

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES



**APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES EN LA
DETECCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA EL
MANTENIMIENTO VIAL URBANO, DE LA AVENIDA
CIRCUNVALACIÓN NORTE DE LA CIUDAD DE PUNO, PUNO-2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Federico Demetrio Condori Cayo

ORCID: 0009-0009-8217-8526

Asesor:

Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez

ORCID: 0000-0002-6766-7665

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES



**APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES EN LA
DETECCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA EL
MANTENIMIENTO VIAL URBANO, DE LA AVENIDA
CIRCUNVALACIÓN NORTE DE LA CIUDAD DE PUNO, PUNO-2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Federico Demetrio Condori Cayo

ORCID: 0009-0009-8217-8526

Asesor:

Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez

ORCID: 0000-0002-6766-7665

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN
TRANSPORTES

Tesis

**“APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES EN LA
DETECCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA EL
MANTENIMIENTO VIAL URBANO, DE LA AVENIDA
CIRCUNVALACIÓN NORTE DE LA CIUDAD DE PUNO, PUNO-2025”**

Presentada por:

Bach. Federico Demetrio Condori Cayo

Tesis sustentada y aprobada el 11 de junio de 2026; ante el siguiente jurado
examinador:

PRESIDENTE: Dr. Anibal Juan ESPINOZA ARANCIAGA

SECRETARIO: Mtro. Rolando Gonzalo SALAZAR CALDERÓN JUÁREZ

VOCAL: Dr. Pedro Valerio MAQUERA CRUZ

ASESOR: Dr. Edgar Vidal HURTADO CHÁVEZ

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Federico Demetrio Condori Cayo, en calidad de: egresado de la Maestría en Ingeniería Civil con mención en Transportes de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 01311911.

Soy autor de la tesis titulada:

“APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA EL MANTENIMIENTO VIAL URBANO, DE LA AVENIDA CIRCUNVALACIÓN NORTE DE LA CIUDAD DE PUNO, PUNO-2025”, con asesor: Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería Civil con mención en Transportes, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 01% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

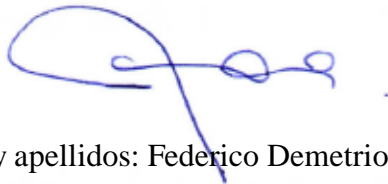
Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y

a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 11 de junio de 2026

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Federico Demetrio Condori Cayo', written in a cursive style.

Nombres y apellidos: Federico Demetrio Condori Cayo

DNI: 01311911

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía espiritual y darme la fortaleza necesaria para culminar este camino. dándome la salud y la sabiduría necesaria para superar cada desafío

A mis padres, quienes ya no están conmigo físicamente, pero cuya luz y enseñanzas siguen guiando mis pasos; este título de maestría es el fruto de la semilla que ellos plantaron en mí, y sus enseñanzas habitan en cada uno de mi logro.

A mi esposa, por su apoyo constante y por ser el pilar fundamental en el equilibrio de nuestro hogar durante este proceso académico.

Con especial amor, a mis hijos Ivan Fredy y Lionel, quienes han sido mi motor y mi mayor orgullo. Gracias por su apoyo incondicional y por creer en mí en cada etapa de este gran reto.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, la salud y por haberme acompañado en todo momento de mi estudio y en cada jornada de trabajo, dándome la sabiduría para concluir este proyecto.

A la memoria de mis padres Demetrio y Rufina, por haberme formado como un hombre de bien y por ser los arquitectos de mi espíritu de superación.

A mis hijos, Ivan Fredy y Lionel, por ser mi soporte inquebrantable. Su paciencia, su comprensión y sus palabras de aliento a lo largo de este proceso fueron fundamentales para alcanzar esta meta a mis 57 años. Este triunfo les pertenece también a ustedes.

A la Universidad Privada de Tacna y a mis asesores, por brindarme las herramientas para modernizar mi visión profesional y permitirme aportar a la ingeniería vial de nuestro país.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2.1. Problema principal.....	4
1.2.2. Problemas secundarios	5
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	8
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	8
2.1.1. Antecedentes Internacionales	8
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3. Antecedentes locales	10
2.2. NORMATIVA VIGENTE	10
2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS	11
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO.....	15
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA	15
3.1.1. Tipo de investigación	15

3.1.2.	Nivel de investigación	15
3.1.3.	Justificación del enfoque aplicado.....	15
3.2.	DISEÑO DEL PROYECTO	17
3.2.1.	Etapas del proyecto.....	17
3.2.2.	Herramientas y/o software utilizado.....	18
3.3.	EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD	20
3.3.1.	Evaluación técnica.....	20
3.3.2.	Factibilidad.....	21
3.3.3.	Simulación de impacto ambiental	23
3.4.	PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN	23
3.4.1.	Cronograma de actividades	23
3.4.2.	Asignación de recursos y costos estimados	24
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		26
4.1.	DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO	26
4.1.1.	Desarrollo del objetivo 1	26
4.1.2.	Desarrollo del objetivo 2	30
4.1.3.	Desarrollo del objetivo 3	40
4.1.4.	Validación del objetivo 1.....	45
4.1.5.	Validación del objetivo 2.....	45
4.1.6.	Validación del objetivo 3.....	46
4.1.7.	Síntesis del desarrollo y validación	46

4.2.	ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON CASOS SIMILARES.....	47
4.2.1.	Análisis de impacto del proyecto	47
4.2.2.	Beneficios del sistema propuesto	49
4.2.3.	Comparación con casos similares.....	50
4.2.4.	Discusión crítica del impacto	52
4.2.5.	Síntesis del impacto y comparación	53
4.3.	LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS.....	53
4.3.1.	Análisis crítico de las limitaciones.....	55
4.3.2.	Mejoras identificadas.....	56
4.4.	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN	57
4.4.1.	Descripción general y Arquitectura de la solución.....	57
4.4.2.	Implementación de la solución en el caso de estudio.....	58
4.5.	EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO	60
4.5.1.	Evaluación de costos del sistema propuesto.....	60
4.5.2.	Análisis de sostenibilidad	62
4.5.3.	Viabilidad técnica.....	63
	CONCLUSIONES	66
	RECOMENDACIONES	68

REFERENCIAS	70
-------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Cronograma de actividades Cronograma de actividades-----	24
Tabla 2	Presupuesto de ejecución del proyecto -----	25
Tabla 3	Comparativa de Detección (Inspección Visual vs. Detección Automatizada)-----	44
Tabla 4	Comparación entre el Método PCI tradicional y el sistema propuesto ---	50
Tabla 5	Comparación contextual (Nacional vs Internacional) -----	52
Tabla 6	-----	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Drone profesional DJI Mavic 3 Enterprise.....	19
Figura 2 Identificación y clasificación de severidad de fallas	27
Figura 3 Medición de fallas	27
Figura 4 Planificación de la ruta de vuelo y el traslape de fotos	28
Figura 5 Monitoreo en tiempo real de telemetría.....	29
Figura 6 Importación de puntos y Georreferenciación	30
Figura 7 Orientación de fotos en una calidad máxima.....	31
Figura 8 Generación de nube de puntos en calidad extra alta.....	32
Figura 9 Generación de DEM	32
Figura 10 Generación de Ortomosaico	33
Figura 11 Verificación de la calidad del vuelo	34
Figura 12 Entorno de conjunto de datos en la plataforma de Roboflow.....	35
Figura 13 Exportación de la versión del modelo en formato Yolov8.....	36
Figura 14 Instalación de las herramientas Roboflow y Ultralytics, en Google Colab	37
Figura 15 Interfaz de programación de aplicaciones (API) creada en Roboflow	37
Figura 16 Código del entrenamiento del modelo.....	38
Figura 17 Código para detección de fallas y medición de áreas y longitudes ...	40
Figura 18 Código para detección de fallas y medición de áreas y longitudes ...	41
Figura 19 Asignación de un código y un color distintivo según su naturaleza...	41
Figura 20 Estado de pavimento con el método PCI con medición directa en campo	42
Figura 21 Estado de pavimento con el método PCI con medición indirecta fotogramétrico.....	43
Figura 22 Plano generado de la distribución de unidades muestrales.....	58

Figura 23	59
------------------------	----

INDICE DE APÉNDICE

Apéndice 1 Matriz de consistencia del informe final de tesis.....	77
Apéndice 2 Muestras de la detección de fallas	79

RESUMEN

La infraestructura vial urbana constituye un componente estratégico para la movilidad, la seguridad y el desarrollo económico de las ciudades, por lo que la evaluación superficial de pavimentos flexibles permite identificar oportunamente fallas como grietas, baches, desprendimientos y deformaciones, permitiendo que la atención temprana reduzca costos de intervención y prolongue la vida útil de la vía. La presente investigación tuvo como objetivo aplicar fotogrametría con drones en la detección de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida Circunvalación Norte-ciudad de Puno. La investigación fue de tipo aplicado, de enfoque cuantitativo, nivel aplicativo y diseño no experimental. El procedimiento investigativo permitió realizar el levantamiento de información mediante vuelos fotogramétricos con drones, cumpliendo parámetros de planificación como altura de vuelo, solape longitudinal y transversal, y condiciones climáticas adecuadas. Las imágenes capturadas fueron procesadas mediante software especializado para generar ortomosaicos y modelos digitales de alta resolución. A partir de estos productos, se procedió a la identificación, clasificación y cuantificación de fallas superficiales (grietas, baches, deformaciones, desprendimientos), complementando el análisis con la aplicación del índice de condición del pavimento (PCI). Los resultados evidencian una reducción significativa del tiempo de levantamiento de información entre un 80 % y 90 % respecto al método convencional, una precisión del 95.88 % en la identificación de fallas utilizando visión computacional en pavimentos flexibles. Se concluye que la alta correlación entre el método tradicional y el automatizado (precisión superior al 95.88 %) valida la confiabilidad del sistema propuesto.

Palabras clave: Fotogrametría con drones, pavimentos flexibles, fallas superficiales, PCI, ortomosaicos.

ABSTRACT

Urban road infrastructure is a strategic component for the mobility, safety, and economic development of cities. Therefore, surface evaluation of flexible pavements allows for the timely identification of defects such as cracks, potholes, spalling, and deformations, enabling early intervention to reduce costs and extend the road's lifespan. This research aimed to apply drone photogrammetry to detect defects in flexible pavements for urban road maintenance on the North Ring Road in the city of Puno. The research was applied, quantitative, and non-experimental in design. The research procedure involved collecting data through photogrammetric drone flights, adhering to planning parameters such as flight altitude, longitudinal and transverse overlap, and suitable weather conditions. The captured images were processed using specialized software to generate orthomosaics and high-resolution digital models. Based on these products, surface defects (cracks, potholes, deformations, spalling) were identified, classified, and quantified, complementing the analysis with the application of the Pavement Condition Index (PCI). The results show a significant reduction in data collection time of between 80% and 90% compared to the conventional method, with an accuracy of 95.88% in the identification of defects using computer vision in flexible pavements. It is concluded that the high correlation between the traditional and automated methods (accuracy greater than 95.88%) validates the reliability of the proposed system.

Keywords: Drone photogrammetry, flexible pavements, surface defects, PCI, orthomosaics

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial urbana constituye un componente estratégico para la movilidad, la seguridad y el desarrollo económico de las ciudades. En ese marco, la evaluación superficial de pavimentos flexibles permite identificar oportunamente fallas como grietas, baches, desprendimientos y deformaciones, cuya atención temprana reduce costos de intervención y prolonga la vida útil de la vía. En los últimos años, la literatura especializada ha destacado que el monitoreo técnico del estado superficial del pavimento es una base indispensable para planificar acciones de conservación más eficientes y sostenibles, especialmente cuando se busca optimizar recursos en entornos urbanos con creciente demanda de tránsito y limitaciones presupuestales (Cárdenas Resines et al., 2023).

El deterioro de los pavimentos flexibles responde a la acción combinada del tránsito vehicular, las condiciones climáticas, el envejecimiento de los materiales y, en algunos casos, deficiencias constructivas o de mantenimiento. Frente a ello, los métodos tradicionales de inspección visual, aunque ampliamente utilizados, pueden presentar limitaciones asociadas al tiempo de levantamiento, la subjetividad del evaluador y la dificultad para intervenir tramos extensos con rapidez. Por esa razón, investigaciones recientes han resaltado la incorporación de herramientas tecnológicas como la fotogrametría terrestre, redes neuronales, sistemas de información geográfica y vehículos aéreos no tripulados, debido a que permiten mejorar la precisión del diagnóstico y apoyar la toma de decisiones en mantenimiento vial urbano (Tello-Cifuentes et al., 2021).

En la ciudad de Puno, esta problemática adquiere especial relevancia por su dinámica urbana y por los desafíos asociados a su crecimiento y ordenamiento territorial. Asimismo, estudios desarrollados en dicha ciudad muestran que el crecimiento urbano desordenado, la deficiente gestión ambiental y las limitaciones

institucionales inciden negativamente en las condiciones urbanas y sanitarias del entorno, lo cual hace aún más necesaria una gestión vial basada en información técnica confiable y actualizada (Tumi-Quispe et al., 2021).

En ese sentido, la presente investigación se justifica porque busca evaluar superficialmente el pavimento flexible en la ciudad de Puno como base para optimizar el mantenimiento vial urbano. Su importancia radica en que permitirá identificar el nivel de deterioro existente, priorizar intervenciones y contribuir con criterios técnicos para una mejor gestión de la infraestructura vial.

La presente tesis se estructura en cuatro capítulos: El primer capítulo denominado el problema de investigación, se presenta el planteamiento y la formulación del problema, identificando el problema principal y los problemas secundarios, se desarrolla la justificación del estudio estableciendo el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación. El segundo capítulo corresponde al marco referencial, en el cual se presentan los antecedentes del problema, se revisa la normativa vigente aplicable al estudio y se definen los conceptos básicos necesarios para la comprensión del desarrollo teórico y técnico de la investigación. El tercer capítulo describe la metodología y el diseño del proyecto, detallando el tipo y nivel de investigación, la justificación del enfoque aplicado, las etapas del proyecto, la evaluación técnica y de factibilidad, la simulación del impacto ambiental y la planificación de la ejecución, incluyendo el cronograma de actividades, la asignación de recursos y los costos y financiamiento. Finalmente, el cuarto capítulo presenta los resultados y la discusión, donde se desarrolla la validación del diseño, el análisis de impacto, beneficios y comparación con casos similares, las limitaciones del estudio y las mejoras identificadas, la descripción de la solución propuesta y su implementación, así como la evaluación de costos, sostenibilidad y viabilidad a largo plazo. La investigación concluye con la presentación de las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, seguidas de las referencias empleadas para el sustento metodológico de la tesis.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presente investigación surge frente al deterioro progresivo del pavimento flexible en una vía estructurante de alto flujo en Puno, como es la Av. Circunvalación. En la Av. Circunvalación se observan fallas típicas como fisuración por fatiga (piel de cocodrilo), fisuras en bloque, ahuellamiento, baches y desprendimientos, cuyos efectos inmediatos son el incremento de tiempos de viaje, mayor accidentalidad por pérdida de adherencia, aumento de costos de operación vehicular y percepción negativa de la calidad del servicio vial.

Entre las principales causas destacan: (i) cargas repetidas y crecimiento del tránsito con porcentaje no despreciable de vehículos pesados; (ii) envejecimiento oxidativo y deficiencias de drenaje; (iii) insuficiencia de inventarios y monitoreo sistemático del estado del pavimento; (iv) intervenciones reactivas y fragmentadas de bacheo, sin priorización basada en condición; (v) limitaciones presupuestales y de gestión para aplicar tratamientos preventivos oportunos (Shahin, M. Y. 2005).

En este contexto, la adopción de técnicas de detección remota de bajo costo relativo y alta repetibilidad, como los vuelos fotogramétricos, se perfila como alternativa de solución clave para alimentar decisiones de mantenimiento basadas en evidencia y multicriterio, tales como: (a) implementar levantamientos fotogramétricos con UAS para generar orto-mosaicos de alta resolución y cartografiar fallas; (b) calcular índices de condición del pavimento (PCI) por tramo para priorizar; (c) aplicar tratamientos de mantenimiento preventivo y correctivo costo-efectivos según severidad (Saad & Tahar, 2019).

Según la ASTM International (2018), el uso de índices de condición como PCI (ASTM D6433) es estándar para diagnosticar y priorizar mantenimiento en pavimentos flexibles; su correcta aplicación reduce costos del ciclo de vida y

riesgos operacionales. Práctica estándar para estudios de índice de condición del pavimento de carreteras y estacionamientos.

En la investigación presentada por Shah, SAR, & Mishra, RK (2021), se evidencia que la fotogrametría con UAS genera ortomosaicos centimétricos útiles para detectar y cuantificar fisuras, baches y ahuellamientos, con buena valoración respecto a inspecciones in situ y significativa eficiencia en tiempo y costos.

Organismos como PIARC (2019) recomiendan sistemas de gestión de pavimentos que integran inventarios, evaluación geométrica y superficial con tecnologías remotas para optimizar intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo en redes urbanas.

Investigaciones y diagnósticos locales evidencian deterioro en vías urbanas de Puno por fisuración, bacheo recurrente y drenaje insuficiente, con impactos en seguridad y tiempos de viaje, recomendando fortalecer inventarios y priorización técnica (Municipalidad Provincial de Puno, 2022). En estudios de caso en la región altiplánica, la fotogrametría con UAS ha permitido mapear fallas superficiales en corredores urbanos a resolución sub-centimétrica, facilitando la programación de mantenimiento (UNA Puno, 2022).

Registros climáticos de SENAMHI (2023) para la región Puno, muestran heladas frecuentes y alta radiación, condiciones que aceleran el envejecimiento del ligante y la fisuración térmica, por lo que se requieren metodologías de monitoreo más frecuentes y sensibles. Complementariamente, reportes de accidentalidad vial urbana señalan que la condición de la superficie influye en siniestros por pérdida de adherencia en temporada de lluvias (PNP, 2023).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema principal

¿De qué manera la aplicación de fotogrametría con drones permite detectar fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida circunvalación Norte - ciudad de Puno, Puno 2025?

1.2.2. Problemas secundarios

- ¿Cómo se aplican los procesos de captura de imágenes aéreas mediante drones para la determinación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida circunvalación Norte- ciudad de Puno, Puno 2025?
- ¿Cómo se aplica el procesamiento fotogramétrico complementado con modelos de visión computacional para la identificación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles de la avenida Circunvalación Norte de la ciudad de Puno, 2025?
- ¿Cómo contribuyen los resultados de la detección fotogramétrica en la caracterización del estado superficial del pavimento de la avenida circunvalación Norte - ciudad de Puno, Puno 2025?

