de difícil acceso para inspeccionar su estado. Esto resulta especialmente útil para detectar corrosión, desgaste y daños estructurales que podrían poner en peligro la seguridad.
- **Levantamiento Topográfico:** Equipados con cámaras y sensores de mapeo, los drones pueden crear modelos topográficos precisos de la infraestructura vial y su entorno. Esto es valioso para la planificación de proyectos de construcción y mantenimiento de carreteras.
- **Evaluación de Daños por Desastres Naturales:** Tras eventos como inundaciones, terremotos o deslizamientos de tierra, los drones pueden desplegarse rápidamente para evaluar el alcance de los daños en la infraestructura vial y colaborar en operaciones de respuesta y recuperación.
- **Gestión de Activos:** Los drones pueden contribuir a la gestión de activos de infraestructura vial, incluyendo señales de tráfico, postes de iluminación y barreras de seguridad, permitiendo una inspección regular y eficiente de su estado.

- **Planificación de Rutas y Estudios de Tráfico:** Los drones pueden recopilar datos sobre el flujo de tráfico y las condiciones de las carreteras, lo que facilita la planificación de rutas y la toma de decisiones relacionadas con la expansión o mejora de la infraestructura vial.

Se nombra como un ejemplo a Tan & Li (2019) quienes realizaron un estudio de pavimentos utilizando un VANT DJI Phantom y emplearon las imágenes adquiridas para generar un modelo topográfico tridimensional con una precisión vertical de 1 cm a través de procesamiento fotogramétrico. Además, desarrollaron un algoritmo para detectar defectos en el pavimento en el modelo 3D. Los resultados demostraron que este enfoque pudo identificar con precisión problemas superficiales del pavimento, con un margen de error en la detección de alrededor de un centímetro. Esto sugiere un gran potencial en la ingeniería práctica.

El empleo de un dron permite recabar información de manera rápida sin interferir con el tráfico ni poner en peligro a los operarios, a diferencia del método tradicional.

En relación a las superficies de carreteras, se han llevado a cabo múltiples investigaciones que exploran la utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) como instrumento para inspeccionar daños, haciendo uso de diversas tecnologías de sensores. En la tabla 8 se proporciona un resumen de la literatura relevante en este contexto.

Tabla 4 Potencial de los VANT en inspección de pavimentos

Referencia	Tipo de sensor	Resumen
Li et al. (2019)	LIDAR	En este estudio, se explora la viabilidad de la identificación del deterioro del pavimento con VANT a baja altitud y un sensor LIDAR.
Zhang et al. (2019)	RGB	Se validan algoritmos para el reconocimiento de tipos de grietas, tales como: longitudinales, transversales y piel de lagarto a través de imágenes del VANT.
Pan et al. (2018)	Multiespectral	Se emplea imágenes multispectrales adquiridas por VANT para distinguir entre el pavimento normal y los deterioros del pavimento. Se utilizan algoritmos de machine learning como redes neuronales artificiales.
Wu et al. (2018)	RGB /Infrarrojo	Se propone un método para evaluar pavimentos y puentes a través de imágenes de alta resolución y sensores infrarrojos en un VANT y el uso de redes neuronales.

Nota: La tabla 6 es una adaptación de la mostrada por Cruz, (2022)

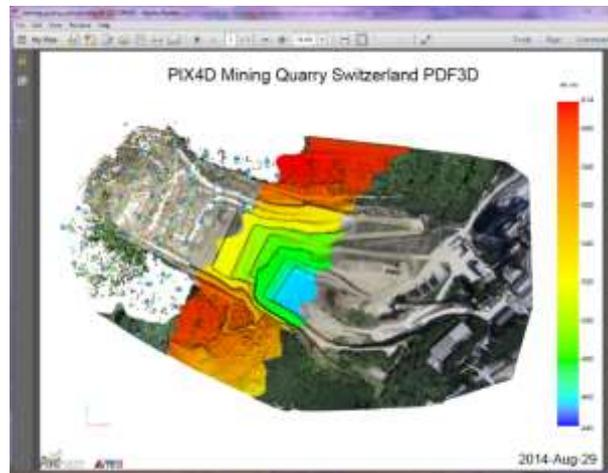
2.3.5 Aplicaciones para procesamiento de datos VANT

Se debe mencionar también que para el procesamiento de los datos obtenidos por equipo VANT, es necesario hacer uso de aplicaciones como las que se presentan a continuación:

PIX4Dmapper

PIX4Dmapper es un software líder en el procesamiento y análisis de imágenes y datos capturados por drones. Es una solución completa que permite transformar imágenes aéreas en mapas georreferenciados, modelos 3D y ortomosaicos de alta resolución.

Figura 11 Modelo 3D de una superficie con PIX4Mapper



Nota: Recuperado de PDF3D, (2023).

La combinación de PIX4DMapper y el análisis de IRI en el contexto de la infraestructura vial implica utilizar un VANT equipado con una cámara para recopilar imágenes aéreas de la carretera a estudiar, teniendo en cuenta de que estas cubran adecuadamente la longitud de la carretera y tengan una superposición significativa. Es importante mencionar que el definir la altitud de vuelo, la georreferenciación y la configuración de la cámara optimiza la calidad de las imágenes para su posterior procesamiento y garantizar la precisión espacial de los resultados.

Se puede utilizar un modelo 3D de la carretera generado por PIX4DMapper para calcular el Índice de Regularidad Internacional (IRI) de la carretera, debido a que esta combinación de PIX4DMapper y análisis de IRI es valiosa en la gestión de carreteras y la ingeniería vial, ya que proporciona una forma eficiente y precisa de evaluar la calidad y la seguridad de las carreteras y planificar su mantenimiento.

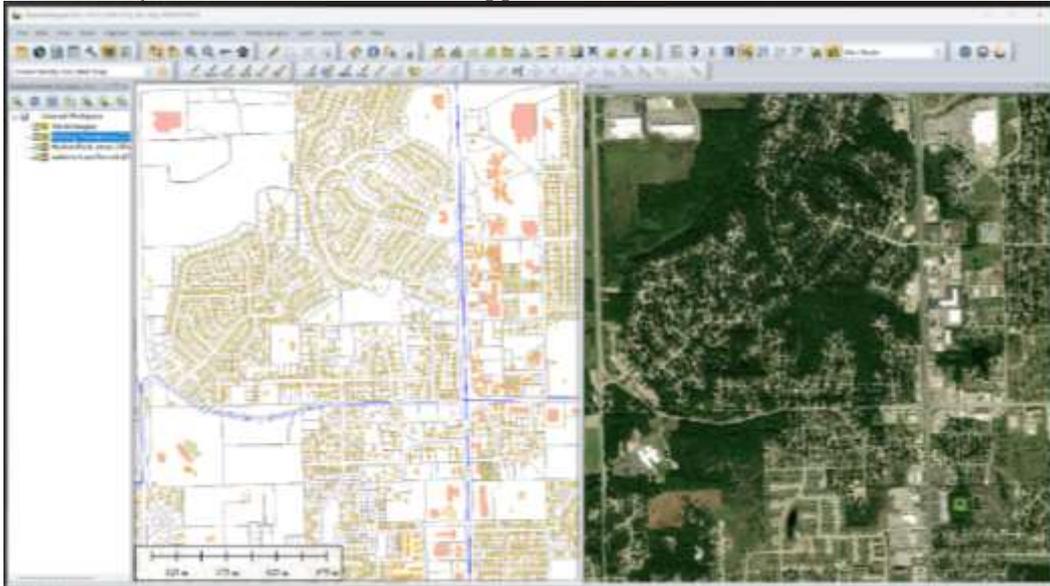
Global Mapper

Este software de SIG (Sistema de Información Geográfica) es bastante versátil y de fácil acceso utilizado para procesar y analizar datos geoespaciales, siendo reconocido por dar la posibilidad de utilizar varios formatos de datos, como son las imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, archivos vectoriales y raster, entre otros. Las funciones de análisis que incluye este software nos permite realizar diversas tareas relacionadas con la cartografía y el análisis espacial de superficies como son: el modelado de cuencas visuales, delineación de cuencas hidrográficas, la medición de volúmenes, la optimización de cortes y rellenos, medición de volúmenes, cálculo ráster, creación de cuadrículas en el área estudiada, generación de perfiles de terreno y entre otras. Adicionalmente el programa nos

da la posibilidad de trabajar con datos LiDAR, permitiendo visualizar, editar y analizar nubes de puntos generadas por esta tecnología. (GeoOilEnergy, 2023)

Este programa se lo puede obtener de manera gratuita en su sitio web aplicando a una prueba gratuita con fines académicos.

Figura 12 Interfaz de inicio de Global Mapper



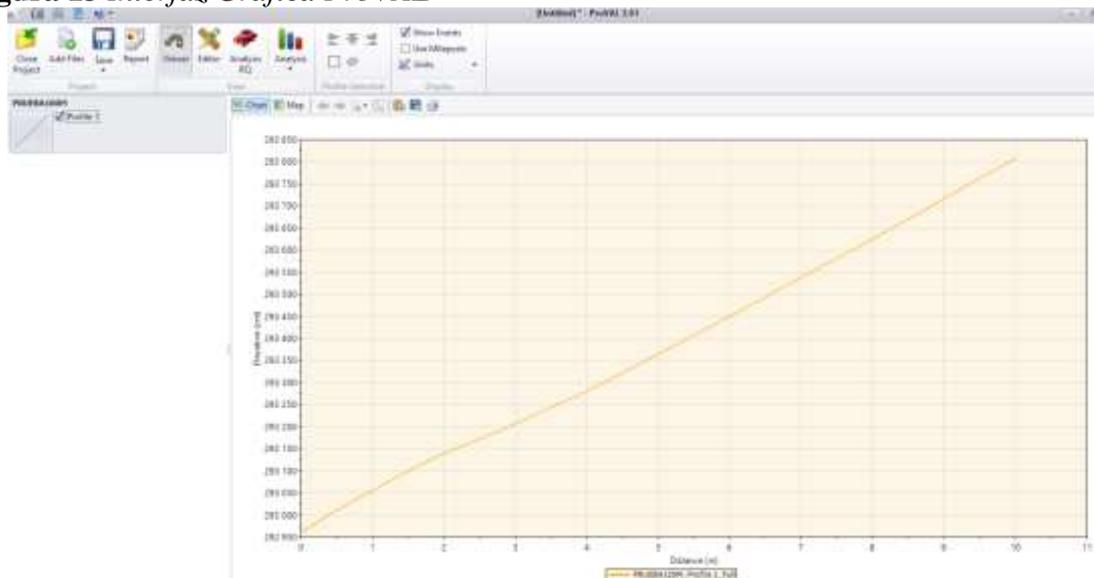
Fuente: (GeoOilEnergy, 2023).

ProVAL

ProVAL, o Visualización y Análisis de Perfiles de Pavimento, emerge como una herramienta ingenieril integral diseñada para la visualización y análisis avanzado de perfiles de pavimentos. Este software se destaca por su interfaz intuitiva y su potente capacidad analítica, permitiendo a los profesionales de la ingeniería de carreteras examinar detalladamente perfiles de pavimento de diversas maneras. Utilizando el formato eficiente y específico PPF (Pavement Profile Standard File), ProVAL garantiza la portabilidad, estabilidad y mantenibilidad de los datos. Además, su capacidad para importar perfiles desde una variedad de formatos, junto con la conversión automática a PPF al guardar proyectos, añade flexibilidad a la gestión de datos. Patrocinado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y el Programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (LTPP), ProVAL se posiciona como una herramienta fundamental para la optimización de operaciones de fresado y el cumplimiento de estándares de regularidad específicos (The Transtec Group, 2017).

La aplicación se la obtiene en Microsoft Store de manera gratuita.

Figura 13 *Interfaz Gráfica ProVAL*



Nota. The Transtec Group, (2017)

2.4 Determinación del IRI mediante Roadroid

En el contexto de la medición del IRI y la administración de carreteras, es frecuente que las entidades utilicen aplicaciones y software especializados para recopilar y examinar información acerca de la regularidad del pavimento. Estos programas generalmente se operan en dispositivos móviles o computadoras portátiles que se instalan (superponen) en vehículos de medición, lo que permite a los ingenieros y profesionales viales registrar y analizar los datos de regularidad de manera instantánea.

Un equipo de ingenieros suecos ha estado utilizando dispositivos móviles y sistemas GPS desde 1997 para llevar a cabo mediciones relacionadas con la fricción, ajustes dinámicos de velocidad y la recopilación de datos de carreteras. La idea original detrás de Roadroid se originó en 2001 cuando el Transportation Research Board (TRB) en Washington supervisó un proyecto en el que se observaron velocidades de camiones significativamente reducidas debido al mal estado de la carretera. Fue a partir de esta observación que surgió la noción de medir las vibraciones de los vehículos como un medio para evaluar la condición de la carretera (Ramirez, 2017).

De acuerdo con Oyolo (2021), Roadroid es una aplicación que se utiliza mediante un teléfono inteligente y funciona como un sistema para supervisar las condiciones en tiempo real de una carretera. Esto se logra registrando vibraciones a través de un acelerómetro incorporado en el teléfono, además de utilizar el GPS para determinar su ubicación en la ruta. La aplicación también se conecta a través de servicios de internet para realizar un seguimiento continuo y transmitir datos sobre las condiciones actuales de la carretera, lo que facilita la planificación de futuras labores de mantenimiento.

El software para Android no se encuentra al nivel de equipos de alta gama para la medición del IRI, pero cabe recalcar que posee un buen rendimiento y proporciona datos

adecuados de este índice, ya que cuenta con un alto grado de precisión, como también es accesible para los usuarios, fácil de usar y no tiene un alto costo. Describiendo también que los usuarios de la aplicación tienen la capacidad de recopilar datos incluso en ausencia de conectividad a internet, ya que la información se comprime antes de ser transmitida a la nube. A través de la plataforma web de Google Maps, se visualiza el estado de la carretera analizada mediante una representación con cinco colores que corresponde al IRI calculado.

