



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA
DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA
CANTONAL DE SANTA ELENA.

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

CEDENO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN
ORRALA SALAS DANIELA TAHIS

TUTOR:

ING. JUAN RENDÓN MARCILLO MG

LA LIBERTAD - ECUADOR

2026

DEDICATORIA

A Dios, por su fidelidad y amor.

Quiero dedicar este trabajo y mi titulación como profesional a mis padres, Euro y Jessenia, por todo el esfuerzo, amor incondicional y apoyo que me han brindado a lo largo de este camino. Gracias por enseñarme, con su ejemplo, que Dios siempre debe ocupar el primer lugar en nuestras vidas y por inspirarme a esforzarme cada día para alcanzar mis metas.

CEDENO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN

A Dios, por guiar mi camino.

A mi madre, por ser mi fuerza y apoyo incondicional.

A mi hijo, por ser mi mayor inspiración

Al ingeniero Pablo Proaño, por su apoyo y por haber sido parte importante de esta etapa.

A mis amigos y a todas las personas que quiero, por acompañarme y dejar una huella especial en este camino.

Con cariño y gratitud, dedico este logro a todos ustedes.

ORRALA SALAS DANIELA TAHIS

AGRADECIMIENTOS

Apreciado lector:

Agradezco a Dios por ser mi guía la fuente de sabiduría para alcanzar esta etapa académica con éxito. Su fidelidad me sostuvo en cada desafío y me permitió llegar hasta aquí.

Mi gratitud a mis amados padres; Euro y Jessenia, por su amor incondicional, su ejemplo de responsabilidad, y su apoyo incansable en mis estudios ha sido una fuente de fortaleza y motivación. Gracias por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo, integridad y perseverancia.

A mis dos hermanas; Dayana y Noemí, por estar presentes en cada etapa de este camino con sus oraciones, apoyo incondicional y cariño.

A Daphne, por brindarme su ayuda y motivación constante en este trayecto.

Extiendo mi agradecimiento a mis familiares y hermanos en la Fe, por demostrarme su amistad sincera y sus oraciones.

A mis amigos, tanto dentro como fuera de la Universidad, con quienes compartí risas, desvelos, aprendizajes y momentos inolvidables que atesoraré por siempre.

A lo largo de esta carrera tuve la bendición de estar rodeado de personas maravillosas que me motivaron. De manera especial, agradezco a mis mascotas: Dulce y Teddy, por su cariño incondicional y por acompañarme en cada día de estudio y trabajo. Finalmente, expreso mi más profundo agradecimiento a los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil por su entrega, profesionalismo y vocación. Gracias por compartir sus conocimientos y por formarme no solo como profesional, sino también como persona con valores y compromiso social. Con mucho cariño.

CEDENO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar esta importante etapa de mi vida.

A mis padres, en especial a mi Madre por su amor, apoyo incondicional y por creer siempre en mí. Este logro también es de ustedes.

Al ingeniero Pablo Proaño, siempre reconoceré y agradeceré el apoyo brindado durante mi formación y por haber sido parte importante de este proceso. Agradezco cada aporte y cada palabra de ánimo que contribuyeron a alcanzar esta meta, siempre guardaré gratitud y respeto por lo compartido y aprendido.

A mi hijo, por ser una de mis mayores motivaciones para seguir adelante y cumplir mis sueños.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, fueron parte de este camino y contribuyeron a que hoy pueda celebrar este logro.

Con el corazón lleno de gratitud, cierro esta etapa orgullosa de lo alcanzado y con ilusión por todo lo que está por venir.

ORRALA SALAS DANIELA TAHIS

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Trabajo de Integración Curricular denominado ““APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA” elaborado por el señor **CEDENO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN** y por la señorita **ORRALA SALAS DANIELA TAHIS**, egresados de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero/s Civil/les, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

JUAN RENDÓN MARCILLO



Ing. Juan Rendón Marcillo Mg.

La Libertad, a los 12 del mes de agosto del año 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **CEDÑO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN** y **ORRALA SALAS DANIELA TAHIS**

DECLARO/DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación **“APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA”**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi/nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, me/nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 13 días del mes de agosto del año 2026

LOS AUTORES



Cedño Parraga Josué Aarón



Orrala Salas Daniela Tahis

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CEDENO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN** y **ORRALA SALAS DANIELA**
TAHIS

Autorizo/Autorizamos a la Universidad Península de Santa Elena la **publicación** en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación denominado “**APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 13 días del mes de agosto del año 2026

LOS AUTORES



Cedeno Párraga Josué Aarón



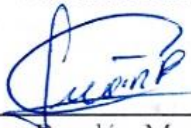
Orrala Salas Daniela Tahis

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado **“APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA”**, elaborado por los estudiante **CEDEÑO PÁRRAGA JOSUÉ AARÓN** y **ORRALA SALAS DANIELA TAHIS**, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero/a Civil, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio, luego de haber cumplido con los requerimientos de valoración, el presente trabajo de titulación, se encuentra con un 5% de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el siguiente certificado.

Adjunto del reporte de análisis.

Atentamente,



Ing. Juan Rendón Marcillo Mg.

DOCENTE TUTOR

La Libertad, a los 13 días del mes de agosto del año 2026.

REPORTE DE ANÁLISIS (ANTIPLAGIO)



Informe de análisis
Compilatio Magister+

TESIS CEDEÑO ORRALA REVCOMPILATIO

ID : d26a2593ebe2aa90bc620e6b71d65b1d00cee5dd



Nombre del fichero : TESIS CEDEÑO ORRALA REVCOMPILATIO.txt
Tamaño del archivo original : 290,8 kB
Número de palabras : 17.961

Depositante :
Fecha de depósito : 22 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 22 de julio de 2026

Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes <1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 6%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 4%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Certificación de Gramatólogo

Lic. ALEXI JAVIER HERRERA REYES

Magíster En Diseño Y Evaluación

De Modelos Educativos

La Libertad, 21 de julio del 2026

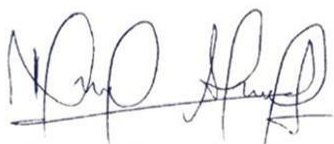
Certifica:

Que, después de revisar el contenido del trabajo de integración cunicular presentado en opción al título de Ingeniero Civil por el Sr. Cedeño Párraga Josué Aarón y la Srta. Orrala Salas Daniela Tahis, cuyo tema es:

"APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA"

me permito manifestar que el trabajo se encuentra idóneo y puede ser expuesto ante el jurado correspondiente.

Es todo cuanto puedo manifestar en honor a la verdad.



Lic. Alexi Herrera R, MSc.

Docente de Español A: Literatura

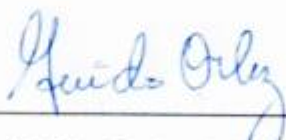
Cel: 0962989420

e-mail: alexiherrerareyes@hotmail.com

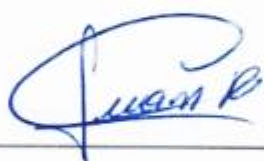
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



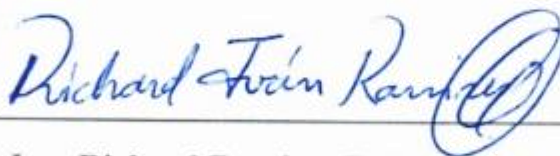
Ing. Lucrecia Cristina Moreno Alcívar PhD.
DIRECTORA DE CARRERA



Ing. Guido Ortiz Safadi Mg.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Juan Rendon Marcillo Mg.
DOCENTE TUTOR



Ing. Richard Ramírez Palma Mg..
DOCENTE GUÍA DE LA UIC

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	vi
AUTORIZACIÓN	vii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO.....	viii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	x
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	xi
INDICE DE TABLAS	xvii
INDICE DE FIGURAS	xviii
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. HIPÓTESIS	7
1.3.1. Hipótesis General.....	7
1.3.2. Hipótesis específicas	7
1.4. OBJETIVOS	8
1.4.1. Objetivo General.....	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.5. ALCANCE.....	8
1.6. VARIABLES	9
1.6.1. Variables independientes	9
1.6.2. Variables Dependientes	9
2. CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	10
2.1. INFRAESTRUCTURA VIAL URBANA	10

2.1.1.	Clasificación funcional de las vías.....	10
2.1.2.	Importancia Socioeconómica de la infraestructura vial.....	11
2.2.	INFRAESTRUCTURA VIAL DE ECUADOR	12
2.3.	INFRAESTRUCTURA VIAL DE LA PROVINCIA DE SANTA ELENA.....	13
2.4.	PROBLEMÁTICAS ASOCIADAS AL DETERIORO VIAL	13
2.5.	PAVIMENTOS.....	14
2.5.1.	Propiedades mecánicas de los pavimentos.....	14
2.6.	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO	16
2.6.1.	Cargas vehiculares y volumen de tránsito.	16
2.6.2.	Condiciones climáticas	16
2.6.3.	Capacidad de soporte de la subrasante.....	16
2.6.4.	Drenaje superficial y subsuperficial.....	17
2.6.5.	Materiales y calidad constructiva.....	17
2.6.6.	Mantenimiento vial.....	17
2.6.7.	Antigüedad y envejecimiento del pavimento.....	18
2.7.	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	18
2.7.1.	Pavimento flexible	18
2.7.2.	Pavimento rígido.....	20
2.8.	CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS	21
2.8.1.	Deterioro del pavimento	21
2.8.2.	Deterioros de la superficie	21
2.8.3.	Deterioros de la estructura	25
2.8.4.	Deterioros por defectos constructivos.....	28
2.9.	INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN VIAL CON DRONES	29
2.9.1.	Drones o VANT	30
2.9.2.	DRONES O VANT APLICADOS A INGENIERÍA CIVIL	30

2.9.3.	COMPONENTES PRINCIPALES DE UN DRON	31
2.10.	Tipos de drones	33
2.10.1.	Dron de ala fija.....	33
2.10.2.	Dron de ala móvil o multirrotores	33
2.11.	PARÁMETROS OPERACIONALES DE VUELO	34
2.11.1.	Sistemas de adquisición de datos	34
2.12.	FOTOGRAMETRÍA DIGITAL.....	36
2.12.1.	Principios geométricos de la fotogrametría	38
2.12.2.	Fotogrametría aérea mediante VANT	39
2.12.3.	Flujo de trabajo fotogramétrico.....	39
2.12.4.	Generación de ortomosaicos	40
2.12.5.	Modelos digitales de superficie y elevación.....	41
2.12.6.	Precisión fotogramétrica	41
2.12.7.	Procesamiento y análisis de imágenes	42
2.13.	DETECCIÓN VISUAL DE GRIETAS Y FISURAS	44
2.13.1.	La clasificación y evaluación de daños	44
2.13.2.	Índice de condición del pavimento (PCI).....	45
2.13.3.	Detección automatizada de daños superficiales	46
2.13.4.	Software especializado para fotogrametría	47
2.13.5.	Generación de ortofotos y modelos digitales	51
2.13.6.	Aplicación del software en inspección vial.....	52
2.13.7.	Monitoreo y mantenimiento vial.....	52
2.13.8.	Planificación del mantenimiento vial.....	53
2.14.	Uso de tecnologías emergentes para mantenimiento preventivo.....	54
3.	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	55
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	55

3.1.1.	Tipo.....	55
3.1.2.	Nivel.....	55
3.2.	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	56
3.2.1.	Método de investigación.....	56
3.2.2.	Enfoque de investigación.....	56
3.2.3.	Diseño de la investigación.....	56
3.2.4.	Diagrama del proceso metodológico.....	57
3.3.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO	58
3.3.1.	Población.....	58
3.3.2.	Muestra.....	58
3.3.3.	Muestreo.....	58
3.3.4.	Variables de estudio.....	58
3.4.	METODOLOGÍA OE1: DIAGNOSTICAR EL ESTADO SUPERFICIAL DE LAS PRINCIPALES VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA, MEDIANTE INSPECCIONES AÉREAS REALIZADAS CON DRONES, PARA OBTENER INFORMACIÓN ACTUALIZADA SOBRE LA PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE DETERIOROS EN EL PAVIMENTO	59
3.4.1.	Delimitación del área de estudio	60
3.4.2.	Selección de tramos viales.....	60
3.4.3.	Reconocimiento preliminar de campo	63
3.4.4.	Planificación del vuelo fotogramétrico	63
3.4.5.	Captura de imágenes aéreas con dron.....	66
3.5.	METODOLOGÍA EO2: PROCESAR Y ANALIZAR LAS IMÁGENES CAPTURADAS MEDIANTE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE IMÁGENES, PARA DETECTAR Y LOCALIZAR AUTOMÁTICAMENTE GRIETAS Y FISURAS PRESENTES EN LA SUPERFICIE VIAL.....	67
3.5.1.	Preparación de la base fotográfica	68

3.5.2.	Creación del proyecto general en Agisoft Metashape	69
3.5.3.	Alineación conjunta de fotografías	69
3.5.4.	Generación de nube de puntos del área de estudio	70
3.5.5.	Construcción del modelo digital de superficie.....	71
3.5.6.	Generación de la ortofoto general del área de estudio	71
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	73
4.1.	Resultados del diagnóstico superficial vial.....	75
4.2.	4.3. Resultados correspondientes a pavimento adoquinado	88
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
5.	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
5.1.	CONCLUSIONES	96
5.2.	RECOMENDACIONES	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de asfaltos utilizados en pavimentos flexibles	19
Tabla 2. Clasificación del hormigón según resistencia	21
Tabla 3. Configuración del UAV y de la cámara para los levantamientos	43
Tabla 4. Variables de estudio	58
Tabla 5. Criterios técnicos para la selección de tramos viales.....	62
Tabla 6. Parámetros aplicados en la planificación del vuelo fotogramétrico.....	65
Tabla 7. Registro de captura de imágenes aéreas.....	67
Tabla 8 Inventario depurado de observaciones de deterioro en pavimento flexible.....	74
Tabla 9 Distribución de observaciones y áreas consignadas por calle	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Red vial estatal de la Península de Santa Elena</i>	13
Figura 2. Sección transversal de un pavimento flexible	19
Figura 3. Sección transversal de un pavimento rígido.....	20
Figura 4. Desprendimiento por pérdida de agregados.....	22
Figura 5. Desprendimiento por pérdida de capa de rodadura	22
Figura 6. Deterioro por pérdida de base	22
Figura 7. Degradación del material de la capa de rodadura.....	23
Figura 8. Alisamiento por exudación de asfalto.....	24
Figura 9. Alisamiento por desgaste de áridos	24
Figura 10. Deterioro por exposición de agregados	25
Figura 11. Deformación por roderas.....	26
Figura 12. Deformación por canalizaciones.....	26
Figura 13. Deformación por baches profundos	27
Figura 14. Deformación por ondulaciones.....	27
Figura 15. Deterioro de la estructura por agrietamiento	28
Figura 16. Deterioro por defecto constructivo	29
Figura 17. Componentes de un dron.....	31
Figura 18. Dron de ala fija	33
Figura 19. Dron de ala móvil o multirotor	34
Figura 20. Fotogrametría con dron.	36
Figura 21. Índice de Condición del Pavimento (PCI) Custom PCI Rating Scale: Escala personalizada de clasificación del PCI.....	46
Figura 22. Pix4D Software.....	48
Figura 23. Software Agisoft Metashape.....	49
Figura 24. Mapa de ubicación del área de estudio en la cabecera cantonal de Santa Elena	60
Figura 25. Registro fotográfico del reconocimiento preliminar de campo.	63
Figura 26. Plan de vuelo fotogramétrico elaborado en DroneDeploy.....	66
Figura 27. Carga general de imágenes en Agisoft Metashape	69

Figura 28. Nube de puntos generada del área de estudio.....	70
Figura 29. Modelo digital del terreno.	71
Figura 30. Ortofoto general generada en Agisoft Metashape	72
Figura 31. Evidencia fotogramétrica del tramo 24 de Mayo, abscisas 0+125 a 0+162.....	76

“APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN LAS VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA”

Autores: Cedeño Párraga Josué Aarón
Orrala Salas Daniela Tahis

Tutor: Ing. Juan Rendon Marcillo Mg

RESUMEN

El deterioro progresivo de la infraestructura vial constituye una problemática relevante para la ingeniería civil, debido a que afecta la seguridad, la movilidad urbana, la comodidad de circulación y la vida útil de los pavimentos. La acción continua de las cargas vehiculares, las condiciones ambientales, el envejecimiento de los materiales y la ausencia de mantenimiento oportuno favorecen la aparición de fisuras, grietas, baches, desprendimientos y deformaciones superficiales. La presente investigación tuvo como objetivo aplicar la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados para identificar y categorizar grietas, fisuras y otros deterioros superficiales en las principales vías de la cabecera cantonal de Santa Elena. El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque predominantemente cuantitativo y un diseño comparativo de campo y gabinete. Se evaluaron nueve tramos viales urbanos, con una longitud total de 1.975 m, correspondientes a seis tramos de pavimento flexible y tres calles adoquinadas.

Para la adquisición de la información se utilizó un dron DJI Air 2S, equipado con una cámara de 20 megapíxeles. Los vuelos fueron planificados en DroneDeploy a una altura de 45 m, con traslapes longitudinal y lateral del 80 % y 70 %, respectivamente. Las imágenes capturadas fueron procesadas en Agisoft Metashape para generar una nube de puntos, un modelo digital de superficie y una ortofoto general georreferenciada. Estos productos se complementaron con inspecciones terrestres para validar la identificación y clasificación de los daños.

Los resultados permitieron reconocer fisuras longitudinales y transversales, grietas tipo piel de cocodrilo, baches, desprendimientos, asentamientos, separación de juntas y adoquines fracturados. Del total de tramos analizados, el 11,11 % presentó deterioro de severidad baja, el 55,56 % severidad media y el 33,33 % severidad alta. Los tramos T-05, T-06 y T-09 fueron considerados prioritarios para intervención.