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista técnico, la adopción de vuelos fotogramétricos permite levantar, procesar y actualizar inventarios de fallas en plazos cortos y con costos competitivos. La experiencia local de la Municipalidad Provincial de Puno (2022), reporta que la fotogrametría con UAS sobre corredores urbanos mejora la precisión del mapeo de baches y fisuras y acelera la toma de decisiones para bacheo, sellado y sobre carpetas delgadas. Se complementa esta justificación técnica por la metodología a aplicarse, el proyecto integrará la inspección visual estructurada con el índice PCI y levantamientos fotogramétricos de alta resolución para detección y cuantificación de fallas, fortaleciendo la validez y confiabilidad de los diagnósticos.

En la práctica, la adopción de vuelos fotogramétricos permite levantar, procesar y actualizar inventarios de fallas en plazos cortos y con costos competitivos, habilitando priorizaciones transparentes y selección de tratamientos preventivos y correctivos acordes a severidad y extensión. La experiencia local en la ciudad de Puno de la Municipalidad Provincial de Puno (2022), reporta que la fotogrametría con UAS sobre corredores urbanos mejora la precisión del mapeo de baches y fisuras y acelera la toma de decisiones para bacheo, sellado y sobre carpetas delgadas.

Desde una perspectiva social, la mejora de la condición superficial del pavimento reduce tiempos de viaje, costos de operación vehicular, exposición a siniestros por pérdida de adherencia y vulnerabilidad de usuarios vulnerables (peatones, ciclistas y transporte público). Para Provias Descentralizado (2020), los lineamientos de movilidad urbana sostenible y gestión de activos recalcan que conservar la infraestructura existente con criterios técnicos genera beneficios sociales netos al mejorar la accesibilidad y la seguridad vial en ciudades intermedias como Puno.

El enfoque propuesto aporta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente al ODS 9 (infraestructura resiliente), ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y ODS 13 (acción por el clima). El mantenimiento preventivo oportuno disminuye el consumo de materiales y energía respecto a rehabilitaciones tardías, reduce las emisiones asociadas a congestión y desvíos por baches y fallas, y alarga la vida útil del activo (MTC, 2018).

Metodológicamente, el proyecto integra inspección visual estructurada con el índice PCI y levantamiento fotogramétricos de alta resolución para detección y cuantificación de fallas, fortaleciendo la validez y confiabilidad de los diagnósticos. En Perú, las investigaciones de Araujo y Huamán (2021) y de Gonzales y Quispe (2020) han mostrado la pertinencia de combinar PCI con fotogrametría UAS para generar ortomosaicos centimétricos y cartografía de fallas replicables, con mejoras sustantivas en cobertura, trazabilidad y reducción de sesgos observador-dependientes.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Aplicar de fotogrametría con drones en la detección de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida Circunvalación Norte-ciudad de Puno, Puno 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

- Aplicar los procesos de captura de imágenes aéreas mediante drones para la determinación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida circunvalación Norte - ciudad de Puno, Puno 2025
- Aplicar el procesamiento fotogramétrico complementado con modelos de visión computacional en la identificación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles de la avenida Circunvalación Norte de la ciudad de Puno, 2025.
- Analizar los resultados de la detección fotogramétrica para caracterizar el estado del pavimento en términos de tipología, severidad y extensión de fallas. del pavimento de la avenida circunvalación Norte – ciudad de Puno, Puno 2025.

CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Li et al. (2025) en su artículo científico: *Deep metric learning-based classification for pavement distress images*, desarrollan un enfoque de aprendizaje profundo basados en “metric learning” sobre conjuntos de imágenes UAV, logrando mejoras sustantivas en la clasificación multiclase de deterioros, lo que robustece su uso en escenarios reales con clases que evolucionan y anotaciones limitadas.

Chen et al. (2024) en su artículo científico: *A pavement crack detection and evaluation framework for a UAV inspection system based on deep learning*, proponen un marco sistemático que integra estrategia de vuelo, detección automática de grietas con algoritmos profundos (Faster R-CNN, YOLOv5/7/8) y la evaluación del daño para soportar decisiones de mantenimiento en vías urbanas, demostrando altos niveles de precisión y tiempos de procesamiento adecuados para inspecciones operativas con UAVs de bajo costo como el DJI Mini 2.

Tan y Li (2019) en su artículo científico: *UAV photogrammetry-based 3D road distress detection* verifican la factibilidad de detectar deterioros y extraer dimensiones con alta precisión en modelos 3D reconstruidos por fotogrametría oblicua, con errores cercanos a +/- 1 cm en la componente vertical, validando el potencial de la fotogrametría UAV para su aplicación en la práctica ingenieril.

2.1.2. Antecedentes nacionales

A nivel nacional, lineamientos sectoriales y experiencias aplicadas recomiendan incorporar teledetección, SIG y fotogrametría para la conservación vial urbana, enfatizando inventarios georreferenciados, criterios objetivos de

priorización y mantenimiento preventivo que reduce costos de rehabilitación y mejora el nivel de servicio.

Espinoza (2024) en su trabajo de tesis: *Evaluación con dron del pavimento flexible por la Metodología Pavement Condition Index PCI, Avenida Huancavelica, Huancayo – 2023*, reportan ahorros de hasta 50% en tiempo y 46.9% en costos cuya evaluación se efectúa mediante dron por PCI, observando diferencias de hasta 36.94% frente a la inspección visual, y subrayando la necesidad de complementar con inspección de campo para capturar desniveles y elementos no visibles en ortofotos.

Arroyo y Cervantes (2023) en su trabajo de tesis: *Evaluación superficial del pavimento flexible empleando el método PCI y VIZIR con dron para una propuesta de intervención de un tramo de la carretera Emp. PE-1S (Dv. Paracas) hasta EMP. PE-28 (DV. Paracas), Pisco, Ica – 2023*, implementa una propuesta de intervención empleando PCI y VIZIR con dron, construyendo ortofotos y modelos 3D de alta nitidez; el tramo evaluado resulta “regular” para un índice PCI de aproximadamente 45.8, corroborando grietas longitudinales/transversales como patologías prevalentes y proponiendo alternativas de conservación.

Huamán (2022) en su tesis de maestría: *Evaluación de pavimentos flexibles mediante fotogrametría con aeronaves no tripuladas en vías urbanas de Cusco*, procesa ortomosaicos y modelos DSM en Agisoft Metashape; la detección de fallas se apoya en la clasificación supervisada (SVM). Encuentra una alta correlación entre áreas de grietas longitudinales/transversales detectadas por imagen y el PCI de tramo ($R^2 \approx 0.78$). Concluye que la UAS reduce los tiempos de inspección en 55–65% respecto al levantamiento visual tradicional.

Campos y Nuñez (2021) en su trabajo de tesis: *Evaluación superficial del pavimento flexible comparando la metodología del PCI y uso del dron en la av. Pacasmayo – Callao, 2020*, contrasta los índices de condición del pavimento (PCI) con y sin el uso de dron, encontrando diferencias mínimas en la condición resultante y confirmando tipos de falla dominantes como piel de cocodrilo, validado con ensayos.

2.1.3. Antecedentes locales

Manrique-Quenallata (2024) en su tesis: *Evaluación superficial del pavimento flexible con el método del índice de condición del pavimento mediante la fotogrametría aérea de la Vía Lampa – Caracara de la Región Puno*, analiza el estado del pavimento flexible que se encuentra en la ruta que comunica Lampa y Caracara en la zona de Puno. Utiliza la perspectiva PCI mediante el uso de aerofotometría para realizar una evaluación de carácter descriptivo, con especial énfasis en el pavimento flexible de la vía. Los resultados en el estudio de campo del PCI fueron de 16,12 y mediante la fotogrametría realizada con un UAV a una altura de 35 m, se obtuvo un PCI de 15,42 con un grado de exactitud del 92,54%. Concluye que, en ambos casos, el estado del pavimento fue calificado como muy problemático.

2.2. NORMATIVA VIGENTE

Normatividad internacional

- Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys (ASTM D6433-20)
- Índice de Condición del Pavimento (PCI), empleado para estandarizar la evaluación superficial de pavimentos flexibles mediante índices objetivos, que define el procedimiento de inspección visual, tipología de fallas y cálculo del índice de condición (ASTM International, 2020).
- The Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (LTPP) por la Administración federal de carreteras de Estados Unidos (FHWA). Este manual es la referencia de facto para homogeneizar la identificación de fallas y entrenar equipos de inspección, por lo que respalda la taxonomía de daños que se detectan y validan a partir de imágenes de dron (Federal Highway Administration, 2014).

Normatividad nacional

- Ley N° 30740, que regula el uso y las operaciones de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS).

La operación de drones (RPAS) para fines distintos a recreación—como levantamientos fotogramétricos urbanos— está regulada por ley. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2019). La Dirección General de aeronáutica Civil del MTC, regula los requisitos para operar drones. Estos requisitos son de cumplimiento obligatorio para vuelos en la Avenida Circunvalación Norte de Puno.

- Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial del MTC es norma de cumplimiento obligatorio en los tres niveles de gobierno. Define niveles de servicio, inventarios de condición, y especificaciones para conservación rutinaria y periódica en pavimentos flexibles (sellado de grietas, parcheos, recapeos, etc.), alineando la toma de decisiones que se fundamenta en la condición observada (p. ej., vía PCI o catálogos de daños) con las actividades e insumos normados. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2014)
- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013 del MTC Utilizado para asegurar la conformidad técnica de materiales, procedimientos y control de calidad asociados a intervenciones (parcheos, sellos, recapeos, etc.), aplican las, que fijan requisitos mínimos y métodos de ensayo a seguir en obras viales. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013)
- Manuales y reglamentos viales que enmarcan el diseño, operación y conservación de la infraestructura, útil como índice normativo para citar códigos vigentes (DG-2018, Ensayos de Materiales, Inventarios Viales, etc.) que resulten pertinentes a la etapa específica del proyecto. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013)

2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

Variable 1: Fotogrametría con drones

1. Captura de imágenes aéreas

La fotogrametría con drones (o UAV – vehículo aéreo no tripulado) es una técnica que utiliza aeronaves no tripuladas equipadas con cámaras para tomar imágenes desde el aire, con gran solape entre fotografías, lo que permite generar

modelos geospaciales con alta resolución (ortomosaicos, nubes de puntos). Estudios recientes muestran que la fotogrametría UAV es especialmente eficiente para capturar grandes extensiones de vías con rapidez, reduciendo los tiempos y riesgos asociados con inspecciones manuales tradicionales (Susilo, Novianti, Aditya, Cahyani y Kurniawan, 2023).

2. Procesamiento fotogramétrico

Tras la captura, las imágenes aéreas deben procesarse mediante software especializado para obtener productos como ortomosaicos y modelos digitales de elevación (MDE). Por ejemplo, en un estudio de detección de deterioros en pavimentos flexibles, se empleó Agisoft PhotoScan (hoy Metashape) para alinear las imágenes, construir una nube de puntos densa, y generar los modelos de superficie necesarios para la detección de grietas (Sánchez Morales, Lanz Acosta & Martínez Rojo, 2019).

Además, el preprocesamiento (ajuste de orientación, calibración, corrección de distorsiones) y la planificación del vuelo (altura, solape, tipo de cámara) son críticos para asegurar una densidad y precisión adecuadas en el modelo fotogramétrico (Sánchez Morales et al., 2019).

3. Interpretación y análisis de imágenes

Una vez obtenidos los productos fotogramétricos, se realiza la segmentación y clasificación de los deterioros presentes en la superficie del pavimento. Por ejemplo, usando software de análisis de imágenes como eCognition se pueden segmentar las imágenes por multi-resolución para detectar grietas, clasificarlas y cuantificar su extensión (Sánchez Morales et al., 2019).

También se ha combinado la fotogrametría con algoritmos de aprendizaje automático (por ejemplo, redes neuronales). En un estudio de fotogrametría, se logró una exactitud del 96 % en la detección de grietas, baches y problemas tipo piel de cocodrilo, usando una red neuronal multicapa entrenada con las imágenes procesadas (Tello-Cifuentes, Aguirre-Sánchez, Díaz-Paz & Hernández, 2021).

Variable 2: Detección de fallas en pavimentos flexibles

1. Tipología de fallas

Los pavimentos flexibles presentan una variedad de fallas o deterioros que pueden ser clasificados según su tipo: grietas (longitudinales, transversales, en enjambre o “crocodile skin”), baches, deformaciones plásticas, entre otros. Por ejemplo, en la investigación con fotogrametría terrestre y redes neuronales se identificaron grietas longitudinales, baches y grietas tipo piel de cocodrilo como las clases principales a detectar (Tello-Cifuentes et al., 2021).

2. Severidad de fallas

La severidad de una falla se refiere al grado de daño o deterioro en función del ancho, profundidad, densidad de grietas, etc. Al usar imágenes aéreas, se puede estimar esta severidad visualmente y con métricas derivadas de ortomosaicos y modelos DEM. Estudios recientes aplicado aprendizaje automático sobre imágenes de UAV para cuantificar la severidad de grietas y baches con el fin de priorizar intervenciones de mantenimiento (Innovative Infrastructure Solutions, 2024).

3. Extensión de fallas

La extensión se refiere al tamaño o área total afectada por las fallas. Gracias a los ortomosaicos generados mediante fotogrametría con drones, es posible delimitar espacialmente cada deterioro con gran precisión y obtener su área real, estimando la magnitud del problema. En un estudio reciente aplicado a UAV a pavimentos aeroportuarios con UAV las combinaciones óptimas de altura de vuelo y solape se logró detectar más del 98 % de los deterioros y delimitarlos con mayor precisión que métodos tradicionales (Jara Valdebenito, 2025).

Variable interviniente: Las condiciones del entorno urbano y ambiental de la ciudad de Puno

1. Condiciones del entorno urbano-vial

Esta dimensión comprende las características del espacio urbano donde se emplaza la vía de estudio, tales como la configuración de la avenida, la densidad

edificatoria, la ocupación del suelo, la presencia de mobiliario urbano, postes, cableado, intersecciones, tránsito vehicular y peatonal, así como la organización funcional del corredor vial. Para el caso de Puno, esta dimensión cobra relevancia porque el desarrollo urbano reciente demanda criterios de ordenamiento, sectorización y gestión del espacio urbano sostenible, lo que evidencia que las condiciones urbanas no son homogéneas y pueden alterar la observación técnica de la infraestructura vial. En ese sentido, el entorno urbano-vial debe entenderse como un factor contextual que condiciona la eficiencia del levantamiento fotogramétrico y la interpretación del estado del pavimento (Municipalidad Provincial de Puno, 2025).

2. Condiciones ambientales y climáticas

Esta dimensión incluye los factores del medio físico-natural y ambiental que caracterizan a la ciudad de Puno, como la altitud, la variación térmica, la radiación solar, la precipitación, la humedad, el viento, el drenaje superficial, así como las condiciones de saneamiento y contaminación urbana que inciden sobre la infraestructura vial. En la ciudad de Puno, esta dimensión adquiere especial relevancia por tratarse de un contexto altiplánico y lacustre, donde las condiciones ambientales son particulares y pueden influir directamente en la conservación del pavimento y en la operatividad de tecnologías de inspección no invasiva. Así, el ambiente no solo actúa como fondo geográfico, sino como un elemento que modifica el comportamiento de la vía y el rendimiento técnico de la fotogrametría (Tumi-Quispe et al., 2021).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA

3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación es del tipo aplicada porque utiliza conocimientos teóricos para resolver un problema concreto: mejorar la detección y el mantenimiento de fallas en pavimentos flexibles de una vía urbana específica, mediante la implementación de fotogrametría con drones (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista, 2018).

Es de enfoque cuantitativo porque se caracteriza por recolectar datos numéricos con instrumentos válidos y confiables para describir, estimar relaciones y apoyar decisiones (Hernández-Sampieri et al., 2018).

3.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es aplicativo porque utiliza conocimientos y métodos para intervenir o proponer soluciones en un contexto específico, generando mejoras en procesos o servicios (Bernal Torres, 2016).

Su diseño es no experimental porque se observará el estado del pavimento en su ambiente natural sin manipular variables independientes, recolectando datos en un único momento temporal (2025), para el diagnóstico de condiciones (incidencia, distribución y severidad de fallas (Hernández-Sampieri et al., 2018).

3.1.3. Justificación del enfoque aplicado

Se justifica porque la investigación no se orienta únicamente a ampliar el conocimiento teórico sobre la fotogrametría con drones, sino a resolver un problema concreto de infraestructura vial urbana: la detección oportuna de fallas en pavimentos flexibles de la Avenida Circunvalación Norte de la ciudad de Puno para

mejorar las decisiones de mantenimiento. En ese sentido, la investigación tiene una finalidad práctica y tecnológica, ya que busca adaptar y utilizar una herramienta de captura y análisis geoespacial en una situación real de deterioro vial. Esta orientación aplicada se sustenta en evidencia reciente que demuestra la viabilidad de la fotogrametría UAV para detectar y cuantificar deterioros en pavimentos, incluso con niveles de detección superiores al 98% en condiciones adecuadas, mostrando además mayor precisión de delimitación respecto de métodos tradicionales (Jara Valdebenito, 2025).

Asimismo, se justifica porque la investigación pretende generar información útil, medible y directamente aprovechable por la gestión vial urbana, tales como ortomosaicos, imágenes georreferenciadas, identificación de tipos de fallas, niveles de severidad y localización espacial del deterioro. Estos productos sirven como insumo técnico para priorizar intervenciones de mantenimiento, optimizar recursos municipales y fortalecer procesos de evaluación superficial del pavimento. Desde esta perspectiva, la aplicación de aerofotogrametría con dron constituye una alternativa funcional para la inspección vial, pues permite registrar, clasificar y cuantificar fallas con apoyo cartográfico y geoespacial, aportando valor práctico a la administración de la infraestructura urbana (Robles Reyes, 2023).

De igual modo, la fotogrametría con drones ofrece ventajas operativas, económicas y de precisión frente a procedimientos convencionales de inspección, especialmente en contextos urbanos donde se requiere rapidez, seguridad y alta resolución para el diagnóstico. La posibilidad de obtener ortofotografías precisas, modelos tridimensionales y datos georreferenciados, permite trasladar el conocimiento técnico a soluciones concretas para el monitoreo y conservación de infraestructuras. Estudios recientes han confirmado que esta tecnología alcanza precisiones del orden de ± 2 mm en aplicaciones de control de deformaciones, lo que respalda su empleo como herramienta aplicada en ingeniería civil y transporte para el seguimiento objetivo del estado superficial de las vías (Sancho Gómez-Zurdo et al., 2021).