La aplicación Roadroid no es de uso libre, no obstante, se puede solicitar una prueba gratuita por motivos académicos comunicándose con los desarrolladores de la aplicación, en el anexo 1 se presenta la solicitud para la obtención del programa.

Tabla 5 Estado de la vía según Roadroid

Estado de la vía	IRI	Color
Buena	< 2.5	Verde
Satisfactoria	2,5 – 4	Amarillo
No satisfactoria	4 – 6	Rojo
Pobre	>6	Negro

Nota: Recuperado de Roadroid, (2020).

2.5 Índice de Serviciabilidad del pavimento

El término PSI, que proviene de las siglas en inglés "Present Serviceability Index" o Índice de Serviciabilidad del Pavimento, nos proporciona información sobre el estado actual del pavimento. Su cálculo se basa en correlaciones a través de análisis matemáticos. Hay diversas metodologías para calcular el PSI, y una de las formas comunes consiste en evaluar la regularidad de la superficie del pavimento utilizando instrumentos como perfilómetros o rugosímetros.

2.5.1 Relación entre PSI – IRI

Después de calcular el Índice de Regularidad Superficial del Pavimento (IRI), los investigadores optaron por establecer una relación entre el IRI y el PSI. Utilizando los siguientes modelos desarrollados por los diferentes autores presentados a continuación:

- En 1987 por Paterson, conocido como HDM III, derivó la siguiente ecuación:

$$PSI = 5 * e^{(-0.18*IRI)} \quad (1)$$

Donde:

PSI = Índice de Serviciabilidad del pavimento

e = Exponencial representado con el valor de 2.71828183

IRI = Índice de Regularidad Superficial del Pavimento

- El modelo desarrollado por Al Omari y Darter en 1994, proponen la siguiente ecuación:

$$PSI = 5 * e^{(-0.261*IRI)} \quad (2)$$

Donde:

PSI = Índice de Serviciabilidad del pavimento

e = Exponencial representado con el valor de 2.71828183

IRI = Índice de Regularidad Superficial del Pavimento

- Los investigadores Dujisin y Arroyo propusieron la siguiente ecuación:

$$PSI = 5,85 - 1,68 * IRI^{(0,5)} \quad (3)$$

PSI = Índice de Serviciabilidad del pavimento

IRI = Índice de Regularidad Superficial del Pavimento

- La ASSHTO 93 propone:

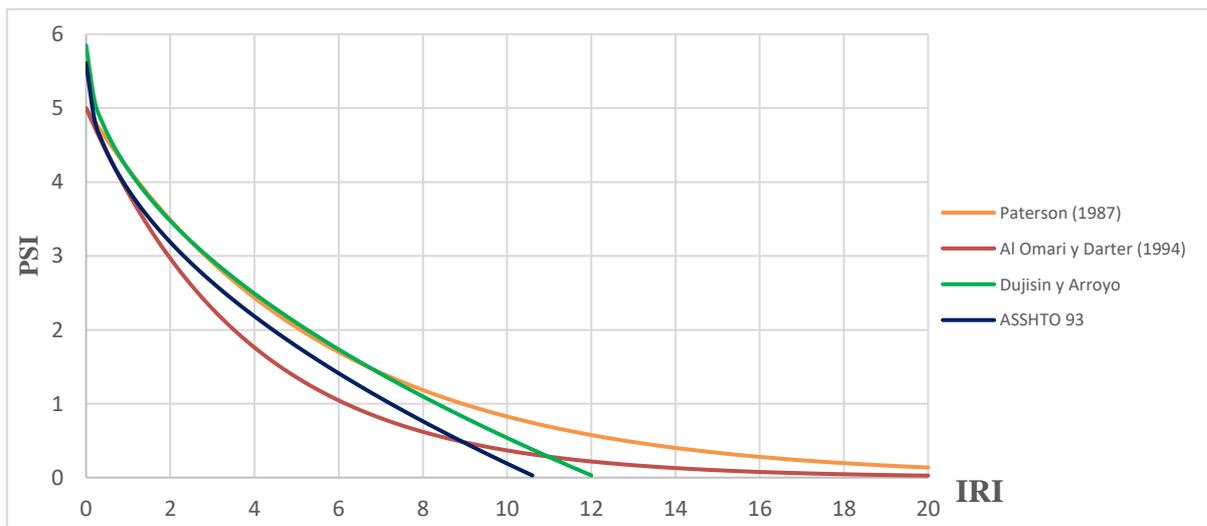
Pavimento asfáltico:

$$PSI = 5,61 - 1,714 * \sqrt{IRI} \quad (4)$$

Pavimento rígido:

$$PSI = 5,769 - 1,589 * \sqrt{IRI} \quad (5)$$

Figura 14 PSI en función al IRI aplicando diferentes formulas



Nota. La grafica representa el ajuste de las 5 ecuaciones aplicadas para la obtención del PSI en función del IRI

La calificación del Índice de Serviciabilidad del Pavimento se organiza según la siguiente escala:

Tabla 6 Rangos de evaluación del PSI

Escala PSI	Clasificación
5 – 4	Muy buena
4 – 3	Buena
3 – 2	Regular
2 – 1	Mala
1 – 0	Muy mala

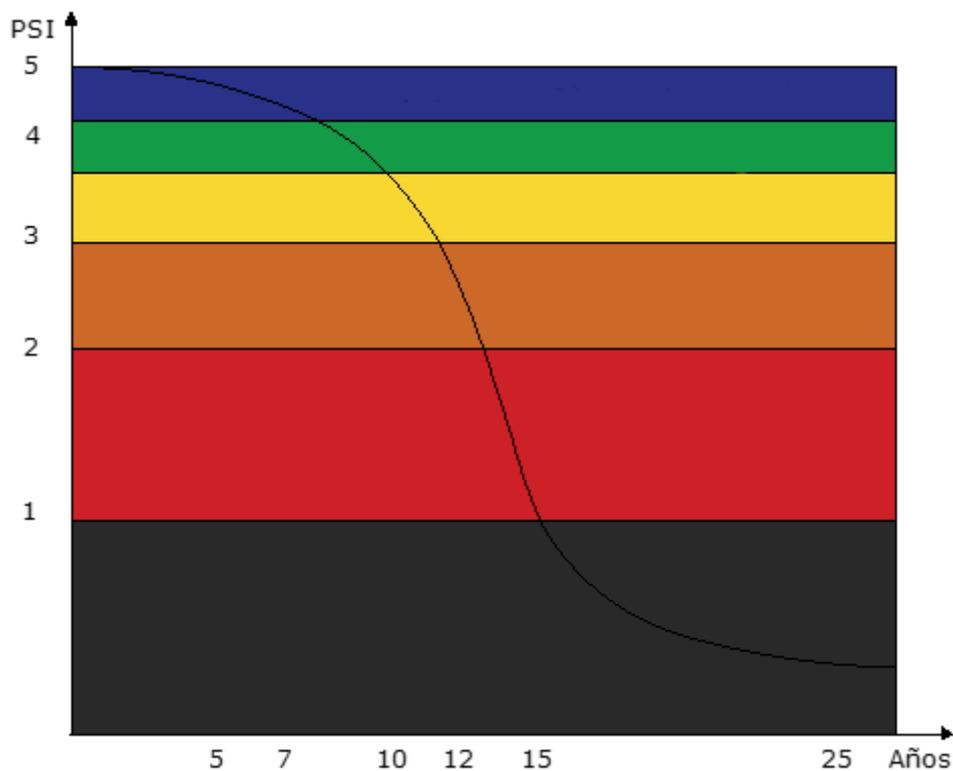
Nota. Clasificación ASHTO (1993)

2.6 Ciclo de vida

El ciclo de vida de un pavimento se refiere a las diversas fases que experimenta desde su creación hasta el final de su vida útil. Por lo general, este concepto se tiene en cuenta en la etapa inicial de diseño del pavimento, planificando su desempeño efectivo durante un número específico de años (Yesquen, 2016).

La representación del ciclo de vida se logra a través de una curva de rendimiento. En la figura 1, se puede apreciar la curva característica que muestra el pavimento a lo largo de su existencia.

Figura 15 Curva típica del ciclo de vida útil del pavimento.



Nota: Recuperado de Valverde & Barrantes Jimenez (2019).

El punto más alto de la gráfica marca el inicio del uso del pavimento cuando se encuentra en condiciones óptimas, como nuevo. A medida que el tiempo avanza, se observa una disminución en la curva, lo que indica un aumento en el deterioro en comparación con su estado inicial.

La determinación del ciclo de vida del pavimento busca evitar que el deterioro del pavimento ocurra de manera abrupta y se procura un cambio gradual a lo largo del tiempo, lo que resulta en una prolongación de su vida útil. Se divide en cinco etapas, que son:

- Fase de diseño del pavimento
- Fase de producción de materiales
- Fase de construcción
- Fase de uso, mantenimiento y rehabilitación
- Finalización de la vida útil

3. CAPITULO III. METODOLOGIA

3.1 Tipo de Investigación

El tema de estudio utiliza una investigación mixta, ya que relaciona la investigación exploratoria y descriptiva en el campo de la ingeniería civil; aquí se explorará el potencial de utilizar equipos VANT para un propósito específico: la evaluación del ciclo de vida útil de las vías a través del método IRI. Dado que esta área de estudio podría ser relativamente nueva o menos estudiada, la investigación podría comenzar explorando las posibilidades y limitaciones de esta técnica. Además, también se incluye una fase descriptiva en la que se recopilan datos y mediciones de campo utilizando los VANT para evaluar el IRI de varias vías. Esta fase busca describir cómo funciona esta técnica en la práctica y qué información se puede obtener.

Según Hernández et al. (2014), los estudios exploratorios se llevan a cabo cuando se pretende investigar un tema o asunto de investigación que ha recibido poca atención previa, generando incertidumbre o carencia de investigación existente. Mientras que una investigación descriptiva tiene como objetivo detallar las propiedades, rasgos y perfiles de individuos, colectivos, comunidades, procesos, elementos o cualquier fenómeno que esté sujeto a un examen analítico.

3.2 Diseño de Investigación

La definición de un diseño de investigación teniendo en cuenta a Hernández et al. (2014), se refiere a un plan minucioso y organizado que establece la manera en que se ejecutará un estudio científico. Este plan estructurado describe de forma sistemática los pasos, métodos, técnicas y procedimientos empleados para recolectar y analizar datos con el fin de abordar preguntas de investigación y cumplir los objetivos del estudio de manera rigurosa y eficaz.

Por lo tanto, se puede afirmar que el enfoque de investigación utilizado en este estudio es “no experimental”, ya que no se lleva a cabo una manipulación deliberada de las variables independientes con el fin de analizar su impacto en otras variables.

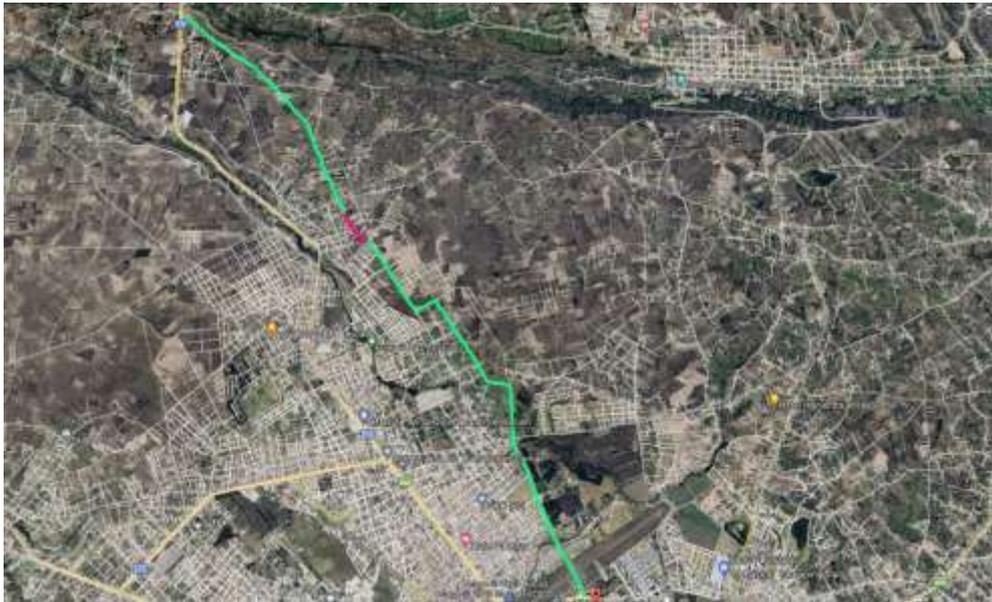
En este estudio, se recopilarán datos del Índice de Regularidad Internacional (IRI) del pavimento a lo largo de la ruta desde la avenida Bicentenario hasta el fin de la vía de la República, en su condición original. Luego, se compararán los resultados obtenidos mediante los equipos VANT, la aplicación Roadroid y el rugosímetro Merlín.

De la división del diseño de investigación “no experimental”, su análisis se basa en la categoría transeccional, puesto que, para Liu (2008) y Tucker (2004) citados por Hernández et al. (2014, p.154), “Los diseños de investigación transeccional o transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único”, haciendo hincapié en que la toma de la variable IRI se la realiza en un momento específico, dado que estos cambian a lo largo de su vida útil.

3.3 Población de estudio y tamaño de muestra

El objetivo de estudio es la avenida del Bicentenario en conjunto con la avenida de la República ubicados en la ciudad de Riobamba, contando con una longitud de 8km, con dos carriles de entrada y salida, además posee una ciclovía, teniendo así la población de estudio.