Palabras clave: fotogrametría, vehículos aéreos no tripulados, pavimentos, grietas, fisuras, inspección vial, ortofoto.

“APPLICATION OF DRONE-BASED PHOTOGRAMMETRY FOR THE DETECTION OF CRACKS AND FISSURES ON ROADS IN THE URBAN CENTER OF SANTA ELENA”

Authors: Cedeño Párraga Josué Aarón
Orrala Salas Daniela Tahis

Advisor: Ing. Juan Rendon Marcillo Mg

ABSTRACT

The progressive deterioration of road infrastructure constitutes a significant challenge for civil engineering because it affects safety, urban mobility, ride comfort, and pavement service life. The continuous action of vehicular loads, environmental conditions, material aging, and the absence of timely maintenance contribute to the development of fissures, cracks, potholes, surface disintegration, and other superficial deformations.

The objective of this research was to apply photogrammetry using unmanned aerial vehicles to identify and categorize cracks, fissures, and other surface distresses on the main roads of the urban center of Santa Elena. The study was applied in nature, with a predominantly quantitative approach and a comparative field-and-office design. Nine urban road sections were evaluated, covering a total length of 1,975 m, including six flexible pavement sections and three cobblestone streets.

For data acquisition, a DJI Air 2S drone equipped with a 20-megapixel camera was used. The flights were planned in DroneDeploy at an altitude of 45 m, with 80% longitudinal overlap and 70% lateral overlap. The captured images were processed in Agisoft Metashape to generate a point cloud, a digital surface model, and a general georeferenced orthomosaic. These products were complemented by ground inspections to validate the identification and classification of the detected distresses.

The results made it possible to identify longitudinal and transverse fissures, alligator cracking, potholes, surface disintegration, settlements, joint separation, and fractured paving blocks. Of the total number of road sections analyzed, 11.11% showed low-severity deterioration, 55.56% showed medium-severity deterioration, and 33.33% showed high-severity deterioration. Sections T-05, T-06, and T-09 were considered priorities for intervention.

Keywords: photogrammetry, unmanned aerial vehicles, pavements, cracks, fissures, road inspection, orthomosaic.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de la infraestructura vial constituye uno de los principales desafíos urbanos debido a que existe la necesidad de conservar las condiciones funcionales, estructurales y de seguridad de los pavimentos durante su vida útil con el fin de garantizar la inversión pública (Ibrahim et al., 2024; Zheng et al., 2024). La evaluación oportuna de los deterioros superficiales se considera un pilar fundamental que sustenta la planificación de actividades de mantenimiento y rehabilitación vial que repercuten en garantizar la continua operación de las carreteras y caminos que componen la infraestructura vial urbana (AASHTO, 2021).

Los pavimentos se encuentran sometidos de manera permanente a cargas vehiculares repetitivas, variaciones ambientales y procesos naturales de envejecimiento de los materiales (X. Chen et al., 2021). La acción acumulativa de estos factores puede provocar una pérdida progresiva de la capacidad de servicio de la vía y favorecer la aparición de diferentes manifestaciones de deterioro (Zheng et al., 2024).

Entre las fallas más frecuentes se encuentran las fisuras longitudinales y transversales, las grietas por fatiga, los baches, los desprendimientos, las deformaciones y las pérdidas de material en la superficie de rodadura. La identificación y clasificación de estos daños proporciona información relevante para establecer el estado del pavimento y determinar las necesidades de intervención (Astor et al., 2023; Zhong et al., 2025).

La combinación de fotogrametría aérea, modelos tridimensionales, sistemas de información geográfica y técnicas de inteligencia artificial puede contribuir al desarrollo de procedimientos más objetivos, reproducibles y eficientes para la inspección vial (Feitosa et al., 2024; Zaman et al., 2025). Estas tecnologías permiten transformar las imágenes capturadas en información cuantificable y espacialmente localizada para apoyar la toma de decisiones sobre mantenimiento y rehabilitación (J. Chen et al., 2021; Zhao et al., 2022).

La aplicación de estas tecnologías permitiría elaborar un inventario georreferenciado de los deterioros visibles, identificar los sectores con mayor concentración de daños y generar mapas temáticos del estado superficial de las vías. Asimismo, los resultados podrían utilizarse como insumo técnico para establecer prioridades de intervención y optimizar la asignación de recursos destinados al mantenimiento vial.

En consecuencia, la presente investigación plantea la aplicación de la fotogrametría aérea mediante drones como una herramienta de apoyo para el diagnóstico superficial de las vías urbanas de la cabecera cantonal de Santa Elena. La metodología incluye la trazabilidad de los datos, la validación de las mediciones y la correspondencia entre los productos fotogramétricos y las condiciones verificadas directamente en campo.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La presencia de deterioros puede afectar la regularidad y comodidad de circulación, comprometer la seguridad de los usuarios y acelerar el desgaste de los vehículos, cuando las fallas no son atendidas oportunamente, su extensión y severidad pueden incrementarse y esto genera mayores requerimientos técnicos y económicos para la recuperación de la infraestructura (Castañeda et al., 2022; Mannering & Washburn, 2020).

Por estas razones la inspección periódica de la superficie vial constituye un componente esencial de los sistemas de gestión de pavimentos. La información obtenida durante estas evaluaciones permite localizar los daños, establecer sus características geométricas, determinar niveles de afectación y priorizar las actividades de conservación de acuerdo con criterios técnicos (Salem & Louzi, 2023).

En la cabecera cantonal de Santa Elena se reconoce la necesidad de disponer de información técnica actualizada sobre las condiciones de las principales vías urbanas. La presencia preliminarmente observable de fisuras, grietas, baches y otros deterioros en determinados sectores plantea la conveniencia de implementar un procedimiento sistemático para caracterizar su tipología, extensión y nivel de severidad, esta problemática no debe establecerse únicamente mediante apreciaciones visuales generales. Su determinación requiere un levantamiento técnico de campo, la aplicación de criterios estandarizados de evaluación y la obtención de evidencia georreferenciada que permita representar espacialmente los daños existentes (Giordan et al., 2020).

Las tecnologías geoespaciales como la fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados, también denominados UAV o drones, representa una alternativa tecnológica para la adquisición de información sobre el estado superficial de los pavimentos. Estos equipos

permiten capturar imágenes de alta resolución siguiendo trayectorias, alturas y porcentajes de solapamiento previamente definidos (Atencio et al., 2022; Feitosa et al., 2024; James et al., 2017)

Las imágenes obtenidas pueden procesarse mediante procedimientos fotogramétricos para generar productos digitales como ortomosaicos, nubes de puntos densas, mallas tridimensionales y modelos digitales de superficie. Estos productos permiten disponer de una representación espacial y georreferenciada del área inspeccionada que se traducen a modelos bidimensionales y tridimensionales facilita la visualización, localización y medición de determinados deterioros superficiales. Dependiendo de la resolución alcanzada y de las características del daño, es posible estimar parámetros como longitud, ancho, área, profundidad y volumen de baches, grietas y deformaciones (Ibrahim et al., 2024; Szypuła, 2024)

Por tanto, la fotogrametría mediante drones no debe entenderse únicamente como un procedimiento de captura de fotografías aéreas. Su aplicación debe formar parte de una metodología integral que incluya la planificación del vuelo, el procesamiento fotogramétrico, la identificación de deterioros, la validación de los resultados y la interpretación técnica de la información.

1.2. ANTECEDENTES

En el ámbito internacional, podemos citar los siguientes estudios:

En China, Zhu et al. (2022), desarrollaron el estudio titulado *Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV* [Detección de deterioros del pavimento mediante redes neuronales convolucionales e imágenes capturadas con UAV]. El objetivo de la investigación fue establecer un procedimiento automatizado para identificar y localizar diferentes tipos de deterioro en pavimentos mediante la integración de imágenes aéreas de alta resolución y algoritmos de aprendizaje profundo. Para ello, los investigadores configuraron una plataforma UAV, analizaron los parámetros de vuelo necesarios para garantizar la calidad de las imágenes y conformaron una base de datos denominada UAPD, integrada por 3151 imágenes de pavimentos y seis clases de deterioro. Posteriormente, compararon el desempeño de los algoritmos Faster R-CNN, YOLOv3 y YOLOv4 para la clasificación y localización de los daños.

Los resultados mostraron que YOLOv3 presentó el mejor desempeño entre las arquitecturas evaluadas, con una precisión media promedio —mean average precision o mAP— de 56,6 %. El estudio confirmó que las imágenes capturadas mediante UAV pueden emplearse para desarrollar sistemas de inspección no destructiva y automatizada del pavimento. No obstante, el nivel de precisión alcanzado evidencia que el método todavía puede producir omisiones o clasificaciones incorrectas, por lo que sus resultados no deben sustituir completamente la verificación técnica en campo. Además, el desempeño del modelo estuvo condicionado por la calidad y diversidad de las imágenes utilizadas durante el entrenamiento.

En Indonesia, Astor et al. (2023), realizaron la investigación denominada *Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey* [Implementación de vehículos aéreos no tripulados para la evaluación de la condición del pavimento]. El propósito del estudio fue determinar la viabilidad de utilizar fotografías obtenidas mediante drones para generar modelos bidimensionales y tridimensionales que permitieran interpretar y medir daños viales sin depender exclusivamente de las mediciones directas efectuadas en campo. Los autores aplicaron dos metodologías de evaluación: el *Pavement Condition Index* (PCI) y el *Surface Distress Index* (SDI). Los resultados calculados sobre los modelos fotogramétricos fueron posteriormente comparados con las mediciones manuales realizadas en los tramos estudiados.

Los autores determinaron que la precisión dimensional de los deterioros identificados en los modelos varió entre 75,72 % y 97,86 %. La grieta de borde presentó la menor precisión, mientras que la grieta reflejada en juntas alcanzó el valor más alto. En la comparación de los métodos de evaluación, el PCI obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,86$ y un error cuadrático medio de 121,333, mientras que el SDI alcanzó un $R^2 = 0,653$ y un error cuadrático medio de 2115. A partir de estos resultados, los investigadores concluyeron que el PCI presentó un mejor ajuste para evaluar la condición del pavimento mediante productos generados con UAV.

Como principal limitación, el estudio evidenció que la precisión fotogramétrica no fue uniforme para todas las tipologías de deterioro. Determinados daños, especialmente aquellos con bordes poco definidos o dimensiones reducidas, fueron más difíciles de representar y medir en los modelos digitales. Por consiguiente, la metodología requiere validaciones de campo y no debe asumirse que todos los deterioros pueden identificarse con el mismo grado de exactitud.

Por su parte Ibrahim et al. (2024), publicaron el estudio *Smart monitoring of road pavement deformations from UAV images by using machine learning* [Monitoreo inteligente de deformaciones del pavimento vial mediante imágenes UAV y aprendizaje automático]. La investigación tuvo como objetivo evaluar la efectividad de un procedimiento basado en aprendizaje automático para detectar y extraer grietas superficiales a partir de imágenes obtenidas mediante drones. La metodología comprendió la ejecución del vuelo, el procesamiento fotogramétrico de las imágenes, la generación de un ortomosaico digital y la combinación de información espectral RGB con atributos derivados de la matriz de coocurrencia de niveles de gris —GLCM—. Posteriormente, los autores aplicaron un árbol de clasificación, el detector de bordes Canny y operaciones morfológicas para mejorar la delimitación de las grietas.

El modelo basado en árbol de clasificación alcanzó una exactitud global del 86 %. Después de incorporar operaciones morfológicas sobre las imágenes clasificadas, la exactitud aumentó hasta el 96 %, lo que demostró que el preprocesamiento y posprocesamiento de las imágenes influyen considerablemente en la capacidad de reconocimiento de los daños. Asimismo, el algoritmo Canny presentó resultados favorables para delimitar los bordes de las grietas y generar información útil para apoyar las decisiones de mantenimiento vial.

Sin embargo, la investigación se concentró principalmente en la detección de grietas superficiales, por lo que sus resultados no pueden generalizarse directamente a todas las clases de deterioro, como baches, ahuellamientos, desprendimientos o reparaciones. Además, la clasificación puede verse afectada por la semejanza visual entre las grietas y otros elementos presentes en las imágenes, entre ellos sombras, cambios de textura, residuos y variaciones de color en el pavimento. En consecuencia, los resultados automatizados deben contrastarse con información de campo.

En conjunto, los tres antecedentes evidencian una evolución metodológica en la inspección de pavimentos. Zhu et al. (2022) se orientaron a la detección y clasificación automatizada de varios tipos de deterioro mediante redes neuronales convolucionales; Astor et al. (2023) demostraron la utilidad de los modelos fotogramétricos 2D y 3D para medir daños y calcular índices de condición; e Ibrahim et al. (2024) profundizaron en la extracción de grietas mediante aprendizaje automático, detección de bordes y operaciones morfológicas. Estos estudios coinciden en que la combinación de drones, fotogrametría y procesamiento digital puede

mejorar la adquisición y análisis de información vial, aunque también señalan la necesidad de controlar la calidad de las imágenes y validar los resultados mediante mediciones directas.

A partir de estos antecedentes, se identifica como oportunidad de investigación la aplicación integrada de estas tecnologías en un contexto urbano ecuatoriano:

En Ecuador, Jarrín Charro & Yáñez Cajas (2026), desarrollaron la investigación titulada *Evaluación del estado superficial del pavimento flexible mediante el método PCI utilizando fotogrametría con UAV y propuesta de mantenimiento de un tramo de la vía a Ibarra, en el sector de Pesillo, ubicado en la parroquia de Olmedo, cantón Cayambe*. El objetivo del estudio fue determinar la condición superficial de un tramo de pavimento flexible mediante la aplicación del Índice de Condición del Pavimento, de acuerdo con la norma ASTM D6433-24, utilizando imágenes de alta resolución capturadas mediante un vehículo aéreo no tripulado.

La metodología combinó el levantamiento fotogramétrico con la identificación, clasificación y determinación de la severidad de los deterioros presentes en la capa de rodadura. Los resultados establecieron un valor promedio de PCI de 59, correspondiente a una condición buena con tendencia a regular. Entre las fallas predominantes se identificaron fisuras longitudinales y transversales de severidad baja y media, incluyendo sectores previamente intervenidos que presentaban nuevos deterioros y desprendimientos.

El estudio concluyó que la fotogrametría UAV constituye una herramienta útil para obtener información detallada y apoyar la evaluación de pavimentos. No obstante, la metodología mantuvo la aplicación del PCI y la interpretación técnica como elementos fundamentales para determinar la condición real de la vía. Este antecedente presenta una relación directa con la presente investigación, debido a que demuestra la aplicabilidad de la fotogrametría aérea para identificar deterioros y establecer necesidades de mantenimiento dentro del contexto vial ecuatoriano.

(Martínez Pacheco & Narváez Tobar, 2024), en la Universidad Nacional de Chimborazo, desarrollaron el estudio *Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI*. La investigación tuvo como propósito analizar la capacidad de vehículos aéreos no tripulados de características convencionales para obtener

información geométrica de la superficie del pavimento y utilizarla en la determinación del Índice de Rugosidad Internacional.

La metodología se sustentó en la adquisición de imágenes aéreas y el procesamiento fotogramétrico de la superficie vial, con el propósito de generar información que permitiera representar las irregularidades longitudinales del pavimento. Posteriormente, los resultados obtenidos mediante el VANT fueron relacionados con el método IRI, empleado para evaluar la regularidad superficial y la condición funcional de las vías.

El principal aporte de esta investigación radica en demostrar el potencial de equipos VANT de disponibilidad comercial para apoyar la evaluación de la serviciabilidad vial. Sin embargo, la determinación del IRI mediante fotogrametría depende de la resolución del levantamiento, la precisión del modelo generado y la correcta representación del perfil longitudinal. Este antecedente resulta relevante porque amplía el uso de los drones más allá de la inspección visual, incorporando variables cuantitativas relacionadas con el desempeño y la vida útil del pavimento.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General.

Si se aplica tecnología de fotogrametría mediante drones (UAV) para la captura y procesamiento de imágenes aéreas de las principales vías de la cabecera cantonal de Santa Elena, entonces será posible identificar y categorizar de manera eficiente el grado de grietas y fisuras, generando información técnica confiable para la evaluación y gestión del mantenimiento vial.

1.3.2. Hipótesis específicas.

HE.1. Si se realizan inspecciones aéreas con drones sobre las principales vías de la cabecera cantonal de Santa Elena, entonces se podrá diagnosticar de manera precisa el estado superficial del pavimento y detectar la presencia de deterioros visibles.

HE.2. Si las imágenes obtenidas mediante drones son procesadas y analizadas utilizando técnicas de fotogrametría digital y análisis de imágenes, entonces será posible detectar y localizar automáticamente grietas y fisuras en la superficie vial.

HE.3. Si las grietas y fisuras detectadas son evaluadas mediante criterios técnicos de clasificación, entonces se podrá determinar objetivamente su tipo y nivel de severidad para caracterizar el estado de las vías.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

Aplicar tecnología de fotogrametría mediante drones (UAV) para la identificación y categorización del grado de grietas y fisuras en las principales vías de la cabecera cantonal de Santa Elena, mediante la captura y procesamiento de imágenes aéreas de alta resolución, para generar información técnica que contribuya a la evaluación del estado vial y a la planificación de acciones de mantenimiento.

1.4.2. Objetivos específicos.

OE.1. Diagnosticar el estado superficial de las principales vías de la cabecera cantonal de Santa Elena, mediante inspecciones aéreas realizadas con drones, para obtener información actualizada sobre la presencia y distribución de deterioros en el pavimento.

OE.2. Procesar y analizar las imágenes capturadas mediante técnicas de fotogrametría digital y herramientas de análisis de imágenes, para detectar y localizar automáticamente grietas y fisuras presentes en la superficie vial.

OE.3. Clasificar el tipo y nivel de severidad de las grietas y fisuras identificadas, mediante criterios técnicos de evaluación del deterioro vial, para establecer una caracterización objetiva del estado de las vías estudiadas.