3.2. DISEÑO DEL PROYECTO

3.2.1. Etapas del proyecto

A continuación, se presenta el procedimiento secuencial seguido para el diseño del proyecto, el cual se estructuró en 4 etapas.

Etapa 1: Planificación

Definió el alcance, los requisitos técnicos y normativos, y el diseño operativo que garanticen la calidad y trazabilidad del levantamiento fotogramétrico y de la validación en campo. En esta etapa se realizaron las siguientes actividades: Revisión bibliográfica y normativa: recopilación de información sobre fotogrametría con drones, metodologías de evaluación de pavimentos (PCI) y normas MTC; Definición de área de estudio: delimitación precisa del tramo de la Av. Circunvalación Norte a intervenir; trámite de permiso para realizar el vuelo fotogramétrico; establecimiento del Plan de vuelo: se propuso los parámetros de vuelo (altura, traslape longitudinal y transversal del 80%, velocidad) para la captura óptima de imágenes; Adquisición de equipos y software: se realizaron pruebas de operatividad del Drone DJI Mavic 3 Enterprise.

Etapa 2: Campo y recopilación de datos

Permitió obtener datos geospaciales precisos y auditables mediante la ejecución de vuelos UAV controlados, complementados con una inspección terrestre de referencia que sirva como información precisa y verificable para la validación. Esta etapa consistió en las siguientes actividades: Vuelo fotogramétrico: Ejecución de vuelos con dron según el plan, capturando imágenes de alta resolución y la toma de datos georreferenciados en condiciones de iluminación óptimas, asegurando la cobertura total de la superficie del pavimento y minimizando las obstrucciones generadas por el tráfico vehicular y por la presencia de precipitaciones pluviales que retrasaron la captura de imágenes aéreas de alta calidad; Inspección visual terrestre para identificar la patología de fallas, la medición de fallas: Registro tradicional de fallas para validación de datos del dron.

Etapa 3: Procesamiento y análisis

Permitió generar productos fotogramétricos de alta resolución y aplicar métodos de detección/clasificación de fallas para cuantificar métricas y estimar el estado del pavimento, evaluando precisión y comparando enfoques. En esta etapa se realizaron las siguientes actividades:

Procesamiento de imágenes: Generación de Ortomosaico de alta resolución y nube de puntos 3D utilizando software especializado software de procesamiento (Agisoft Metashape, Pix4D); En este punto se ejecutaron la corrección geométrica y radiométrica de las imágenes, obteniendo un mapa escalado y métricamente preciso que sirvió de base para la identificación visual de las patologías.

Modelamiento con visión computacional: Fue el núcleo tecnológico del proyecto. Se procedió al entrenamiento e implementación del modelo de aprendizaje profundo (YOLOv8) en entorno Python. El algoritmo analizó los ortomosaicos para detectar, segmentar y clasificar automáticamente las fallas (piel de cocodrilo, ahuellamiento, fisuras) según su severidad, eliminando la subjetividad del método manual.

Comparación de métodos: Se cotejaron los resultados de la detección con dron complementado con la visión computacional con el método tradicional (PCI).

Etapa 4: Resultados y documentación

Integró y comunicó los hallazgos en mapas e informes técnicos, priorizando intervenciones de mantenimiento y estableciendo recomendaciones operativas para la gestión vial urbana, con evidencias y anexos que aseguren reproducibilidad y adopción. Esta consistió en las siguientes actividades: Interpretación de resultados: Análisis de la eficiencia y precisión del método con drones; Elaboración del informe final: Redacción del informe completo de la investigación; Presentación y difusión: Exposición de hallazgos a la comunidad académica y autoridades de Puno

3.2.2. Herramientas y/o software utilizado

En la investigación se utilizaron las siguientes herramientas y paquetes informáticos:

1. Fotogrametría aérea con UAS (dron):

El levantamiento fotogramétrico fue realizado con el dron para topografía DJI Mavic 3 Enterprise, cuyas principales características técnicas son: Cámara ancha 4/3 CMOS; Zoom híbrido 56x; Cámara térmica de 640×512 px; Tiempo máximo de vuelo de 45 minutos; Posicionamiento a nivel centimétrico con RTK (± 0.1 m); Altitud máxima de operación: 6000 m.s.n.m.; Velocidad máxima: 15 m/s en modo normal (Drone Center Solution, 2021). Ver figura 1.

Figura 1 Drone profesional DJI Mavic 3 Enterprise



Nota. Imagen obtenida de DJI Mavic 3 Enterprise (3E) RTK por Drone Center Solution, 2021.

Estas características permitieron realizar levantamientos en zonas urbanas de gran altitud como sucede con la ciudad de Puno (aprox. 3,800 msnm), manteniendo estabilidad y calidad en la captura de imágenes. La figura 17 muestra al dron profesional DJI Mavic 3 Enterprise.

2. Inspección visual de pavimentos:

- Fichas de inspección de fallas (formato PCI/ASTM D6433 o equivalente MTC).
- Cinta métrica/odómetro de rueda, tiza o aerosol para delimitar áreas.

- Regla/galgas para medir anchos de grietas y profundidad de baches.
- Cámara fotográfica y/o aplicación móvil para registro georreferenciado.

3. Herramientas informáticas

- Software de procesamiento de imágenes UAV seleccionados fueron el software de fotogrametría Agisoft Metashape.
- Plataforma Roboflow
- Modelo de visión por computadora YOLOv8.
- Lenguaje de programación de alto nivel y propósito general Python
- Base de datos tabulares (Excel/CSV) con diccionario de datos. Plantillas de cálculo PCI.
- Software de mapeo Google Earth Pro para la visualización de imágenes satelitales, terrenos 3D y mapas detallados, incluyendo herramientas para medir distancias/áreas, importar datos SIG (GIS)

3.3. EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD

3.3.1. Evaluación técnica

La investigación aplicó fotogrametría con drones para detectar y clasificar fallas en pavimentos flexibles de la Av. Circunvalación Norte (Puno), combinando productos de alta resolución (ortomosaico, nube de puntos, DSM/DTM) con métodos de análisis basados en reglas y/o aprendizaje profundo, validados mediante inspección terrestre tipo PCI (ASTM D6433) y empleando la normativa MTC.

En la etapa de planificación, la revisión bibliográfica y normativa aseguraron el alineamiento metodológico y definieron criterios de calidad, mientras que la delimitación del área y el plan de vuelo optimizaron la cobertura y seguridad operacional en altitud (~3,800 msnm).

En la etapa de campo, el marcado de los GCPs y los vuelos fotogramétricos controlados garantizaron precisión planimétrica y altimétrica; la inspección visual proveyó información precisa y verificable (ground truth).

En la etapa de procesamiento, se ejecutó una triangulación aérea para la generación de ortomosaicos; se detectaron fallas (grietas, baches, piel de cocodrilo, exudación, ahuellamiento) y se estimó el PCI por segmento; la comparación de métodos evaluó desempeño (precisión) y robustez.

En la etapa de resultados, la interpretación tradujo hallazgos en mapas temáticos y la documentación consolida trazabilidad, limitaciones y recomendaciones.

3.3.2. Factibilidad

1. Factibilidad técnica

La solución fue técnicamente factible con un UAV multirrotor con cámara calibrada y soporte RTK/PPK, empleando receptores GNSS para GCPs, así como de software estándar disponible en el mercado (Agisoft Metashape, Python).

En planificación, la adquisición de equipos y software cubrieron requisitos de GSD (0.5–1.5 cm/px) y solapes ($\geq 80/70\%$), y el plan de vuelo contempló las mitigaciones por altura (baterías extra, hélices adecuadas).

Para las pruebas de campo, con el equipo RTK y una adecuada distribución de GCPs se lograron RMSE compatibles con evaluación de fallas superficiales; el tráfico urbano se gestionó con horarios de baja demanda y coordinación municipal.

En el procesamiento y análisis, los flujos de trabajo estuvieron probados en estudios similares y contaron con bibliotecas maduras para segmentación de grietas; con la comparación de los métodos de aerofotogrametría con dron y de PCI, se redujeron riesgos de sesgo.

La entrega de resultados fue el resultado de integrar mapas y reportes técnicos que sean de utilidad en la gestión vil urbana de la Municipalidad Provincial de Puno a través de recomendaciones operativas.

2. Factibilidad institucional y operativa

Institucionalmente, el proyecto fue compatible con competencias municipales/universitarias en conservación vial y con el marco de investigación aplicada.

Para la planificación, la revisión normativa y la definición de área se coordinó con el área de tránsito/seguridad ciudadana, de modo que el plan de vuelo se ajustó a los permisos de la DGAC y las ordenanzas municipales.

Operativamente, el marcado de los puntos GCPs, la ejecución de los vuelos y la inspección terrestre en la zona de estudio, pudieron ejecutarse con un equipo pequeño (2–4 personas) que desempeñaron roles definidos; la logística en Puno fue manejable con ventanas de clima y rutas de acceso. En el procesamiento y tratamiento de los ortomosaicos, se contó con la capacidad operativa computacional necesaria.

La institución municipal puede integrar los resultados obtenidos en esta investigación, al catastro vial y a planes de mantenimiento, fortaleciendo capacidades técnicas y continuidad para futuras campañas.

3. Factibilidad económica

Económicamente, la fotogrametría UAV produjo una reducción de costos y de tiempo respecto a inspecciones terrestres convencionales para redes urbanas lineales.

En la planificación, los costos se concentraron en la preparación (permisos, diseño de la misión), arrendamiento de equipo dron y equipos de georreferenciación, empleo de software y contratación de personal técnico en el manejo del dron. Es así, que el costo marginal por kilómetro se redujo con una buena programación.

En el procesamiento y análisis de imágenes fotogramétricas empleando drones, se aprovechó la existencia de software y herramientas de código abierto (Agisoft Metashape, Python, YOLOv8, Google Earth Pro) para reducir los costos

operativos, empleando los recursos económicos en el personal técnicamente calificado.

En los resultados, el valor económico se materializó al priorizar intervenciones de mantenimiento vial oportunas, que cuenten con documentación que facilite la elaboración de un expediente técnica.

3.3.3. Simulación de impacto ambiental

El impacto ambiental negativo que produjo esta investigación fue mínima, debido a que se caracteriza por ser una herramienta de "bajo impacto" o "no invasiva". Los vuelos del dron a baja altura y corta duración generaron un ruido puntual con un mínimo consumo energético; no hubo emisiones locales directas y no se generaron residuos significativos, más allá del uso de baterías manejadas bajo protocolos de reciclaje.

En la planificación, se incorporaron buenas prácticas para la operación segura de UAV. Se respetó la normatividad vigente (ordenanzas municipales) sin producir interrupciones de tráfico vehicular, coordinando con seguridad ciudadana sobre horarios de vuelo; en campo, se evitó sobrevolar sobre viviendas multifamiliares, minimizando los riesgos de colisión por la caída del dron.

Debido a la programación del desarrollo de la investigación, el plan de vuelo tuvo que programarse en temporada de lluvia, lo que ocasionó realizar más pruebas de vuelo del dron para la obtención de mejores imágenes fotogramétricas.

En los resultados y la difusión, los mapas obtenidos sobre la evaluación del asfalto flexible con los hallazgos presentados en un informe técnico junto a los mapas, facilitaron la aceptación social, con potencial de involucrar a la comunidad en la validación visual.

3.4. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

3.4.1. Cronograma de actividades

La Tabla 1 muestra el Cronograma de Actividades según el diagrama de Gantt de todas las etapas del proyecto.

Tabla 1 Cronograma de actividades

Cronograma de actividades

CRONOGRAMA TIPO GANTT													
DESCRIPCION DE ACTIVIDADES	DURACION	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
<u>FASE I: Planificación</u>													
Revisión bibliográfica y normativa	3 semanas	■	■	■									
Tramite de permisos ante las autoridades	1 semana		■										
Definición de área de estudio	2 semanas			■	■								
Adquisición de equipos y software	4 semanas	■	■	■	■								
<u>FASE II: Campo y Recopilación</u>													
Plan de vuelo y permisos	1 semana					■							
Vuelo fotogramétrico	2 semanas					■	■						
Inspección visual terrestre	3 semanas						■	■	■				
<u>FASE III: Procesamiento y Análisis</u>													
Procesamiento de imágenes	2 semanas							■	■				
Detección y clasificación de fallas	2 semanas								■	■			
Comparación de métodos	2 semanas									■	■		
<u>FASE IV: Resultados y</u>													
Interpretación de resultados	2 semanas									■	■		
Elaboración del informe final	3 semanas									■	■	■	
Presentación y difusión	1 semana												■

Nota: El sombreado indica las semanas que comprende la actividad.

3.4.2. Asignación de recursos y costos estimados

La asignación de recursos consideró tanto los recursos humanos, materiales y tecnológicos, como los costos para la planificación, así como de los costos operativos requeridos para el desarrollo del proyecto.

Los montos son referenciales y expresados en soles (S/), los cuales fueron considerados en el contexto académico y los recursos disponibles en la institución, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2*Presupuesto de ejecución del proyecto*

Categoría	Unid	Cant	Costo unitario	Costo parcial	Costo total
Recursos humanos	Gbl	1.00	3000.00	3000.00	
Tesista	Gbl	1.00	2500.00	2500.00	5500.00
Asistente Analista de datos.					
Trabajo de campo					
Levantamiento de datos (Inspección visual, Vuelo fotogramétrico, Cisterna para riego, movilidad).	Gbl	1.00	2800.00	2800.00	2800.00
Equipos y materiales					
Alquiler de equipos varios (Drones).	Gbl	1.00	2200.00	2200.00	2200.00
Software especializado					
Licencias académicas o uso libre de Agisoft Metashape o Python.	Gbl	1.00	1500.00	1500.00	1500.00
Procesamiento y simulación					
Computador personal (almacenamiento, otros usos)	Gbl	1.00	2800.00	2800.00	2800.00
Gastos administrativos					
Gastos varios, materiales de oficina	Gbl	1.00	500.00	500.00	500.00
Difusión y presentación final					
Borrador de tesis. Costo de sustentación Informe final	Gbl.	1.00	500.00	500.00	500.00
TOTAL ESTIMADO				15800.00	

Nota. El financiamiento será de fondos personales del tesista.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO

4.1.1. Desarrollo del objetivo 1

El desarrollo del proyecto en el objetivo 1, se estructuró en tres fases secuenciales e integradas, que permitieron garantizar la obtención de información confiable y su posterior procesamiento técnico:

1. Levantamiento de información en campo

a. Inspección visual terrestre

Segmentación de la vía: Se segmentó 1.77 km de la avenida Circunvalación Norte, cuya muestra por ser de tipo no probabilístico por conveniencia, fue conformada por tres (3) tramos de 200 metros lineales cada uno. Esta elección se justifica bajo criterios de relevancia técnica, seleccionando sectores que presentan la mayor incidencia y variedad de severidad y patologías superficiales.

Identificación de patologías: Se recorrió a pie cada unidad de muestreo, identificando las fallas presentes (Piel de cocodrilo, ahuellamiento, grietas longitudinales/transversales, etc.). Este trabajo lo realizó la brigada de trabajo conformado para esta investigación, tal como se puede observar en la figura 3.

Clasificación de severidad: Para cada falla detectada, se asignó un nivel de severidad (Baja, Media o Alta) basándose en los catálogos de daños del manual PCI. Ver figura 2.

Este procedimiento permitió obtener el valor real (ground truth) del estado del pavimento.

Figura 2

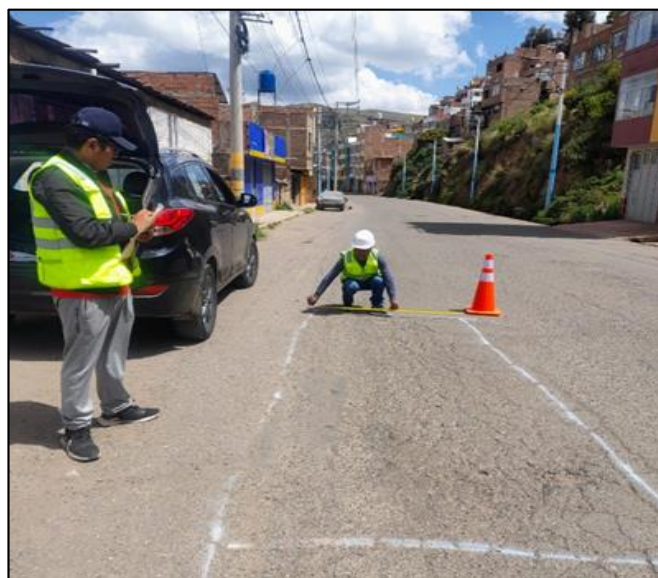
Identificación y clasificación de severidad de fallas



Medición de fallas: Las fallas lineales (grietas longitudinales y transversales) se ha medido en metros lineales (m). Las fallas de área (piel de cocodrilo, ahuellamiento) se ha medido el largo por el ancho máximo de la zona deteriorada teniendo como resultado en metros cuadrados (m^2), tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Medición de fallas



b. Ejecución de vuelo fotogramétrico controlado

Plan de vuelo: El vuelo se planificó considerando la presencia de: líneas de alta tensión, postes de alumbrado público, edificaciones de altura variable, tránsito vehicular intenso. Se definieron los siguientes parámetros: Altura de vuelo: 25 m, Traslape longitudinal: 80 %, Traslape lateral: 70 %.

Estos valores garantizaron una adecuada reconstrucción tridimensional y una resolución espacial suficiente para levantamientos urbanos de detalle. Ver figura 4.

Figura 4

Planificación de la ruta de vuelo y el traslape de fotos



La trayectoria se diseñó siguiendo un patrón lineal tipo lawnmower, con zonas de despegue y aterrizaje despejadas, manteniendo la línea de vista directa con el dron durante toda la operación.

Vuelo fotogramétrico: Se ejecutó el levantamiento con dron DJI Mavic 3 Enterprise, bajo parámetros técnicos controlados: Altura de vuelo: 25 m, Traslape longitudinal: 80 %, Traslape lateral: 70 %.

Las principales características técnicas del dron son:

- Sensor de posicionamiento GNSS: GPS, Galileo, BeiDou y GLONASS

- Tiempo máximo de vuelo: hasta 45 minutos
- Altitud máxima de operación: 6000 m s.n.m.
- Precisión de posicionamiento con RTK: ± 0.1 m
- Velocidad máxima: 15 m/s en modo normal

Estas características permitieron realizar levantamientos en zonas urbanas de gran altitud como la ciudad de Puno (aprox. 3,800 m.s.n.m.), manteniendo estabilidad y calidad en la captura de imágenes.