Figura 16 *Ubicación de la población y muestra de estudio*



Nota. Obtención Google Earth

Para establecer el tamaño de la muestra de estudio se buscó una combinación óptima entre precisión, eficiencia computacional y requisitos de hardware, obteniendo así una optimización del software PIX4DMapper ya que, si nos centramos en la eficiencia computacional, al limitar el área de procesamiento a un tramo de 400 metros, se optimiza la eficiencia del software, reduciendo el tiempo de procesamiento y los requisitos de hardware. Esto facilita el manejo de grandes conjuntos de datos y mejora la fluidez del proceso de generación de modelos digitales.

3.4 Técnicas de recolección de datos

3.4.1 Recolección de datos rugosímetro Merlín

Para iniciar con la recolección de datos del IRI con el instrumento Merlín, se realiza la calibración in situ en una superficie plana, se debe también marcar una referencia de 2 metros en la llanta, seguir medidas de seguridad, y evitar ensayos en pavimento húmedo para prevenir errores en las lecturas y el procesamiento de datos.

Los datos obtenidos se deben registrar en la hoja de campo presentada en el Anexo 2, colocándolos en orden descendente, y de izquierda a derecha. Al completar la hoja de muestra se realiza el mismo proceso con el siguiente tramo, hasta culminar la zona de estudio.

Una vez levantada la información se procesa los datos para el cálculo del IRI, siendo necesario determinar el rango “D”, mismo que es equivalente a la sumatoria del número de barras que se mantienen intactas después de descontar el 10%, mientras que a las barras que sí fueron afectadas se las representa como una fracción donde el número superior es igual a lo que sobra después de la eliminación sobre lo que se tenía inicialmente, como se presenta a continuación:

$$D = (\#barras completas * 5) + (\#barras incompletas * 5)$$

Se continua con el cálculo del factor de corrección, mismo que se sirve para corregir posibles variaciones o sesgos que puedan surgir debido a diferentes condiciones o situaciones durante la medición del IRI. Aplicamos nuestro factor de corrección, obteniendo así nuestro D corregido

$$FC = \frac{EP * 10}{(LI - LF) * 5} \quad (5)$$

EP: espesor pastilla

(LI – LF): lecturas

FC: Factor de corrección = 0.92

$$D_{\text{corregido}} = D * FC \quad (6)$$

Calculamos el IRI utilizando la ecuación I para pavimento común:

$$IRI = 0.593 + 0.0471(D) \quad (7)$$

$$2.4 < IRI < 15.9$$

En caso de no cumplir con la ecuación I, asumimos que es un pavimento nuevo por lo cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$IRI = 0.0485(D) \quad (8)$$

$$IRI < 2.4$$

3.4.2 Recolección de datos metodología VANT – IRI

El método alternativo para calcular el Índice de Regularidad Internacional (IRI) utilizando imágenes georreferenciadas capturadas por un dron implica un proceso de trabajo que consta de tres pasos: recopilación de datos, procesamiento de imágenes y análisis de datos. A continuación, se presenta los pasos mencionados de manera detallada exceptuado el análisis de resultados que esta presentado en el capítulo 4 de la presente investigación.

- **Equipos VANT a utilizar**

Este proyecto de investigación se llevó a cabo con dos modelos de equipos VANT, uno convencional y el otro no convencional, a continuación, se presenta las características principales de los dispositivos mencionados:

Tabla 7 Especificaciones técnicas Phantom 4 Pro

Phantom 4 Pro	
Generalidades	
Peso	1388 gr
Tamaño	350 mm
Autonomía/batería	30 min
Altura máxima	500m
Distancia transmisión	2.4 GHz
Resistencia de vuelo	35km/h
Tipo de ala	Rotatoria
Datos cámara y sensor	
Sensor	Pasivo
Cámara	RGB
Resolución	20MP
Tamaño físico del sensor	8.792x13.188 mm
Distancia Focal	8.8 mm
Costo	
Nuevo	\$2,800.00
Segunda mano	\$1,000.00

Tabla 8 Especificaciones técnicas EVO II RTK

AUTEL EVO II	
Generalidades	
Peso	1999 gr
Tamaño	397 mm
Autonomía/batería	40 min
Altura máxima	7000m
Distancia transmisión	5.85 GHz
Resistencia de vuelo	20km/h
Tipo de ala	Rotatoria
Módulo RTK	
Datos cámara y sensor	
Sensor	Pasivo
Cámara	RGB
Resolución	20MP - 4K
Costo	
Nuevo	\$4,500.00
Segunda mano	\$2,400.00

- **Recopilación de datos**

Aspectos preliminares

La realización de un examen visual preliminar del lugar de estudio es fundamental para identificar obstáculos como árboles, pendientes o edificios que puedan suponer riesgos durante el vuelo. Para obtener el perfil longitudinal de la carretera es recomendable utilizar herramientas como Google Earth con el fin de facilitar la obtención de datos que permitan calcular la altura de vuelo apropiada basada en la resolución espacial deseada.

Figura 17 Perfil longitudinal vía de la República

Nota. Obtención Google Earth

Planificación del Vuelo

Para la toma de datos sobre el terreno se debe tener en cuenta tres aspectos fundamentales como son: los softwares para la configuración del vuelo, la distancia de muestro del terreno (GSD) y la planificación del vuelo considerando el relieve del área de estudio.

La GSD se refiere a la distancia en el suelo que representa cada píxel en una imagen. Cuanto menor sea la GSD, más detallada será la imagen, ya que habrá más píxeles para representar la misma área, lo que permite una mayor resolución espacial, mientras que, una GSD mayor tiene como resultado una imagen menos detallada pero que abarca un área más extensa.

La GSD se expresa generalmente en unidades de longitud por píxel, como metros por píxel o centímetros por píxel. Para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

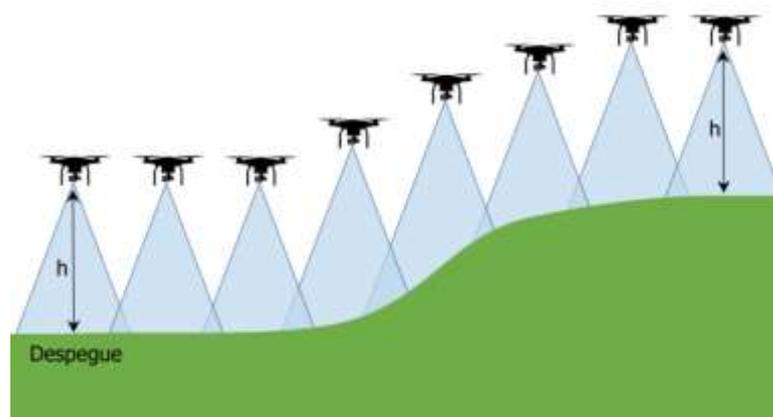
$$GSD \left[\frac{m}{pixel} \right] = \frac{\text{tamaño sensor [mm]}}{\text{distancia focal [mm]}} * \frac{\text{altura de vuelo [m]}}{\text{tamaño de la imagen [pixel]}} \quad (9)$$

En base al estudio realizado por Cruz (2022), menciona que el valor del IRI será más preciso cuando la resolución de las imágenes GSD sea igual o menor a 0.35 cm por píxel, por lo que la presente investigación se tomará este dato como referencia para determinar la altura de vuelo adecuada, teniendo así la siguiente formula:

$$\text{Altura de vuelo} = GSD \left[\frac{m}{pixel} \right] * \frac{\text{tamaño de la imagen [pixel]} * \text{distancia focal [mm]}}{\text{tamaño sensor [mm]}} \quad (10)$$

Una vez establecida la altura de vuelo optima en base a las características de nuestro equipo VANT se realizará la planificación del vuelo, esta debe conservar una altura constante de vuelo sobre el terreno con la finalidad de mantener una resolución uniforme y traslapes adecuados, por lo que es importante obtener el perfil longitudinal con antelación, con el fin de programar el equipo VANT previamente a su operación, y de esta forma generar información que permita determinar el IRI adecuado.

Figura 18 Plan de vuelo considerando el relieve del terreno



Nota. Recuperado de Cruz (2022)

Para la planificación del vuelo se necesitan softwares que envíen la información necesaria a los equipos VANT para la realización del levantamiento de datos, en el caso de la presente investigación se hará uso del programa **Litchi**, el cual utiliza el archivo de extensión KML correspondiente al proyecto que se va a ejecutar y colabora con la plataforma en línea conocida como Litchi HUB (flylitchi.com/hub). Mediante este portal, es posible importar, modificar y compartir planes de vuelo, los cuales la aplicación Litchi, instalada en dispositivos Android o IOS, llevará a cabo. Cabe mencionar que la velocidad de vuelo es un parámetro crucial para el procesamiento de imágenes, dado que velocidades relativamente altas pueden generar errores en la captura de imágenes, se aconseja ingresar manualmente este valor, adaptándolo a las condiciones específicas de la zona de estudio.

Figura 19 Planificación del vuelo Litchi



Nota. Litchi (2023).

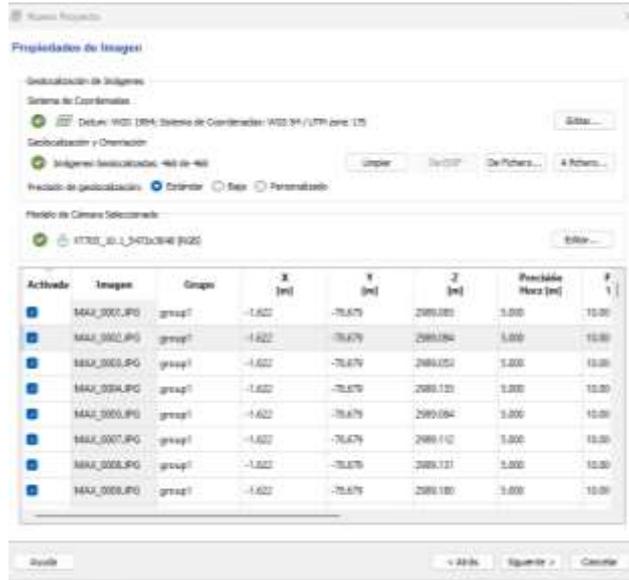
- **Procesamiento de imágenes**

Para realizar el procesamiento de las imágenes obtenidas por los equipos VANT haremos uso del programa PIX4D Mapper Pro, el cual nos permitirá generar una nube de puntos, MDS y el ortomosaico del área de trabajo. A continuación, se presenta de manera clara los pasos llevados a cabo al igual que las consideraciones tomadas en cuenta dentro de la presente metodología.

Creación de nuevo proyecto

Para iniciar se creará un nuevo proyecto dentro del programa al cual le importaremos las imágenes obtenidas del vuelo previo de los dispositivos VANT. Automáticamente este identificará la información que posee cada una como son: coordenadas y orientación de cada imagen, el tipo de sensor que poseen el dron y los parámetros internos y externos del mismo. Todo lo mencionado anteriormente se lo puede observar en la figura 19, adicionalmente se ingresará las coordenadas de salida y la plantilla que entregará los resultados finales.

Figura 20 Importación de imágenes PIX4Dmapper

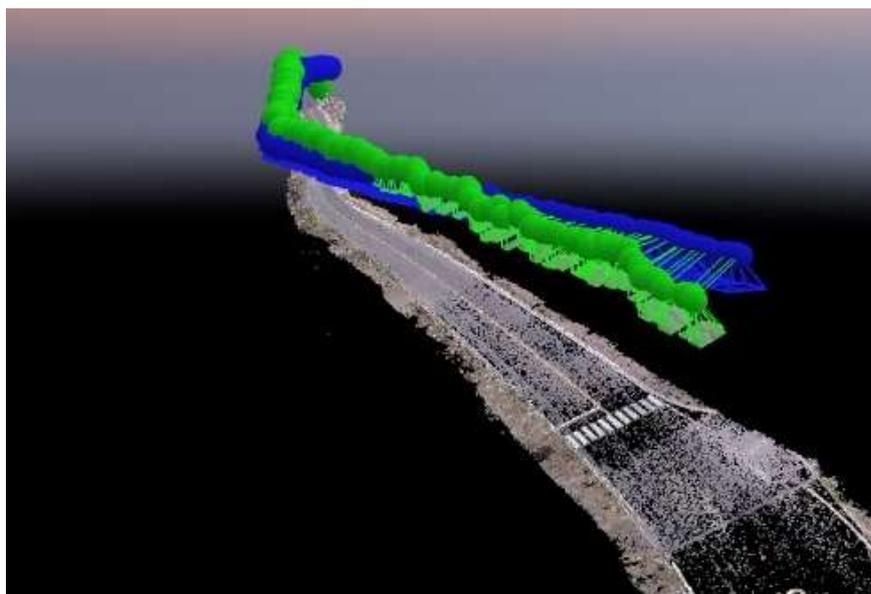


Nota. Autores

Procesamiento inicial

El proceso inicia con la extracción de puntos clave, un paso crucial que implica identificar características distintivas en las imágenes capturadas, mismos que sirven como referencias únicas en la escena. Posteriormente, se lleva a cabo la identificación de puntos clave coincidentes, donde el software busca en qué imágenes específicas se encuentren los mismos puntos clave y establece correspondencias entre ellas. Esto permite la alineación precisa de las imágenes en el espacio tridimensional, proporcionando la base para la generación de modelos digitales y la representación fiel del entorno capturado.

Figura 21 Base para la creación del MDS



Nota. Autores

Terminado el procesamiento inicial de las imágenes, el programa nos generará un reporte de calidad del proyecto en el que se considera diferentes variables como: cantidad de puntos clave por imagen, imágenes calibradas, referencia geoespacial mediante puntos de control y diferencia relativa entre parámetros internos de la cámara iniciales y optimizados, teniendo en cuenta que debe este último criterio no sea mayor al 5%, ya que, Pix4DMapper (2017) menciona que los aspectos de la cámara pueden diferir de un proyecto a otro, debido a factores como son: el clima, temperatura, altitud de vuelo, etc...