1.5. ALCANCE

El presente estudio se enfocará exclusivamente en la evaluación superficial del estado de las principales vías urbanas de la cabecera cantonal de Santa Elena. El ámbito de análisis comprenderá tramos seleccionados con base en criterios de uso, deterioro visible y accesibilidad. No se incluirán aspectos estructurales profundos como sub-base o base granular, ni se considerará el análisis del tránsito vehicular o factores geotécnicos. El estudio tampoco contempla vías rurales ni sectores periurbanos.

Los resultados obtenidos estarán orientados a generar insumos técnicos que puedan ser utilizados por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal y otras entidades responsables del mantenimiento vial urbano, para mejorar la planificación de intervenciones y optimizar la asignación de recursos.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables independientes.

- Aplicación de fotogrametría con drones UAV
- Estado del pavimento de las vías
- Condiciones hidrológicas, topográficas y geotécnicas del área analizada

1.6.2. Variables Dependientes

- Altura de vuelo del dron.
- Resolución espacial de las imágenes.
- Calidad de las ortofotos generadas.
- Cobertura del área inspeccionada.
- Precisión del modelo fotogramétrico.
- Georreferenciación de los daños detectados.

CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

2.1. INFRAESTRUCTURA VIAL URBANA

La infraestructura vial urbana corresponde al conjunto de elementos físicos destinados a garantizar la movilidad eficiente de personas, bienes y servicios dentro de áreas urbanas, integrando componentes como carreteras, calles, avenidas, intersecciones, puentes y demás estructuras destinadas al transporte terrestre. Su función principal consiste en facilitar la conectividad territorial y permitir el adecuado funcionamiento de las actividades económicas, sociales y productivas dentro de las ciudades (Chuquiguanga-Auquilla, 2024). La infraestructura vial constituye uno de los componentes fundamentales del sistema de transporte moderno debido a su influencia directa sobre la accesibilidad y el desarrollo territorial (Yunda et al., 2026).

Desde la perspectiva de la ingeniería civil, la infraestructura vial representa un componente estratégico dentro del desarrollo urbano, debido a que influye directamente sobre la movilidad, competitividad económica, accesibilidad territorial y eficiencia de los sistemas de transporte. Diversos estudios indican que la infraestructura vial trasciende la función de conectividad física, convirtiéndose en un elemento determinante para el crecimiento económico, la integración territorial y el desarrollo sostenible de las ciudades (Chuquiguanga-Auquilla, 2024). Asimismo, una adecuada infraestructura vial permite optimizar tiempos de desplazamiento, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia logística dentro de los sistemas urbanos (Chuquiguanga-Auquilla, 2024)

2.1.1. Clasificación funcional de las vías.

La clasificación funcional de las vías corresponde al proceso mediante el cual las infraestructuras viales son organizadas según el papel que desempeñan dentro del sistema de transporte, considerando aspectos relacionados con movilidad, accesibilidad, volumen de tránsito y conectividad territorial. Esta clasificación permite establecer jerarquías viales que facilitan la planificación, diseño, operación y mantenimiento de las redes de transporte urbano y rural (AASHTO, 2018; FHWA, 2013)

De manera general, las vías pueden clasificarse funcionalmente en arteriales, colectoras y locales. Las vías arteriales cumplen la función de movilizar grandes volúmenes de tránsito a

mayores velocidades y conectar sectores estratégicos de las ciudades o regiones. Las vías colectoras actúan como elementos intermedios encargados de canalizar el tránsito proveniente de vías locales hacia sistemas arteriales, mientras que las vías locales tienen como objetivo principal proporcionar acceso directo a propiedades, viviendas y actividades urbanas, priorizando la accesibilidad sobre la movilidad (FHWA, 2013).

En Ecuador, la estructura vial nacional se organiza mediante la Red Vial Estatal, Provincial y Cantonal, las cuales integran distintos niveles funcionales dentro del sistema de transporte terrestre. La Red Vial Estatal comprende principalmente corredores arteriales y vías colectoras administradas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, mientras que las redes provinciales y cantonales incluyen vías terciarias, caminos vecinales y sistemas urbanos de circulación local (MTOP, 2013). Esta clasificación resulta fundamental para la gestión vial debido a que permite priorizar intervenciones, optimizar recursos y establecer estrategias diferenciadas de mantenimiento según la función que cumple cada vía dentro del sistema de transporte.

2.1.2. Importancia Socioeconómica de la infraestructura vial.

La infraestructura vial constituye uno de los componentes más importantes para el desarrollo económico y social de un territorio, debido a que facilita la movilidad de personas, bienes y servicios, permitiendo la integración entre sectores productivos, centros urbanos y mercados regionales. Diversos estudios señalan que la disponibilidad y calidad de la infraestructura de transporte influyen directamente sobre la productividad, competitividad económica y capacidad de crecimiento territorial, convirtiéndose en un factor determinante para el desarrollo sostenible de las ciudades y regiones (Calderón & Servén, 2014; Chuquiguanga-Auquilla, 2024).

Desde una perspectiva económica, las redes viales eficientes permiten reducir tiempos de desplazamiento, disminuir costos operativos de transporte y optimizar las cadenas logísticas, favoreciendo el intercambio comercial y el acceso a mercados. Asimismo, una adecuada infraestructura vial contribuye al incremento de inversiones, generación de empleo y fortalecimiento de actividades productivas locales, especialmente en sectores dependientes de la conectividad territorial como turismo, comercio, agricultura e industria (Calderón & Servén, 2014; Yunda et al., 2026).

En el ámbito social, la infraestructura vial influye directamente sobre la accesibilidad a servicios esenciales como educación, salud, comercio y espacios administrativos, contribuyendo a mejorar la calidad de vida y reducir desigualdades territoriales. De igual manera, la existencia de sistemas viales adecuados favorece la integración urbana, mejora la conectividad entre comunidades y fortalece la movilidad cotidiana de la población (Bruzelius et al., 2002).

Por otra parte, las deficiencias en infraestructura vial pueden generar efectos negativos significativos, tales como incremento en costos de transporte, reducción de la competitividad económica, disminución de la seguridad vial y limitaciones en el desarrollo territorial. Por esta razón, la planificación, conservación y monitoreo continuo de las redes viales constituyen elementos fundamentales dentro de la gestión de infraestructura pública y del desarrollo urbano sostenible (Calderón & Servén, 2014).

2.2. INFRAESTRUCTURA VIAL DE ECUADOR

En Ecuador, la infraestructura vial constituye un elemento fundamental para el desarrollo económico, social y territorial del país, ya que permite la conectividad entre provincias, cantones y sectores productivos, en este contexto la Red Vial Nacional se encuentra conformada por la Red Vial Estatal, la Red Vial Provincial y la Red Vial Cantonal, las cuales integran carreteras y caminos de uso público que se encuentran bajo la normativa y administración estatal correspondiente, dentro de esta estructura la Red Vial Estatal comprende vías primarias y secundarias que están administradas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), mientras que las redes provinciales y cantonales abarcan principalmente vías terciarias y caminos vecinales (Saltos, 2021).

De acuerdo con información oficial del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, la Red Vial Estatal ecuatoriana posee aproximadamente 9.660 km de carreteras distribuidas en todo el territorio nacional, las cuales cumplen funciones estratégicas para la movilidad, el comercio y la integración regional, además, el sistema vial ecuatoriano se encuentra dividido en corredores arteriales y vías colectoras que forman parte de la malla vial estratégica del país (MTO, 2025,).

2.3. INFRAESTRUCTURA VIAL DE LA PROVINCIA DE SANTA ELENA

En relación con la provincia de Santa Elena, los registros oficiales señalan que esta cuenta con aproximadamente 141,68 km de Red Vial Estatal (Agencia nacional de tránsito, 2023), lo que la ubica entre las provincias con menor extensión de red vial estatal en el Ecuador, no obstante, su relevancia turística, comercial y administrativa mantiene un flujo vehicular constante en su territorio, en especial dentro de los sectores urbanos de la cabecera cantonal de Santa Elena, donde el deterioro progresivo del pavimento se presenta como una problemática significativa para la infraestructura vial local. La vía principal es la E-40.

Figura 1.

Red vial estatal de la Península de Santa Elena



Fuente: (Agencia nacional de tránsito, 2023)

2.4. PROBLEMÁTICAS ASOCIADAS AL DETERIORO VIAL

El deterioro de las vías urbanas se origina principalmente por el incremento del parque automotor, la presencia de tránsito pesado, las condiciones climáticas y la limitada aplicación de mantenimiento preventivo, lo cual deriva en la aparición de grietas, fisuras, baches y deformaciones superficiales (Federal Highway Administration, 2021), afectaciones que reducen la calidad de la movilidad y comprometen la seguridad vial en este sentido las entidades responsables de la infraestructura vial requieren implementar mecanismos de monitoreo y evaluación técnica que faciliten la identificación oportuna de los daños existentes, así como la

planificación de intervenciones eficientes orientadas a la conservación de las vías urbanas (López Yumiguan, 2017).

2.5. PAVIMENTOS

Los pavimentos constituyen elementos esenciales dentro de la infraestructura vial debido a que garantizan condiciones adecuadas de movilidad, seguridad y transitabilidad vehicular, en este sentido se definen como un sistema conformado por capas superpuestas, relativamente horizontales, diseñadas técnicamente con materiales apropiados y debidamente compactados, cuya función principal consiste en resistir y distribuir las cargas generadas por el tránsito hacia la subrasante durante el período de vida útil para el cual han sido diseñados (Alfonso Montejó Fonseca, 2002).

La ingeniería de pavimentos ha experimentado una evolución significativa en los últimos años como consecuencia del incremento del tráfico vehicular y de la necesidad de desarrollar infraestructuras viales más sostenibles y resistentes, en este contexto diversos autores señalan que los pavimentos modernos deben asegurar resistencia estructural, comodidad de circulación y seguridad vial, especialmente en entornos urbanos donde las cargas dinámicas y las condiciones ambientales aceleran el deterioro superficial (J. Chen et al., 2021).

Asimismo, un diseño adecuado junto con un mantenimiento oportuno de los pavimentos contribuye directamente al desarrollo económico, a la conectividad territorial y a la optimización de los sistemas de transporte urbano, ya que una gestión eficiente permite reducir costos de mantenimiento correctivo y extender la vida útil de las vías (León Torres et al., 2025).

2.5.1. Propiedades mecánicas de los pavimentos

Las propiedades mecánicas de los pavimentos corresponden al conjunto de características físicas y estructurales que determinan la capacidad del sistema para resistir las cargas vehiculares, deformaciones y esfuerzos generados durante su vida útil. Estas propiedades permiten evaluar el comportamiento mecánico del pavimento frente a sollicitaciones repetitivas, variaciones ambientales y condiciones operativas, constituyendo uno de los principales criterios utilizados durante el diseño y evaluación estructural de carreteras (Huang, Y.H., 2004).

Una de las propiedades mecánicas más importantes corresponde a la resistencia estructural, definida como la capacidad del pavimento para soportar cargas vehiculares sin experimentar fallas prematuras o deformaciones excesivas. Esta propiedad depende de factores como la calidad de los materiales, el espesor de las capas, la capacidad de soporte del suelo y las características del tránsito vehicular (Alfonso Montejo Fonseca, 2002; ASTM, 2023).

Asimismo, la rigidez constituye una propiedad fundamental debido a que representa la capacidad del pavimento para distribuir esfuerzos hacia las capas inferiores mediante la reducción de deformaciones producidas por cargas externas. Pavimentos con mayor rigidez presentan menores deformaciones superficiales; sin embargo, pueden ser más susceptibles a agrietamientos asociados a esfuerzos térmicos o fatiga estructural (Yoder & Witczak, 1975).

Otra propiedad relevante corresponde a la elasticidad, entendida como la capacidad del material para recuperar su forma original después de ser sometido a una carga. En pavimentos flexibles esta propiedad resulta particularmente importante debido a que las mezclas asfálticas presentan comportamientos viscoelásticos, permitiendo absorber parcialmente deformaciones ocasionadas por el tránsito repetitivo (Bocci & Carpani, 2026).

Por otra parte, la resistencia a la fatiga representa la capacidad del pavimento para soportar cargas repetitivas durante largos períodos sin desarrollar grietas o fallas estructurales significativas. Este fenómeno adquiere especial relevancia en vías urbanas con elevado volumen vehicular, donde la repetición continua de cargas acelera procesos de deterioro superficial y estructural (Huang, Y.H., 2004).

Finalmente, la resistencia a la deformación permanente constituye una propiedad esencial relacionada con la capacidad del pavimento para evitar hundimientos, ahuellamientos y deformaciones irreversibles generadas por cargas repetidas. La adecuada combinación entre resistencia, rigidez, elasticidad y comportamiento frente a la fatiga permite mejorar significativamente el desempeño estructural y funcional de los pavimentos durante su vida útil.

2.6. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO

2.6.1. Cargas vehiculares y volumen de tránsito.

El tránsito vehicular constituye uno de los factores más importantes que influyen en el desempeño y deterioro de los pavimentos, debido a que las cargas repetitivas generadas por el paso constante de vehículos producen esfuerzos internos que ocasionan deformaciones permanentes, fatiga estructural y progresiva pérdida de capacidad funcional. La magnitud del deterioro depende no únicamente del volumen de tránsito, sino también del peso de los ejes, frecuencia de carga, velocidad de circulación y presencia de vehículos pesados. Investigaciones realizadas dentro del programa Long-Term Pavement Performance (LTPP) han demostrado que el tránsito constituye uno de los principales condicionantes del comportamiento estructural y funcional de los pavimentos a largo plazo (Zhao et al., 2022).

2.6.2. Condiciones climáticas.

Las condiciones climáticas influyen significativamente sobre el comportamiento de los materiales que conforman el pavimento. Variables como temperatura, precipitación, humedad y exposición solar modifican las propiedades físicas y mecánicas de las capas estructurales, acelerando la aparición de deterioros superficiales y estructurales. Los cambios térmicos producen fenómenos de expansión y contracción que favorecen la formación de grietas térmicas, mientras que la presencia de humedad puede reducir la capacidad portante de la subrasante y acelerar la degradación del pavimento. Estudios realizados por la Federal Highway Administration indican que los factores ambientales pueden representar aproximadamente un tercio del deterioro total observado en pavimentos flexibles sometidos a condiciones normales de tráfico (Saleh & Hashemian, 2022).

2.6.3. Capacidad de soporte de la subrasante

La subrasante constituye la base sobre la cual descansa toda la estructura del pavimento, por lo que su comportamiento influye directamente en el desempeño global de la vía. Una baja capacidad portante incrementa la susceptibilidad a asentamientos diferenciales, deformaciones permanentes y agrietamientos prematuros.

La rigidez de la subrasante suele evaluarse mediante parámetros como el módulo resiliente, considerado uno de los indicadores más utilizados para representar la respuesta elástica de los materiales granulares y del suelo ante cargas repetidas. Subrasantes con bajos valores de rigidez requieren estructuras más robustas para evitar fallas prematuras (Saha et al., 2021).

2.6.4. Drenaje superficial y subsuperficial

El agua constituye uno de los factores más críticos para el deterioro del pavimento. Sistemas de drenaje deficientes favorecen la infiltración hacia las capas inferiores, disminuyendo la resistencia mecánica de los materiales y generando deformaciones, pérdida de soporte y aceleración del deterioro superficial.

Diversos estudios indican que la presencia prolongada de humedad incrementa significativamente la ocurrencia de agrietamientos, ahuellamientos y fallas relacionadas con pérdida de capacidad estructural, particularmente en zonas sometidas a elevadas precipitaciones o deficiente evacuación hidráulica (Wang et al., 2020).

2.6.5. Materiales y calidad constructiva

La selección adecuada de materiales y la correcta ejecución constructiva influyen directamente sobre el desempeño del pavimento durante su vida útil. Factores como compactación deficiente, uso de agregados inadecuados, errores constructivos o incumplimiento de especificaciones técnicas pueden reducir considerablemente la resistencia estructural y acelerar la aparición de deterioros. Investigaciones recientes señalan que propiedades como el módulo resiliente, humedad, espesor de capas y características de los materiales constituyen variables fundamentales dentro de los modelos modernos de desempeño de pavimentos (K.-H. Lee et al., 2012) (Deng & Shi, 2023).

2.6.6. Mantenimiento vial

Las actividades de mantenimiento representan un componente esencial para conservar las condiciones funcionales y estructurales del pavimento. La ausencia de mantenimiento preventivo permite que deterioros menores evolucionen hacia daños más severos,

incrementando costos de rehabilitación y reduciendo la seguridad vial. Los sistemas modernos de gestión vial consideran que intervenciones tempranas permiten reducir costos operativos y prolongar significativamente la vida útil del pavimento mediante acciones preventivas oportunas (Peraka & Biligiri, 2020).

2.6.7. Antigüedad y envejecimiento del pavimento

Con el paso del tiempo, los materiales que conforman el pavimento experimentan procesos naturales de envejecimiento asociados a oxidación, exposición ambiental y cargas repetitivas. En pavimentos asfálticos, este proceso provoca pérdida progresiva de flexibilidad, aumento de rigidez y mayor susceptibilidad a la aparición de grietas y fisuras. El envejecimiento constituye un factor determinante dentro de los modelos de deterioro, debido a que influye directamente sobre la evolución de daños superficiales y estructurales a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura vial (X. Chen et al., 2021).

2.7. TIPOS DE PAVIMENTOS

2.7.1. Pavimento flexible.

Los pavimentos flexibles se componen de mezclas asfálticas elaboradas a partir de derivados del petróleo, los cuales aportan propiedades impermeabilizantes, adherentes y flexibles que facilitan la distribución progresiva de las cargas vehiculares hacia las capas inferiores del terreno, además este tipo de estructura se distingue por su capacidad de adaptarse a pequeñas deformaciones generadas por el tránsito y por las variaciones del suelo de fundación (Limonés Gabino, 2021).