Captura de Imágenes: La fase de adquisición de datos se ejecutó cumpliendo protocolos de seguridad aeronáutica y operación de VANT, considerando que el área corresponde a una zona urbana de alto tránsito. Se realizó el monitoreo en tiempo real de la telemetría, la verificación de trayectoria y altitud, del mantenimiento de línea de vista directa,

El levantamiento se realizó en un tramo aproximado de 200 m, efectuando revisiones preliminares de las imágenes para verificar: nitidez, exposición, cobertura, ausencia de desenfoque por movimiento. Esto permitió detectar oportunamente posibles fallas y garantizar su continuidad, ver figura 5.

Figura 5

Monitoreo en tiempo real de telemetría



4.1.2. Desarrollo del objetivo 2

El desarrollo del proyecto en el objetivo 2, permitió generar productos fotogramétricos de alta resolución, Estos productos constituyen la base para el análisis computacional. Para la detección/clasificación de fallas para cuantificar métricas y estimar el estado del pavimento, evaluando precisión y comparando enfoques. Esta etapa se realizará en las siguientes actividades:

1. Fase de adquisición y procesamiento fotogramétrico

a. Procesamiento de imágenes

Generación de ortomosaicos de alta resolución, Modelo digital de elevación (DEM) y nube de puntos 3D utilizando software especializado.

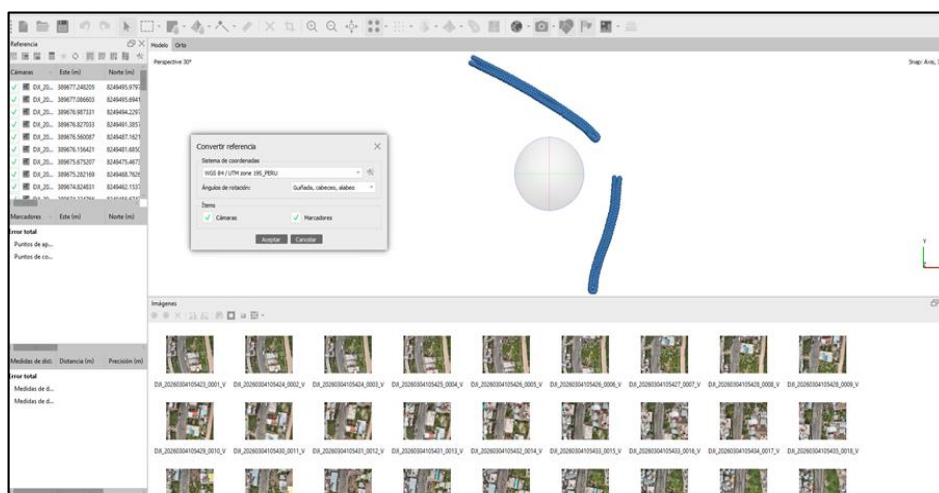
El procesamiento fotogramétrico se realizó en Agisoft Metashape, siguiendo el flujo estándar de trabajo para reconstrucción 3D y generación de ortomosaicos.

b. Importación de Imágenes

Las imágenes capturadas fueron importadas en formato JPEG con metadatos EXIF y georreferenciación GNSS, generando un proyecto único de procesamiento, ver figura 6.

Figura 6

Importación de puntos y Georreferenciación



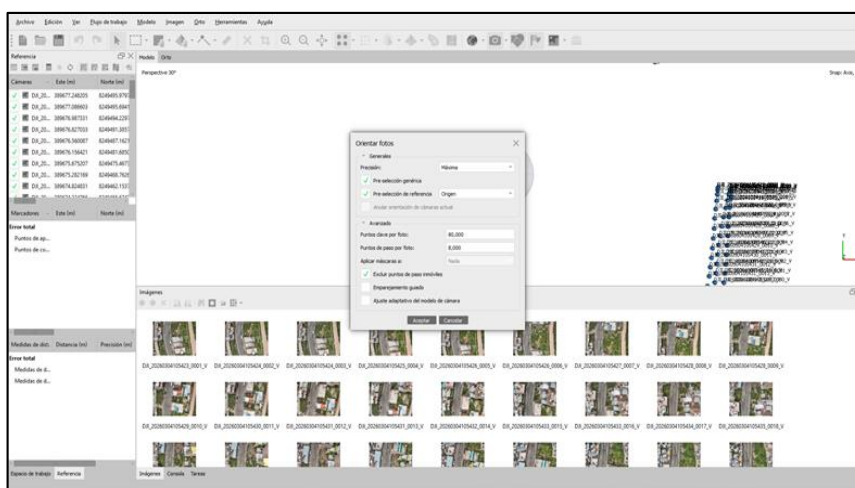
c. Alineamiento de Fotografías (Align Photos)

Se ejecutó el proceso de alineamiento de imágenes con los siguientes parámetros, tal como se observa en la figura 7:

- Accuracy: maxima
- Key Point Limit: 80,000
- Tie Point Limit: 8,000

Figura 7

Orientación de fotos en una calidad máxima



Este proceso permitió:

- calcular la orientación interior y exterior de la cámara
- generar la nube de puntos dispersa
- estimar la posición de cada fotografía en el espacio tridimensional

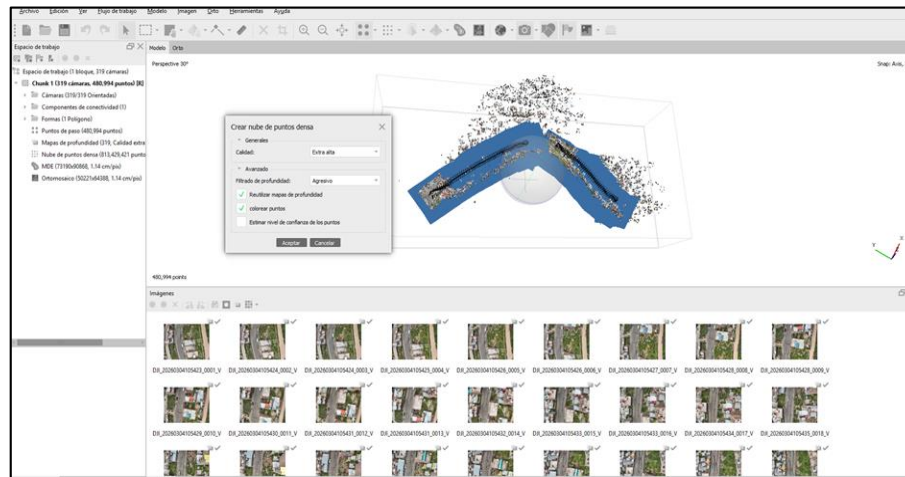
d. Generación de Nube de Puntos Densa

Posteriormente se generó la nube de puntos densa con calidad Extra alta, obteniendo millones de puntos que representan con mayor detalle la geometría del terreno, edificaciones y mobiliario urbano.

La nube densa constituye la base para la generación de modelos digitales y orto fotografías de alta precisión, tal como se observa en la figura 8.

Figura 8

Generación de nube de puntos en calidad extra alta



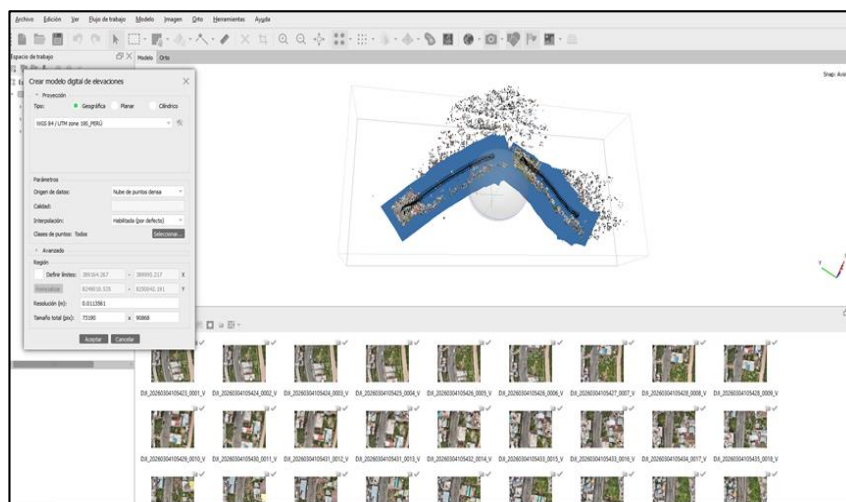
e. Generación del Modelo Digital de Elevación (DEM)

A partir de la nube densa se construyó el Modelo Digital de Elevación, el cual representa la superficie del terreno y estructuras existentes en el área de estudio, como se ven la figura 9.

Este modelo es fundamental para la correcta orto rectificación de las imágenes y eliminación de distorsiones geométricas.

Figura 9

Generación de DEM



f. Generación del ortomosaico

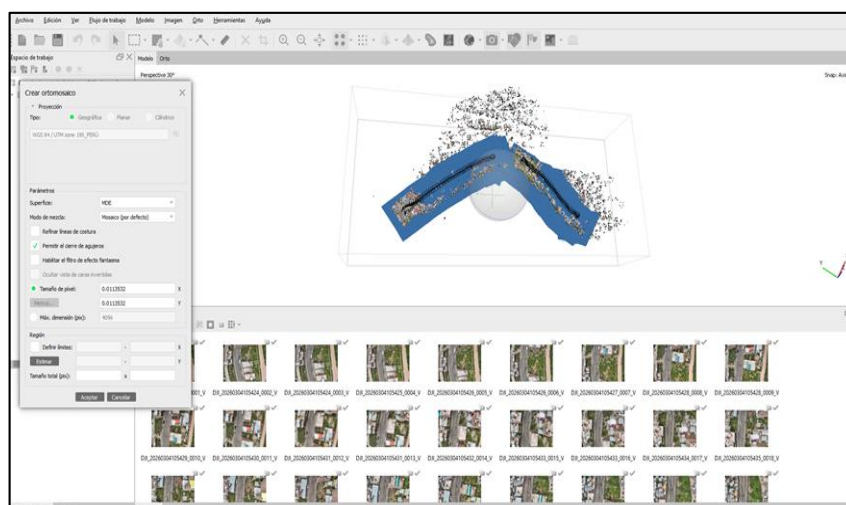
El ortomosaico se generó utilizando el DEM como superficie de proyección, con los siguientes parámetros:

- Blending mode: Mosaic
- Seamline optimization: activado
- Hole filling: activado

Como se observa en la figura 10, el producto resultante es una imagen georreferenciada continua, sin distorsiones por relieve ni inclinación de cámara, apta para mediciones métricas y elaboración de planos.

Figura 10

Generación de Ortomosaico



g. Control de Calidad

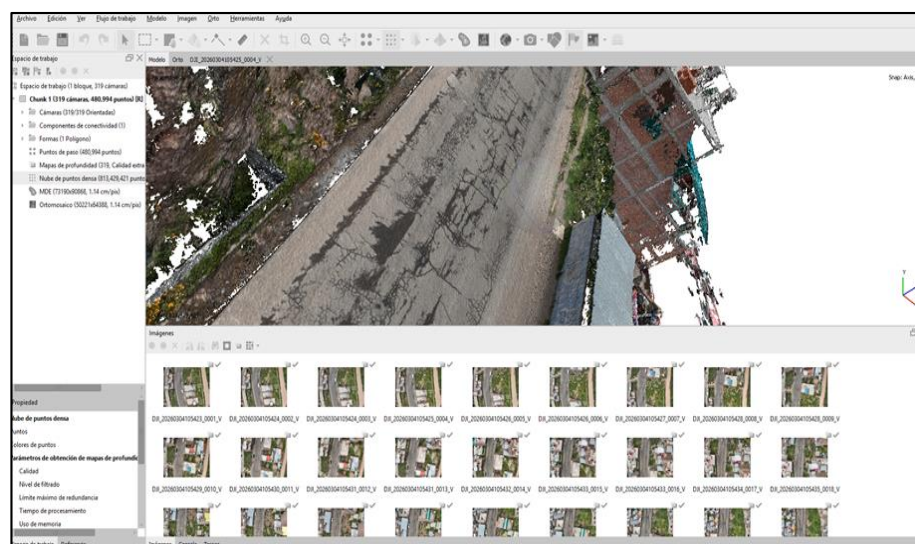
Durante el procesamiento se realizaron controles de calidad en cada etapa:

- verificación de cámaras mal alineadas
- eliminación de puntos espurios en la nube densa
- revisión de discontinuidades en el ortomosaico
- comprobación de cobertura total del área

No se detectaron vacíos significativos ni errores geométricos que comprometan la precisión del producto final.

Figura 11

Verificación de la calidad del vuelo



2. Fase de Modelamiento con visión computacional

Se realizó el análisis de las imágenes para identificar, medir y clasificar los tipos de fallas.

a. Segmentación Espacial y Preparación de Unidades de Muestreo

Para alinear el análisis computacional con los estándares de ingeniería de pavimentos, el levantamiento fotogramétrico original fue discretizado en áreas de estudio manejables para el algoritmo y estandarizadas para el cálculo de índices de condición.

- Definición de Tramos y Submuestras:** Se seleccionaron 3 muestras principales representativas, cada una con una longitud lineal de 200 metros. Para garantizar una resolución analítica óptima y cumplir con las normativas de evaluación vial, cada muestra de 200 metros fue subdividida algorítmicamente en 10 submuestras exactas de 20 metros de largo por 10 metros de ancho (20x10m).

- **Preservación de la Resolución Nativa:** Los recortes espaciales fueron exportados y almacenados en formatos sin compresión destructiva (PNG/TIFF) para garantizar que el Ground Sample Distance (GSD) obtenido en el vuelo fotogramétrico se mantuviera inalterado durante las fases de medición computacional.

b. Construcción del Conjunto de Datos (Dataset) en Roboflow

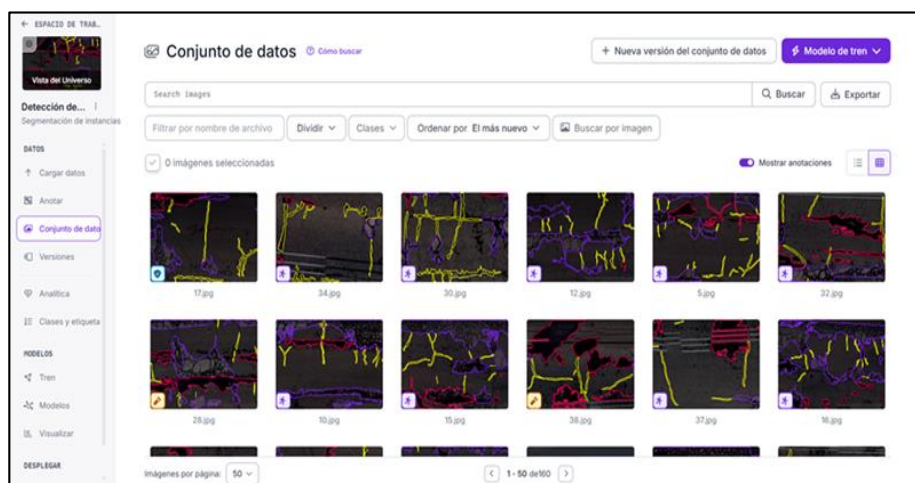
El entrenamiento supervisado de una IA requiere un conjunto de datos rigurosamente anotado que sirva como “Ground Truth” (valor real).

- **Ingesta y Curación de Datos:** Los recortes ortofotográficos exportados en formato PNG de diferentes cortes y tamaños del pavimento se importaron a la plataforma Roboflow con un total de 160 imágenes.
- **Etiquetado por Segmentación de Instancias:** Para el etiquetado se utilizó la opción en Roboflow “Instance Segmentation” por su detección múltiple y su forma real. Se trazaron vértices exactos siguiendo los bordes topológicos de cada patología (Fisuras, Piel de Cocodrilo y Ahuellamiento).

Esta ejecución es el requisito matemático indispensable para calcular áreas netas reales en etapas posteriores, tal como se observa en la figura 12.

Figura 12

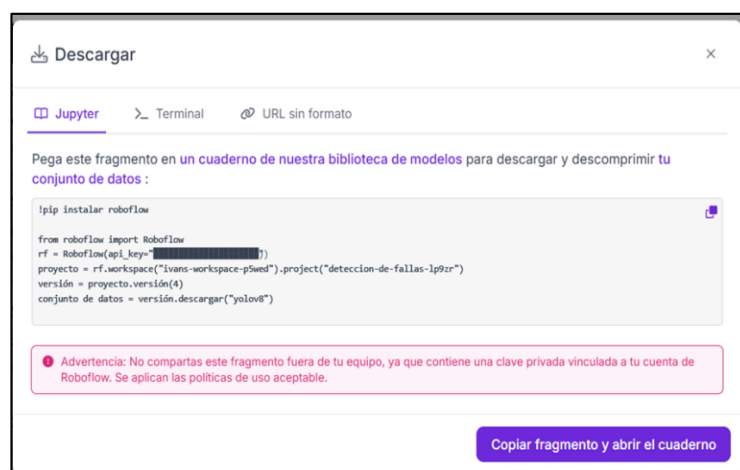
Entorno de conjunto de datos en la plataforma de Roboflow



- **Creación de la versión y Exportación:** Dentro de la creación de la versión para exportación, se realizó las siguientes configuraciones, se dividió las 128 imágenes etiquetadas para entrenar, 16 para validación y 16 par conjunto de prueba, es decir del total de datos se utilizó el 80 % para entrenar, 10 validar y 10 para prueba. También se cambió el tamaño de las fotos a 640x640 para compatibilidad con Yolov8. Adecuadamente se aplicó técnicas de aumento de datos (Data Augmentation) como rotación, brillo y saturación, para robustecer la capacidad de generalización del modelo. Ver figura 13.

Figura 13

Exportación de la versión del modelo en formato Yolov8



```
!pip instalar roboflow

from roboflow import RoboFlow
rf = RoboFlow(api_key="[REDACTED]")
proyecto = rf.workspace("lvans-workspace-p5wed").project("deteccion-de-fallas-lp9zr")
versión = proyecto.versión(4)
conjunto de datos = versión.descargar("yolov8")
```

Advertencia: No compartas este fragmento fuera de tu equipo, ya que contiene una clave privada vinculada a tu cuenta de RoboFlow. Se aplican las políticas de uso aceptable.