Figura 22 Incumplimiento de relación entre parámetros iniciales y optimizados

Quality Check		
Images	median of 34921 keypoints per image	✓
Dataset	468 out of 468 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	53.50% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠
Matching	median of 20114.9 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Nota. Autores

Al no cumplir con este indicador se debe realizar nuevamente el proceso inicial reajustando los parámetros ideales de la cámara para reducir la diferencia relativa entre parámetros internos de la cámara iniciales y optimizados, con la finalidad de generar modelos más apegados a la realidad.

Figura 23 Cumplimientos de parámetros en reporte de calidad

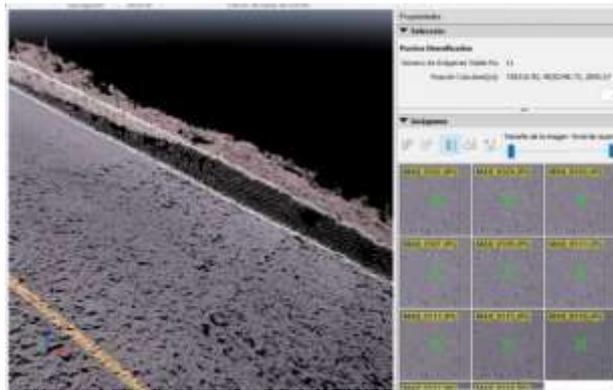
Quality Check		
Images	median of 34921 keypoints per image	✓
Dataset	468 out of 468 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.25% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 19964.5 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Nota. Autores

Nube de puntos

PIX4Dmapper crea una nube de puntos densa utilizando la información de las imágenes alineadas representando la geometría tridimensional del terreno y de los objetos en la escena. Cada punto guarda información única como textura, color y coordenadas precisas añadiendo un nivel de detalle visual realista del entorno capturado. La cantidad total de puntos en la nube, a su vez, está sujeta a diversas variables, entre ellas, la resolución de las imágenes utilizadas, la calidad del procesamiento y la cantidad de traslape entre ellas.

Figura 24 *Nube de puntos de la superficie*



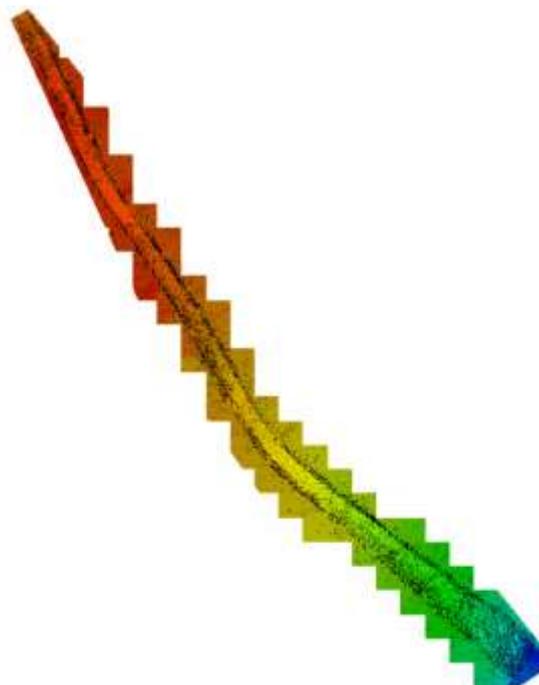
Nota. Autores

En determinadas situaciones, la captura de imágenes puede verse obstaculizada por la presencia de elementos que interfieren. En tales casos, al generar la nube de puntos, existe la posibilidad de editar estas imágenes para obtener un modelo digital más depurado y preciso. Se debe mencionar que en el proyecto realizado no fue necesario eliminar ningún objeto ya que la vía de estudio no tenía obstáculos en el camino.

MDS y Ortomosaico

PIX4Dmapper crea ortofotos, que son imágenes georreferenciadas y corregidas en perspectiva, eliminando distorsiones causadas por la topografía. Finalmente, exporta los resultados obteniendo el modelo 3D y la ortofoto, mismo que son presentados en a la siguiente figura 25.

Figura 25 *MDS del tramo evaluado*

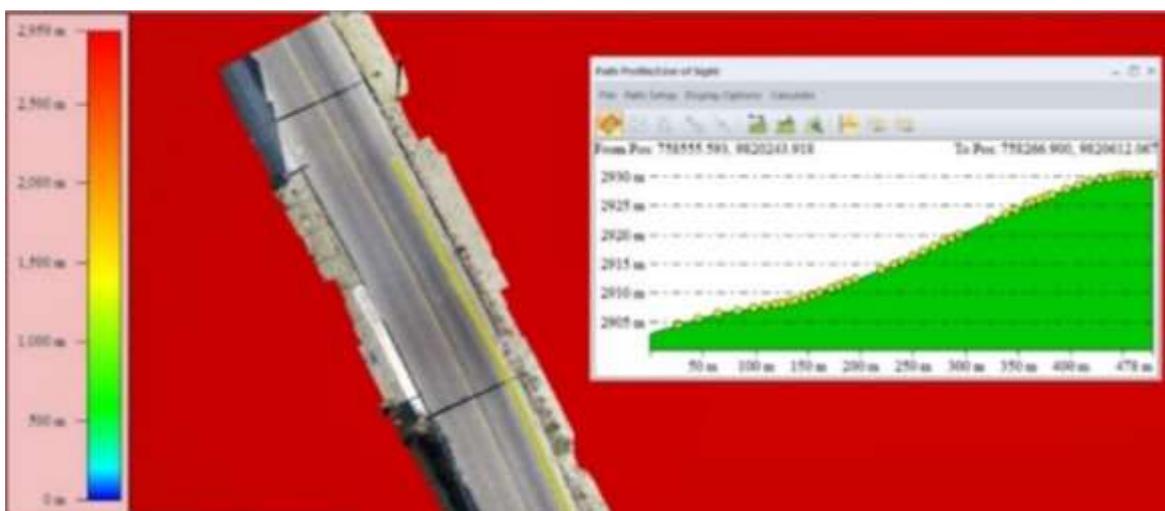


Nota. Autores

Creación de perfiles longitudinales

La generación de un perfil longitudinal implica el empleo de sistemas de información geográfica. En este programa, se cargan la ortofoto y el MDS. Luego, utilizando la herramienta de perfil de ruta/línea de visión, se traza una línea sobre la huella previamente analizada con el dispositivo Merlín. Teniendo en cuenta que el abscisado es establecido por el usuario, siendo en este caso cada 10 cm, con el objetivo de obtener un perfil que revele con mayor precisión la regularidad del terreno.

Figura 26 Perfil de la superficie generado



Nota. Autores

Los datos del perfil del terreno se exportan como un archivo en diferentes formatos como son: .CSV, .XZ, .XYZ, DXF. El presente proyecto se exportó con datos .XZ, de distancia/elevación, mismo que se procesa con softwares ofimáticos.

ProVAL

El archivo generado por el software de información geográfica se lo procesa con herramientas ofimáticas con el fin de revisar que todos los valores tengan el abscisado correcto, para posteriormente llevarlos a un formato de texto, el cual se ingresa en el programa ProVAL. La tabla 10 presenta los datos iniciales que debemos colocar en el programa al importar los archivos que contienen información de la elevación y distancia de los levantamientos realizados con el equipo VANT Phantom 4 Pro y EVO II.

Tabla 9 Parámetros iniciales de importación de datos ProVAL

Datos iniciales en ProVAL	
Intervalo de muestra	10
Unidad de Intervalo de muestra	cm
Unidad de Elevación	m
Tipo de huella	Derecha

Nota. Autores

AUTOCAD

Dada la necesidad de comparar los resultados que se obtengan con la metodología Merlín y la metodología VANT se realiza el procesamiento de datos obtenidos con ProVAL, iniciando con la exportación del perfil de terreno desde el software de información geográfica y posteriormente impórtalos a AutoCAD. Este procedimiento permite un análisis detallado de elevaciones y depresiones, considerando los picos altos de las mismas en un ancho de análisis de 2m de manera análoga al procesamiento de datos utilizado con el rugosímetro Merlín, obteniendo resultados similares a los de este equipo.

3.4.3 Recolección de datos IRI con la aplicación Roadroid

Para la recolección de datos haciéndose uso de la aplicación Roadroid se inicia al calibrar el equipo smartphone en un soporte fijo y con la opción Fitting se verifica que los valores X, Y, Z sean cercanos a 0, garantizando la selección de las aceleraciones verticales (Y) y excluyendo la influencia al frenar (X) o girar (Z), adicionalmente en el menú de configuraciones hay que seleccionar el tipo de vehículo y una sensibilidad de 1,6 para concreto asfáltico como lo menciona Roadroid (2023) dentro del manual de usuario.

Una vez listo las configuraciones anteriores se procede a capturar la información de la vía teniendo tres opciones, captura de fotografías, video y únicamente del valor IRI, seguidamente al presionar el botón rojo de la pantalla la aplicación recolectara los datos de la carretera. Es recomendable que previo a la captura de datos el vehículo debe moverse a una velocidad constante entre 60 y 90 km/h para asegurar un cálculo preciso del IRI por lo cual se debe tener en cuenta ubicarse a 200 metros antes del punto de recopilación información.

Al finalizar, se guarda los datos en el teléfono en dos archivos: uno en formato CSV con información de latitud, longitud, velocidad, desplazamiento y valor del IRI; el otro, en KML el cual muestra el estado de la carretera explicado por una paleta de colores. Estos se los puede visualizar al importarlos al sitio web de la aplicación de donde se los puede descargar.

3.5 Método de análisis y procesamiento de datos

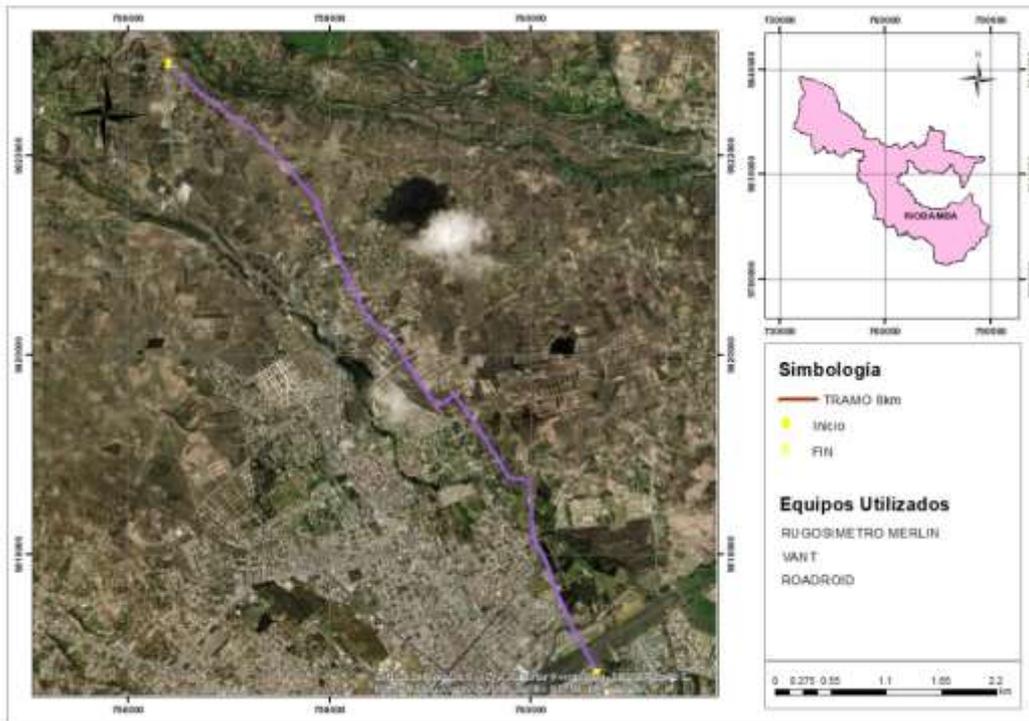
El análisis de resultados fue desarrollado por: sensores y aplicaciones de Microsoft Office. Adicionalmente los datos recolectados y generados fueron tabulados aplicando estadística descriptiva y programas específicos para su análisis y procesamiento.

4. CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tramo de evaluación

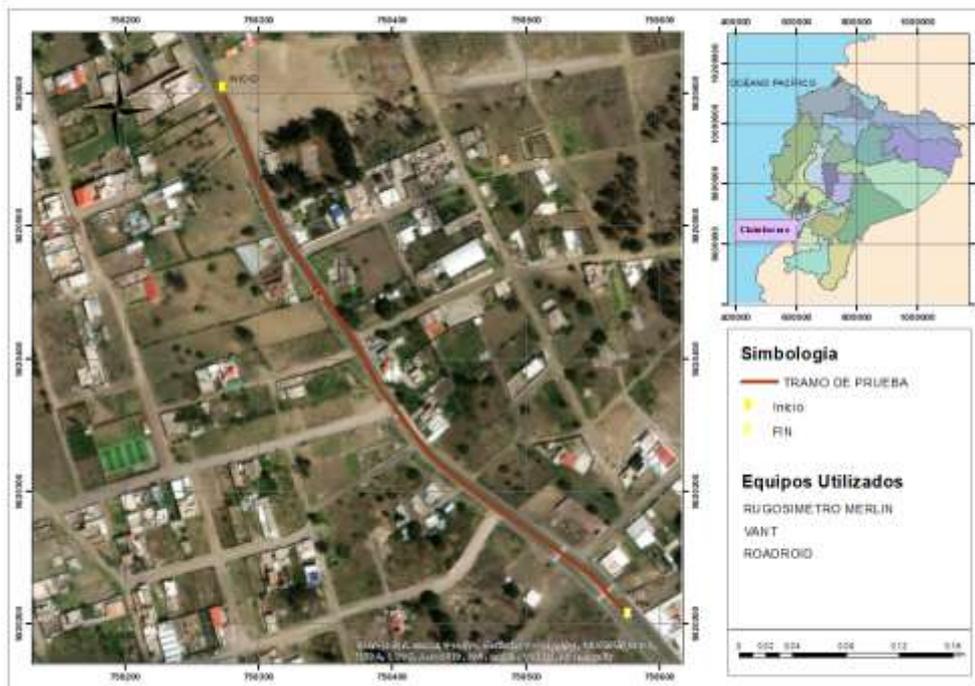
En el anexo 3 se proporciona el formato con los datos recolectados en campo, detallando las lecturas obtenidas en el tramo de prueba de la Avenida de la República, considerando que este será analizado por todos los métodos para el cálculo del IRI.