Su configuración estructural integra varias capas como subrasante, subbase, base y carpeta asfáltica, en este sistema la subbase cumple una función de transición y soporte estructural al reducir las deformaciones provenientes de la subrasante (Federal Highway Administration, 2021), mientras que la base se encarga de distribuir las cargas hacia las capas inferiores y aportar resistencia estructural, por su parte la carpeta asfáltica actúa como superficie de rodadura, proporcionando impermeabilización, confort y seguridad al tránsito (figura 2) (Limonés Gabino, 2021).

En cuanto a los materiales empleados, destacan el cemento asfáltico, las emulsiones asfálticas y los asfaltos cortados o cutbacks, los cuales contribuyen a mejorar la adherencia entre capas, garantizar la impermeabilidad del sistema y aumentar la durabilidad del pavimento (Alfonso Montejo Fonseca, 2002). A continuación, en la Tabla 1 se describen los tipos de asfaltos utilizados en pavimentos flexibles.

Figura 2.

Sección transversal de un pavimento flexible



Fuente: (Giordani & Leone, 2014)

Tabla 1.

Tipos de asfaltos utilizados en pavimentos flexibles

Tipo de asfalto	Características principales
Cemento asfáltico	Material impermeabilizante y adherente utilizado en mezclas asfálticas
Emulsión asfáltica	Mezcla de asfalto y agua utilizada a temperatura ambiente
Asfalto cortado (Cutback)	Asfalto diluido con solventes para facilitar su aplicación

Dentro de la construcción de pavimentos flexibles se aplican tratamientos como el riego de imprimación y el riego de liga, el primero se utiliza sobre bases granulares con el fin de cohesionar partículas superficiales e impermeabilizar la capa, mientras que el segundo mejora la adherencia entre capas asfálticas nuevas y existentes (Giordani & Leone, 2014).

El diseño de este tipo de pavimento depende de variables como el tránsito vehicular, las condiciones climáticas, el drenaje y la capacidad de soporte del suelo, además se consideran parámetros como el número estructural, el módulo resiliente y la serviciabilidad, los cuales

permiten definir espesores adecuados para cada capa y asegurar una vida útil eficiente (Burgos, 2014).

2.7.2. Pavimento rígido

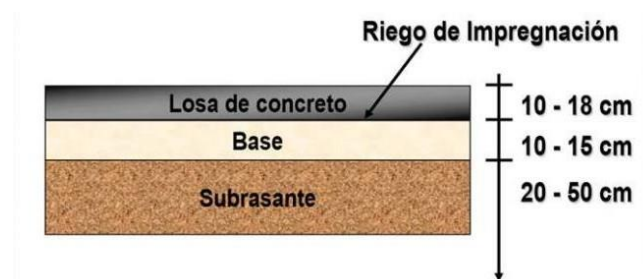
Los pavimentos rígidos están formados principalmente por losas de hormigón hidráulico, material compuesto por cemento, agua y agregados pétreos. Su principal característica es la elevada resistencia a la flexión y a las cargas concentradas producidas por el tránsito vehicular, permitiendo una distribución más amplia de los esfuerzos sobre la subrasante (Burgos, 2014).

El hormigón utilizado en pavimentación posee alta durabilidad, resistencia mecánica y baja deformabilidad, además de presentar buena resistencia frente a agentes climáticos y abrasivos. Debido a estas propiedades, los pavimentos rígidos tienen una vida útil aproximada de 20 a 40 años, aunque presentan costos iniciales más elevados que los pavimentos flexibles (Almeda, 2020).

La estructura del pavimento rígido está compuesta por subrasante, sub-base, base y losa de concreto. La sub-base ayuda a evitar el bombeo y mejora el apoyo uniforme de la losa; la base incrementa la capacidad estructural y controla cambios volumétricos; mientras que la losa de hormigón constituye la superficie de rodadura y soporta directamente las cargas vehiculares (figura 2) (Almeda, 2020).

Figura 3.

Sección transversal de un pavimento rígido



Fuente: (Giordani & Leone, 2014)

Los pavimentos rígidos pueden clasificarse según el tipo de refuerzo empleado, existiendo pavimentos de hormigón simple, hormigón con refuerzo, hormigón armado y hormigón postensado.

Tabla 2.

Clasificación del hormigón según resistencia

Tipo de hormigón	Resistencia
H5 – H50	Resistencia a compresión de 5 a 50 MPa
HF3 – HF6	Resistencia a flexotracción de 3 a 6 MPa

El diseño de pavimentos rígidos considera variables como el tránsito proyectado, la capacidad de soporte del suelo, la resistencia a la flexotracción del hormigón, el clima y la vida útil esperada. Estos parámetros permiten definir el espesor adecuado de la losa y garantizar el correcto comportamiento estructural del pavimento durante su periodo de servicio (Giordani & Leone, 2014).

2.8. CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS

2.8.1. Deterioro del pavimento

El deterioro del pavimento corresponde al conjunto de daños y alteraciones que afectan progresivamente la estructura y funcionalidad de una vía como consecuencia del tránsito vehicular, condiciones climáticas, envejecimiento de los materiales y falta de mantenimiento. Estas afectaciones reducen la capacidad estructural del pavimento y disminuyen la seguridad y comodidad de circulación vehicular.

2.8.2. Deterioros de la superficie

2.8.2.1. Desprendimientos

Los desprendimientos consisten en la pérdida progresiva de partículas de agregado o fragmentos de la mezcla asfáltica superficial debido al desgaste ocasionado por el tránsito y factores ambientales. Este deterioro genera una superficie irregular y favorece el ingreso de agua hacia las capas inferiores del pavimento, acelerando el deterioro estructural de la vía. Entre sus principales manifestaciones se encuentran la pérdida parcial de agregados, el desprendimiento de la capa de rodadura y la pérdida del material de base que sostiene la carpeta asfáltica (DIRCAIBEA, 2002; Llopiz & Pérez, 2020).

Figura 4.

Desprendimiento por pérdida de agregados



Nota. Evidencia del desprendimiento por pérdida de agregados. Registro fotográfico realizado por los autores.

Figura 5.

Desprendimiento por pérdida de capa de rodadura.



Nota: Desprendimiento de la última capa delgada, de tratamientos superficiales. Registro fotográfico realizado por los autores.

Figura 6.

Deterioro por pérdida de base



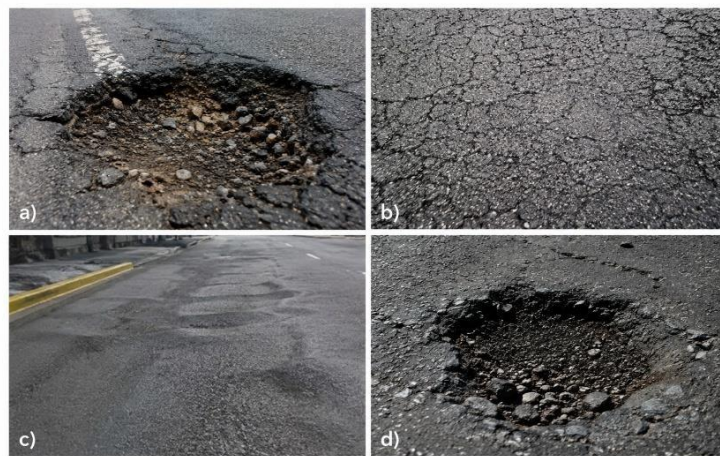
Nota: Deterioro por pérdida de base. Registro fotográfico realizado por los autores.

Dentro de esta categoría también se incluyen los baches, definidos como cavidades localizadas con pérdida de material del pavimento; la meteorización, caracterizada por pérdidas superficiales de mezcla bituminosa que dejan expuestas capas inferiores; los

blandones, asociados a hundimientos localizados en zonas con deficiente drenaje y materiales deformables; y los huecos, que corresponden a pequeñas depresiones en forma de tazón sobre la superficie de la vía. Estos daños pueden originarse tanto por fallos superficiales como por deficiencias estructurales en las capas inferiores del pavimento (Llopiz & Pérez, 2020).

Figura 7.

Degradación del material de la capa de rodadura.



Nota: a) Bache; b) Meteorización; c) Blandon; d) Hueco. Deterioro por pérdida de base. Registro fotográfico realizado por los autores.

2.8.2.2. Alisamientos

El alisamiento corresponde a la disminución de la textura superficial del pavimento ocasionada por la acción continua de las llantas sobre la carpeta asfáltica. Este fenómeno reduce la adherencia entre el neumático y la vía, incrementando el riesgo de deslizamientos vehiculares. Una de sus principales manifestaciones es la exudación de asfalto, caracterizada por la presencia de ligante asfáltico sin agregado en la superficie, como se aprecia en la Figura 7. De igual forma, el desgaste de los áridos provoca que los agregados presenten caras planas embebidas en el asfalto, disminuyendo aún más la rugosidad superficial, tal como se observa en la Figura 8 (DIRCAIBEA, 2002).

Figura 8.

Alisamiento por exudación de asfalto



Nota: Presencia de asfalto sin agregado (árido) en la superficie. Registro fotográfico realizado por los autores.

Figura 9.

Alisamiento por desgaste de áridos



Nota: Presencia de agregados (áridos) que presentan una cara plana en la superficie, generalmente embebidos en el ligante. Registro fotográfico realizado por los autores.

2.8.2.3. Exposición de agregados

La exposición de agregados ocurre cuando el ligante asfáltico se desgasta o pierde adherencia, dejando visibles los materiales pétreos de la mezcla asfáltica. Esta condición acelera el desgaste superficial y favorece la aparición de nuevos deterioros en la vía, debido a la pérdida de cohesión de la carpeta asfáltica. En la Figura 9 se observa la presencia de agregados expuestos y parcialmente embebidos en el ligante (DIRCAIBEA, 2002).

Figura 10.

Deterioro por exposición de agregados.



Nota: Presencia de agregados (áridos) que presentan una cara plana en la superficie, generalmente embebidos en el ligante (asfalto). Fuente: (DIRCAIBEA, 2002)

2.8.3. Deterioros de la estructura

2.8.3.1. Deformaciones

Las deformaciones son alteraciones en la geometría original del pavimento que afectan la regularidad superficial de la vía. Entre las más comunes se encuentran los hundimientos, ahuellamientos y ondulaciones, ocasionados principalmente por cargas repetitivas, baja capacidad estructural y deformaciones permanentes de las capas inferiores (Llopiz & Pérez, 2020). Las roderas corresponden a hundimientos longitudinales localizados en las zonas de circulación vehicular, acompañados de elevaciones laterales, como se muestra en la Figura 10. Por otro lado, las canalizaciones presentan deformaciones más amplias en el perfil transversal del pavimento, afectando tanto las rodadas como las áreas vecinas, tal como se evidencia en la Figura 11. También pueden presentarse baches profundos, caracterizados por hundimientos localizados acompañados de agrietamientos y pérdida de material, como se observa en la Figura 12. Asimismo, las ondulaciones generan crestas y valles sucesivos que alteran la regularidad de la superficie vial, tal como se aprecia en la Figura 13 (DIRCAIBEA, 2002).

Figura 11.

Deformación por roderas



Nota: Deformación del perfil transversal por hundimiento a lo largo de las rodadas, con la aparición de cordones laterales a cada lado de la rodera. Registro fotográfico realizado por los autores.

Figura 12.

Deformación por canalizaciones



Nota: Deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas. Fuente: (DIRCAIBEA, 2002)

Figura 13.

Deformación por baches profundos



Nota: Hundimiento local de la calzada. Registro fotográfico realizado por los autores.

Figura 14.

Deformación por ondulaciones



Nota: Deformaciones del perfil longitudinal con crestas y valles regularmente espaciados a distancias cortas. Fuente: (DIRCAIBEA, 2002)

2.8.3.2. Agrietamientos

Los agrietamientos corresponden a fracturas o discontinuidades que aparecen sobre la superficie del pavimento debido a esfuerzos repetitivos, fatiga estructural, cambios térmicos o envejecimiento del betún. Las grietas permiten el ingreso de agua hacia las capas internas, acelerando el deterioro estructural del pavimento. En la Figura 14 se observa un agrietamiento longitudinal paralelo al eje de la carretera, considerado un deterioro importante debido a que facilita la infiltración de agua y debilita progresivamente la estructura vial (DIRCAIBEA, 2002).

Los agrietamientos pueden clasificarse en grietas longitudinales, orientadas en la dirección del tráfico; grietas transversales, perpendiculares al flujo vehicular; y grietas en forma de piel de cocodrilo, caracterizadas por una red interconectada de fisuras que evidencian fatiga estructural avanzada del pavimento (Llopiz & Pérez, 2020).

Figura 15.

Deterioro de la estructura por agrietamiento



Nota. Evidencia de deterioro superficial caracterizado por fisuración longitudinal y agrietamiento reticular generalizado. Registro fotográfico realizado por los autores.

2.8.4. Deterioros por defectos constructivos

Los defectos constructivos son daños asociados a errores durante el diseño, construcción o compactación del pavimento. Estos problemas pueden originarse por el uso de materiales inadecuados, deficiente compactación o fallas en los

procedimientos de ejecución, ocasionando deterioros prematuros y reducción de la vida útil de la infraestructura vial. Este tipo de deterioro suele presentarse en zonas donde existen instalaciones subterráneas o intervenciones previas, generando hundimientos localizados y grietas con patrones definidos, como se aprecia en la Figura 15 (Llopiz & Pérez, 2020).

Figura 16.

Deterioro por defecto constructivo



Nota: Deterioros que se producen por defectos en la construcción de instalaciones bajo los pavimentos. Siguen un patrón bien definido en concordancia con la instalación. Registro fotográfico realizado por los autores.

2.9. INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN VIAL CON DRONES

La inspección y evaluación vial mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones) constituye una alternativa moderna frente a los métodos tradicionales de inspección en campo, debido a su capacidad para optimizar la recolección de datos, mejorar la precisión de los análisis y reducir los tiempos operativos. El uso de drones en la evaluación de infraestructuras de transporte ha cobrado relevancia en los últimos años como una solución eficiente para el monitoreo del estado de los pavimentos, especialmente en redes viales extensas donde los métodos convencionales resultan costosos y lentos (Feitosa et al., 2024).

El empleo de UAV permite la captura de imágenes aéreas de alta resolución que facilitan la identificación de deterioros superficiales del pavimento, como grietas, baches y deformaciones. Estas imágenes pueden ser procesadas mediante técnicas de fotogrametría digital, como la estructura desde el movimiento (*Structure from Motion – SfM*), permitiendo la generación de modelos tridimensionales (3D) y

ortomosaicos que representan con precisión la superficie de la vía. Estos productos digitales constituyen una base fundamental para el análisis geométrico y la evaluación del estado funcional del pavimento (Feitosa et al., 2024).

2.9.1. Drones o VANT

Los drones o VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados) constituyen una de las tecnologías más utilizadas actualmente en el campo de la ingeniería civil debido a su capacidad para obtener información geoespacial precisa, imágenes aéreas y modelos digitales del terreno de manera rápida y eficiente. Su aplicación ha incrementado considerablemente en actividades relacionadas con topografía, cartografía, inspección de infraestructura y monitoreo de obras civiles (Colomina & Molina, 2014).

2.9.2. DRONES O VANT APLICADOS A INGENIERÍA CIVIL

El uso de drones en ingeniería civil ha permitido optimizar procesos de control y seguimiento de obras, reduciendo costos operativos y tiempos de ejecución. Estas tecnologías facilitan el monitoreo de carreteras, vías férreas y proyectos constructivos mediante la captura periódica de información aérea de alta resolución (Zaman et al., 2025).

Asimismo, los drones son ampliamente utilizados en cartografía y topografía para la generación de ortofotografías, levantamientos topográficos y modelos digitales del terreno. Según Morales (2016), la incorporación de UAV en trabajos cartográficos permite obtener datos espaciales en menor tiempo y con alta resolución, superando limitaciones asociadas a métodos tradicionales como levantamientos terrestres, imágenes satelitales o vuelos tripulados (Tmušić et al., 2020).

En relación con la fotogrametría, esta técnica permite generar modelos digitales tridimensionales a partir de secuencias de imágenes bidimensionales capturadas mediante drones. A través de algoritmos computacionales y procesos de triangulación, es posible obtener representaciones precisas de superficies y estructuras, facilitando análisis topográficos y evaluaciones técnicas (James et al., 2017).

2.9.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN DRON

Figura 17.

Componentes de un dron



2.9.3.1. Marco o chasis del dron}

El marco o chasis constituye la estructura principal del dron y cumple la función de sostener e integrar todos los componentes del sistema. Además, define el tamaño y configuración aerodinámica del UAV, permitiendo mantener estabilidad y equilibrio durante el vuelo.

2.9.3.2. Brazos

Los brazos son estructuras conectadas al marco que sirven de soporte para los motores y hélices del dron. Su longitud y disposición influyen en la estabilidad y maniobrabilidad del UAV durante las operaciones aéreas.

2.9.3.3. Hélices

Las hélices son componentes giratorios conectados a los motores que generan la sustentación necesaria para elevar y desplazar el dron. Generalmente, trabajan en conjunto mediante rotaciones opuestas para mantener estabilidad durante el vuelo.

2.9.3.4. Cuerpo de aterrizaje

El cuerpo o tren de aterrizaje es la parte inferior del dron encargada de proporcionar soporte durante el despegue y aterrizaje. Además, protege componentes sensibles como la cámara y el gimbal frente a impactos o contacto directo con el suelo.

2.9.3.5. Cámara

La cámara es uno de los componentes más importantes en aplicaciones de ingeniería civil y fotogrametría, ya que permite capturar imágenes y videos aéreos de alta resolución para inspecciones, monitoreo y levantamientos topográficos.