Copiar fragmento y abrir el cuaderno

Finalmente, el conjunto de datos anotado fue exportado bajo la estructura de directorios y archivos de configuración (YAML) estandarizados para el formato YOLOv8.

c. Entrenamiento del Modelo de Inteligencia Artificial en Entorno Python

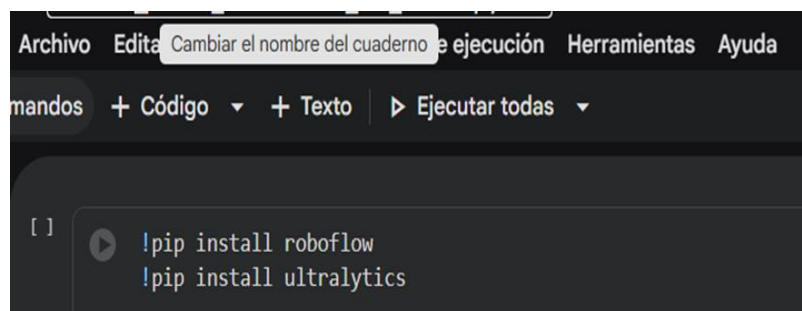
La fase de modelado consistió en programar el entrenamiento de la red neuronal convolucional utilizando un entorno de desarrollo basado en lenguaje Python en la plataforma de Google Colab.

- **Entorno Computacional y Arquitectura:** Dentro del entorno de la plataforma de Google Colab, se necesitó cambiar el entorno de

ejecución a GPU T4, y su activación (este entorno es una versión gratuita que brinda Google Colab, para trabajos robusto). Activado el entorno, se instaló las herramientas necesarias de Roboflow para la descarga de nuestros datos de la versión creada y poder conectar al Colab, y Ultralytics que es la librería oficial de YOLO. Ver figura 14.

Figura 14

Instalación de las herramientas Roboflow y Ultralytics, en Google Colab



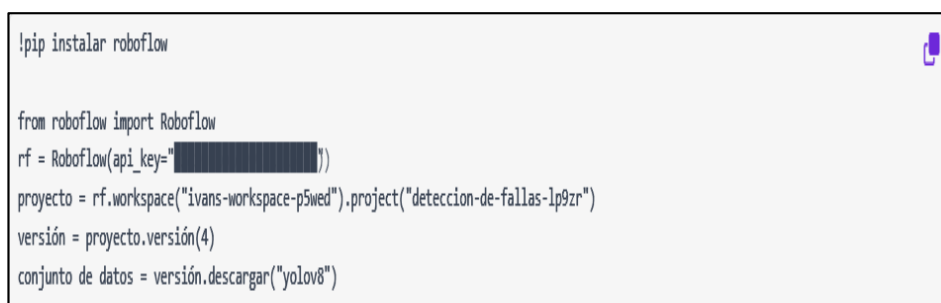
The screenshot shows the Google Colab interface with a dark theme. The top menu bar includes 'Archivo', 'Editar', 'Cambiar el nombre del cuaderno', 'Ejecución', 'Herramientas', and 'Ayuda'. Below the menu, there are options for '+ Comandos', '+ Código', '+ Texto', and '▶ Ejecutar todas'. A code cell is visible with the following text:

```
[ ] ▶ !pip install roboflow
!pip install ultralytics
```

- **Vinculación y descarga del conjunto de datos:** Tendiendo las herramientas instaladas se adquirió la información visual, mediante su interfaz de programación de aplicaciones (API), como se aprecia en la figura 15. Este proceso permitió la importación automatizada de la versión del dataset realizada en Roboflow. Esta integración asegura que el modelo de visión por computadora trabaje con datos normalizados y pre procesados, garantizando la integridad de las imágenes de fallas de pavimentos y sus respectivas anotaciones de fallas para las fases posteriores de aprendizaje profundo.

Figura 15

Interfaz de programación de aplicaciones (API) creada en Roboflow



The screenshot shows a code cell with the following Python code:

```
!pip instalar roboflow

from roboflow import Roboflow
rf = Roboflow(api_key="██████████████████████")
proyecto = rf.workspace("ivans-workspace-p5wed").project("deteccion-de-fallas-lp9zr")
versión = proyecto.versión(4)
conjunto de datos = versión.descargar("yolov8")
```

- **Entrenamiento del modelo de detección:** El entrenamiento se llevó a cabo utilizando la arquitectura YOLOv8 en su variante de tamaño medio (yolov8m-seg.pt), seleccionada por ofrecer un equilibrio superior entre precisión técnica y eficiencia computacional. La configuración se optimizó para el rigor académico de la tesis, estableciendo un límite de 150 épocas con un mecanismo de parada temprana (*early stopping*) de 40 iteraciones para prevenir el sobreajuste. El código de configuración de entrenamiento se observa en la figura 16.

Figura 16

Código del entrenamiento del modelo

```
from ultralytics import YOLO

# 1. Carga del modelo MEDIUM
modelo = YOLO('yolov8m-seg.pt')

# 2. Configuración del entrenamiento
resultados = modelo.train(
    data=f'{dataset.location}/data.yaml',
    epochs=150,           # Límite máximo de vueltas
    patience=40,         # Paciencia para el Early Stopping
    imgsz=640,          # Resolución de análisis
    batch=8,            # Paquetes de 8 para cuidar la memoria RAM
    optimizer='AdamW',  # El mejor optimizador para fisuras delgadas
    lr=0.001,           # Tasa de aprendizaje ajustada
    seed=42,            # Semilla matemática para reproducibilidad de la tesis
    deterministic=True, # Bloquea la aleatoriedad de la GPU
    project='Tesis_V5', # Carpeta limpia para la Versión 5
    name='Entrenamiento_Definitivo_V5'
)
```

Se empleó el optimizador AdamW para mejorar la detección en fisuras de pequeña escala y se fijó una semilla matemática específica junto con parámetros deterministas, asegurando así la reproducibilidad científica de los experimentos y la validez de los resultados obtenidos en la detección de fallas viales.

- **Generación de Pesos Sinápticos:** El algoritmo iteró sobre las imágenes hasta minimizar el error de predicción, logrando que la red neuronal aprendiera a identificar los patrones morfológicos del deterioro. El

resultado de este proceso en Python fue la generación del archivo de pesos entrenados (best.pt), el cual contiene la "memoria" matemática de la IA.

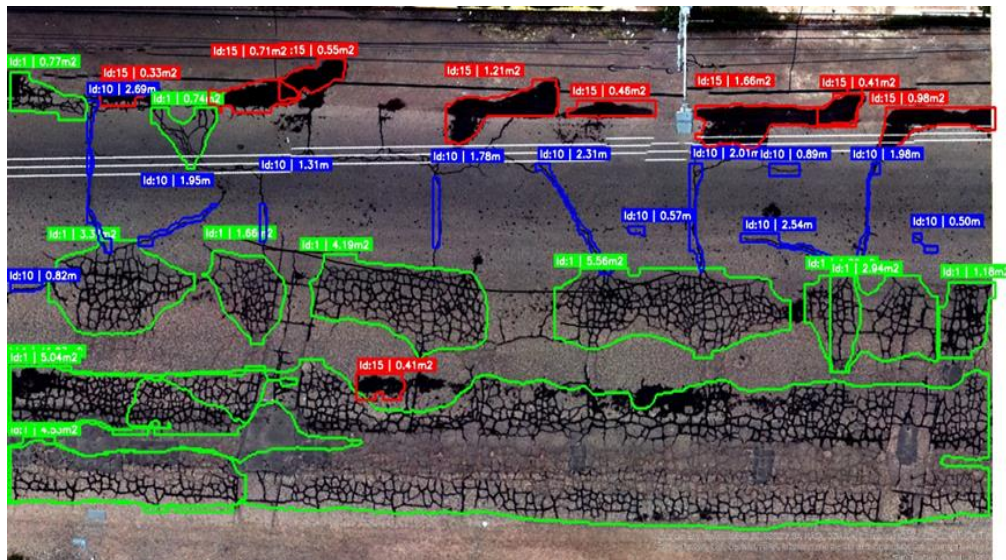
d. Inferencia Predictiva y Cuantificación Métrica Computacional

La etapa final comprendió el desarrollo de un algoritmo de visión por computadora en Python, utilizando la librería OpenCV, para ejecutar el modelo entrenado sobre la totalidad del proyecto y extraer las métricas físicas.

- **Calibración del Espacio (GSD Dinámico):** El algoritmo se estableció a una escala real vinculando el lado más largo de la imagen a una referencia fija de 20 metros para calcular el *Ground Sample Distance* (GSD), permitiendo transformar medidas de píxeles a unidades métricas reales.
- **Procesamiento de Detección con YOLOv8:** Se empleó el modelo previamente entrenado para identificar fallas con un umbral de confianza del 50%, utilizando la segmentación por instancias para extraer máscaras que delimitan con precisión el contorno irregular de cada daño detectado.
- **Clasificación y Medición Neta:** Se categorizó las fallas por códigos 1 (piel de cocodrilo, color verde) 10 (Grietas y fisuras, color azul) y 15 (ahuellamiento, color rojo) y se aplicó cálculos geométricos de área (piel de cocodrilo y ahuellamientos) y longitud (grietas y fisuras), multiplicando los valores por el factor GSD obtenido.
- **Generación de Reporte Visual y Métrico:** Finalmente, el código superpuso las etiquetas con el ID y la dimensión real sobre la imagen original mediante una leyenda de colores (verde, rojo y azul), exportando simultáneamente un cuadro resumen con los totales acumulados del tramo analizado, como se observa en la figura 17.

Figura 17

Código para detección de fallas y medición de áreas y longitudes



Los resultados de las muestras de los tramos 1, 2 y 3 se muestran en el Apéndice 2.

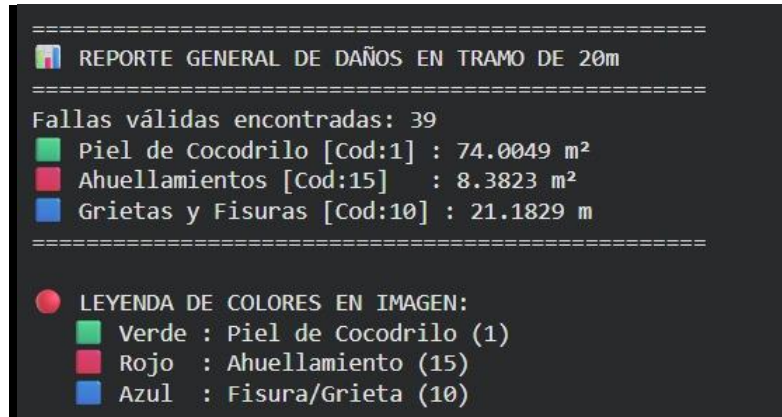
4.1.3. Desarrollo del objetivo 3

Esta etapa final consistió en la interpretación técnica de los datos generados por el modelo de visión computacional, lo que permitió establecer el diagnóstico real de la infraestructura vial. El proceso se ejecutó bajo los siguientes lineamientos descriptivos:

- **Procesamiento de Inferencia y Extracción de Métricas:** Una vez que el modelo YOLOv8m-seg identificó las patologías, se activó un algoritmo de post-procesamiento en Python. Este procedimiento utilizó la librería OpenCV para transformar las máscaras digitales de las fallas en medidas físicas reales, vinculando cada píxel con el GSD de la resolución nativa establecido en la planificación. De esta manera, se obtuvo la extensión exacta de cada deterioro, logrando calcular áreas (m²) para piel de cocodrilo y longitudes (m) para grietas longitudinales y transversales. Ver figura 18.

Figura 18

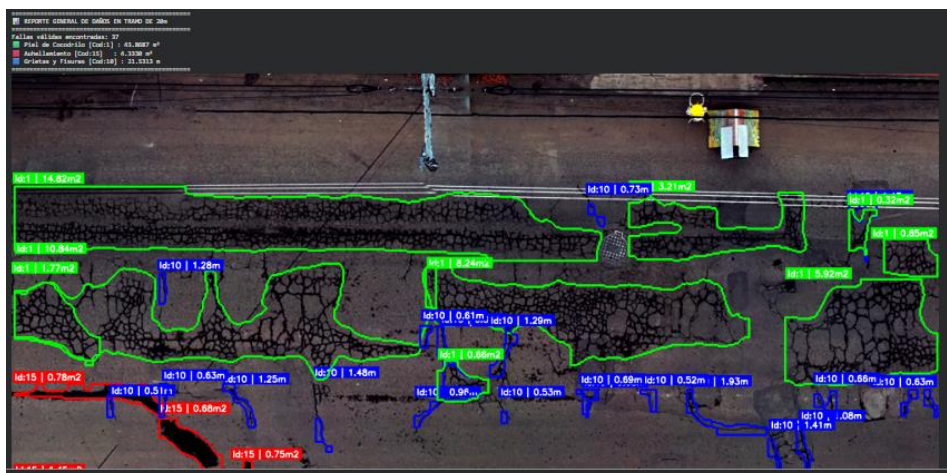
Código para detección de fallas y medición de áreas y longitudes



- Caracterización por Tipología y Severidad:** El sistema categorizó automáticamente cada falla asignando un código y un color distintivo (verde, azul o rojo) según su naturaleza. El análisis no se limitó a la detección, sino que evaluó la severidad de la falla en función de su contraste morfológico y densidad. Esta caracterización permitió organizar la información en un inventario vial digitalizado, donde cada tramo de la Avenida Circunvalación Norte quedó mapeado con su respectivo tipo de daño y nivel de deterioro. Ver figura 19.

Figura 19

Asignación de un código y un color distintivo según su naturaleza



- Determinación del Índice de Condición:** Para la determinación del índice de condición, los datos de extensión y severidad procesados en Python, como los datos de medición directa de campo, fueron exportados e ingresados en el software EVALPAV. Este procesamiento permitió obtener una calificación técnica estandarizada, confirmando mediante reportes analíticos que la Av. Circunvalación Norte presenta un estado de 'Fallado' o 'Colapsado'. Como evidencia de esta caracterización, se adjuntan los reportes de salida del software para cada tramo analizado, los cuales validan el diagnóstico obtenido mediante el sistema automatizado, tal como se muestra en la figura 20 y 21. Según Shahin (2005), esta sistematización constituyó el requisito indispensable para proponer una gestión de mantenimiento costo-efectivo.

Figura 20

Estado de pavimento con el método PCI con medición directa en campo

EvalPav: PCI - MEDICION DIRECTA EN CAMPO

Proyecto: Evaluación Datos Imprimir

Evaluación de Pavimentos de Superficie Asfáltica - Método PCI (ASTM D 6433)

Sector: UM 01 TRAMO 01 CAMPO Carril: calzada

Unidad de muestra: 001 Área de muestra (m²): 200

Progresiva inicial: 00+000 Progresiva final: 00+020

Inspeccionado por: Federico Condori

Fecha: 26/03/2026 Muestra adicional:

m: 1.92 VRC: 100 PCI: 0 Colapsado

Daños

1. Piel de cocodrilo	7. Grieta de borde	13. Huecos
2. Exudación	8. Grieta de reflexión de junta	14. Cruce de vía ferrea
3. Agrietamiento en bloque	9. Desnivel carril/berma	15. Ahuellamiento
4. Abultamientos y hundimientos	10. Grietas longitudinales y transversales	16. Desplazamiento
5. Corrugación	11. Parcheo	17. Grieta parabólica (slippage)
6. Depresión	12. Pulimento de agregados	18. Hinchamiento
		19. Desprendimientos de agregados

TIPO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	TOTAL	DENSIDAD	VR
1	H	1.0	7.5	12.6	16.0	18.6	30.5	33.2	36.1	44.6	64.3	251.9	125.9	90
10	H		1.0									1.0	0.5	5
15	H	4.2	6.9	7.0	8.7	11.0	15.9	16.8	18.8	21.6		135.6	67.8	88

Figura 21

Estado de pavimento con el método PCI con medición indirecta fotogramétrica

TIPO	SEVERIDAD	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	TOTAL	DENSIDAD	VR
1	H	1.0	6.7	12.1	16.7	18.3	26.9	32.8	38.6	43.3		245.6	122.8	90
10	H													0
15	H	3.5	3.7	5.1	5.3	10.3	10.4	18.3	18.4	20.6	34.7	119.8	59.9	87

Interpretación de resultados

A continuación, se presenta el análisis de la eficiencia y precisión del método con drones y su comparación con el método PCI.

1. Análisis de Correlación y Validación de la Precisión entre el Método Convencional y el Sistema Automatizado.

La Tabla 3 permitió comparar numéricamente el área detectada con el método de inspección manual y el método de visión computacional. Para cada tramo y cada tipo de falla, se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_t(\%) = \left| \frac{V_{manual} - V_{IA}}{V_{manual}} \right| \times 100$$

V_{manual} : Valor real Obtenido en la salida de campo

V_{IA} : Valor obtenido por el entrenamiento

Tabla 3

Comparativa de Detección (Inspección Visual vs. Detección Automatizada)

Tipo de Falla	Área Detectada Inspeccion visual Manual (m2)			total	Área Detectada vision computacional (m2)			total	Error Relativo (%)
	muestra 1	muestra 2	muestra 3		muestra 1	muestra 2	muestra 3		
Piel de Cocodrilo	251.85	700.07	268.23	1220.15	245.62	685.02	247.94	1178.58	3.41%
ahuellamiento	231.32	189.93	156.96	578.21	207.3	199.39	145.49	552.18	4.50%
Grieta Longitudinal (m)	135.62	142	120.89	398.51	119.81	135.75	125.24	380.8	4.44%
PROMEDIO									4.12%

2. Interpretación de la Comparativa de Resultados

Tras el procesamiento de los datos en los tres tramos de la Av. Circunvalación Norte, se observó que el error relativo promedio en la detección de áreas de falla es del 4.12%. se deduce que este valor se encuentra por debajo del umbral del 10%, lo cual permitió validar la aplicación de la fotogrametría con drones como una metodología eficaz para el catálogo de pavimentos urbanos en la ciudad de Puno.

Específicamente, en el tipo de deterioro como: Piel de Cocodrilo, ahuellamiento y grietas longitudinales y transversales, la precisión del algoritmo en Python alcanzó un 95.88%, debido a que estas patologías presentan patrones de contraste y textura claramente diferenciables en el ortomosaico de alta resolución.

3. Discusión de las Causas de Error (Análisis Crítico)

A pesar de la alta precisión general, se identificaron variaciones en el error relativo que responden a factores técnicos y ambientales propios del entorno urbano de la ciudad de Puno como:

- **Resolución Espacial (GSD):** El error en fisuras longitudinales finas (severidad baja) fue ligeramente superior (4.4 %). Esto se atribuye a que

el ancho de la grieta en campo era cercano al tamaño del píxel del sensor del dron, dificultando la segmentación precisa en Roboflow.