Figura 27 *Vía del Bicentenario y de la República*



Nota. Autores

Figura 28 *Tramo de evaluación*



Nota. Autores

4.1.1 Levantamiento del IRI mediante equipo Merlín

Después de haber realizado el levantamiento del IRI con el equipo Merlín se procesa y tabula los resultados, enfatizando que se ha optado por presentar a detalle el tramo del IRI más desfavorable, mientras que los demás datos se los presentará en la tabla 8.

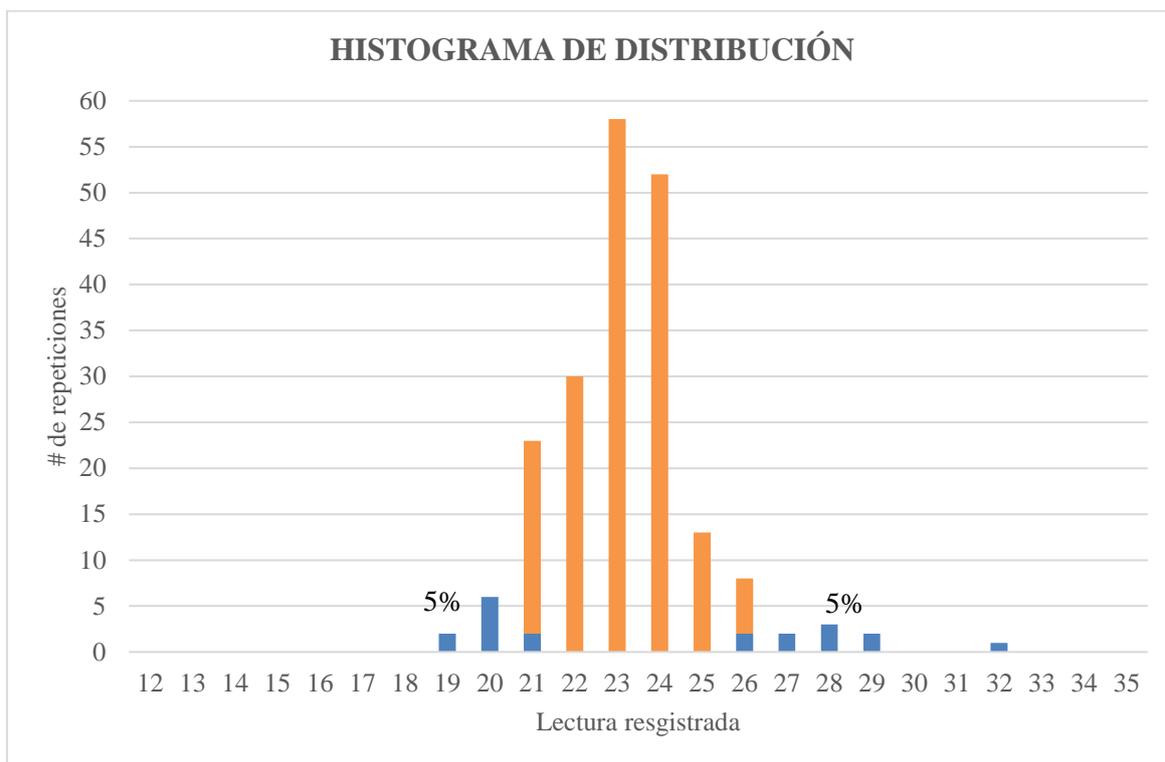
Tabla 10 Resumen IRI 8km levantados

km		IRI
0 + 000	0 + 400	1.0774
0 + 400	0 + 800	0.8097
0 + 800	1 + 200	0.7073
1 + 200	1 + 600	0.7044
1 + 600	2 + 000	0.8088
2 + 000	2 + 400	1.0529
2 + 400	2 + 800	0.8735
2 + 800	3 + 200	1.0185
3 + 200	3 + 600	1.2295
3 + 600	4 + 000	0.8218
4 + 000	4 + 400	0.9157
4 + 400	4 + 800	1.3733
4 + 800	5 + 200	1.1047
5 + 200	5 + 600	0.8771
5 + 600	6 + 000	1.028
6 + 000	6 + 400	0.7962
6 + 400	6 + 800	0.7091
6 + 800	7 + 200	0.9688
7 + 200	7 + 484	1.3203

Nota. Elaboración Propia

Mediante la utilización de un histograma, se presenta la distribución de frecuencias de las lecturas registradas con el dispositivo Merlín, resaltando tanto las elevaciones como las depresiones en el conjunto de datos. Luego, se realiza la exclusión del 10% de la información, dividiéndola de manera equitativa en un 5% a la izquierda y un 5% a la derecha del histograma, lo que implica la eliminación de un total de 20 lecturas.

Figura 29 Histograma de valores obtenidos con el equipo Merlín



Nota. Autores

Los resultados finales del cálculo de la regularidad de la carretera son presentados a continuación, mismos que se obtuvieron a partir de la aplicación de la metodología del Merlín, determinando que la zona de estudio es un pavimento nuevo con un IRI de **1.3733 m/km**.

Tabla 11 Datos del cálculo del IRI

CÁLCULO IRI			
D		28.3152	
D corregido		26.05	
IRI	Pavimento común	1.82 m/km	NO CUMPLE
	Pavimento Nuevo	1.3733 m/km	CUMPLE

Nota. Autores.

4.1.2 Cálculo del IRI a partir de datos obtenidos con el equipo VANT

En la determinación del IRI implica el cálculo de la altura de vuelo necesaria para los equipos VANT, asegurando un GSD igual o inferior a 0.35 cm/píxel, según la recomendación de Cruz (2022). Mediante la aplicación de la ecuación 10 y los valores en la tabla 7, se calculó un valor de 12.79 metros, redondeado posteriormente a 13 metros.

Según las especificaciones del MEER, se establece que la altura estándar de los postes es de 10 m con una carga de 400 kg y de 12 m con una carga de 500 kg. Además,

debido a condiciones especiales de operación, se permite el uso de postes de 14, 16 y 18 m. Cabe recalcar que como se mencionó previamente, se llevó a cabo una inspección en el terreno inicialmente para identificar la presencia de obstáculos, garantizando así la seguridad durante el vuelo. Lo que determinar que la altura calculada es apropiada para el propósito del estudio.

Tabla 12 Densidad de pixelaje obtenida con la altura de Vuelo

Equipo	Altura de Vuelo	GSD
VANT convencional	12.79 m	0.35 cm/píxel
VANT RTK	12.79 m	0.29 cm/píxel

Nota. Se presenta los resultados del GSD utilizando la misma altura de vuelo en ambos equipos VANT.

Al terminar con los vuelos para la obtención de los datos que generen los modelos digitales de la superficie y las ortofotos se procede con el cálculo del IRI, aplicando la metodología VANT-IRI con ciertas modificaciones en la planificación de vuelos que conservan en su mayoría una altitud constante en relación con la topografía del terreno y a su vez no obstruye la vía ni genera molestias para los demás usuarios.

Para el cálculo del IRI se utilizó dos métodos, uno a partir de la herramienta ProVAL obteniendo un resultado directo mientras que en AutoCAD se analiza de forma manual, las depresiones y elevaciones de la vía.

- **PROVAL**

Posterior a la carga de los archivos en el software, se hace uso de la herramienta “Analysis RQ”, para el cálculo del IRI, obteniendo un **valor de 2.39 m/km** para el VANT Phantom 4 Pro y un **valor de 2.334 m/km** para el VANT EVO II, para mayor detalle referirse al anexo 4.

Tabla 13 Resultados IRI ProVAL

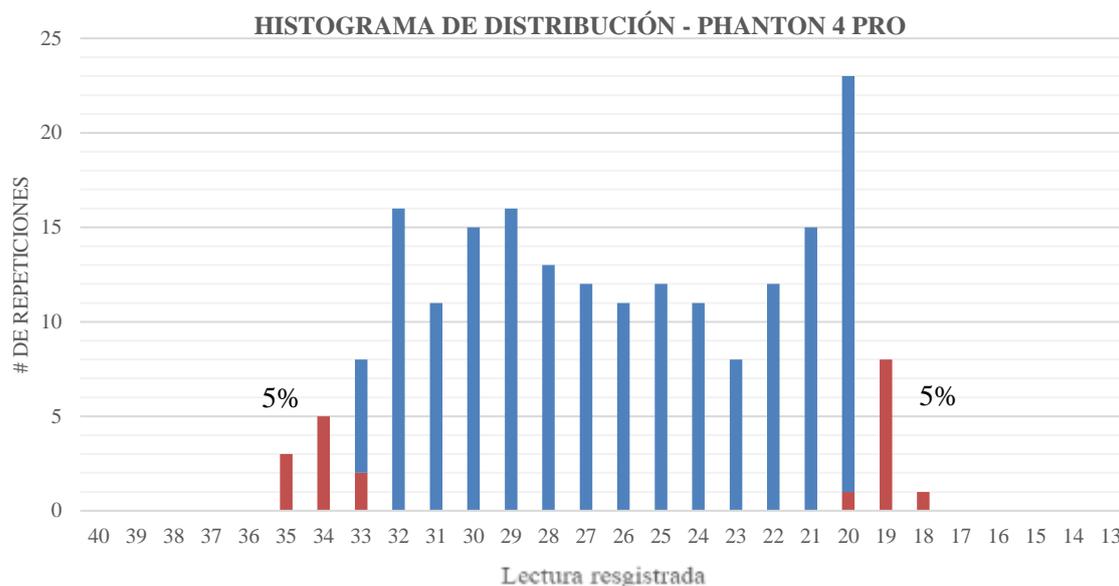
Procesamiento de datos		
Herramienta	Analysis RQ	
Tipo de análisis	Overwall	
IRI	Phanton 4 Pro	2.39 m/km
	EVO II	2.334 m/km

Nota. Autores

- **AUTOCAD**

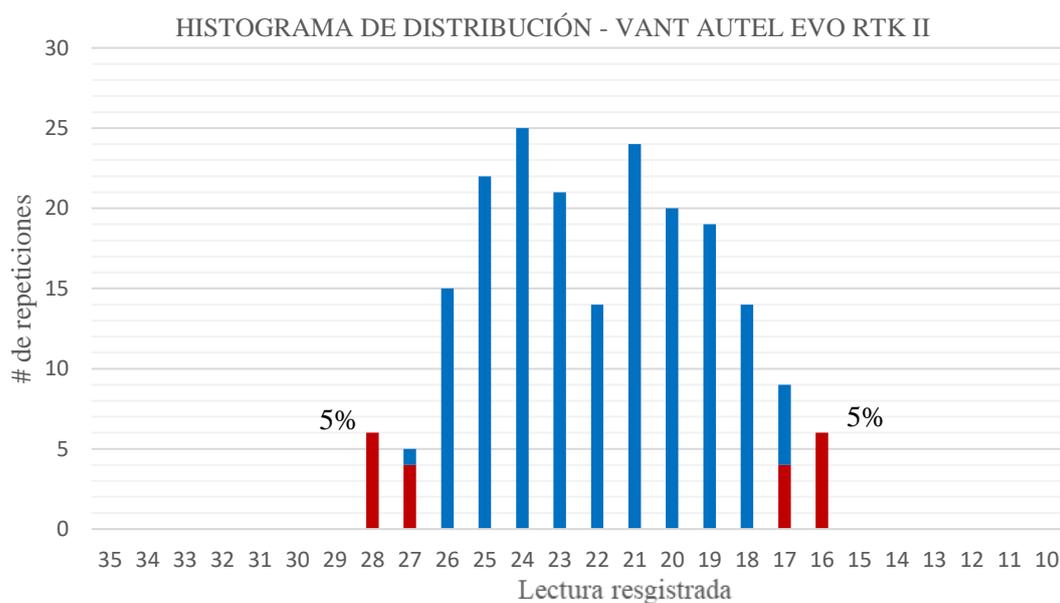
Después del análisis para homogeneizar los resultados de la plataforma ProVAL con los obtenidos por la metodología Merlín y facilitar su comparación se obtuvo los siguientes histogramas, tomando en cuenta que no es tan preciso, pero si genera un valor aproximado al IRI, como se presenta a continuación:

Figura 30 Histograma de valores obtenidos de la revisión de datos del equipo VANT



Nota. Autores

Figura 31 Histograma de valores obtenidos de la revisión de datos del equipo VANT RTK



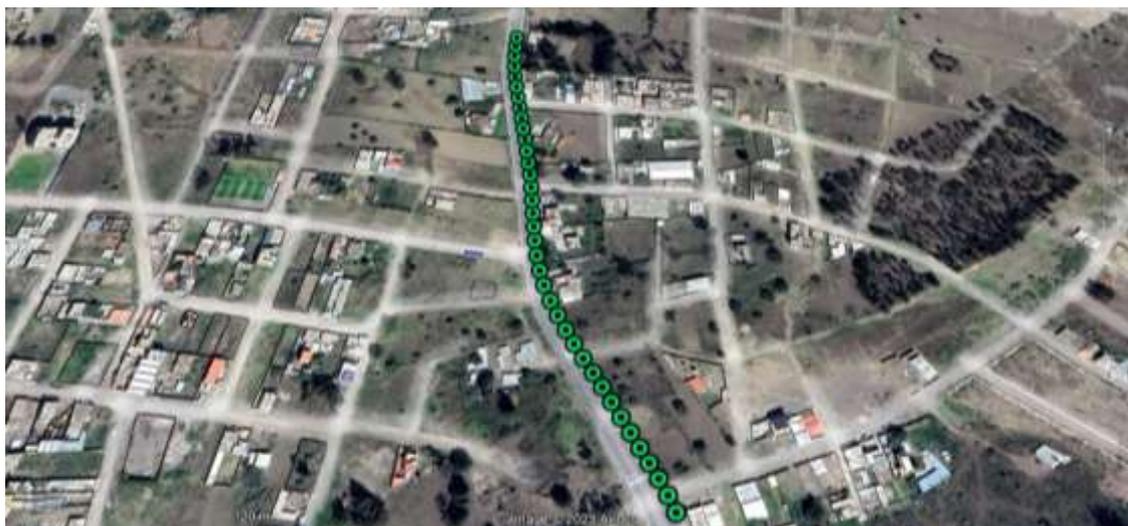
Nota. Autores

Como resultado se calculó un IRI para pavimento nuevo de **2.9811 m/km** para el VANT Phantom 4 Pro y un **valor de 2.4843 m/km** para el VANT EVO II, siendo así valores similares al obtenido con ProVAL.