2.9.3.6. Batería

La batería suministra la energía necesaria para el funcionamiento de los motores, sensores y demás componentes electrónicos del dron. Las baterías de polímero de litio (Li-Po) son las más utilizadas debido a su autonomía y rendimiento energético.

1.1.1.1. Motor

Los motores son los dispositivos encargados de generar la fuerza de impulsión necesaria para el movimiento y elevación del dron. Estos se ubican generalmente en los extremos de los brazos y trabajan conjuntamente con las hélices.

2.9.3.7. Gimbal

El gimbal o cardán es un sistema de estabilización instalado entre la cámara y el dron cuya función es reducir vibraciones y movimientos bruscos durante el vuelo. Esto permite mejorar la calidad y estabilidad de las imágenes capturadas.

2.10. Tipos de drones

2.10.1. Dron de ala fija

Los drones de ala fija poseen una estructura compuesta por un fuselaje y alas rígidas, similar a la de un avión convencional. Este tipo de diseño es común en aeronaves de uso militar y en aplicaciones que requieren cubrir grandes distancias. Su principal ventaja es la eficiencia aerodinámica, lo que les permite alcanzar una mayor autonomía de vuelo y desplazarse a velocidades superiores en comparación con los multirrotores. Además, pueden cubrir áreas extensas, por lo que son ampliamente utilizados en actividades de cartografía, teledetección y vigilancia. También presentan una menor huella sonora y un mejor desempeño frente a condiciones climáticas adversas como viento, lluvia y cambios de temperatura. Sin embargo, requieren más espacio para el despegue y aterrizaje, ya que generalmente necesitan ser lanzados manualmente, mediante catapultas o utilizar sistemas especiales para aterrizar (Reuter & Pedenovi, 2020).

Figura 18.

Dron de ala fija



2.10.2. Dron de ala móvil o multirrotores

Los drones de ala móvil, también llamados multirrotores, son aeronaves que poseen más de dos rotores o motores. Su estructura está formada por varios brazos que sostienen los motores y contienen los componentes electrónicos del equipo. Actualmente, la mayoría de los drones de uso civil pertenecen a esta categoría debido a su gran utilidad en actividades de fotografía, grabación audiovisual e inspección técnica (Reuter & Pedenovi, 2020).

Entre sus características más importantes destaca la capacidad de realizar despegues y aterrizajes verticales, lo que reduce considerablemente el espacio necesario para su operación. También pueden mantenerse en vuelo estacionario o desplazarse a muy baja velocidad, facilitando tareas de observación detallada e inspección. Los multicopteros presentan una elevada maniobrabilidad y precisión de vuelo, permitiéndoles seguir trayectorias complejas y acercarse fácilmente a los objetivos. Asimismo, tienen la capacidad de transportar cargas relativamente voluminosas en relación con su tamaño. Gracias a estas ventajas, los multirrotores dominan actualmente el mercado de drones civiles, aunque los drones de ala fija continúan siendo más eficientes para recorridos extensos y levantamientos cartográficos de gran escala (Reuter & Pedenovi, 2020).

Figura 19.

Dron de ala móvil o multirrotor



2.11. PARÁMETROS OPERACIONALES DE VUELO

2.11.1. Sistemas de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos en drones comprenden el conjunto de dispositivos tecnológicos incorporados en los vehículos aéreos no tripulados para captar, registrar y almacenar información durante el vuelo. Estos sistemas permiten obtener imágenes aéreas, datos geoespaciales y modelos digitales utilizados en

actividades de cartografía, topografía, monitoreo e inspección de infraestructura vial.

La incorporación de cámaras digitales de alta resolución en drones ha transformado significativamente los procesos de levantamiento fotogramétrico, debido a que permiten generar ortofotografías y modelos tridimensionales con elevada precisión espacial y menor tiempo de adquisición de datos. Los autores indican que la calidad de las imágenes obtenidas influye directamente en la precisión de los modelos digitales generados mediante técnicas fotogramétricas (Agüera-Vega et al., 2016).

Las cámaras RGB son los sensores más utilizados en aplicaciones de ingeniería civil e inspección vial, ya que permiten capturar imágenes detalladas de la superficie del pavimento y detectar deterioros como grietas, deformaciones y desprendimientos, también se señala que el empleo de cámaras de alta resolución en UAV facilita la obtención de información georreferenciada con mayor rapidez y resolución en comparación con métodos tradicionales de levantamiento terrestre (Salas Rojas, 2022).

Además de las cámaras convencionales, los drones pueden incorporar sensores especializados como cámaras térmicas, sensores multiespectrales y sistemas LiDAR. Según Giordan et al. (2020), estos sensores permiten ampliar las capacidades de análisis y monitoreo, debido a que facilitan la identificación de variaciones térmicas, humedad, deformaciones superficiales y generación de modelos tridimensionales de alta precisión.

Por otra parte, los drones integran sistemas de posicionamiento global (GPS) y unidades de medición inercial (IMU), los cuales permiten registrar coordenadas, orientación y trayectoria del vuelo. Estos componentes son fundamentales para garantizar la precisión espacial de los datos recopilados y optimizar el procesamiento fotogramétrico posterior.

La integración de sistemas de adquisición de datos en drones ha permitido mejorar considerablemente los procesos de inspección y evaluación de infraestructura vial, proporcionando información precisa, rápida y segura para el

análisis técnico y la toma de decisiones en actividades de mantenimiento y monitoreo vial.

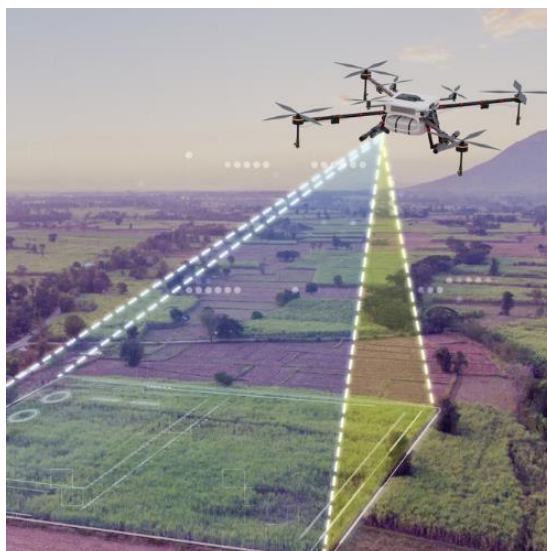
2.12. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

La fotogrametría digital es una técnica que permite obtener información precisa de objetos, superficies y terrenos a partir de fotografías digitales, mediante el uso de software especializado que procesa imágenes capturadas desde diferentes perspectivas. Etimológicamente, el término fotogrametría proviene de las palabras griegas *photo* (luz), *gramma* (dibujo o registro) y *metron* (medida), lo que hace referencia al proceso de representar y medir la realidad a través de imágenes. Su finalidad principal es reconstruir modelos tridimensionales y generar información métrica confiable de un objeto o área determinada (Bernal, 2020).

El principio fundamental de la fotogrametría consiste en que una fotografía transforma un objeto tridimensional en una representación bidimensional. Sin embargo, mediante la captura de imágenes desde distintos ángulos y el procesamiento computacional, es posible revertir ese proceso y reconstruir nuevamente la geometría tridimensional del objeto original. Para ello, los programas especializados identifican puntos comunes entre varias fotografías y calculan su posición espacial, permitiendo generar modelos digitales en 3D, ortomosaicos, nubes de puntos y modelos digitales del terreno (Silva et al., 2022). De acuerdo con la International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), la fotogrametría corresponde a la ciencia y tecnología destinada a obtener mediciones precisas y confiables a partir de fotografías. Esta disciplina se encuentra estrechamente relacionada con el sensoriamiento remoto, ya que ambas permiten adquirir información de objetos sin necesidad de contacto físico directo. En la actualidad, la evolución de sensores digitales y cámaras de alta resolución ha impulsado significativamente el desarrollo de la fotogrametría digital, especialmente mediante el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (VANT) (Bernal, 2020; Silva et al., 2022).

Figura 20.

Fotogrametría con dron.



Fuente: (Aviterra Solutions, 2016)

El avance tecnológico ha permitido integrar técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y Visión Computacional (VC), facilitando la automatización de tareas relacionadas con la identificación de patrones, reconstrucción espacial y análisis de superficies. Gracias a estas herramientas, la fotogrametría digital puede producir resultados de alta precisión como ortofotos, modelos digitales de elevación, modelos digitales de superficie y representaciones tridimensionales detalladas de infraestructuras y terrenos (Bernal, 2020).

La fotogrametría digital puede clasificarse según diversos criterios, entre ellos la distancia al objeto, el tipo de cámara utilizada, el tamaño del área de estudio y la plataforma de captura. En aplicaciones modernas, las imágenes suelen obtenerse mediante cámaras de pequeño formato instaladas en drones, lo que permite realizar levantamientos rápidos, económicos y seguros en áreas extensas o de difícil acceso. Esta metodología tiene aplicaciones en topografía, arqueología, minería, agricultura, ingeniería civil y monitoreo vial (Silva et al., 2022).

En el ámbito de la infraestructura vial, la fotogrametría digital se ha convertido en una herramienta importante para la inspección y evaluación de pavimentos, ya que permite generar modelos detallados de carreteras y detectar daños superficiales como grietas, fisuras y deformaciones. Además, facilita el cálculo de áreas, volúmenes y pendientes, así como la planificación de actividades de mantenimiento

y conservación vial mediante información geoespacial precisa y actualizada (Silva et al., 2022).

2.12.1. Principios geométricos de la fotogrametría

Los principios geométricos de la fotogrametría se fundamentan en la reconstrucción tridimensional de objetos o superficies a partir de imágenes bidimensionales obtenidas desde diferentes posiciones. Esta disciplina utiliza relaciones geométricas entre el objeto real, la cámara y las imágenes capturadas para determinar posiciones espaciales, dimensiones y características físicas del terreno o estructura analizada. La base geométrica de la fotogrametría moderna permite transformar información visual en productos geoespaciales precisos, tales como ortomosaicos, modelos digitales de elevación y reconstrucciones tridimensionales (Colomina & Molina, 2014).

Uno de los principios fundamentales corresponde a la proyección central, mediante la cual los rayos de luz provenientes de un objeto convergen hacia el centro óptico de la cámara, formando una representación bidimensional de un entorno tridimensional. Este principio establece la relación geométrica existente entre el objeto fotografiado y su imagen, permitiendo realizar mediciones espaciales a partir de fotografías digitales (Luhmann et al., 2019).

Otro principio importante corresponde a la estereoscopia, basada en la utilización de imágenes superpuestas capturadas desde diferentes posiciones para obtener percepción de profundidad. Cuando un mismo punto del terreno aparece en múltiples fotografías, es posible calcular su ubicación espacial mediante procesos de triangulación geométrica. Este principio constituye la base para la generación de modelos tridimensionales y reconstrucciones espaciales empleadas en fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT) (Luhmann et al., 2019).

La triangulación fotogramétrica representa otro componente esencial dentro de la geometría fotogramétrica. Este procedimiento consiste en determinar coordenadas espaciales mediante la intersección de rayos proyectados desde múltiples imágenes hacia un mismo punto del terreno. A través de este proceso, los algoritmos

fotogramétricos pueden calcular posiciones tridimensionales con elevada precisión, facilitando la generación de nubes de puntos densificadas y modelos digitales del terreno (Westoby et al., 2012a).

Asimismo, la fotogrametría moderna incorpora procesos de orientación interna y orientación externa. La orientación interna describe la geometría propia de la cámara, incluyendo parámetros como distancia focal, tamaño del sensor y distorsiones ópticas, mientras que la orientación externa define la posición y orientación espacial de la cámara durante la captura de imágenes. Ambos procesos permiten georreferenciar correctamente los productos fotogramétricos y mejorar la precisión geométrica de los resultados obtenidos (Luhmann et al., 2019).

2.12.2. Fotogrametría aérea mediante VANT

La fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) corresponde a la aplicación de técnicas fotogramétricas utilizando drones como plataforma de adquisición de imágenes. Esta metodología permite capturar fotografías aéreas con elevados niveles de resolución espacial, facilitando la generación de productos geoespaciales para topografía, cartografía e inspección de infraestructura. La incorporación de UAV ha reducido significativamente los costos operativos y tiempos de adquisición respecto a métodos convencionales basados en vuelos tripulados o levantamientos terrestres.

La utilización de UAV en ingeniería civil ha incrementado debido a su capacidad para acceder a áreas complejas, generar información georreferenciada y obtener datos repetitivos para monitoreo continuo. Diversos estudios demuestran que la integración entre drones y fotogrametría permite alcanzar precisiones centimétricas adecuadas para aplicaciones relacionadas con monitoreo vial, evaluación estructural y generación de modelos digitales (Colomina & Molina, 2014b).

2.12.3. Flujo de trabajo fotogramétrico

El flujo de trabajo fotogramétrico comprende el conjunto de etapas necesarias para transformar imágenes capturadas mediante UAV en productos geoespaciales útiles para análisis e inspección. Este proceso generalmente inicia

con la planificación del vuelo, continúa con la adquisición de imágenes y finaliza con el procesamiento computacional y generación de productos digitales.

La primera etapa corresponde a la planificación de misión, donde se definen variables como altura de vuelo, traslapes longitudinales y laterales, velocidad de desplazamiento y parámetros de cámara. Posteriormente, durante la adquisición de datos, se obtienen imágenes con suficiente superposición para garantizar reconstrucciones precisas.

El procesamiento fotogramétrico comprende procesos de alineación fotográfica, identificación automática de puntos homólogos, generación de nubes de puntos, reconstrucción tridimensional y creación de ortomosaicos. Actualmente, la mayoría de software especializados automatizan estas etapas mediante algoritmos de visión computacional y técnicas SfM (Structure from Motion) y MVS (Multi-View Stereo) (Westoby et al., 2012b).

2.12.4. Generación de ortomosaicos

Los ortomosaicos corresponden a imágenes aéreas corregidas geométricamente que representan la superficie terrestre en proyección ortogonal, eliminando distorsiones producidas por inclinación de cámara, relieve y perspectiva.

Su generación requiere combinar múltiples imágenes superpuestas mediante procesos de georreferenciación y corrección geométrica, produciendo una única imagen continua con escala uniforme. Debido a estas características, los ortomosaicos permiten realizar mediciones precisas de distancias, áreas, superficies y deterioros presentes sobre el pavimento.

En aplicaciones de inspección vial, los ortomosaicos constituyen uno de los productos más utilizados debido a que facilitan la detección visual de grietas, fisuras, baches y deformaciones superficiales, proporcionando además información espacial precisa para actividades de mantenimiento y monitoreo (James et al., 2017).

2.12.5. Modelos digitales de superficie y elevación

Los modelos digitales representan reconstrucciones tridimensionales obtenidas a partir del procesamiento fotogramétrico de imágenes UAV. Estos productos permiten representar geoméricamente la superficie terrestre y constituyen herramientas fundamentales para análisis topográficos e inspección de infraestructura.

El Modelo Digital de Superficie (MDS) representa elevaciones considerando todos los elementos presentes sobre el terreno, incluyendo vegetación, edificaciones e infraestructura. Por otra parte, el Modelo Digital de Elevación (MDE) representa únicamente la topografía del terreno eliminando objetos superficiales.

En infraestructura vial, estos modelos permiten identificar deformaciones, pendientes, asentamientos y anomalías geométricas del pavimento, facilitando la evaluación técnica del estado estructural de las vías. Diversos estudios han demostrado que los modelos generados mediante UAV presentan precisiones suficientes para aplicaciones de ingeniería civil y monitoreo vial (Szypuła, 2024).

2.12.6. Precisión fotogramétrica

La precisión fotogramétrica corresponde al grado de exactitud con que los productos generados representan la geometría real del terreno. Esta precisión depende de múltiples factores relacionados con adquisición de imágenes, calidad del sensor, configuración del vuelo y metodología de procesamiento utilizada.

Uno de los parámetros más utilizados corresponde al Ground Sampling Distance (GSD), el cual representa la dimensión real cubierta por cada píxel de la imagen. Valores pequeños de GSD permiten capturar mayor detalle superficial, incrementando la capacidad para identificar grietas y fisuras pequeñas.

Asimismo, variables como altura de vuelo, resolución de cámara, traslapes fotográficos, utilización de puntos de control terrestre (GCP) y calidad del posicionamiento GNSS influyen directamente sobre la precisión final obtenida.

Investigaciones recientes muestran que vuelos UAV correctamente configurados pueden alcanzar precisiones horizontales y verticales del orden centimétrico, adecuadas para aplicaciones de inspección vial y evaluación de pavimentos (Inzerillo et al., 2022a).

2.12.7. Procesamiento y análisis de imágenes

2.12.7.1. *Procesamiento digital de imágenes*

El procesamiento digital de imágenes es una técnica computacional utilizada para mejorar, analizar e interpretar imágenes digitales con el propósito de extraer información relevante. En el área de la ingeniería vial, esta tecnología permite detectar y evaluar daños superficiales en pavimentos mediante imágenes obtenidas por cámaras terrestres, drones o sistemas fotogramétricos. Su aplicación facilita la automatización de inspecciones y reduce la subjetividad de los métodos tradicionales basados únicamente en observación visual (Mohan & Poobal, 2018).

El proceso generalmente inicia con la adquisición de imágenes digitales de la superficie vial. Posteriormente, se aplican técnicas de preprocesamiento para mejorar la calidad visual de la imagen, tales como reducción de ruido, ajuste de contraste, filtrado y corrección de iluminación. Estas operaciones permiten resaltar características importantes como grietas, fisuras o deformaciones presentes en el pavimento. Según el estudio desarrollado por Hernán Porras y colaboradores, los filtros de mediana y los ajustes de contraste son fundamentales para mejorar la detección de grietas en imágenes de pavimentos asfálticos (Oliveira & Correia, 2013).