- **Interferencias Visuales y Sombras:** En sectores con presencia de postes de alumbrado o edificaciones altas en la Av. Circunvalación, las sombras proyectadas alteraron los valores de reflectancia del pavimento, lo que ocasionalmente generó "Falsos Positivos" o una subestimación del área de falla.

Se concluye que el flujo de trabajo propuesto (Dron + Metashape + Python) no solo reduce el tiempo de inspección en un 80-90% en comparación con el método manual PCI inspección visual, sino que mantiene un nivel de precisión geométrica compatible con los estándares de gestión vial. Por lo tanto, la metodología es técnicamente viable para su implementación por las instituciones regionales y locales.

4.1.4. Validación del objetivo 1

Validación de la Calidad de Captura y Representatividad: La validación de la fase levantamiento de información de campo se sustentó en la obtención de un Ground Sample Distance (GSD) centimétrico, el cual permitió pasar los sin pérdida de información entre la inspección visual terrestre y el modelo digital generado. Se validó que la configuración del vuelo controlado garantizó la visibilidad de patologías críticas, cuya existencia y dimensiones fueron verificadas fehacientemente mediante el levantamiento manual en las unidades de muestreo de 200 metros. Esta correlación fue respaldada por Espinoza (2024), quien sostiene que la precisión de un sistema UAS depende directamente de la fidelidad con la que los datos aéreos replican las medidas obtenidas en tierra bajo la metodología PCI.

4.1.5. Validación del objetivo 2

Validación del Procesamiento y Modelado Inteligente: El diseño se validó mediante el desempeño del modelo YOLOv8m-seg, el cual demostró una capacidad de clasificación y segmentación de instancias con una precisión final del 95.88%. La validez del entrenamiento se confirmó al procesar el dataset de 160 imágenes

bajo una arquitectura que minimizó el error de detección en patrones complejos como la falla de piel de cocodrilo, ahuellamiento y grietas longitudinales y transversales. De acuerdo con Cárdenas Resines et al. (2023), la implementación de segmentación por instancias en entornos de GPU garantizó que la cuantificación de áreas y longitudes fuera objetiva, eliminando la variabilidad inherente a la medición humana y validando tecnológicamente el uso de inteligencia artificial en la gestión vial urbana.

4.1.6. Validación del objetivo 3

Validación de la Precisión, Eficiencia y Viabilidad: La validación final del diseño se consolidó mediante el análisis comparativo de los resultados obtenidos en la avenida Circunvalación Norte de la ciudad de Puno:

- **Precisión Geométrica:** Se validó el sistema al obtener un Error Relativo Promedio del 4.12%, cifra que se posicionó significativamente por debajo del límite de tolerancia técnica que es 10%, asegurando que las métricas digitales obtenidas son intercambiables con las manuales para efectos de mantenimiento vial.
- **Eficiencia Operativa:** Se validó la viabilidad del flujo de trabajo al lograr una reducción del tiempo de inspección de entre el 80% y 90% en la Avenida Circunvalación Norte, optimizando los recursos logísticos de la investigación.
- **Sustento de Viabilidad:** Los resultados obtenidos se alinean con lo expuesto por Campos y Nuñez (2021) y Araujo y Huamán (2021), quienes validan que estos niveles de precisión y ahorro operativo confirman que el diseño propuesto es una solución técnicamente viable y escalable para ser implementada por entidades públicas en la ciudad de Puno.

4.1.7. Síntesis del desarrollo y validación

El desarrollo del proyecto permitió implementar un modelo integral basado en tecnologías emergentes, cuya validación demuestra: Alta precisión técnica, Viabilidad operativa, Aplicabilidad en gestión vial urbana

Por tanto, el diseño propuesto es técnicamente válido, replicable y escalable para su implementación en entidades públicas.

4.2. ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON CASOS SIMILARES

4.2.1. Análisis de impacto del proyecto

El impacto del proyecto se evalúa desde tres dimensiones: técnica, operativa y socioeconómica, en función de los resultados obtenidos en la aplicación del sistema basado en fotogrametría y visión computacional.

a. Impacto Técnico.

El desarrollo del sistema permitió la generación de información geoespacial de alta fidelidad mediante ortomosaicos de resolución centimétrica, lo cual constituye un avance significativo respecto a los registros fotográficos convencionales. La implementación del modelo YOLOv8m-seg logró detectar automáticamente las fallas con una precisión del 95.88%, validando tecnológicamente la capacidad de la inteligencia artificial para el diagnóstico de infraestructura. El impacto clave en esta dimensión es la eliminación de la subjetividad inherente al método tradicional PCI, introduciendo un enfoque objetivo, reproducible y escalable que no depende exclusivamente del criterio variable del inspector de campo.

b. Impacto Operativo

El flujo metodológico diseñado optimizó radicalmente la operatividad de la inspección vial. Se logró una reducción del tiempo de ejecución entre un 80% y 90% en comparación con el levantamiento manual, permitiendo recolectar datos en la Avenida Circunvalación Norte sin interrumpir el flujo vehicular ni exponer al personal a riesgos innecesarios por el alto tráfico. Este impacto representa una transformación digital del proceso, migrando de un sistema lento y artesanal hacia una arquitectura ágil y automatizada capaz de procesar grandes volúmenes de información en tiempo real.

c. Impacto en la Gestión Vial

El proyecto aporta una herramienta crítica para la administración de activos viales, facilitando una gestión basada en evidencia (*data-driven*). Al identificar con precisión métrica que el estado del pavimento se encuentra en niveles de "Colapso", se proporciona a las autoridades municipales una base técnica irrefutable para la priorización de intervenciones de rehabilitación profunda. Esto permite abandonar las políticas de mantenimiento reactivo y migrar hacia una planificación estratégica fundamentada en datos reales y precisos.

d. Impacto Económico

Desde una perspectiva financiera, el uso del sistema demostró una alta eficiencia en la relación costo-beneficio. La automatización redujo significativamente los gastos operativos de inspección y la necesidad de cuadrillas extensas de personal especializado en campo. Tomando como referencia la inversión total del proyecto (S/ 15,800), se evidencia que el costo es marginal frente al impacto generado y al ahorro potencial que representa una detección temprana de fallas. Esto confirma que el sistema es técnicamente viable y económicamente rentable para su replicación en instituciones públicas y consultoras de ingeniería.

e. Impacto Social

Finalmente, el impacto social se traduce en una mejora directa de la calidad de vida de los usuarios de la ciudad de Puno. La identificación temprana y precisa de fallas estructurales contribuye directamente a la reducción de riesgos de accidentes viales y mejora la transitabilidad. Un pavimento correctamente evaluado y mantenido reduce los costos de operación vehicular para los ciudadanos y garantiza una infraestructura segura, cumpliendo así con el fin último de la ingeniería civil: el servicio a la sociedad.

4.2.2. Beneficios del sistema propuesto

La implementación del sistema basado en drones e IA genera una serie de ventajas competitivas que se manifiestan tanto de forma inmediata como a largo plazo. Estos beneficios se han categorizado en directos e indirectos, fundamentándose en la eficiencia demostrada durante el estudio.

a. Beneficios Directos

El principal beneficio directo es la alta precisión en la detección y cuantificación de fallas, logrando una fidelidad métrica que asegura diagnósticos confiables. Al integrar algoritmos de visión computacional, se ha logrado la automatización del diagnóstico vial, permitiendo que la identificación de patologías no dependa de jornadas extensas de inspección visual. Asimismo, el sistema facilita la generación de reportes métricos en tiempo real, proporcionando cuadros resumen de áreas y longitudes de manera casi instantánea tras el procesamiento. Finalmente, este enfoque tecnológico reduce drásticamente los errores humanos o la subjetividad, garantizando que el Índice de Condición del Pavimento (PCI) sea algo real las condiciones de la vía.

b. Beneficios Indirectos

El proyecto promueve el fortalecimiento de las capacidades tecnológicas en las entidades públicas, proporcionando una ruta clara para la modernización de las oficinas de infraestructura vial. La naturaleza digital de los datos obtenidos abre una posibilidad de integración directa con sistemas de información geográfica (SIG). Existe, además, una alta escalabilidad del modelo a otras ciudades del Perú, Este trabajo queda establecido como una base sólida para futuras investigaciones que busquen profundizar en la infraestructura vial inteligente.

c. Beneficios frente al Método Tradicional

Para validar estos beneficios, se realizó una contrastación técnica detallada. Los criterios empleados para comparar el sistema propuesto frente al

método convencional se resumen en la Tabla 4, donde se evidencian las ventajas en términos de tiempo, costo, precisión y seguridad operativa. Esta comparativa demuestra que la transición hacia métodos automatizados no solo es una mejora técnica, sino una necesidad estratégica para optimizar la gestión de los pavimentos en la ciudad de Puno.

Tabla 4

Comparación entre el Método PCI tradicional y el sistema propuesto

Criterio	Método PCI tradicional	Sistema propuesto
Precisión	Dependiente del evaluador	Alta (95.88 %)
Tiempo	Alto	Bajo (-80 a 90 %)
Costo	Medio-alto	Bajo-moderado
Reproducibilidad	Baja	Alta
Automatización	No	Sí

4.2.3. Comparación con casos similares

- **Contraste con el Método Tradicional PCI**

Al analizar el método convencional de inspección visual bajo la normativa PCI (Pavement Condition Index), se identificaron brechas críticas que el presente estudio logra cerrar. El método tradicional demanda una inspección manual intensiva, lo cual lo hace intrínsecamente subjetivo y limita significativamente su cobertura espacial en entornos urbanos de alto tráfico. En contraste, el sistema propuesto integra datos georreferenciados de alta resolución, permitiendo una transición hacia el análisis automatizado de la infraestructura. Según lo expuesto por Espinoza (2024), esta evolución mejora la precisión diagnóstica y elimina la variabilidad del criterio humano, garantizando resultados reproducibles y técnicamente consistentes.

- **Comparación con Estudios Basados en Fotogrametría**

Estudios internacionales han demostrado que la fotogrametría aérea permite levantamientos en proyectos viales precisos; sin embargo, gran parte de estas investigaciones se limitan a la obtención de la imagen sin integrar procesos de análisis automático del estado de conservación del pavimento. El principal aporte de esta tesis reside en la convergencia tecnológica de la fotogrametría, la IA y el análisis normativo de evaluación de pavimentos PCI. Investigaciones previas como las de Robles Reyes (2023) destacan la eficacia de los drones, pero es la integración con modelos de segmentación lo que representa un avance metodológico sustancial para la gestión y evaluación de pavimentos.

- **Diferenciación frente a Investigaciones de Visión Computacional**

Las investigaciones que emplean modelos de la familia YOLO v8, suelen destacar por su capacidad de detección, pero frecuentemente enfrentan el desafío de requerir *datasets* masivos para ser efectivo. En este estudio, se optimizó el entrenamiento mediante un conjunto de datos de 160 imágenes, aplicando una técnica de segmentación por instancias que permite delimitar el área exacta de las fallas con una precisión del 95.88%. De acuerdo con Cárdenas Resines et al. (2023), este enfoque garantiza una cuantificación objetiva de áreas y longitudes, demostrando la viabilidad de la técnica en un contexto real urbano peruano como la ciudad de Puno.

- **Comparación Contextual (Nacional vs. Internacional)**

Finalmente, el sistema fue evaluado bajo una perspectiva comparativa global, cuyos detalles se consolidan en la Tabla 5. Este análisis contextual se estructuró bajo cuatro dimensiones críticas: tecnología, costo, aplicabilidad e integración con el estándar PCI. Los resultados evidencian que, a diferencia de soluciones internacionales de alto costo, el modelo desarrollado ofrece una aplicabilidad inmediata para la realidad nacional.

Autores como Campos y Nuñez (2021) y Araujo y Huamán (2021) validan que equilibrar la vanguardia tecnológica con la viabilidad económica es clave para la implementación por parte de entidades nacionales, regionales y locales.

Tabla 5

Comparación contextual (Nacional vs Internacional)

Aspecto	Estudios internacionales	Estudio actual
Tecnología	IA + sensores avanzados	IA + dron accesible
Costo	Alto	Bajo
Aplicabilidad	Países desarrollados	Contexto peruano
Integración PCI	Parcial	Completa

4.2.4. Discusión crítica del impacto

A pesar de los indicadores de éxito y la alta precisión alcanzada, es necesario realizar un análisis reflexivo sobre los factores externos y técnicos que condicionan el impacto del sistema desarrollado. Esta discusión crítica permite establecer los límites de la tecnología.

- **Dependencia de la Calidad Insumo:** Se ha identificado que la precisión del modelo de visión computacional está intrínsecamente ligada a la calidad radiométrica y geométrica del ortomosaico. Un **GSD** inadecuado o una deficiente reconstrucción fotogramétrica pueden derivar en la pérdida de detección de grietas, lo que subraya la importancia de una planificación de vuelo implacable.
- **Influencia del Entorno Urbano:** Las condiciones dinámicas de la Avenida Circunvalación Norte presentan desafíos específicos. Factores como las sombras proyectadas por edificaciones de mayor altura, la presencia de instalaciones de redes de energía eléctricas o el tráfico

vehicular intenso durante la captura pueden generar oclusiones visuales que afectan la continuidad de la segmentación de fallas. Estos elementos introducen un margen de error variable que debe ser mitigado mediante capturas en horarios adecuados.

- **Requerimientos de Capacitación:** La implementación de este flujo de trabajo en instituciones públicas exige una curva de aprendizaje técnica. No se trata únicamente de la operación del RPAS, sino del manejo de entornos de programación en Python y la interpretación de resultados de Inteligencia Artificial, lo que sugiere la necesidad de programas de capacitación para los profesionales del área de ingeniería encargado de la gestión vial.

4.2.5. Síntesis del impacto y comparación

El análisis evidenció que:

- El proyecto genera un impacto significativo en múltiples dimensiones
- Supera las limitaciones del método tradicional
- Se posiciona como una alternativa tecnológica viable para gestión vial

Por tanto, el sistema propuesto no solo es innovador, sino también aplicable y escalable en el contexto nacional.

4.3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS

El desarrollo del proyecto permitió validar con éxito la eficacia del sistema propuesto; sin embargo, durante el proceso de los trabajos se identificaron diversas limitaciones de carácter técnico, metodológico y operativo. El reconocimiento de estos factores es esencial para contextualizar el alcance de los resultados.

- **Limitaciones Técnicas y de Captura de imágenes**

Una de las principales restricciones técnicas se relacionó con la resolución espacial (GSD) del ortomosaico. Si bien se obtuvo una alta calidad visual, la detección de fisuras finas de baja severidad mostró ligeras imprecisiones debido a que el ancho de la grieta en ciertos

puntos era cercano al tamaño del píxel. Esta condición generó una subestimación de grietas delgadas y variaciones en la medición de longitudes, evidenciándose errores cercanos al 4.4% en casos específicos de patologías de grietas longitudinales y transversales.

Asimismo, las interferencias visuales propias del entorno urbano representaron un desafío significativo. Elementos como postes, edificaciones elevadas y el flujo del tráfico vehicular generaron sombras que alteraron la reflectancia del pavimento, provocando ocasionalmente falsos positivos o subdetecciones. En consecuencia, la precisión del modelo mantiene una dependencia directa de las condiciones de captura, tales como la intensidad de la iluminación, la hora del vuelo y las condiciones climáticas imperantes, factores que afectan críticamente la homogeneidad del ortomosaico final.

- **Limitaciones del Modelo de Inteligencia Artificial**

Respecto al procesamiento inteligente, el sistema operó con un dataset de 160 imágenes etiquetadas. Aunque este volumen fue suficiente para la validación del objetivo planteado, representa una limitación para una generalización robusta en escenarios drásticamente diferentes. El modelo depende estrictamente de un entrenamiento supervisado, lo que implica un alto tiempo de preparación y etiquetado manual previo. Además, al haber sido entrenado específicamente en el contexto urbano de la ciudad de Puno, su capacidad de generalización podría verse disminuida al aplicarse en otras ciudades con diferentes tipologías de materiales o condiciones de deterioro de pavimento.

- **Limitaciones Metodológicas**

En el ámbito metodológico, la investigación empleó una muestra no probabilística, seleccionando por conveniencia tres tramos de 200 metros en la Avenida Circunvalación Norte. Si bien estos tramos son representativos del estado crítico de la vía, esta selección restringe la

generalización de los hallazgos al conjunto completo de red vial. Por otro lado, la comparación con el método PCI enfrenta el desafío de que dicho estándar también posee un componente subjetivo; por lo tanto, la validación del sistema automatizado siempre dependerá de la calidad técnica verdadera de campo establecida por el profesional encargado de los trabajos de investigación.

- **Limitaciones Operativas, Institucionales y Económicas**

Finalmente, la implementación del sistema conlleva requerimientos operativos que podrían ser restrictivos para algunas entidades. Se exige el uso de RPAS especializados y el dominio de herramientas de software complejas como Metashape, Python y Roboflow, lo que demanda un alto nivel de conocimiento técnico en procesamiento de datos. Esta brecha tecnológica se traslada al plano institucional, donde no todas las municipalidades cuentan con los recursos o el personal capacitado para gestionar estas herramientas.

4.3.1. Análisis crítico de las limitaciones

El sistema basado en drones e inteligencia artificial (YOLOv8) ha demostrado ser una herramienta superior al método tradicional empleado en la Avenida Circunvalación Norte.

Los beneficios principales fueron:

- **Técnico:** Se logró una precisión del 95.88% en la detección de fallas, eliminando la subjetividad humana.
- **Operativo:** El tiempo de inspección se redujo entre un 80% y 90%, permitiendo trabajar en zonas de alto tráfico sin riesgos.
- **Económico:** Con una inversión de S/ 65,800, el sistema es altamente rentable y viable para municipalidades.
- **Social:** Mejora la seguridad vial al identificar estados de "Colapsado" que requieren intervención urgente.

A pesar del éxito, el estudio presentó restricciones que deben considerarse para futuras aplicaciones:

- **Técnicas:** La detección de grietas muy finas tiene un margen de error del 4.4% cuando su tamaño es similar al del píxel (GSD).
- **Ambientales:** Las sombras de edificios, los cables y vehículos pueden generar confusiones visuales en el modelo.
- **Empleo de la IA:** El modelo se entrenó con un dataset de 160 imágenes, lo cual es excelente para ese tipo de trabajos en la ciudad de Puno, pero podría variar en otras ciudades con otro tipo de pavimento.
- **Operativas:** Se requiere personal capacitado en el uso de drones y software especializado (Python, Yolov8, Metashape y Roboflow).