4.1.3 Cálculo de IRI con el acelerómetro

El levantamiento inició en la vía la República dentro del tramo más desfavorable y se determinó que la carretera se encuentra en estado bueno de acuerdo con la tabla 7, ya que, la medición utilizando la aplicación Roadroid, presenta todos los puntos de esta sección en color verde.

Figura 32 Reporte grafico generado por el software Roadroid



Nota. Autores

La aplicación registró 0.09 puntos por metro cuadrado, lo que implica que se recopilaban 9 puntos por cada 100 metros recorridos. Esta relación sugiere que la cantidad de puntos calculados es inversamente proporcional a la velocidad del vehículo, que varió entre 30 y 50 km/h durante la toma de datos. El resumen de los puntos calculados y el valor estimado del IRI para el área estudiada se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 14 Datos obtenidos por la aplicación

Condición de la carretera	Número de puntos	Porcentaje (%)	IRI estimado m/km
Buena (verde)	36	100%	1.17
Satisfactoria (amarillo)	0	0	
No satisfactoria (Rojo)	0	0	
Pobre (negro)	0	0	

Nota. Datos recuperados de la aplicación Roadroid. Autores.

El IRI calculado para la carretera es de **1.17 m/km**, lo que representa que el tramo analizado se encuentra en una condición óptima para garantizar un viaje cómodo y seguro a los usuarios.

4.2 Cálculo del PSI

Para determinar el PSI se hace uso de las fórmulas mostradas en el apartado 2.5.1, posteriormente se promedia los resultados obtenidos para generar un único valor, el cual será el referente para determinar su edad actual y el ciclo de vida que le queda. A continuación, se presenta los resultados obtenidos para cada equipo utilizado en la presente investigación.

Tabla 15 Calculo del PSI con los diferentes equipos utilizados en la obtención del IRI

EQUIPOS Formula	MERLIN			PHANTON			EVO II			ACCELEROMETRO		
	IRI	PSI	Estado	IRI	PSI	Estado	IRI	PSI	Estado	IRI	PSI	Estado
Paterson (1987)		3.905	Bueno		3.252	Bueno		3.285	Bueno		4.050	Muy Bueno
Al Omari y Darter (1994)		3.494	Bueno		2.680	Regular		2.719	Regular		3.683	Bueno
Dujisin y Arroyo	1.373	3.881	Bueno	2.390	3.253	Bueno	2.334	3.283	Bueno	1.171	4.032	Muy Bueno
ASSHTO 93		3.601	Bueno		2.960	Regular		2.991	Regular		3.755	Bueno
Promedio		3.720	Bueno		3.036	Bueno		3.070	Bueno		3.880	Bueno

Nota. Autores

4.3 Estimación del ciclo de vida útil

Este valor se puede establecer haciendo uso del modelo propuesto por Valverde & Barrantes Jimenez (2019), el cual utiliza la curva típica del ciclo de vida del pavimento, ajustada a los parámetros del PSI, adicionalmente muestra rangos de calidad con posibles operaciones de mantenimiento.

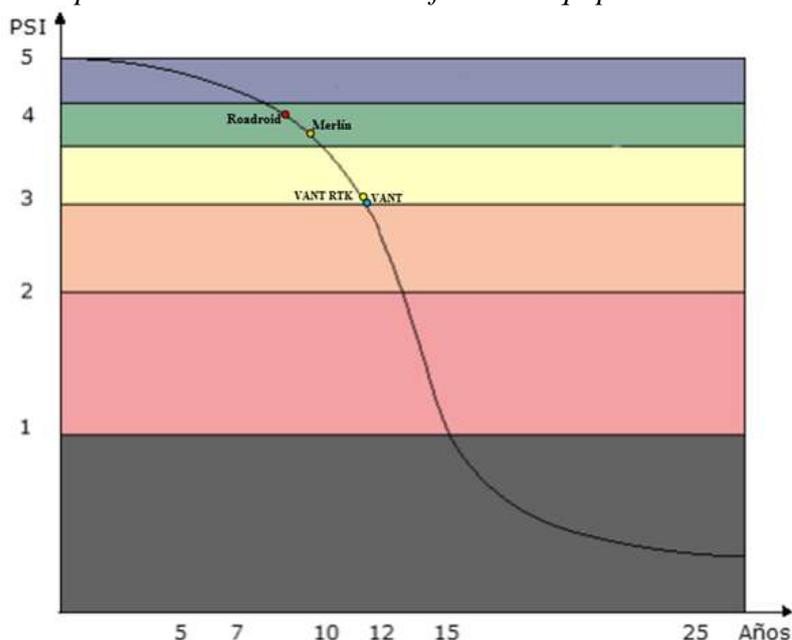
En la imagen 31 podemos apreciar la edad actual del pavimento en base al PSI para cada equipo utilizado, teniendo en cuenta que un pavimento tiene una vida útil entre 15 a 20 años, podemos restar la edad calculada de la edad de diseño que se asume para 20 años por la importancia y la cantidad de vehículos observados en la zona, teniendo así los siguientes resultados:

Tabla 16 Edades del pavimento calculada con diferentes equipos

Equipo	Edad calculada	Edad de diseño	Edad Restante
Merlín	9.486		10.514
VANT-Phanton	11.280	20	8.840
VANT RTK-EVO II	11.180		8.820
Acelerómetro	8.714		11.286

Nota. Autores

Figura 33 Edad del pavimento calculada con diferentes equipos en base al PSI



Nota. Figura adaptada de Valverde & Barrantes Jimenez (2019)

Actividades de Gestión Vial en base al PSI

- Mantenimiento de Preservación
- Mantenimiento de recuperación IRI
- Recuperación IRI con sustitución de capa estructural
- Rehabilitación Menor
- Rehabilitación Mayor
- Reconstrucción

4.4 Comparativa entre equipos utilizados para la obtención del IRI

A continuación, se describe los aspectos a comparar para determinar las ventajas y desventajas de los equipos utilizados para la obtención del IRI, considerando tres parámetros fundamentales: tiempo, costo y logística asociada, mismos que fueron analizados en un tramo de referencia de 400m

En cuanto al tiempo, se evalúa el levantamiento en categorías de rápido (<30 minutos), aceptable (30 minutos – 1.30 horas) y lento (>1.30 horas).

Tabla 17 Comparativa con respecto al tiempo

EQUIPOS	TIEMPO			TIEMPO POR KM	CATEGORIA
	LEVANTAMIENTO	PROCESAMIENTO	TOTAL		
VANT convencional	10 min	1.20 h	1.30 h	3.25 h/km	ACEPTABLE
VANT RTK	10 min	1.20 h	1.30 h	3.25 h/km	ACEPTABLE
Merlín	40 min	40 min	1.20 h	3 h/km	ACEPTABLE
Acelerómetro	5 min	15 min	20 min	0.5 h/km	RAPIDO

Nota. Autores

En términos de costos, se analiza el valor total considerando aspectos como el mantenimiento, el personal especializado, los programas de procesamiento y la adquisición del equipo. Esta valoración se clasifica en categorías de bajo, medio y alto, teniendo en cuenta que lo descrito en la tabla 17 son en base a la operación y rendimiento del proyecto.

Tabla 18 Comparativa con respecto al costo

EQUIPOS	COSTO									Total	Calificación
	Campo					Procesamiento					
	Técnicos		Ayudante		Alquiler	Técnicos		Programas			
	#	COSTO (día)	#	COSTO (día)		#	COSTO (día)	#	COSTO (día)		
VANT convencional	1	37.36	1	33.12	100	1	37.36	3	17.333	\$225	ALTO
VANT RTK	1	37.36	1	33.12	100	1	37.36	3	17.333	\$225	ALTO
Merlín	1	37.36	3	99.36	10	1	37.36	1	0	\$184	ALTO
Acelerómetro	1	37.36	1	33.12	0	1	37.36	1	4.72	\$113	MEDIO

Nota. Autores

Al analizar la logística asociada al rendimiento de los equipos utilizados, se considera a criterio de los autores de la presente investigación, que la complejidad en la planificación y ejecución para obtener datos, teniendo en cuenta factores externos como condiciones meteorológicas, tráfico, entre otros. Esta evaluación resulta en una escala que

abarca desde lo sencillo, moderado y difícil, proporcionando un indicador preciso de la dificultad intrínseca en la implementación y operación de los equipos en el contexto específico de la obtención de datos.

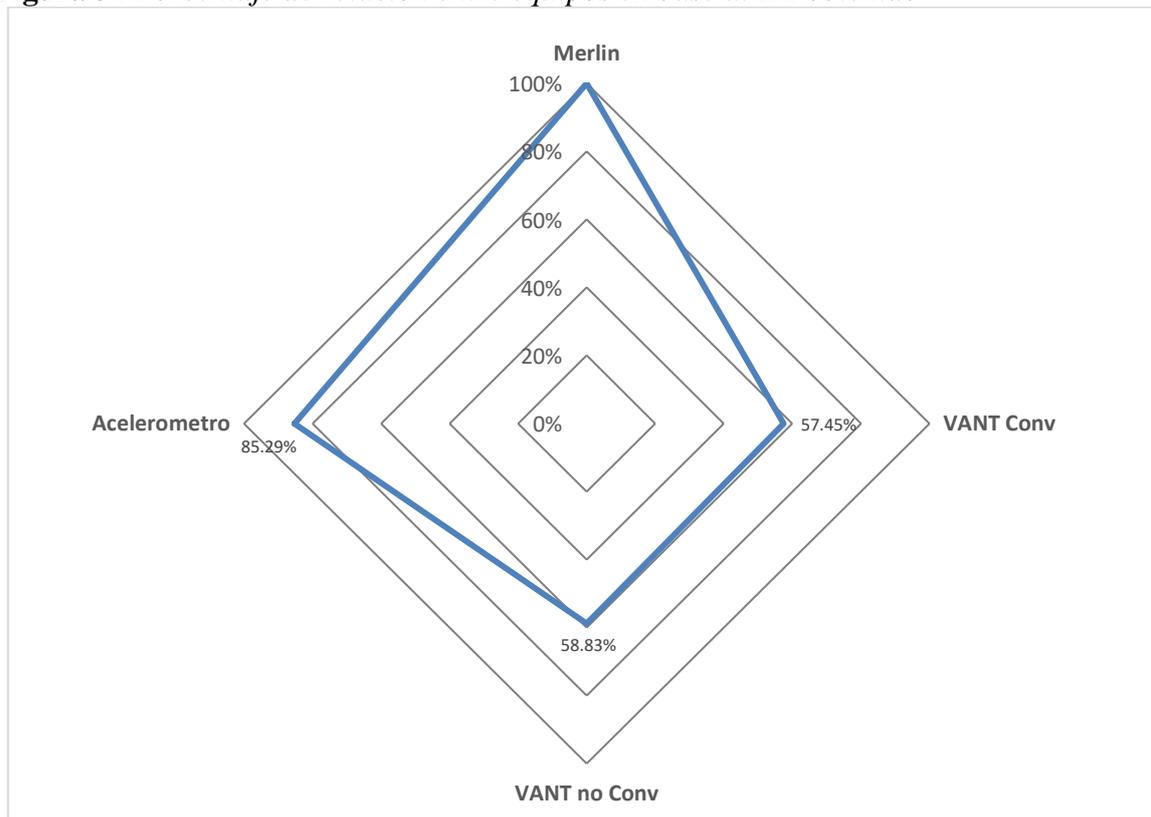
Tabla 19 Comparativa en función a la logística

EQUIPOS	LOGISTICA
VANT convencional	MODERADO
VANT RTK	MODERADO
Merlín	MODERADO
Acelerómetro	SENCILLO

Nota. Autores

A continuación, se presenta la correlación entre los resultados del Índice de Regularidad Internacional (IRI) obtenidos por cada equipo, utilizando como referencia los resultados del rugosímetro Merlín. Se opta por considerar el rugosímetro Merlín como la medida de referencia debido a su reconocida precisión en la determinación del IRI. Los valores resultantes son los siguientes:

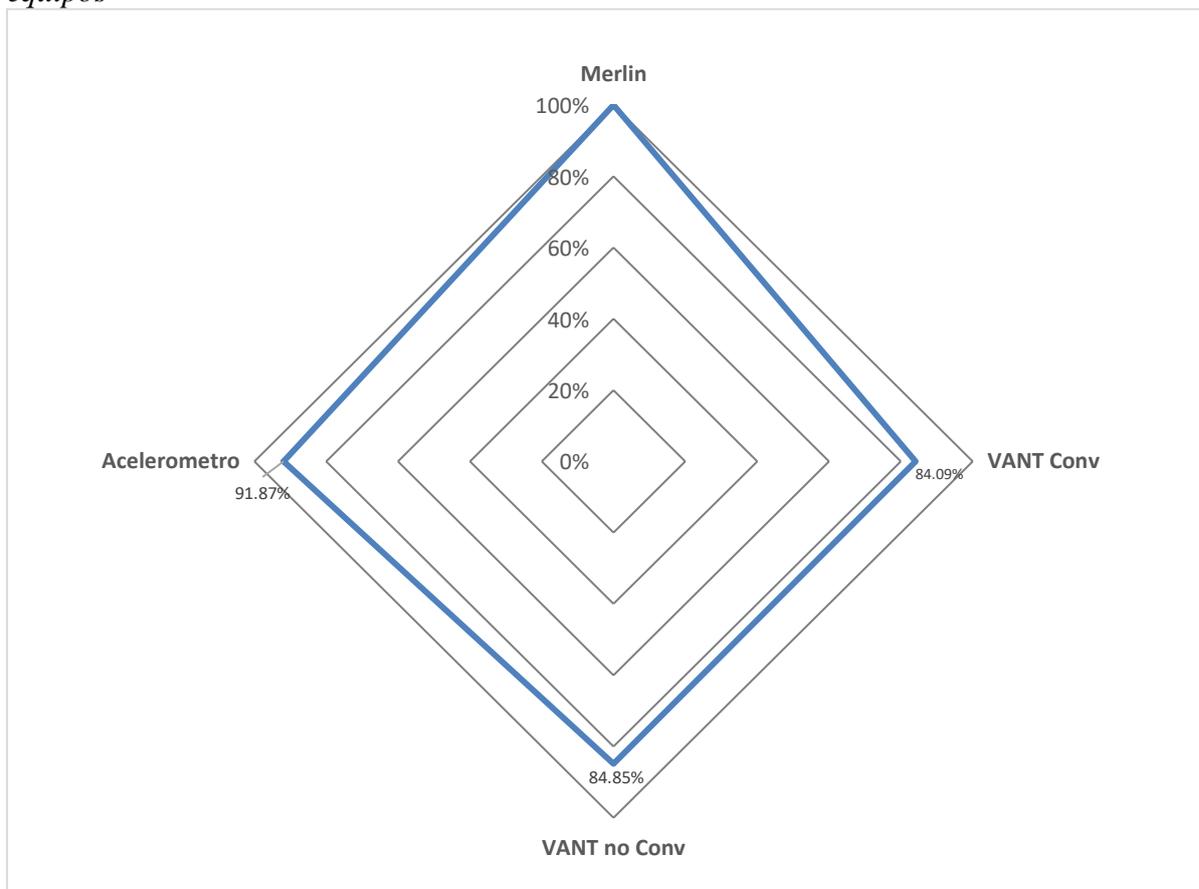
Figura 34 Porcentaje de relación entre equipos en base al IRI obtenido



Nota. Autores

En relación con la Figura 35, se ilustra la comparación de los resultados del PSI utilizando como referencia los datos obtenidos por el equipo Merlín. Esta representación gráfica permite observar el potencial de cada equipo en términos de porcentajes para identificar el ciclo de vida del pavimento.

Figura 35 Porcentaje de relación entre la edad del pavimento obtenida con los diferentes equipos



Nota. Autores

4.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos por la metodología VANT para la obtención del IRI presentan un ajuste con los equipos tradicionales. Esto evidencia el potencial para generar valores comparables a estudios realizados por diferentes autores como Cruz (2022), el cual hizo uso de tres equipos de alta precisión tomando como referencia el perfilómetro láser para el cálculo del IRI. Con lo antes mencionado se posiciona a los equipos VANT convencionales como una alternativa en la evaluación de pavimentos

Prosser-Contreras et al. (2020) sugiere mantener un tamaño del píxel en el terreno de 0.2 cm/píxel con alturas de vuelo por debajo de los 10 metros. Sin embargo, Cruz señala que un valor más elevado puede comprometer la obtención de una densidad de píxeles adecuada para generar modelos digitales y calcular el IRI, recomendando una densidad de píxeles de 0.35 cm/píxel, por lo que la investigación se respalda en la sugerencia de Cruz, evitando alturas de vuelo excesivamente bajas y calculándolas según el GSD recomendado. Esto posibilita ajustes según el equipo utilizado, a la par que preserva la integridad de los dispositivos al evitar posibles riesgos.

Al aplicar la metodología VANT para obtener el IRI y determinar el PSI, se evidencia una coincidencia de valores del 80% en comparación con la metodología

empleada con el equipo Merlín. Ambos métodos arrojan una calificación de serviciabilidad considerada como buena, señalando que existe una variación del 16% en los datos, ya que el equipo VANT estima una vida útil de 11 años, mientras que el equipo Merlín indica aproximadamente 9 años.

De acuerdo a lo mencionado por Tingal (2021) el Merlín sigue siendo el equipo más preciso y menos costoso para la medición de las irregularidades del pavimento para entidades públicas, no obstante, los Equipos VANT pueden realizar múltiples funciones en diferentes áreas dentro de dichas entidades que justifiquen su valor a largo plazo.

Cuando se habla de acelerómetros en dispositivos para medir la regularidad, Montalvo (2023) recalca que una velocidad de 60 a 80 km/h es recomendada para obtener un valor de IRI apropiado utilizando sensores en dispositivos móviles. A pesar de ello, es posible configurar los parámetros de sensibilidad según el tipo de vehículo y las condiciones, como la afluencia de la vía. Esto permite ajustar la velocidad y posibilita un desplazamiento más tranquilo para los usuarios, incluso reduciéndola a un máximo de 50 km/h.

5. CAPITULO V. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La investigación destacó que la selección precisa tanto de la altura de vuelo como de la densidad de pixelaje juega un papel crucial en la precisión de las mediciones del IRI a partir de imágenes aéreas. La comparación con medidas de campo evidenció que los resultados no dependen únicamente de la altura de vuelo ya que en el análisis de los datos recopilados con los dispositivos VANT en el tramo de prueba volando a una altura de 13 m para ambos equipos, demostró que los resultados están intrínsecamente ligados al GSD obtenido, valor que es de 0.35 cm/píxel con el VANT convencional y de 0.29 cm/píxel en el VANT RTK. Por ende, la elección de la elevación para el vuelo debe calcularse considerando la densidad de píxeles por centímetro en la imagen, utilizando datos específicos del sensor del equipo, tales como tamaño, cantidad de píxeles y distancia focal.

La inversión inicial en la adquisición y operación de VANT conlleva costos considerables, que abarcan desde el mantenimiento y la capacitación del personal hasta la seguridad. El precio diario de operación de cada equipo VANT es de \$225, ya que el alquiler y la utilización de software representan los costos más significativos en contraste con equipos tradicionales donde las aplicaciones para el procesamiento de datos no conllevan costo alguno. Además, cabe mencionar que la compra de un dispositivo VANT convencional se estima en \$2800, mientras que el equipo tradicional tiene un valor de \$875. Este aspecto subraya la importancia de equilibrar la eficiencia operativa con la viabilidad económica para evaluar la rentabilidad a largo plazo de esta tecnología. Bajo estos criterios, el equipo Merlín emerge como la opción más óptima para la obtención del IRI.

En lo que respecta al tiempo dedicado al levantamiento y procesamiento de datos, los dispositivos VANT presentan una ventaja significativa, ya que el tiempo requerido es de 3.25 horas por cada km. Además de obtener el valor del IRI, se adquieren datos adicionales, como perfiles longitudinales, ortomosaicos, opciones de registro y medición de fallas, mismas que son aprovechadas en otros parámetros, como es el PCI. Por otro lado, con el equipo Merlín, que requiere 3 horas por cada km, solo se obtiene el valor del IRI. Esta eficiencia conlleva ahorros sustanciales de tiempo y minimiza los errores asociados a la tabulación manual del método tradicional. No obstante, es importante señalar como única desventaja la necesidad de recursos, como computadoras potentes y personal capacitado, para una implementación exitosa de esta tecnología.

Comparando las determinaciones del IRI mediante la implementación de mediciones tradicionales, metodología VANT y sensores de movimiento, se evidencia el potencial de los equipos VANT en el ámbito de la gestión vial, ya que se ha concluido que su capacidad para obtener el parámetro IRI, muestra una relación del 56% en comparación con el método tradicional. Señalando que para la obtención de resultados hay que tener en cuenta diversos factores, como la posición, orientación y calidad de las imágenes, que están directamente vinculados a la resolución uniforme, los traslapes, la iluminación, la

configuración de la cámara, el sistema de posicionamiento y las condiciones meteorológicas.

El potencial de los equipos VANT en la identificación del ciclo de vida útil se sitúa en un 80% en comparación con la metodología tradicional, evidenciando así que esta innovadora técnica es viable para determinar dicho ciclo. Sin embargo, es esencial mantener un seguimiento constante, dado que estos equipos siguen evolucionando de manera continua.

Como un método adicional al estudio, cabe resaltar la utilidad de los acelerómetros, que logran competir con los métodos tradicionales al proporcionar un valor del IRI de 1.17m/km teniendo un ajuste del 85% con el resultado del equipo Merlín. Este enfoque ofrece una recopilación de datos rápida y sencilla, con un tiempo estimado de 20 minutos para el levantamiento y procesamiento, prescindiendo de la necesidad de personal calificado. Además, su costo es accesible para los usuarios, como se verifica con la aplicación Roadroid, con un precio diario de \$5 y un costo mensual de \$141. Por lo que, se sugiere la necesidad de estudios continuos en investigaciones futuras para perfeccionar esta metodología.

5.2 Recomendaciones

- Es esencial llevar a cabo una revisión anticipada para identificar posibles impedimentos, como postes, cables o árboles, que podrían afectar la ejecución del vuelo. Además, es necesario verificar la necesidad de obtener permisos especiales para volar sobre la zona de evaluación.
- Previo a la ejecución del vuelo sobre la zona, es esencial tener información detallada sobre las condiciones meteorológicas diarias, incluyendo la temperatura, las ráfagas de viento que podrían afectar la orientación de los sensores del equipo, y garantizar una iluminación adecuada para la correcta captura de datos.
- Se requiere la presencia de personal especializado en el manejo de VANT para garantizar la aplicación adecuada de las normativas, así como una planificación y ejecución precisa de los vuelos.
- Disponer de un computador con un procesador potente, una tarjeta de video de calidad y una cantidad adecuada de memoria RAM facilita el proceso de imágenes.
- Al emplear Roadroid, se aconseja que el vehículo cuente con amortiguadores en buen estado, un adecuado balanceo y una presión correcta en los neumáticos.
- Antes y durante la evaluación en la vía, es esencial asegurar la calibración adecuada del equipo, incluyendo la verificación del estado y la presión de la llanta del Equipo Merlín, un punto fijo crucial para obtener datos precisos.

BIBLIOGRAFÍA

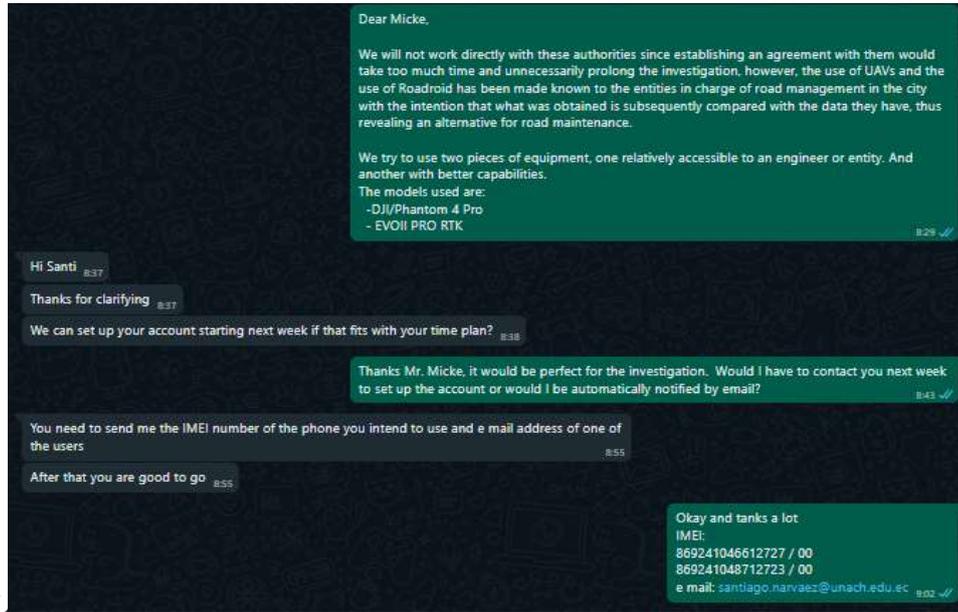
- Álvarez, S., & Rivero, R. (2012). *Instrumento Electrónico Para La Estimación Del Índice De Rugosidad Internacional (IRI) Con Base En El Perfilómetro Estático Merlín*. 27(1), 49-55.
- ASHTO. (1993). *Design of Pavement Structures*.
- Badilla, G. (2009). *Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI)*. <https://www.researchgate.net/publication/277227990>
- Bardales, C., & Cheng, G. (2013). *Elaboración de las curvas de ciclo de vida de las carreteras CA-1, CA-2, CA-3*.
- Cruz, J. (2022). *Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) a través de imágenes obtenidas de un vehículo aéreo no tripulado*.
- Del Aguila, P. (1999). *METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DE LA RUGOSIDAD DE LOS PAVIMENTOS CON EQUIPO DE BAJO COSTO Y GRAN PRECISION*.
- DGAC. (2020). *Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)*. En 2020.
- Elmeseiry, N., Alshaer, N., & Ismail, T. (2021). A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (Uavs) with potential applications. *Aerospace*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/aerospace8120363>
- Geoequipos S.A. (2023). *Miras – Geoequipos S.A.* <https://www.geoequipos.cl/categoria-producto/topografia/miras/>
- Greenwood, W. W., Lynch, J. P., & Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000464](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000464)
- Guevara, M., Meza, A. S., Esquivel, E. A., Arias, D., Tapia Andrea, & Masís, F. (2020). Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i4.4528>
- Hernández, R., Fernández, C., & Del Pilar, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta ed.).
- Instituto Mexicano Del Transporte. (1998). *Índice Internacional De Rugosidad en la Red Carretera De México*.
- Kraftur®. (2023). *Dipstick*. <https://kraftur.com.au/dipstick/>