Después del preprocesamiento, se realizan procesos de segmentación y extracción de características. La segmentación permite separar las zonas deterioradas del resto de la superficie mediante técnicas basadas en niveles de gris, detección de bordes o umbralización. Posteriormente, se emplean algoritmos de clasificación que identifican el tipo de daño detectado, como grietas longitudinales, transversales, piel de cocodrilo o baches. Estudios recientes han demostrado que la combinación de procesamiento digital de imágenes y redes neuronales artificiales mejora considerablemente la

precisión en la identificación automática de deterioros viales (Mohan & Poobal, 2018).

2.12.7.2. Calidad de imágenes para el procesamiento y análisis

La calidad de las imágenes en estudios fotogramétricos y de evaluación vial depende principalmente de la resolución espacial o *Ground Sampling Distance* (GSD), parámetro que representa el tamaño real que ocupa cada píxel en el terreno. Mientras menor sea el valor del GSD, mayor será el nivel de detalle capturado en la imagen. Investigaciones recientes indican que para la detección confiable de grietas en pavimentos se recomienda trabajar con resoluciones entre 1 y 3 mm/píxel, ya que valores superiores reducen significativamente la visibilidad de fisuras pequeñas. Asimismo, se ha determinado que vuelos realizados a aproximadamente 5 m de altura pueden generar resoluciones cercanas a 0.2 cm/píxel, mientras que vuelos a 60 m producen imágenes de alrededor de 1.5 cm/píxel, disminuyendo la precisión del análisis superficial (FADRON, 2025).

Otro aspecto importante corresponde al tamaño y formato de los archivos de imagen utilizados durante el procesamiento. Las imágenes obtenidas en formatos RAW o TIFF conservan una mayor cantidad de información radiométrica y geométrica en comparación con formatos comprimidos como JPEG, lo que mejora la precisión de ortomosaicos y modelos digitales. Además, para evitar desenfoques y pérdida de calidad durante la captura, diversos estudios recomiendan velocidades de obturación mínimas de 1/125 s, sensibilidad ISO cercana a 100 y traslapes fotográficos superiores al 75 % frontal y 60 % lateral. Estos parámetros permiten obtener imágenes más nítidas y estables, optimizando el desempeño de algoritmos de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y visión computacional aplicados en inspección vial mediante drones (Inzerillo et al., 2022b).

Tabla 3.
Configuración del UAV y de la cámara para los levantamientos

Parámetro	Rango recomendado para inspección vial con UAV
Resolución de cámara	20 – 21 MP

Tamaño de imagen	Aproximadamente 5500 × 3600 píxeles
Tamaño del sensor	Entre 13 × 9 mm y 24 × 18 mm
Distancia focal equivalente	24 – 28 mm
ISO	100 – 200
Velocidad de obturación	1/60 – 1/250 s
Apertura	f/5.6 – f/8

Fuente:(Inzerillo et al., 2022b)

2.13. DETECCIÓN VISUAL DE GRIETAS Y FISURAS

La detección visual de grietas y fisuras corresponde al proceso de identificación de discontinuidades presentes en la superficie del pavimento mediante el análisis de imágenes digitales o inspecciones visuales. Estas fallas representan uno de los principales indicadores del deterioro estructural y funcional de las vías, debido a que permiten el ingreso de agua y aceleran la degradación de las capas internas del pavimento (Gómez et al., 2023).

La detección visual mediante UAV permite capturar imágenes aéreas de alta resolución capaces de identificar grietas longitudinales, transversales y agrietamientos tipo piel de cocodrilo. Posteriormente, estas imágenes son procesadas mediante algoritmos de segmentación y reconocimiento de patrones que facilitan la localización y clasificación automática de deterioros viales (Inzerillo et al., 2022b).

Asimismo, investigaciones recientes indican que la integración de técnicas de visión artificial y aprendizaje profundo incrementa significativamente la precisión en la identificación de fisuras superficiales, optimizando los procesos de inspección y mantenimiento vial (Inzerillo et al., 2022c).

2.13.1. La clasificación y evaluación de daños

La clasificación y evaluación de daños viales constituye un proceso técnico fundamental para determinar el estado funcional y estructural de los pavimentos. Este procedimiento permite identificar los tipos de deterioro presentes en la superficie de rodadura, establecer su nivel de severidad y cuantificar el área

afectada, facilitando la planificación de actividades de mantenimiento y rehabilitación vial (Quinto Prado et al., 2023).

La evaluación de daños considera diversos criterios técnicos relacionados con la severidad, extensión y localización de las fallas presentes en el pavimento. La severidad hace referencia al grado de afectación que presenta el deterioro, mientras que la extensión corresponde al porcentaje de superficie afectada dentro del área evaluada. Ambos parámetros son fundamentales para determinar el nivel de intervención requerido y el impacto del deterioro sobre la seguridad y funcionalidad de la vía (González-Fernandez et al., 2019).

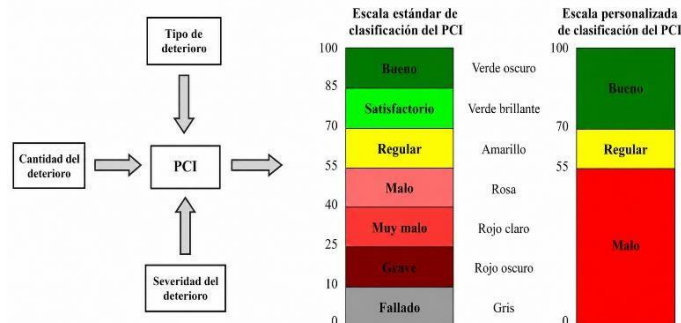
2.13.2. Índice de condición del pavimento (PCI)

El Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés *Pavement Condition Index*) es un método cuantitativo desarrollado para evaluar el estado superficial de los pavimentos a partir de inspecciones visuales (ASTM, 2023). Este índice permite representar de manera numérica la condición de un pavimento en una escala que va desde 0 hasta 100, donde 100 representa un pavimento en excelente estado y 0 un pavimento en estado de falla total (González-Fernandez et al., 2019).

El PCI se basa en la identificación de los distintos tipos de deterioro presentes en la superficie del pavimento, tales como grietas, baches, desprendimientos y deformaciones. Cada tipo de daño es clasificado según su nivel de severidad, el cual puede ser bajo, medio o alto, dependiendo del grado de afectación que presenta sobre la funcionalidad del pavimento. Asimismo, se considera la densidad o extensión del deterioro, entendida como el porcentaje del área afectada dentro de la unidad de análisis (ASTM, 2023).

Figura 21.

Índice de Condición del Pavimento (PCI) Custom PCI Rating Scale: Escala personalizada de clasificación del PCI



Fuente: (ASTM, 2023)

La metodología PCI establece el procedimiento de división del pavimento en unidades de muestreo, las cuales son evaluadas individualmente mediante inspección visual. Posteriormente, los datos recolectados son utilizados para calcular el valor del PCI de cada unidad, lo que permite obtener una evaluación detallada y representativa del estado del pavimento en estudio. Este indicador es ampliamente utilizado en la gestión vial, ya que facilita la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento preventivo, correctivo y la rehabilitación de la infraestructura vial.

El PCI constituye una herramienta fundamental dentro de los sistemas de gestión de pavimentos, debido a su capacidad para integrar información sobre tipo, severidad y extensión de los deterioros en un solo valor numérico que refleja el nivel de servicio del pavimento (ASTM, 2023).

2.13.3. Detección automatizada de daños superficiales

La detección automatizada de daños superficiales consiste en el uso de técnicas computacionales para identificar grietas, fisuras, baches y otros deterioros presentes en el pavimento mediante el análisis digital de imágenes. Este proceso integra herramientas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), visión computacional e inteligencia artificial con el objetivo de mejorar la precisión y rapidez de las inspecciones viales. A diferencia de los métodos tradicionales basados en observación manual, los sistemas automatizados permiten procesar

grandes volúmenes de imágenes obtenidas mediante drones, reduciendo tiempos de evaluación y minimizando errores asociados a la subjetividad humana. Investigaciones recientes indican que los modelos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) presentan altos niveles de precisión en la identificación automática de daños superficiales en carreteras (Maeda et al., 2018).

El funcionamiento de estos sistemas generalmente comprende etapas de adquisición de imágenes, preprocesamiento, segmentación y clasificación automática de deterioros. Durante el preprocesamiento se aplican técnicas de filtrado, reducción de ruido y mejora de contraste para resaltar las características del daño superficial, mientras que los algoritmos de segmentación permiten diferenciar las áreas deterioradas del resto del pavimento. Asimismo, investigaciones recientes destacan que el uso de modelos de aprendizaje profundo y segmentación semántica mejora considerablemente la detección automática de grietas y fisuras mediante imágenes capturadas con UAV, optimizando los procesos de monitoreo y mantenimiento vial (Ma et al., 2023).

2.13.4. Software especializado para fotogrametría

El desarrollo de la fotogrametría digital ha impulsado la creación de software especializado capaz de procesar imágenes aéreas y generar productos geoespaciales de alta precisión. Estas herramientas permiten automatizar procesos como alineación de imágenes, generación de nubes de puntos, ortomosaicos, modelos digitales de elevación y reconstrucciones tridimensionales del terreno (Nex & Remondino, 2014).

En aplicaciones de ingeniería civil e inspección vial, el uso de software fotogramétrico resulta fundamental para transformar imágenes capturadas mediante drones en información técnica útil para el análisis y monitoreo de infraestructura. Estos programas utilizan algoritmos de visión computacional y técnicas de correlación automática para reconstruir modelos espaciales a partir de fotografías superpuestas (Colomina & Molina, 2014b).

Según Nex y Remondino (2014), los software fotogramétricos modernos han mejorado considerablemente la precisión y eficiencia en la generación de modelos

digitales, permitiendo aplicaciones en topografía, cartografía, monitoreo de obras civiles y evaluación de pavimentos. Asimismo, Colomina y Molina (2014) señalan que la integración entre drones, sistemas GNSS y software especializado ha optimizado los procesos de adquisición y procesamiento de información geoespacial (X. Chen et al., 2023).

2.13.4.1. Pix4D

Pix4D es uno de los softwares fotogramétricos más utilizados en aplicaciones de ingeniería civil, topografía e inspección de infraestructura vial. Este programa permite procesar imágenes aéreas capturadas mediante drones para generar productos geoespaciales como ortomosaicos, modelos digitales de superficie, nubes de puntos y reconstrucciones tridimensionales de alta precisión (Soto & Sanchez, 2025).

Figura 22.

Pix4D Software



Nota. Captura de pantalla obtenida del software PIX4Dmapper durante el procesamiento de las imágenes aéreas. Elaboración propia mediante PIX4Dmapper, desarrollado por Pix4D S.A.

El funcionamiento de Pix4D se basa en algoritmos de fotogrametría digital y visión computacional que permiten identificar puntos homólogos entre imágenes superpuestas y reconstruir modelos espaciales georreferenciados. Gracias a ello, es posible realizar mediciones precisas de distancias, áreas, volúmenes y deformaciones presentes en superficies viales (Pix4D, 2026; Soto & Sanchez, 2025).

De acuerdo con Pix4D (2022), el software facilita el procesamiento automatizado de imágenes UAV mediante etapas de alineación fotográfica,

generación de nube de puntos densificada, creación de modelos digitales y elaboración de ortomosaicos. Estas herramientas permiten optimizar trabajos de inspección y monitoreo de carreteras, reduciendo tiempos de levantamiento y procesamiento de información.

Diversas investigaciones destacan que el uso de Pix4D en levantamientos fotogramétricos mediante drones mejora significativamente la eficiencia en la recopilación de datos y en el análisis técnico de infraestructura vial, especialmente en áreas urbanas y carreteras de difícil acceso (Agüera-Vega et al., 2017).

2.13.4.2. Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un software especializado en fotogrametría digital utilizado para el procesamiento de imágenes aéreas y la generación de modelos tridimensionales de alta precisión. Este programa permite transformar fotografías capturadas mediante drones en productos geoespaciales como ortomosaicos, modelos digitales de elevación, nubes de puntos densificadas y reconstrucciones 3D del terreno (Rojas, 2024).

Figura 23.

Software Agisoft Metashape



Nota. Elaboración propia a partir de imágenes capturadas mediante UAV y procesadas en el software Agisoft Metashape.

El software emplea técnicas de visión computacional y algoritmos de correlación automática para identificar puntos comunes entre imágenes superpuestas y reconstruir superficies georreferenciadas con elevada

precisión. Gracias a estas capacidades, Agisoft Metashape es ampliamente utilizado en aplicaciones de topografía, cartografía, ingeniería civil y monitoreo de infraestructura vial (Agisoft Metashape, 2026).

El procesamiento fotogramétrico en Metashape comprende etapas de alineación de imágenes, generación de nube de puntos, construcción de mallas tridimensionales y creación de ortofotografías digitales. Estas herramientas facilitan el análisis detallado de superficies y permiten realizar mediciones precisas de áreas, volúmenes y deformaciones.

En inspección vial, Agisoft Metashape se utiliza para generar modelos digitales de pavimentos y detectar deterioros superficiales como grietas, fisuras y deformaciones. Además, la integración del software con imágenes UAV de alta resolución mejora la precisión en los procesos de monitoreo y evaluación técnica de carreteras (Rojas, 2024).

Diversos estudios destacan que el uso de Agisoft Metashape en proyectos fotogramétricos reduce tiempos de procesamiento y optimiza la obtención de información geoespacial, convirtiéndose en una herramienta eficiente para aplicaciones de infraestructura vial y análisis territorial (Atik & Duran, 2022).

2.13.4.3. *Procesamiento de imágenes aéreas*

El procesamiento de imágenes aéreas corresponde al conjunto de técnicas y procedimientos computacionales utilizados para transformar fotografías capturadas mediante drones en información geoespacial útil para análisis e inspección de infraestructura. Este proceso permite corregir, organizar y analizar imágenes digitales con el objetivo de generar productos cartográficos y modelos digitales de alta precisión (Nex & Remondino, 2014).

En fotogrametría digital, el procesamiento inicia con la adquisición de imágenes aéreas superpuestas obtenidas mediante UAV. Posteriormente, las fotografías son

sometidas a procesos de alineación y georreferenciación, donde se identifican puntos comunes entre imágenes para reconstruir la geometría espacial del terreno, Estos procedimientos permiten generar representaciones precisas de superficies mediante técnicas automatizadas de correlación fotogramétrica (Colomina & Molina, 2014b).

Durante el procesamiento también se aplican técnicas de corrección radiométrica y geométrica para mejorar la calidad visual de las imágenes y reducir errores asociados a iluminación, perspectiva o distorsiones ópticas. Estas correcciones son fundamentales para garantizar precisión en los productos fotogramétricos obtenidos. Asimismo, mediante algoritmos computacionales es posible generar nubes de puntos densificadas, modelos digitales de elevación y ortomosaicos georreferenciados a partir de las imágenes procesadas. Estos productos permiten realizar mediciones de distancias, áreas y deformaciones superficiales con elevada exactitud (Nex & Remondino, 2014).

2.13.5. Generación de ortofotos y modelos digitales

La generación de ortofotos y modelos digitales constituye una etapa clave dentro del flujo de trabajo fotogramétrico aplicado a la inspección de infraestructura vial. Las ortofotos son imágenes aéreas corregidas geoméricamente que eliminan distorsiones de perspectiva y relieve, permitiendo representar el terreno en una proyección ortogonal con escala uniforme, lo que facilita mediciones precisas sobre la superficie.

La generación de ortofotos digitales se basa en procesos de reconstrucción geométrica derivados de modelos de correlación densa, los cuales permiten obtener representaciones de alta precisión a partir de imágenes UAV. Este proceso se apoya en técnicas de Structure from Motion (SfM) y Multi-View Stereo (MVS), ampliamente utilizadas en fotogrametría moderna.

Asimismo, los modelos digitales de elevación (MDE) y modelos digitales de superficie (MDS) permiten representar la estructura tridimensional del terreno. Según Szypuła (2023), los modelos derivados de UAV presentan una alta precisión altimétrica cuando se emplean flujos de procesamiento fotogramétrico adecuados, siendo fundamentales para aplicaciones de ingeniería y análisis geoespacial.

En el ámbito de la infraestructura vial, estos productos permiten identificar deformaciones, variaciones de pendiente y anomalías superficiales del pavimento, mejorando significativamente la capacidad de análisis y diagnóstico del estado de las vías.

2.13.6. Aplicación del software en inspección vial

La aplicación de software fotogramétrico en la inspección vial permite transformar las imágenes aéreas capturadas mediante drones en información geoespacial detallada, útil para el análisis del estado de la infraestructura. Estos programas facilitan la identificación, medición y clasificación de deterioros en pavimentos, tales como grietas, baches, deformaciones y desprendimientos superficiales, a partir de productos como ortomosaicos, nubes de puntos y modelos digitales (S. Lee & Cho, 2023).

El uso de software especializado como Pix4D o Agisoft Metashape permite automatizar el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes, optimizando la generación de resultados precisos en menor tiempo. Según Nex et al. (2023), los flujos de trabajo basados en UAV y software fotogramétrico han demostrado alta eficiencia en la inspección de infraestructura, especialmente en la detección de cambios superficiales y evaluación de activos viales (Agüera-Vega et al., 2017).

Asimismo, la integración de técnicas de visión por computador y algoritmos de análisis digital ha permitido mejorar la detección automática de daños en pavimentos. De acuerdo con Yang et al. (2024), el uso de herramientas de procesamiento de imágenes aéreas combinadas con aprendizaje profundo incrementa significativamente la precisión en la identificación de defectos en infraestructuras viales (Soto & Sanchez, 2025).

2.13.7. Monitoreo y mantenimiento vial

El monitoreo vial es un componente esencial en la gestión de infraestructura de transporte, ya que permite evaluar de manera continua el estado funcional y

estructural de las carreteras. A través de este proceso es posible identificar oportunamente deterioros como fisuras, baches, deformaciones y pérdida de material superficial, lo que facilita la toma de decisiones para intervenciones tempranas (Rind et al., 2026).