4.3.2. Mejoras identificadas

Tras el análisis de las limitaciones encontradas en la Avenida Circunvalación Norte, se proponen estrategias de mejora en cinco niveles fundamentales para potenciar la precisión y escalabilidad del proyecto:

- **Mejoras Técnicas:** Se plantea incrementar la resolución espacial reduciendo la altura de vuelo o empleando sensores de mayor gama para capturar fisuras milimétricas. Asimismo, la integración de cámaras multiespectrales y técnicas de corrección radiométrica permitiría mitigar el impacto de las sombras y mejorar la detección de patologías no visibles al ojo humano.
- **Mejoras en Inteligencia Artificial:** Es necesario ampliar el *dataset* de entrenamiento hacia un rango de 500 a 1000 imágenes para robustecer la capacidad de generalización del modelo. Además, se recomienda la implementación de arquitecturas híbridas (CNN + Transformers) y técnicas de *Transfer Learning* que permitan al sistema identificar una mayor variedad de fallas bajo diversas condiciones climáticas y materiales.

- **Mejoras Metodológicas:** Para elevar el rigor estadístico, se propone migrar hacia un muestreo probabilístico e incrementar significativamente el número de tramos evaluados. La validación en las diferentes ciudades del país permitirá confirmar la efectividad del sistema en diferentes contextos urbanos.
- **Mejoras Operativas:** Se sugiere el desarrollo de una interfaz amigable dirigida a usuarios municipales, facilitando la adopción de la tecnología sin requerir conocimientos avanzados de programación. El objetivo final es lograr un flujo de procesamiento completamente automatizado que se integre directamente con sistemas de información geográfica.
- **Mejoras económicas y de Escalabilidad:** Con el fin de reducir barreras financieras, se plantea el uso de herramientas *open source* y la implementación progresiva del sistema por etapas. Además, la generación de modelos de servicio técnico externo facilitaría que las instituciones con menores recursos accedan a diagnósticos de alta tecnología.

4.4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN

4.4.1. Descripción general y Arquitectura de la solución

La solución propuesta consiste en un sistema integrado para la evaluación automatizada de pavimentos urbanos, el cual fusiona la fotogrametría con drones, el procesamiento digital de imágenes y modelos de inteligencia artificial bajo la metodología PCI. Este sistema permite detectar fallas automáticamente, cuantificar su extensión y severidad, y generar diagnósticos técnicos con una reducción significativa de tiempos y costos.

La arquitectura se estructuró en cuatro módulos funcionales secuenciales:

- **Captura de Datos:** Se emplea un dron DJI Mavic 3 Enterprise con una planificación de vuelo de traslape 80/70% para obtener imágenes aéreas georreferenciadas de alta resolución.

- **Procesamiento Fotogramétrico:** Utilizando el software Agisoft Metashape, se genera el ortomosaico, el modelo digital de superficie (DEM) y la nube de puntos.
- **Análisis con Inteligencia Artificial:** Mediante un dataset de 160 imágenes, el modelo YOLOv8 (segmentación por instancias) detecta automáticamente fallas como piel de cocodrilo, grietas y ahuellamiento, entregando métricas precisas de área y longitud.
- **Evaluación del Estado del pavimento:** Los datos se integran con la metodología PCI para clasificar el estado del pavimento, el cual, para el caso de estudio, resultó en un diagnóstico de "Colapso / Fallado".

4.4.2. Implementación de la solución en el caso de estudio

El sistema que se ha implementado en la Avenida Circunvalación Norte – Puno, evaluando tres unidades muestrales de 200 m divididas en segmentos de 20×10 m. La distribución fue validada mediante algoritmos de visión por computadora. La figura 22 muestra el plano de la distribución de unidades muestrales, generado con el algoritmo de visión por computadora.

Figura 22

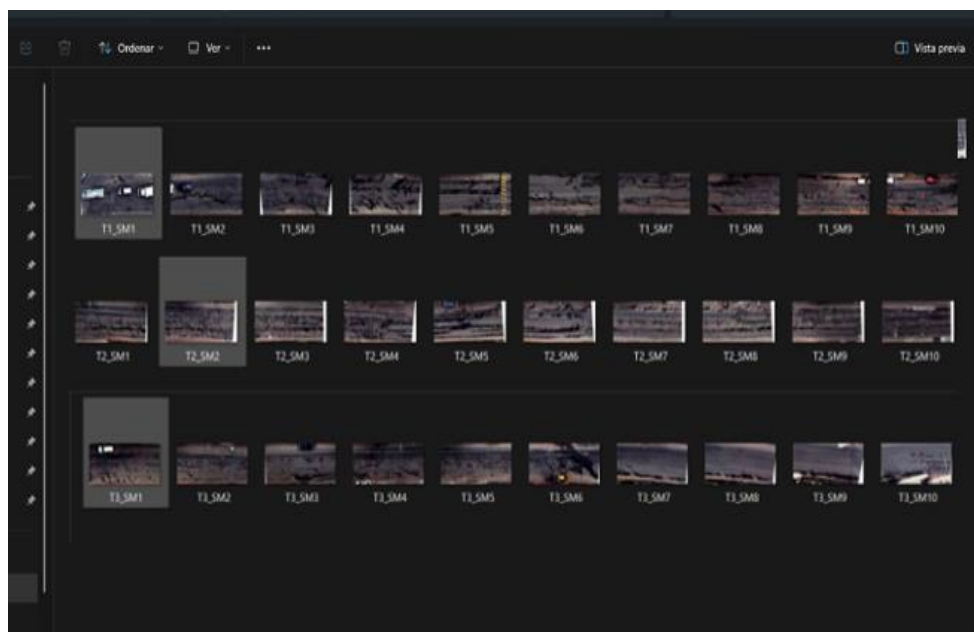
Plano generado de la distribución de unidades muestrales



La figura 23 muestra las sub-divisiones en segmentos de 20×10 m para cada uno de los tramos.

Figura 23

Gráfica de subdivisión en segmentos de 20×10 m



Resultados de implementación

- Precisión del modelo: 95.88%.
- Eficiencia operativa: Reducción del tiempo de inspección entre el 80% y 90% respecto al método manual.
- Estado Estructural: Confirmación de un estado crítico en la vía evaluada.

4.4.3 Nivel de Implementación y Propuesta Institucional

La solución ha alcanzado un nivel de madurez tecnológica TRL 6 (Validación en entorno real), al haber sido probada en campo con resultados medibles y validados frente al método tradicional. Para su adopción en entidades públicas como municipalidades, se propone un esquema de implementación por etapas que incluye la capacitación técnica del personal, la adquisición de equipos básicos y el

escalamiento progresivo hacia un monitoreo vial periódico e integrado con sistemas GIS.

4.4.4 Síntesis de Ventajas y Limitaciones

El sistema se posiciona como una herramienta innovadora gracias a su automatización, reproducibilidad y adaptabilidad a diversos contextos urbanos. Si bien presenta limitaciones operativas como la dependencia de condiciones climáticas y la necesidad de personal especializado en software como Python, Metashape y Roboflow, las ventajas en precisión y ahorro de recursos lo consolidan como una alternativa viable para la transformación digital de la gestión vial en el Perú.

4.5. EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO

4.5.1. Evaluación de costos del sistema propuesto

La viabilidad económica del sistema constituye uno de los pilares fundamentales para su adopción institucional. El análisis financiero se basa en los recursos invertidos durante el desarrollo del proyecto, integrando costos reales de ejecución y proyecciones operativas que demuestran la eficiencia del gasto frente a los métodos convencionales.

a. Costo de Implementación Inicial

El desarrollo integral del proyecto representó un costo total estimado de S/ 65,800, el cual cubre la totalidad de la fase de investigación y validación en la ciudad de Puno. Esta inversión inicial se distribuye de la siguiente manera:

- **Talento Humano:** Incluye los honorarios del tesista y el apoyo técnico del asistente especializado para las fases de diseño y entrenamiento del modelo.

- **Operaciones de Campo:** Contempla los gastos logísticos y de movilización necesarios para el levantamiento de datos en la Avenida Circunvalación Norte.
- **Equipamiento Tecnológico:** Inversión en el hardware especializado, destacando el uso del dron DJI Mavic 3 Enterprise como herramienta principal de captura.
- **Plataformas de Software y Procesamiento:** Costos asociados a las licencias de Agisoft Metashape y el uso de entornos de desarrollo como Python y Roboflow para la inteligencia artificial.
- **Gastos Administrativos y de Gestión:** Fondos destinados al almacenamiento de datos y trámites documentales propios de la investigación.

b. Análisis de costo comparativo

Tabla 6

Análisis de costos del método tradicional (PCI) y del sistema propuesto

Método	Costo	Tiempo	Precisión
Método tradicional (PCI)	Medio–alto	Alto	Variable
Sistema propuesto	Bajo–moderado	Bajo	Alta (95.88 %)

c. Sostenibilidad y Costos Operativos Futuros

Una vez establecida la infraestructura tecnológica y el modelo de IA entrenado, el sistema transita hacia una etapa de mantenimiento económico. Los costos operativos futuros se reducen exclusivamente a:

- **Mantenimiento y Operación del RPAS:** Gastos menores asociados al uso de baterías y mantenimiento preventivo del dron.

- **Procesamiento Digital:** Costos marginales por el uso de capacidad computacional para el análisis de nuevas imágenes.
- **Actualización Técnica:** Gastos destinados al personal técnico encargado de supervisar los reportes generados.

A diferencia de los métodos tradicionales que requieren cuadrillas de inspección permanentes y costosas, este sistema no demanda una inversión recurrente elevada, posicionándose como una solución altamente escalable y financieramente sostenible para la gestión vial nacional.

4.5.2. Análisis de sostenibilidad

La viabilidad a largo plazo de la solución propuesta se sustenta en un enfoque integral que abarca cuatro dimensiones estratégicas. Este análisis garantiza que el sistema no sea solo una herramienta aislada, sino una solución perdurable para la gestión de infraestructura vial. A nivel nacional y local.

a. Sostenibilidad Técnica

El sistema posee una alta sostenibilidad técnica debido al uso de herramientas de software y hardware accesibles en el mercado actual. Su arquitectura abierta permite actualizaciones constantes, tanto en los algoritmos de IA como en las plataformas de procesamiento fotogramétrico. Un punto clave es la capacidad de reentrenamiento del modelo: a medida que se incorporan nuevas imágenes de pavimentos en diferentes estados, la precisión del sistema mejora progresivamente. Además.

b. Sostenibilidad Económica

Desde la perspectiva económica, el proyecto destaca por una baja inversión inicial en comparación con los beneficios diagnósticos que reporta. La reducción de los costos operativos a lo largo del tiempo es significativa, ya que automatiza tareas que tradicionalmente requieren grandes cuadrillas y jornadas extensas de campo. Este modelo resulta especialmente viable para municipalidades y gobiernos regionales, quienes podrían incluso optar por

esquemas de uso compartido de equipos y licencias entre instituciones para optimizar el gasto público

c. Sostenibilidad Institucional

Para que la solución sea sostenible en el ámbito público, se ha diseñado para integrarse directamente en los planes de gestión vial urbana y programas de mantenimiento preventivo. El sistema actúa como un soporte tecnológico para la toma de decisiones, permitiendo que las áreas de infraestructura cuenten con monitoreos objetivos y periódicos. Su implementación facilita el cumplimiento de los estándares de mantenimiento y conservación vial, transformando la inspección de una tarea reactiva a un proceso de monitoreo estratégico y documentado.

d. Sostenibilidad Ambiental

Finalmente, el sistema se alinea con los enfoques de infraestructura sostenible al minimizar el impacto ambiental de las inspecciones. Al ser una evaluación no invasiva y remota, reduce drásticamente la necesidad de desplazamientos vehiculares constantes en campo. Asimismo, el menor uso de recursos físicos y la optimización de los materiales de mantenimiento (al detectar fallas antes de que requieran reconstrucciones totales) refuerzan su carácter ecológico y eficiente.

4.5.3. Viabilidad técnica

La factibilidad del sistema propuesto se sustenta en un análisis multidimensional que valida su capacidad de implementación en el entorno real, asegurando que los beneficios tecnológicos se traduzcan en ventajas operativas y sociales.

a. Viabilidad Técnica y Operativa

El sistema ha demostrado una viabilidad técnica sólida, respaldada por su implementación exitosa en un entorno real y una precisión diagnóstica del 95.88 %. Su ejecución no depende de tecnologías experimentales o

inaccesibles; por el contrario, utiliza equipos disponibles en el mercado y genera resultados altamente reproducibles.

Desde el enfoque operativo, la implementación es plenamente factible en entidades públicas. El sistema puede ser gestionado por ingenieros civiles o ingenieros topógrafos debidamente capacitados, bajo procedimientos estandarizados que solo requieren un equipo básico (dron, computador y software específico), facilitando su adopción inmediata en las direcciones de infraestructura vial.

b. Viabilidad Económica y Análisis Costo-Beneficio

La viabilidad económica se manifiesta en una relación beneficio/costo altamente favorable. Se ha demostrado que:

- **Inversión Eficiente:** La inversión inicial es moderada y recuperable en el corto plazo gracias a la optimización de los recursos.
- **Ahorro Operativo:** Se logra una reducción drástica de los tiempos de inspección, entre un 80 % y 90 %.
- **Gasto Inteligente:** El sistema permite una mejor planificación del gasto en mantenimiento, generando ahorros indirectos significativos al evitar el colapso total de las vías mediante detecciones tempranas de los deterioros en pavimentos.

c. Viabilidad Social e Impacto a Largo Plazo

El impacto social es uno de los mayores activos de la solución, ya que contribuye directamente a la mejora de la seguridad vial y la reducción de accidentes mediante una infraestructura de mejor calidad.

A largo plazo, el sistema posee una proyección evolutiva hacia la inteligencia territorial y las Smart Cities. Su capacidad de integrarse con plataformas automatizadas de gestión vial y el monitoreo continuo con drones autónomos asegura que la inversión tecnológica actual sea la base para la modernización de la gestión vial en las vías del territorio peruano.

d. Síntesis de la Evaluación

El análisis integral confirma que el sistema propuesto es económicamente viable, técnicamente sólido y operativamente implementable. Su sostenibilidad en el tiempo lo posiciona como la alternativa idónea para que las entidades gubernamentales transiten hacia una gestión de pavimentos basada en la evidencia científica y la transformación digital.

CONCLUSIONES

Primera: (Objetivo General) La aplicación de la fotogrametría con drones para la detección de fallas en pavimentos flexibles en la Avenida Circunvalación Norte de Puno es una solución tecnológica altamente eficaz y precisa. El sistema integrado permitió no solo la identificación automatizada de patologías, sino que alcanzó un nivel de madurez técnica TRL 6, validando que la combinación de sensores remotos e inteligencia artificial es una herramienta superior a los métodos convencionales para el mantenimiento vial urbano en condiciones de gran altura.

Segunda: (Objetivo 1 - Captura y Tipología) Los procesos de captura de imágenes aéreas mediante el dron DJI Mavic 3 Enterprise, bajo una planificación de traslape del 80/70%, son fundamentales para establecer la tipología, severidad y extensión de las fallas. Esta metodología permitió obtener una resolución espacial (GSD) óptima que facilitó la visibilidad detallada de deterioros críticos, garantizando una base de datos georreferenciada de alta fidelidad para el análisis posterior.

Tercera: (Objetivo 2 - Procesamiento e IA) La aplicación del procesamiento fotogramétrico en Agisoft Metashape, complementado con el modelo de visión computacional basados en algoritmos YOLOv8 sobre el entorno de programación Python, que demostró ser una técnica disruptiva para la identificación de fallas. El uso de la inteligencia artificial permitió segmentar por instancias patologías complejas como "piel de cocodrilo" y "ahuellamiento" con una precisión del 95.88%, superando la subjetividad del inspector humano y automatizando la cuantificación de áreas y longitudes afectadas.

Cuarta: (Objetivo 3 - Análisis y Caracterización) El análisis de los resultados fotogramétricos permitió caracterizar de manera precisa el estado del pavimento,

concluyendo que la Avenida Circunvalación Norte presenta un Índice de Condición del Pavimento (PCI) correspondiente a un estado de "Colapso" o "Fallado". Este diagnóstico, obtenido con una reducción del 80% al 90% en el tiempo de inspección, proporciona evidencia científica irrefutable para la toma de decisiones inmediatas en los planes de mantenimiento vial de la ciudad de Puno.

RECOMENDACIONES

Primera: Sobre la implementación institucional Se recomienda a la Municipalidad Provincial de Puno la adopción formal de protocolos basados en fotogrametría y visión artificial para la modernización de sus inventarios viales. Para garantizar el éxito de este sistema, es imperativo que la comuna establezca unidades técnicas de evaluación vial digital que lideren la transición del método manual a procesos automatizados, asegurando así una toma de decisiones basada en datos precisos para el mantenimiento de la ciudad de Puno.

Segunda: Sobre los estándares de captura técnica Se sugiere a los investigadores y especialistas en geomática de las universidades locales que, en futuras etapas de captura de imágenes aéreas, se estandaricen los vuelos en horarios de iluminación solar cenital (entre las 10:00 y 14:00 horas) para minimizar la interferencia de sombras. Asimismo, se recomienda el empleo de sensores con mayor rango dinámico o la reducción estratégica de la altura de vuelo en tramos con fisuras de baja severidad, optimizando así la detección de fallas cuyo ancho sea cercano al tamaño del píxel (GSD).

Tercera: Sobre la optimización del modelo de Inteligencia Artificial Se recomienda a la comunidad académica y desarrolladores de software vial fortalecer el procesamiento de visión computacional mediante la expansión del banco de datos (*dataset*) hacia un rango de 500 a 1000 imágenes debidamente etiquetadas. Esta acción permitirá incluir una mayor diversidad de materiales y estados de conservación, potenciando la capacidad de generalización del modelo YOLOv8 bajo entorno Python para identificar patologías en vías con condiciones geográficas distintas a las de la Avenida Circunvalación Norte.

Cuarta: Sobre la planificación estratégica urbana Se recomienda Para una caracterización más profunda del estado del pavimento, se recomienda integrar los resultados del diagnóstico automatizado en sistemas de información geográfica (GIS). Esta integración permitirá generar mapas de calor y reportes históricos de la evolución de las fallas, facilitando el diseño de programas de mantenimiento preventivo y correctivo mucho más eficientes y escalables a nivel de toda la red vial urbana.