- Litchi. (2023). *Litchi for DJI Drones*. <https://flylitchi.com/>
- Ministerio De Transporte Y Obras Públicas Del Ecuador. (2013). *NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12 - MTOP*.
- Montalvo, I. (2023). *INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE LA CARRETERA HUARAZ-CARHUAZ PARA MEJORAR LA SERVICIABILIDAD EMPLEANDO ROADROID, AÑO 2022*.
- Montoya, J. (2013). *Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú*. [Tesis de Master en Ingeniería Civil con Mención en Ingeniería Vial]. Universidad de Piura.
- Morales-Rodríguez, A., Cano Cano, E., Villena, J., & López-Perales, J. A. (2022). *A Comparison between Conventional Sprayers and New UAV Sprayers: A Study Case of Vineyards and Olives in Extremadura (Spain)*. <https://doi.org/10.3390/agronomy>
- Oyolo, J. (2021). *Determinación del índice de rugosidad del pavimento, aplicando el método Roadroid mediante Smartphone, en tramos de la panamericana sur, Ica*.
- Pix4DMapper. (2017). *Pix4DMapper 4.1 User Manual*.
- Prosser-Contreras, M., Atencio, E., La Rivera, F. M., & Herrera, R. F. (2020). Use of unmanned aerial vehicles (Uavs) and photogrammetry to obtain the international roughness index (iri) on roads. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(24), 1-22. <https://doi.org/10.3390/app10248788>
- Ramirez, B. (2017). *CÁLCULO DEL IRI MEDIANTE ACELERÓMETRO DE SMARTPHONE EN EL TRAMO HUARMEY – CASMA DE LA CARRETERA PANAMERICANA NORTE*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Reyes, B. (2020). *Determinación del Índice de Rugosidad Internacional en la Av. La Prensa, usando aparatos inteligentes y el rugosímetro de merlín*. Universidad Estatal Del Sur De Manabí.
- Roadroid. (2020). *Roadroid Intro Video - YouTube*. https://www.youtube.com/watch?v=kG-1_G18woI
- Roadroid. (2023). *User Guide for Roadroid Pro*.
- Rodríguez, E., Torres, L., & Villeda, M. (2019). *DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE IRI (INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX), MEDIANTE EL USO DE UN RUGOSÍMETRO BASADO EN EL MERLIN (MACHINE EVALUATING ROUGHNESS USING LOW COST INSTRUMENTATION), PARA EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS EN EL SALVADOR*. Universidad de El Salvador.

- Rogers, P. (2019). *Use of Small Unmanned Aerial Systems for Construction Inspection Tech Brief*. www.faa.gov/uas/.
- Saltos, E. (2023). *Determinación Del Índice De Rugosidad Internacional de La Vía Los Ángeles-Andil*. Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Solís, M. (2017). *Contexto del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en los proyectos de rehabilitación carreteros costarricenses* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/13430/1/41106.pdf>
- Solminihaç, H. D., Echaveguren, T., Thenoux, G., & Vera, I. (2010). Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 9, 76-88.
- Tan, Y., & Li, Y. (2019). UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi8090409>
- The Transtec Group, Inc. (2017). *ProVAL Software: View and Analyze Pavement Profiles*. <https://www.thetranstecgroup.com/portfolio-items/proval-software-view-and-analyze-pavement-profiles/>
- Tingal, H. (2021). *ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA VÍA CAJAMARCA – BAÑOS DEL INCA, UTILIZANDO EL RUGOSIMETRO DE MERLIN*.
- Valverde, C., & Barrantes Jimenez, R. (2019). *Rangos del Índice de Regularidad Internacional y su impacto en las ventanas de operación*. <https://www.researchgate.net/publication/331022525>
- Valverde, C., & Barrantes Jiménez, R. (2019). *Rangos del Índice de Regularidad Internacional y su Impacto en las Ventanas de Operación*.
- Vea, F. (2019). *El proyecto PAV-DT. Una nueva herramienta innovadora para la auscultación de pavimentos*. https://www.revistacarreteras.com/2021/05/03/pav-dt_becs_art2021/
- Yesquen, I. (2016). *GESTIÓN Y CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, A TRAVÉS DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO «PCI» EN EL ENTORNO DEL DISTRITO DE SURQUILLO-LIMA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA.

ANEXOS

Anexo 1 Solicitud de cuenta educativa para el uso de la aplicación Roadroid



Anexo 2 Hoja de campo “anotación de lecturas ensayo Merlín”



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
 EVALUACIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO
 HOJA DE CAMPO

Proyecto: _____ Carril: _____
 Sector: _____ Operador: _____
 Nombre de la vía: _____ Fecha: _____
 Tramo: _____

Ensayo N° Km Hora

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tipo de Pavimento
1											Afirmado <input type="checkbox"/>
2											Base Granular <input type="checkbox"/>
3											Base Imprimida <input type="checkbox"/>
4											Tratamiento Bicapa <input type="checkbox"/>
5											Carpeta en frio <input type="checkbox"/>
6											Carpeta en caliente <input type="checkbox"/>
7											Recapeo Asfáltico <input type="checkbox"/>
8											Sello <input type="checkbox"/>
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

Observaciones:

Nota: En la hoja de campo se detallará los datos generales del proyecto y del operador en la sección inicial, mientras que la según parte se registrará los datos obtenidos por el Merlín en las cuadrículas de 20x10.

Anexo 3 Formato con las lecturas obtenidas en el tramo de prueba de la Avenida de la República.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
EVALUACIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO
HOJA DE CAMPO**

Proyecto: DETERMINACIÓN IRI
Sector: AV. REPUBLICA **Carril:** DERECHO
Nombre de la vía: AV. REPUBLICA **Operador:** MARTINEZ Y NARVAEZ
Tramo: 4+400 – 4+4800 **Fecha:** 15/08/2023

Ensayo N° **Km** **Hora**

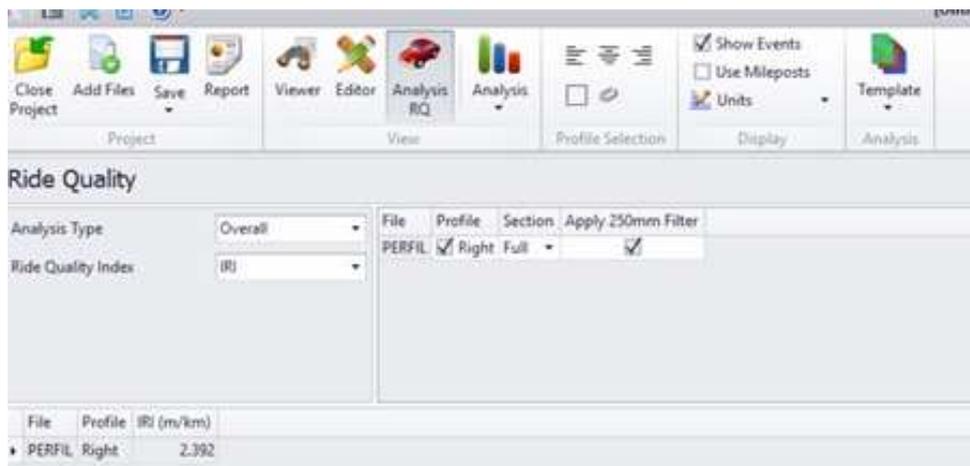
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tipo de Pavimento
1	24	26	23	24	22	24	21	23	23	24	Afirmado <input type="checkbox"/>
2	25	24	21	23	20	23	21	24	23	22	Base Granular <input type="checkbox"/>
3	24	22	27	29	24	23	23	21	24	24	Base Imprimida <input type="checkbox" value="x"/>
4	25	26	23	24	21	28	22	22	23	23	Tratamiento Bicapa <input type="checkbox"/>
5	23	23	24	24	23	25	23	23	22	22	Carpeta en frío <input type="checkbox"/>
6	22	32	24	9	23	23	20	21	24	23	Carpeta en caliente <input type="checkbox"/>
7	23	24	25	22	26	24	22	23	23	24	Recapeo Asfáltico <input type="checkbox"/>
8	24	24	24	25	26	19	21	22	23	22	Sello <input type="checkbox"/>
9	26	22	22	23	21	24	22	22	23	23	<input type="checkbox"/>
10	25	25	21	21	23	23	22	21	22	25	<input type="checkbox"/>
11	24	24	24	22	24	20	21	23	24	23	<input type="checkbox"/>
12	23	24	23	21	23	22	22	23	22	21	<input type="checkbox"/>
13	24	23	22	21	24	21	20	24	24	24	<input type="checkbox"/>
14	23	24	23	23	19	20	22	23	21	24	<input type="checkbox"/>
15	24	23	22	23	24	23	24	23	24	27	<input type="checkbox"/>
16	24	22	23	23	23	21	20	21	25	24	<input type="checkbox"/>
17	21	23	21	28	24	23	21	24	23	26	<input type="checkbox"/>
18	23	24	24	24	24	24	23	22	23	22	<input type="checkbox"/>
19	23	25	23	26	24	23	25	23	22	26	<input type="checkbox"/>
20	24	24	24	22	25	23	21	23	25	28	<input type="checkbox"/>

Observaciones:

Anexo 4 Análisis de datos VANT convencional - ProVAL



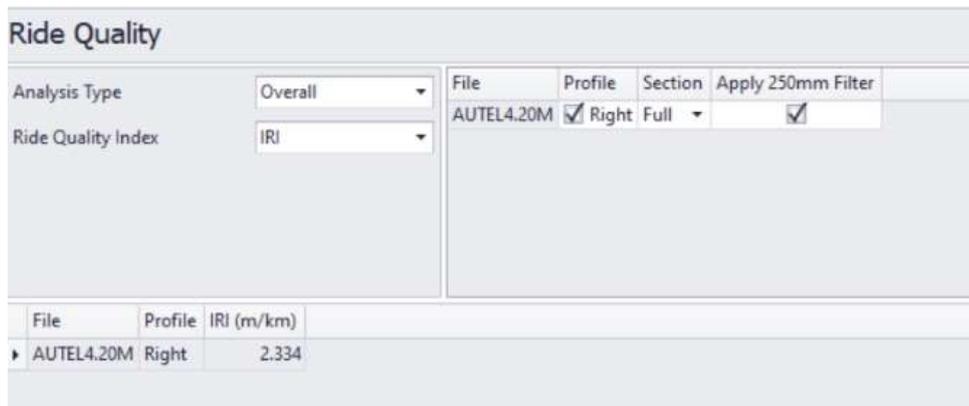
Anexo 5 Análisis Overall en el software ProVAL para la obtención del IRI



Anexo 6 Análisis de datos VANT RTK - ProVAL



Anexo 7 Análisis Overall en el software ProVAL para la obtención del IRI



Anexo 8 Cantidades registradas por unidad de medida según el tipo de falla

No.	Fisuras	Cantidad	Unidad
1	Exudación del asfalto	611.5	m2
2	corrugaciones	110.3	m2
3	Fisuras longitudinales y transversales	114.3	m2
4	Pulimiento del agregado	70.0	m2

Nota. La tabla del anexo 8 explica que la inspección visual en la extensión de la Avenida de la República, se establecieron ocho unidades de muestra dentro de las cuales, se identifican cuatro de los diecinueve tipos de fallas considerados por el método

Anexo 9 Resultados del cálculo del PCI de las 8 unidades de muestra

DATOS		Figuras	Exudación del asfalto	corrugaciones	Figuras longitudinales y Pulimiento del agregado	DENSIDAD AFECTADA POR LA FALLA (%)				VALOR DE DEDUCCION POR TIPO DE FALLA				Cálculo del PCI						
PROGRESIVA	AREA					TIPO DE FALLA REGISTRADA														
Del Km	Al Km	m ²	SEV.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	VDT	q	VDC	PCI	CONDICION
00+000	00+050	367.50	L	60.0	110.3	5.3		16.3265	30	1.42857		7	25	5		37	3	23	77	Muy Bueno
00+050	00+100	367.50	L			13.4	70.0			3.63265	19.05			11	8	19	2	15	85	Muy Bueno
00+100	00+150	367.50	L	87.5		6.0		23.8095		1.63265		10		4		14	1	19	81	Muy Bueno
00+150	00+200	367.50	L	90.0		11.3		24.4898		3.06122		11		10		21	2	19	81	Muy Bueno
00+200	00+250	367.50	L	99.0		17.5		26.9388		4.7619		13		14		27	2	21	79	Muy Bueno
00+250	00+300	367.50	L	80.0		30.0		21.7687		8.16327		9		17		26	2	20	80	Muy Bueno
00+300	00+350	367.50	L	90.0		15.8		24.4898		4.28571		11		13		24	2	15	85	Muy Bueno
00+350	00+400	367.50	L	105.0		15.0		28.5714		4.08163		15		12		27	2	21	79	Muy Bueno

Nota. Al tener todos los factores esenciales, como el Tipo de falla, Cantidad, Severidad, Densidad, Valor deducido, entre otros, necesarios para la evaluación del pavimento mediante el método PCI, se llevó a cabo la aplicación de dicho método en las 8 Unidades de muestra. Lo que permite conocer la condición actual en la que se encuentran la carretera, presentando así en la tabla 11, los resultados procesados para su cálculo. La tabla proporciona los resultados de cada muestra evaluada, donde observan fluctuaciones que van desde 79 hasta 85, calculando un promedio calculado de 81, indicando una condición de pavimento clasificada como "**muy bueno**"