La importancia del monitoreo radica en su contribución a la seguridad vial y a la optimización de recursos. Los sistemas de monitoreo basados en datos permiten mejorar la evaluación del desempeño de los pavimentos, reduciendo costos de mantenimiento y aumentando la vida útil de las vías mediante acciones oportunas.

2.13.8. Planificación del mantenimiento vial

La planificación del mantenimiento vial consiste en el proceso técnico y estratégico mediante el cual se organizan y programan las intervenciones necesarias para conservar o recuperar las condiciones funcionales y estructurales de la infraestructura vial. Este proceso se basa en la evaluación del estado del pavimento, la identificación de deterioros y la asignación eficiente de recursos técnicos, económicos y operativos (*Pavement Management Guide, Second Edition*, 2012).

Una planificación adecuada permite prolongar la vida útil de las vías, reducir costos de rehabilitación y mejorar la seguridad vial. En este sentido, los sistemas de gestión de pavimentos (PMS) juegan un papel fundamental, ya que permiten recopilar, analizar y modelar información sobre el desempeño de la infraestructura a lo largo del tiempo.

De acuerdo con la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), los sistemas PMS constituyen una herramienta esencial para la toma de decisiones en la gestión vial, ya que permiten priorizar intervenciones, evaluar alternativas de mantenimiento y optimizar la asignación de recursos disponibles (AASHTO, 2021).

2.14. Uso de tecnologías emergentes para mantenimiento preventivo

La priorización de intervenciones dentro del mantenimiento vial es un proceso técnico que permite establecer el orden de ejecución de las acciones de conservación o rehabilitación en la red vial, con base en criterios objetivos relacionados con el estado del pavimento, su nivel de deterioro, la importancia funcional de la vía y el volumen de tránsito. Este proceso es fundamental para optimizar la asignación de recursos y maximizar el impacto de las inversiones en infraestructura (Agüera-Vega et al., 2017).

Para realizar esta priorización, se emplean indicadores técnicos como el Índice de Condición del Pavimento (PCI), el cual permite evaluar de manera cuantitativa el estado superficial del pavimento y clasificarlo en distintos niveles de condición. Este enfoque facilita la comparación entre tramos viales y la toma de decisiones basada en evidencia técnica (Limonés Gabino, 2021).

De acuerdo con Shahin (2005), el uso de metodologías basadas en indicadores cuantitativos mejora significativamente la objetividad en la gestión del mantenimiento vial, reduciendo la subjetividad en la toma de decisiones y permitiendo una planificación más eficiente de las intervenciones (Shahin, 2005).

En la actualidad, este proceso se ve fortalecido mediante el uso de tecnologías como drones, sistemas de información geográfica (SIG) y software fotogramétrico, los cuales permiten obtener información geoespacial precisa y actualizada del estado de la infraestructura vial. Esto contribuye a mejorar la capacidad de análisis técnico y a establecer prioridades de intervención más precisas y fundamentadas (Shahin, 2005).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo.

Es una investigación aplicada de desarrollo tecnológico, orientada a resolver el problema concreto de la inspección de vías mediante la implementación, adaptación y validación de la tecnología de fotogrametría con drones, cuyo producto principal es un protocolo operativo validado.

3.1.2. Nivel.

La presente investigación se desarrolla en tres niveles complementarios, conforme a la tipología de Hernández-Sampieri et al. (2014), se considera una investigación multinivel:

- a) **Nivel Descriptivo:** Como base del estudio, se describe sistemáticamente el estado de las vías mediante la identificación, clasificación y cuantificación de grietas y fisuras, generando un inventario georreferenciado que caracteriza la magnitud y distribución del deterioro de las vías del cantón.
- b) **Nivel Explicativo:** Como núcleo analítico, se explican las relaciones causales y comparativas entre variables, particularmente al contrastar la precisión y eficiencia del método fotogramétrico frente al tradicional, analizando estadísticamente las diferencias y correlacionando la presencia de daños con factores urbanos contextuales.
- c) **Nivel Tecnológico/Aplicado:** Como contribución práctica, se desarrolla, implementa y valida un protocolo tecnológico operativo para la inspección de infraestructura vial mediante fotogrametría con drones, evaluando su aplicabilidad, limitaciones y potencial de transferencia al GAD Municipal.

3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método de investigación.

El método implementado corresponde al grupo de metodologías secuenciales híbridas de campo-oficina con validación cruzada, estructurado en seis fases interdependientes que integran técnicas de geomática, ingeniería civil y estadística.

3.2.2. Enfoque de investigación.

Esta investigación se fundamenta en un enfoque metodológico mixto (cualitativo-cuantitativo) de carácter predominantemente cuantitativo, clasificable dentro del Grupo de Investigaciones Aplicadas con Validación Tecnológica. El componente cuantitativo, que constituye el núcleo del diseño permite la medición objetiva, el análisis estadístico inferencial y la comparación métrica rigurosa entre métodos, generando datos numéricos sobre precisión (RMSE), eficiencia (tiempo/costo) y efectividad (tasas de detección). El componente cualitativo facilita la clasificación tipológica de daños, la descripción de patrones de deterioro y la interpretación contextual de resultados, lo que enriquece el análisis cuantitativo con profundidad interpretativa.

3.2.3. Diseño de la investigación.

3.2.3.1. Diseño general.

El presente estudio adopta un diseño experimental comparativo transeccional, ya que se manipula deliberadamente la variable independiente a método de inspección, al aplicar dos técnicas diferentes a un conjunto de tramos viales: fotogrametría con drones e inspección terrestre tradicional, con el propósito de comparar su precisión y eficiencia. El diseño es transeccional porque los datos se recolectan en un período temporal definido y se considera experimental porque, aunque se aplican tratamientos diferenciados, la asignación de tramos a cada método está

sujeta a restricciones prácticas del entorno urbano que impiden una aleatorización perfecta.

3.2.3.2. Diseño específico.

El diseño específico corresponde a un estudio comparativo con validación cruzada donde podemos definir dos grupos de datos al usar dos técnicas de inspección, mediante fotogrametría con drones e inspección terrestre tradicional o grupo de validación.

3.2.4. Diagrama del proceso metodológico.

El proceso metodológico se valida por fases y actividades, cada fase presenta productos y entregables que validarán el éxito de cada una y permitirán avanzar a la siguiente fase.

Ilustración 1.

Diagrama de proceso metodológico por fases.



3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.3.1. Población.

La población es el total de vías de pavimento rígido, flexible y decorativo en la cabecera cantonal de Santa Elena.

3.3.2. Muestra.

Las vías delimitadas en el área de estudio, para lo cual se determinan por censo de accesibilidad y considerando las que tienen mayor uso.

3.3.3. Muestreo.

El muestreo de validación es definido como el 20% de tramos seleccionados mediante muestreo aleatorio estratificado por tipo de vía y zona. Como criterios de inclusión se propone que las vías deben ser pavimentadas de acceso público, con tráfico vehicular regular y se excluyen las vías que estén en construcción, cerradas al tránsito, o con cobertura vegetal que impida la visión del pavimento.

3.3.4. Variables de estudio.

Las variables de estudio se clasifican en independientes, dependientes y de control, definidas en la tabla 4.

Tabla 4.

Variables de estudio.

Variable	Tipo	Escala	Instrumento de Medición
A. Variable Independiente:			
Método de inspección	Cualitativa	Nominal (Drone/Terrestre)	Protocolo aplicado
B. Variable Dependiente:			

Precisión de detección	Cuantitativa	Razón (mm, cm)	Error RMSE, diferencia de mediciones
Eficiencia operativa	Cuantitativa	Razón (minutos, costo)	Tiempo registrado, costos calculados
Tipo de fisura	Cualitativa	Nominal (Clasificación)	Taxonomía desarrollada
C. Variable de Control:			
Condiciones climáticas, hora del día, tipo de pavimento	Mixtas	Varias	Registro meteorológico, observación

3.4. METODOLOGÍA OE1: DIAGNOSTICAR EL ESTADO SUPERFICIAL DE LAS PRINCIPALES VÍAS DE LA CABECERA CANTONAL DE SANTA ELENA, MEDIANTE INSPECCIONES AÉREAS REALIZADAS CON DRONES, PARA OBTENER INFORMACIÓN ACTUALIZADA SOBRE LA PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE DETERIOROS EN EL PAVIMENTO.

Para el cumplimiento del primer objetivo específico, se desarrolló el diagnóstico superficial vial basado en inspección aérea con drones, complementado con observación directa de campo. Esta fase permitió identificar las condiciones actuales del pavimento en los tramos seleccionados de la cabecera cantonal de Santa Elena, registrando la presencia y distribución de deterioros visibles en la carpeta de rodadura.

El diagnóstico se orientó a reconocer, localizar y registrar daños superficiales tales como grietas, fisuras, baches, desprendimientos, desgaste superficial, deterioro en juntas y deformaciones observables. El análisis se limitó exclusivamente a la condición superficial del pavimento, sin incluir evaluación estructural profunda de base, subbase o condiciones geotécnicas del terreno.

Desde el punto de vista metodológico, esta fase correspondió al nivel descriptivo, debido a que permitió caracterizar el estado actual de las vías mediante la

observación, registro y clasificación preliminar de los deterioros existentes. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), los estudios descriptivos permiten especificar propiedades, características y perfiles de fenómenos sometidos a análisis; en este caso, el fenómeno estudiado fue el deterioro superficial de las vías urbanas de la cabecera cantonal de Santa Elena.

3.4.1. Delimitación del área de estudio

Se delimitó el área urbana correspondiente a la cabecera cantonal de Santa Elena, identificando las principales vías de circulación vehicular incluidas dentro del estudio. Para esta delimitación se consideraron criterios de importancia funcional, nivel de uso, accesibilidad y presencia visible de deterioros superficiales.

La delimitación permitió organizar el levantamiento por tramos viales y establecer una base espacial para el diagnóstico. Cada tramo fue identificado con un código de registro, ubicación, tipo de pavimento y observaciones preliminares. Esta información sirvió como base para la planificación de los vuelos con dron y para la posterior elaboración del inventario de daños.

Figura 24.

Mapa de ubicación del área de estudio en la cabecera cantonal de Santa Elena.



3.4.2. Selección de tramos viales

La selección de los tramos viales objeto de estudio se realizó mediante criterios técnicos de accesibilidad, representatividad, importancia urbana, tipo de

superficie vial y presencia visible de deterioros superficiales. Esta etapa permitió definir las unidades de análisis sobre las cuales se aplicó la inspección aérea con drones y la posterior verificación terrestre.

Se incluyeron vías de acceso público ubicadas dentro de la cabecera cantonal de Santa Elena, debido a que forman parte de la red vial urbana utilizada diariamente por vehículos particulares, transporte público, motocicletas y peatones. También se consideraron vías con tráfico vehicular regular, ya que el tránsito constante contribuye al deterioro progresivo de la superficie de rodadura y favorece la aparición de grietas, fisuras, deformaciones, desprendimientos y baches.

Asimismo, se priorizaron tramos con importancia urbana, es decir, vías que conectan sectores residenciales, comerciales, institucionales o de circulación frecuente. Este criterio permitió seleccionar vías cuya condición superficial influye directamente en la movilidad, seguridad vial y calidad del servicio que presta la infraestructura urbana.

Los tramos seleccionados correspondieron únicamente a pavimentos flexibles y calles adoquinadas, por ser los tipos de superficie presentes dentro del área de estudio. En los pavimentos flexibles se consideraron deterioros como fisuras longitudinales, fisuras transversales, grietas tipo piel de cocodrilo, baches, desprendimientos y desgaste superficial. En las calles adoquinadas se consideraron asentamientos, hundimientos localizados, separación de juntas, pérdida de material de junta, adoquines fracturados y deformaciones superficiales.

Se incluyeron tramos con evidencia visible de deterioro superficial, a fin de que la metodología con drones permitiera registrar y analizar diferentes tipos de daños. No se seleccionaron únicamente vías en estado crítico, sino tramos con distintos niveles de afectación, para obtener una visión más representativa del estado vial urbano.

Se excluyeron vías en construcción, cerradas al tránsito, con obstrucciones permanentes, presencia significativa de vegetación, acumulación de agua, vehículos estacionados de forma continua o elementos que impidieran observar

adecuadamente la superficie vial. También se descartaron sectores donde la operación del dron representara riesgos por presencia de cables eléctricos, edificaciones próximas, árboles u otros obstáculos.

Tabla 5.

Criterios técnicos para la selección de tramos viales

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	CONDICIÓN
Ubicación	Vías localizadas dentro de la cabecera cantonal de Santa Elena	Inclusión
Tipo de vía	Vías urbanas de circulación vehicular regular	Inclusión
Tipo de pavimento	Pavimento flexible, rígido o decorativo	Inclusión
Accesibilidad	Tramos accesibles para inspección aérea y terrestre	Inclusión
Estado superficial	Presencia visible de grietas, fisuras u otros deterioros	Inclusión
Obras en ejecución	Vías intervenidas, cerradas o en construcción	Exclusión
Obstrucciones	Vegetación, vehículos estacionados, agua acumulada u objetos que impidan la visibilidad	Exclusión
Seguridad operativa	Zonas donde no fue posible operar el dron de manera segura	Exclusión

3.4.3. Reconocimiento preliminar de campo

Se realizó un reconocimiento preliminar de campo en los tramos seleccionados, con el propósito de verificar las condiciones reales del entorno vial antes de la inspección aérea. Durante esta actividad se identificaron obstáculos físicos, cables eléctricos, postes, árboles, edificaciones cercanas, tránsito vehicular, zonas de sombra y posibles puntos seguros para el despegue y aterrizaje del dron.

El reconocimiento permitió ajustar las condiciones de operación del vuelo y reducir riesgos durante el levantamiento con UAV. Además, se registraron observaciones generales sobre el estado superficial de las vías, condiciones climáticas, iluminación, horario de inspección y características del entorno urbano.

Figura 25.

Registro fotográfico del reconocimiento preliminar de campo.



3.4.4. Planificación del vuelo fotogramétrico

Una vez definidos los tramos de estudio, se elaboró el plan de vuelo fotogramétrico mediante la aplicación DroneDeploy, utilizada para programar la captura sistemática de imágenes aéreas sobre las vías seleccionadas. Esta herramienta permitió definir el área de cobertura, trayectoria de vuelo, altura de

operación, velocidad de desplazamiento, traslape entre imágenes, puntos de despegue y aterrizaje, así como las condiciones generales de seguridad durante la inspección aérea.

Para el levantamiento se utilizó un dron DJI Air 2S, equipo que cuenta con cámara de alta resolución adecuada para la captura de imágenes aéreas aplicadas a inspección superficial de pavimentos. De acuerdo con las especificaciones técnicas del equipo, el DJI Air 2S incorpora un sensor CMOS de 1 pulgada y una resolución efectiva de 20 megapíxeles, características que permiten obtener imágenes con buen nivel de detalle para el análisis visual de la superficie vial.

La altura de vuelo se estableció en 45 metros sobre la superficie vial, valor que permitió mantener un equilibrio entre cobertura del tramo inspeccionado y nivel de detalle de las imágenes obtenidas. Esta altura fue seleccionada considerando la necesidad de identificar deterioros superficiales visibles, tales como grietas, fisuras, desprendimientos, baches, deformaciones y asentamientos, tanto en pavimentos flexibles como en calles adoquinadas.

En la configuración del vuelo se aplicó un traslape longitudinal y lateral suficiente para garantizar la continuidad visual entre imágenes consecutivas y facilitar el procesamiento fotogramétrico. Para ello, se adoptó un traslape longitudinal del 80 % y un traslape lateral del 70 %, valores utilizados comúnmente en levantamientos fotogramétricos con UAV para asegurar una adecuada reconstrucción de ortofotos y reducir vacíos de información. DroneDeploy recomienda mantener como mínimo un 70 % de traslape frontal y lateral para la mayoría de las misiones de mapeo, debido a que una mayor superposición facilita el procesamiento de imágenes y mejora la consistencia del modelo generado.

La planificación del vuelo permitió garantizar una cobertura homogénea de los tramos viales seleccionados y obtener imágenes con calidad suficiente para el análisis posterior. Se priorizaron horarios con buena iluminación natural, evitando condiciones que pudieran afectar la nitidez de las imágenes, tales como lluvia, vientos fuertes, sombras excesivas, reflejos, presencia de agua sobre la superficie vial o circulación de vehículos que obstruyeran la visualización del pavimento.

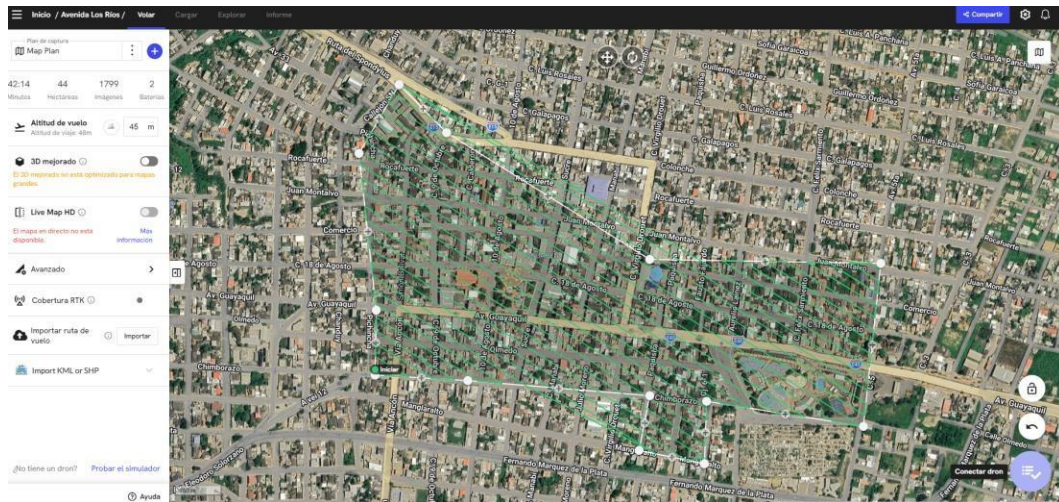
Tabla 6.