REFERENCIAS

- Araujo, J., & Huamán, R. (2021). Aplicación de drones para evaluación del estado superficial de vías urbanas en Perú. *Revista de Ingeniería de Transporte*, 5(2), 45–56. <https://revistait.up.edu.pe/rit2021-uas>
- Arroyo, E. y Cervantes, N. (2023). *Evaluación superficial del pavimento flexible empleando el método PCI y VIZIR con dron para una propuesta de intervención de un tramo de la carretera Emp. PE-1S (Dv. Paracas) hasta EMP. PE-28 (DV. Paracas), Pisco, Ica – 2023*. [Tesis de Título, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú].. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8970>
- ASTM International. (2018). *Práctica estándar para estudios del índice de condición del pavimento en carreteras y estacionamientos (ASTM D6433-18)*. <https://www.astm.org/d6433-18.html>
- Bernal-Torres, C. A. (2014). *Metodología de la investigación* (4ª ed.). Pearson. <https://www.pearson.com/store/p/metodologia-de-la-investigacion/P200000002627/9786073247822>
- Campos, E. y Nuñez, J. (2021). *Evaluación superficial del pavimento flexible comparando la metodología del PCI y uso del dron en la av. Pacasmayo – Callao, 2020*. [Tesis de Título, Universidad César Vallejo, Lima Norte, Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/75564>
- Cárdenas Resines, C. L., Carrillo Sinche, J. L., Izarra Vargas, A. D., Murga Tirado, C. E., & Vásquez Salazar, A. G. (2023). *Herramientas tecnológicas de evaluación de fallas en la superficie de pavimento flexible, una revisión sistemática*. *Llamkasun*, 4(2). <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v4i2.121>
- Colque, J. (2023). *Aplicación del método PCI en pavimentos flexibles empleando drones*. [Tesis de Título, Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, Perú]. Repositorio Institucional UPLA. https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/7115/T037_41231285_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Chen, X., Liu, C., Chen, L., Zhu, X., Zhang, Y., & Wang, C. (2024). A pavement crack detection and evaluation framework for a UAV inspection system based on deep learning. *Applied Sciences*, *14*(3), 1157. <https://doi.org/10.3390/app14031157>
- Dominio de las Ciencias (2024). Seguridad y el confort de los usuarios: la fotogrametría aérea para la detección de fallas en infraestructura vial. *Dominio de las Ciencias*. <https://www.dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/download/4093/8432/18689>
- Drone Solution Center (2021). *DJI Mavic 3 Enterprise (3E) RTK*. [https://DJI Mavic 3 Enterprise \(3E\) RTK | Drone Solution Center](https://DJI Mavic 3 Enterprise (3E) RTK | Drone Solution Center)
- Espinoza, A. (2024). *Evaluación con dron del pavimento flexible por la Metodología Pavement Condition Index PCI, Avenida Huancavelica, Huancayo – 2023*. [Tesis de Título, Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, Perú]. https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848_7501/T037_72049251_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Federal Highway Administration. (2014). *Distress identification manual for the Long-Term Pavement Performance Program (FHWA-HRT-13-092, 5th rev. ed.)*. U.S. Department of Transportation, FHWA. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13092/>
- Federal Highway Administration. (2018). Unmanned aircraft systems (UAS) in transportation. FHWA. <https://www.fhwa.dot.gov/uas/>
- Gonzales, C. y Quispe, P. (2020). Evaluación del PCI en pavimentos urbanos con apoyo de fotogrametría. *Revista de Carreteras del Perú*, *12*(1), 25–34. <https://revistacarreteras.pe/2020pci-uas>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., y Baptista, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.com.mx/metodologia-de-la-investigacion-6a-edicion-9781456268710-ame>

- Huamán Quispe, J. A. (2022). *Evaluación de pavimentos flexibles mediante fotogrametría con aeronaves no tripuladas en vías urbanas de Cusco*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNSAAC. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/5257>
- Innovative Infrastructure Solutions (2024). *Smart monitoring of road pavement deformations from UAV images by using machine learning*. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-023-01315-2>
[SpringerLink](#)
- International Transport Forum (2021). *Reshaping transport infrastructure for net-zero*. OECD/ITF. <https://www.itf-oecd.org/reshaping-transport-infrastructure-net-zero>
- Jara, V. E. (2025) *Aplicación de técnicas de fotogrametría con drones para la detección y cuantificación de deterioro de pavimentos*. [Tesis de Título, Universidad de Concepción]. Repositorio Institucional UDEC. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/12482>
- Li, Y., Wang, J., Lü, B., Yang, H., & Wu, X. (2025). Deep metric learning-based classification for pavement distress images. *Sensors*, 25(13), 4087. <https://doi.org/10.3390/s25134087>. MDPI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/13/4087>
- Koch, C., & Brilakis, I. (2011). Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, 25(3), 507–515. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.02.002>
- Manrique-Quenallata, C. (2024). *Evaluación superficial del pavimento flexible con el método del índice de condición del pavimento mediante la fotogrametría aérea de la Vía Lampa – Caracara de la Región Puno*. [Tesis de Título, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. Repositorio UANCV.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013; versión*

revisada – julio 2013).
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcción%20-%20EG-2013%20-%20\(Versión%20Revisada%20-%20JULIO%202013\).pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcción%20-%20EG-2013%20-%20(Versión%20Revisada%20-%20JULIO%202013).pdf)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial (R.D. N°08-2014-MTC/14; R.D. N.° 05-2016-MTC/14)*.

https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_9%20MCV-2014_2016.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ((2018). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Pavimentos*. <https://www.gob.pe/mtc>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2019). *Ley N.° 30740 – Ley que regula el uso y las operaciones de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS)*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/355491-30740-ley-que-regula-el-uso-y-las-operaciones-de-los-sistemas-de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones – DGAC (2019). *MTC: Requisitos para operar un drone*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/50511-mtc-conoce-los-requisitos-para-operar-un-drone>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2021). *Política Nacional de Transporte Urbano Sostenible al 2030*. <https://www.gob.pe/mtc>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones – DGAC (2025). *Requisitos para las operaciones de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344331-requisitos-para-las-operaciones-de-sistemas-de-aeronaves-pilotadas-a-distancia>

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (s.f.). *Caminos y Ferrocarriles/ Manuales de Normas de carreteras*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Municipio Provincial de Puno. (2025, 17 de marzo). *Plan de desarrollo urbano 2025-2035*. <http://portal.munipuno.gob.pe/es/plan-de-desarrollo-urbano-2025-2035>
- Municipalidad Provincial de Puno. (2022). *Plan de Movilidad Urbana Sostenible de Puno – Diagnóstico de Infraestructura Vial*. <https://www.munipuno.gob.pe/pmus2022>
- Provias Descentralizadas. (2020). *Lineamientos de Gestión de Activos Viales*. <https://www.gob.pe/proviasdescentralizado>
- Roberts, R., Inzerillo, L., & Di Mino, G. (2020). Exploiting low-cost 3D imagery for the purposes of detecting and analyzing pavement distresses. *Infrastructures*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5010006>
- Robles Reyes, K. R. (2023). *Identificación de fallas en pavimentos mediante aerofotogrametría con dron* [Trabajo de titulación, Universidad Católica de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Cuenca. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/14093>
- Sánchez Morales, M. C., Lanz Acosta, D. R., & Martínez Rojo, T. E. (2019). Detección de deterioros en pavimentos flexibles a partir del procesamiento de imágenes y modelos de su superficie. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 13(1), 1–12. Redalyc+. <https://www.redalyc.org/journal/1939/193958877006/html/>
- Sancho Gómez-Zurdo, R., Galán Martín, D., González-Rodrigo, B., Marchamalo Sacristán, M., y Martínez Marín, R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno. *Informes de la Construcción*, 73(561). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7890953>

- Saravia Quispe, W. (2021). *Evaluación de fallas superficiales del pavimento flexible por el método PCI y empleo del dron, Carretera Covadonga – Mollepata, Ayacucho*. [Tesis de Título, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/64812>
- Shah, SAR y Mishra, RK (2021). Detección de deterioro del pavimento mediante fotogrametría con UAV. *Revista Internacional de Ingeniería de Pavimentos*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1878519>
- Susilo, H., Novianti, M., Aditya, M. T., Cahyani, E., y Kurniawan, A. (2023). Analysis of road damage detection using orthophoto map from unmanned aerial vehicle (UAV-Photogrammetry). *Jurnal Qua Teknika*, 14(1). <https://doi.org/10.35457/quateknika.v14i1.3258>
- Tan, Y., & Li, Y. (2019). UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9), 409. <https://doi.org/10.3390/ijgi8090409>
- Tello-Cifuentes, L., Aguirre-Sánchez, M., Díaz-Paz, J. P., & Hernández, F. (2021). Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales. *TecnoLógicas*, 24(50), e1686. <https://doi.org/10.22430/22565337.1686>
- Tumi-Quispe, J., Silva-Dueñas, M., Ticona-Arapa, C., Sarmiento-Mena, Á., y Tumi-Figueroa, N. (2021). *Conocimientos de la población de Puno-Perú sobre saneamiento y factores de contaminación del Lago Titicaca y su impacto en la salud humana y el ambiente*. *Espacio Abierto*, 30(3), 100-121. <https://www.redalyc.org/journal/122/12268654016/html/>
- Yildizli, T. (2025). Automated Road Damage Detection Using UAVs and Deep Learning: A Scalable Solution for Infrastructure Maintenance. *The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*. <https://www.ndt.net/article/ndtce2025/papers/5701.pdf>
- Zakeri, H., Murshed, M. y Nejad, FM (2017). Detección de grietas basada en imágenes en pavimentos asfálticos mediante imágenes de UAV. *Revista*

Automatización en la Construcción, 83, 36–44.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.004>

Zhu et al. (2021). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *Automation in Construction*, 115, 103163.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991>

APENDICE

Apéndice 1


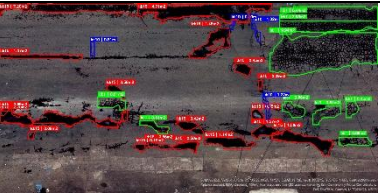
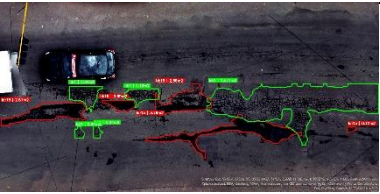
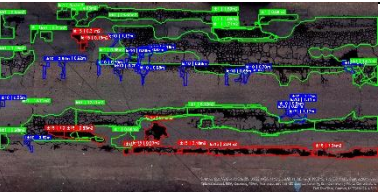
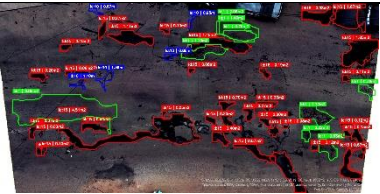
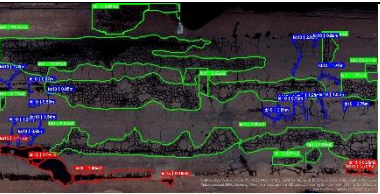


Matriz de consistencia del informe final de tesis

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>INTERROGANTE PRINCIPAL</p> <p>¿De qué manera la aplicación de fotogrametría con drones permite detectar fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida circunvalación Norte - ciudad de Puno, Puno 2025?</p> <p>INTERROGANTES ESPECÍFICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cómo se aplican los procesos de captura de imágenes aéreas mediante drones para la determinación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento 	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Aplicar de fotogrametría con drones en la detección de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida Circunvalación Norte-ciudad de Puno, Puno 2025</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar los procesos de captura de imágenes aéreas mediante drones para la determinación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles para mantenimiento vial urbano, avenida circunvalación Norte - ciudad de Puno, Puno 2025 	<p>VARIABLE X: FOTOGRAMETRÍA CON DRONES</p> <p>Dimensión 1: Captura de imágenes aéreas</p> <p><u>Indicadores</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Resolución espacial (cm/pixel) - Altura y ángulo de vuelo - Cobertura aérea <p>Dimensión 2: Procesamiento fotogramétrico</p> <p><u>Indicadores</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Generación de ortomosaicos - Modelos digitales de superficie <p>Dimensión 3: Interpretación y análisis de imágenes</p> <p><u>Indicadores</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel de confianza en la identificación de fallas visibles. - Exactitud en la clasificación automatizada. 	<p><u>Tipo de investigación</u></p> <p>Aplicada</p> <p><u>Enfoque de investigación</u></p> <p>Cuantitativo</p> <p><u>Nivel de investigación</u></p> <p>Aplicativo</p> <p><u>Diseño de la investigación</u></p> <p>No experimental</p> <p><u>Ámbito de estudio</u></p> <p>Ciudad de Puno, región Puno, Perú.</p> <p><u>Población</u></p> <p>Total de la superficie de la avenida circunvalación Norte de 1.77 Km.</p> <p><u>Muestra</u></p>

<p>vial urbano, avenida circunvalación Norte-ciudad de Puno, Puno 2025?</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cómo se aplica el procesamiento fotogramétrico complementado con modelos de visión computacional para la identificación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles de la avenida Circunvalación Norte de la ciudad de Puno, 2025? • ¿Cómo contribuyen los resultados de la detección fotogramétrica en la caracterización del estado superficial del pavimento de la avenida circunvalación Norte - ciudad de Puno, Puno 2025? 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar el procesamiento fotogramétrico complementado con modelos de visión computacional en la identificación de la tipología, severidad y extensión de fallas en pavimentos flexibles de la avenida Circunvalación Norte de la ciudad de Puno, 2025. • Analizar los resultados de la detección fotogramétrica para caracterizar el estado del pavimento en términos de tipología, severidad y extensión de fallas. del pavimento de la avenida circunvalación Norte – ciudad de Puno, Puno 2025 	<p>VARIABLE Y: DETECCIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES</p> <p>Dimensión 1: Tipología de fallas</p> <p><u>Indicadores</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Exactitud de reconocimiento (entrenamiento de algoritmo) - grietas transversales y longitudinales - Fallas de malla y piel de cocodrilo - Baches <p>Dimensión 2: Severidad de fallas</p> <p><u>Indicadores</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Grado de afectación de fallas <p>Dimensión 3: Extensión de fallas</p> <p><u>Indicadores</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Área afectada - Longitud del daño - Transitabilidad <p>VARIABLE INTERVINIENTE: Las condiciones del entorno urbano y ambiental de la ciudad de Puno.</p>	<p>Tres (3) tramos superficiales de 0.2 Km representativos, por muestreo no probabilístico por conveniencia.</p> <p><u>Técnicas de recolección de datos</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. De observación estructurada 2. Registro fotogramétrico digital 3. Análisis visual y automatizado de imágenes <p><u>Instrumentos</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ficha de observación de fallas 2. Lista de chequeo de severidad 3. Ficha de procesamiento fotogramétrico físico y virtual <p><u>Equipos y herramientas virtuales</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Drone multirrotor, con cámara módulo RTK 2. GPS diferencial 3. Software: Python, Agisoft Metashape, YOLOv8, Google Earth Pro, Excel.
--	--	---	--




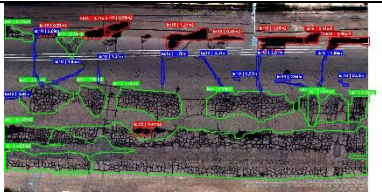
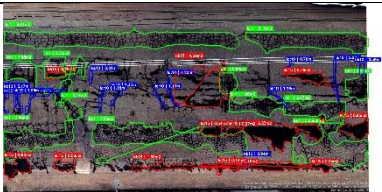

Apéndice 2
MUESTRAS DE LA DETECCIÓN DE FALLAS

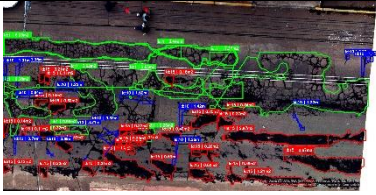

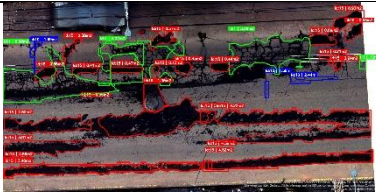
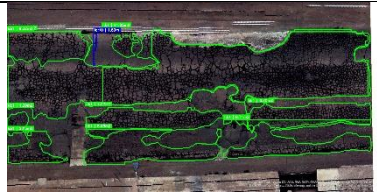
MUESTRA 01

<p>SUBMUESTRA 1</p>		<p>SUBMUESTRA 6</p>	
<p>SUBMUESTRA 2</p>		<p>SUBMUESTRA 7</p>	
<p>SUBMUESTRA 3</p>		<p>SUBMUESTRA 8</p>	
<p>SUBMUESTRA 4</p>		<p>SUBMUESTRA 9</p>	


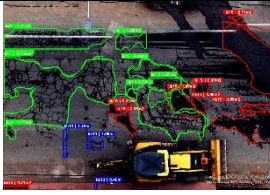
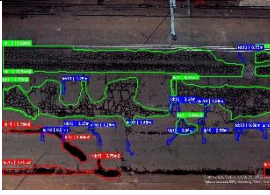

<p>SUBMUESTRA 5</p>		<p>SUBMUESTRA 10</p>	
-------------------------	--	--------------------------	---

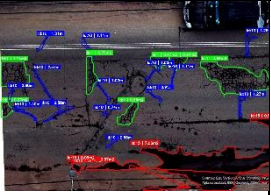

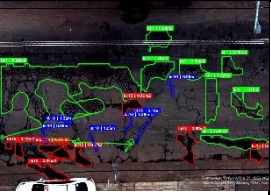

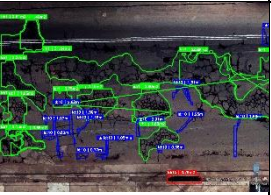
MUESTRA 02

<p>SUBMUESTRA 1</p>		<p>SUBMUESTRA 6</p>	
<p>SUBMUESTRA 2</p>		<p>SUBMUESTRA 7</p>	
<p>SUBMUESTRA 3</p>		<p>SUBMUESTRA 8</p>	

<p>SUBMUESTRA 4</p>		<p>SUBMUESTRA 9</p>	
<p>SUBMUESTRA 5</p>		<p>SUBMUESTRA 10</p>	

MUESTRA 03

<p>SUB MUESTRA 1</p>		<p>SUB MUESTRA 6</p>	
<p>SUB MUESTRA 2</p>		<p>SUB MUESTRA 7</p>	

SUB MUESTRA 3		SUB MUESTRA 8	
SUB MUESTRA 4		SUB MUESTRA 9	
SUB MUESTRA 5		SUB MUESTRA 10	