Parámetros aplicados en la planificación del vuelo fotogramétrico

Parámetro	Valor / criterio aplicado	Descripción
Aplicación de planificación	DroneDeploy	Software utilizado para programar el vuelo fotogramétrico
Equipo UAV	DJI Air 2S	Dron empleado para la captura de imágenes aéreas
Cámara	Sensor CMOS 1” / 20 MP	Cámara integrada del DJI Air 2S
Altura de vuelo	45 m	Altura establecida sobre la superficie vial
Traslape longitudinal	80 %	Superposición entre imágenes consecutivas en la dirección de vuelo
Traslape lateral	70 %	Superposición entre líneas de vuelo adyacentes
Tipo de captura	Imagen aérea nadiral	Captura perpendicular a la superficie vial
Superficie evaluada	Pavimento flexible y calles adoquinadas	Tipos de superficie presentes en el área de estudio
Condiciones de vuelo	Buena iluminación, sin lluvia y sin vientos fuertes	Criterios considerados para asegurar calidad de imagen
Variables de control	Clima, hora, nubosidad, viento y humedad superficial	Factores registrados durante el levantamiento

Figura 26.

Plan de vuelo fotogramétrico elaborado en DroneDeploy.



3.4.5. Captura de imágenes aéreas con dron

Se ejecutaron los vuelos con dron sobre los tramos viales seleccionados, siguiendo el plan de vuelo establecido. Durante esta actividad se capturaron imágenes aéreas consecutivas de alta resolución, procurando mantener una cobertura uniforme de la superficie del pavimento.

La captura de imágenes se realizó verificando que la carpeta de rodadura quedara claramente visible y que las fotografías permitieran reconocer grietas, fisuras y otros deterioros superficiales. Se descartaron o repitieron capturas afectadas por desenfoque, sombras intensas, reflejos, vehículos estacionados u otros elementos que dificultaran la interpretación visual.

Cada imagen capturada fue organizada por código de tramo, fecha, hora y número de vuelo. Esta codificación permitió mantener la trazabilidad entre la imagen aérea, el tramo inspeccionado y el posterior registro de daños.

Tabla 7.

Registro de captura de imágenes aéreas

Código de tramo	Calle / tramo evaluado	Fecha	Hora	Longitud del tramo (m)	Tipo de pavimento	Número de imágenes	Condición climática
T-01	Av. 9 de octubre	15/05/2026	08:10	180	Flexible	24	Soleado
T-02	Calle Guayaquil	15/05/2026	08:35	145	Adoquinado	15	Soleado
T-03	Calle Sucre	15/05/2026	09:00	210	Flexible	28	Soleado
T-04	Av. 10 de Agosto	15/05/2026	09:25	260	Flexible	34	Soleado
T-05	Calle Chimborazo	15/05/2026	10:00	160	Adoquinado	21	Soleado
T-06	Calle Manabí	15/05/2026	10:25	230	Flexible	30	Soleado
T-07	Av. Carlos Espinoza Larrea	15/05/2026	11:00	320	Flexible	42	Soleado
T-08	Calle Loja	15/05/2026	11:35	190	Adoquinado	25	Soleado
T-09	<u>Calle Rocafuerte</u>	15/05/2026	12:00	280	Flexible	37	Soleado

3.5. METODOLOGÍA EO2: PROCESAR Y ANALIZAR LAS IMÁGENES CAPTURADAS MEDIANTE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE IMÁGENES, PARA DETECTAR Y LOCALIZAR AUTOMÁTICAMENTE GRIETAS Y FISURAS PRESENTES EN LA SUPERFICIE VIAL.

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico, se procesó en conjunto la totalidad de imágenes aéreas obtenidas con el dron DJI Air 2S, utilizando el software Agisoft Metashape. Este procesamiento permitió generar una ortofoto general del área de estudio, a partir de la cual se analizaron los tramos viales seleccionados y se identificaron los deterioros superficiales presentes en pavimentos flexibles y calles adoquinadas.

El procesamiento conjunto de las imágenes permitió integrar en un solo producto cartográfico la información capturada durante los vuelos fotogramétricos, obteniendo una representación continua, corregida geométricamente y georreferenciada del área urbana evaluada. Esta ortofoto general constituyó el insumo principal para la detección, localización y medición preliminar de grietas, fisuras, baches, desprendimientos, asentamientos y deformaciones superficiales.

Agisoft Metashape es un software especializado en fotogrametría digital que permite procesar imágenes aéreas para generar nubes de puntos, modelos digitales de superficie, modelos tridimensionales y ortomosaicos. En esta investigación se utilizó principalmente para transformar las fotografías capturadas por el dron en una ortofoto general del área de estudio.

3.5.1. Preparación de la base fotográfica

Antes del procesamiento en Agisoft Metashape, se organizó la base fotográfica obtenida durante los vuelos realizados con DroneDeploy. Las imágenes aceptadas durante el control de calidad fueron agrupadas en una carpeta general de procesamiento, manteniendo su codificación por fecha, hora de captura, vuelo y tramo vial asociado.

Aunque la captura de imágenes se realizó sobre diferentes tramos de estudio, el procesamiento fotogramétrico se ejecutó de manera conjunta, con el propósito de generar una sola ortofoto general que permitiera observar la continuidad espacial del área evaluada. Esta decisión metodológica facilitó la interpretación global de los deterioros y permitió trabajar sobre una base cartográfica única.

Las imágenes con desenfoque, sombras excesivas, obstrucciones por vehículos, presencia de peatones, reflejos o falta de continuidad visual fueron descartadas antes del procesamiento. De esta manera, se ingresaron al software únicamente las fotografías que cumplieran condiciones adecuadas de nitidez, traslape, iluminación y cobertura.

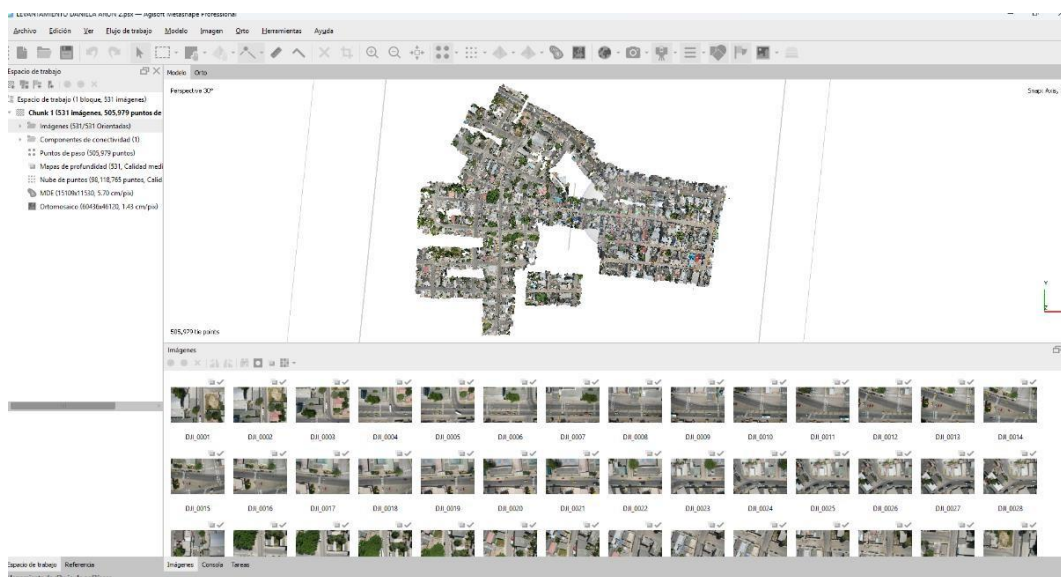
3.5.2. Creación del proyecto general en Agisoft Metashape

Una vez organizada la información, se creó un proyecto general en Agisoft Metashape, dentro del cual se cargó la totalidad de imágenes aceptadas correspondientes a los tramos evaluados. En esta etapa se verificó que las fotografías conservaran su información de captura, orientación aproximada y datos espaciales asociados.

El proyecto fue configurado como un bloque fotogramétrico único, con el propósito de procesar la totalidad del área levantada y obtener un producto cartográfico continuo. Esta forma de procesamiento permitió evitar la generación de ortofotos aisladas por tramo y favoreció la interpretación espacial del deterioro vial dentro de una misma base gráfica.

Figura 27.

Carga general de imágenes en Agisoft Metashape.



3.5.3. Alineación conjunta de fotografías

Posteriormente, se ejecutó el proceso de alineación de fotografías. En esta etapa, Agisoft Metashape identificó puntos homólogos entre imágenes consecutivas y entre imágenes superpuestas, reconstruyendo la posición relativa de las cámaras dentro del área de estudio.

La alineación conjunta fue posible debido al traslape longitudinal del 80 % y lateral del 70 % utilizado durante la captura aérea. Estos valores permitieron que el software encontrara suficientes coincidencias entre fotografías y generara una reconstrucción espacial continua.

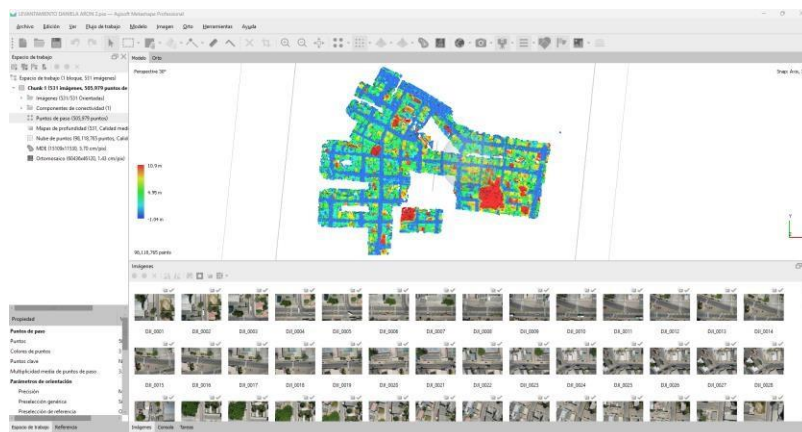
Como resultado de esta etapa se obtuvo una nube de puntos dispersa y la orientación preliminar de las cámaras. Este resultado permitió verificar la cobertura general del levantamiento, la continuidad espacial entre tramos y la ausencia de vacíos significativos dentro del área procesada. Las imágenes que no lograron alinearse correctamente fueron revisadas y, de ser necesario, excluidas del procesamiento para evitar distorsiones en la ortofoto final.

3.5.4. Generación de nube de puntos del área de estudio

Después de la alineación fotográfica, se generó la nube de puntos correspondiente al área de estudio. Esta nube representó la geometría básica de la superficie vial y de los elementos urbanos visibles en las imágenes, tales como calzadas, aceras, bordillos, edificaciones próximas, postes y otros elementos existentes en el entorno. La nube de puntos permitió verificar la continuidad del levantamiento y revisar posibles errores de reconstrucción. Aunque el objetivo principal de la investigación fue el análisis superficial de grietas y fisuras, esta etapa fue necesaria para controlar la calidad del procesamiento fotogramétrico y servir de base para la generación de la ortofoto general.

Figura 28.

Nube de puntos generada del área de estudio



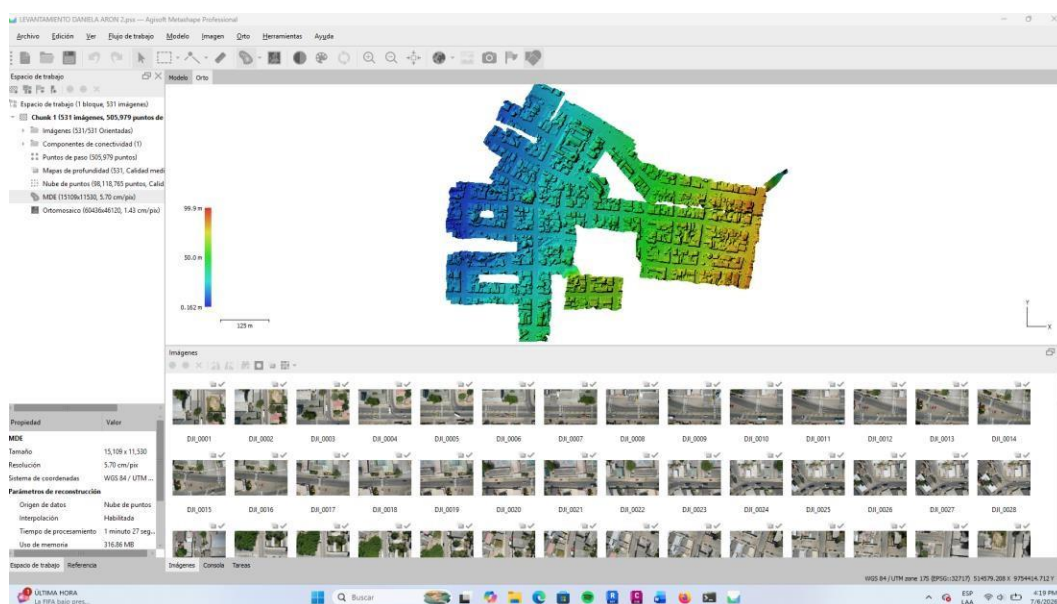
3.5.5. Construcción del modelo digital de superficie

Con la nube de puntos generada, se construyó el modelo digital de superficie del área levantada. Este modelo permitió representar la superficie visible del entorno urbano y sirvió como base para la corrección geométrica de la ortofoto general.

En esta investigación, el modelo digital de superficie no fue utilizado para realizar una evaluación estructural profunda del pavimento, sino como insumo fotogramétrico intermedio para generar la ortofoto y apoyar la interpretación de irregularidades superficiales visibles, especialmente en calles adoquinadas donde los daños pueden manifestarse como asentamientos o deformaciones.

Figura 29.

Modelo digital del terreno.



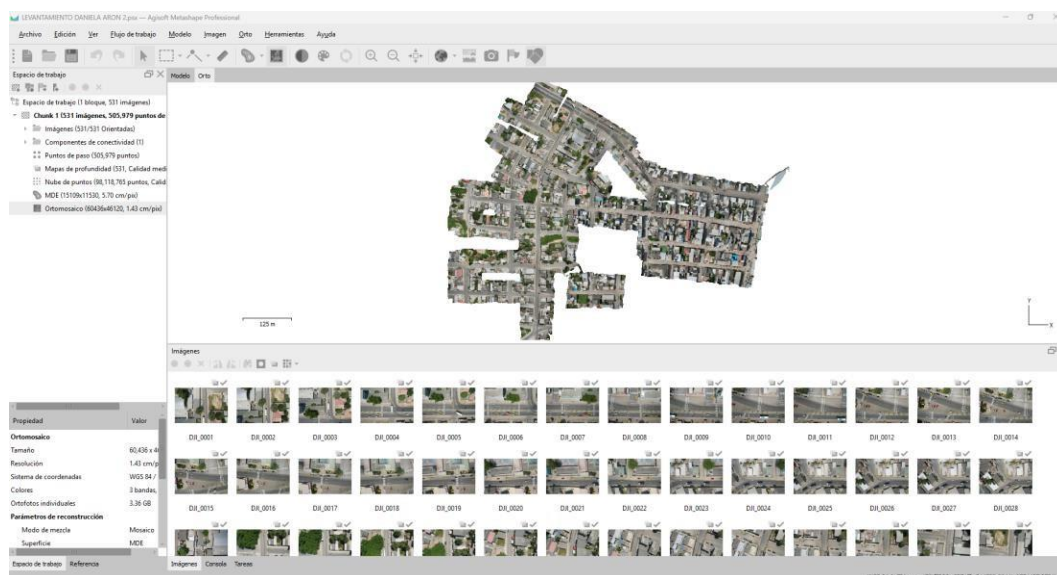
3.5.6. Generación de la ortofoto general del área de estudio

La etapa principal del procesamiento consistió en la generación de una ortofoto general del área de estudio. Este producto integró las imágenes aéreas capturadas en una representación continua, corregida geométrica y visualmente coherente de los tramos viales evaluados.

La ortofoto general permitió analizar la superficie de rodadura de manera integral, identificando sobre una misma base gráfica los sectores correspondientes a pavimento flexible y calles adoquinadas. A partir de este producto se detectaron grietas, fisuras, baches, desprendimientos, deformaciones, asentamientos y otros deterioros superficiales. La generación de una sola ortofoto permitió mantener unidad espacial en el análisis, facilitando la comparación entre tramos, la ubicación de daños y la elaboración posterior de mapas temáticos de deterioro vial.

Figura 30.

Ortofoto general generada en Agisoft Metashape.



CAPÍTULO IV: RESULTADOS

El presente documento reorganiza y amplía los resultados obtenidos a partir de las fichas gráficas proporcionadas para las calles 24 de Mayo, Rocafuerte y Juan Montalvo. Para asegurar coherencia en el análisis cuantitativo, los registros que aparecen repetidos en la presentación original no se contabilizaron dos veces. En particular, el tramo de la calle Rocafuerte entre las abscisas 0+200 y 0+280 y el tramo de la calle Juan Montalvo entre 0+440 y 0+480 se consideran una sola observación cada uno.

De igual forma, en los tres registros correspondientes a la calle 24 de Mayo se consigna el mismo valor de 375,52 m². Debido a que los intervalos de abscisas son diferentes, este valor debe ser verificado en la base de medición original antes de utilizarse como área neta de cada patología. En las tablas y análisis de este documento se conserva el dato tal como aparece en las fichas, pero se lo denomina “área consignada” para evitar atribuirle una precisión que aún necesita ser comprobada.

Las evidencias suministradas corresponden visualmente a sectores con superficie asfáltica y patologías propias de pavimento flexible. No se identificaron, dentro del archivo proporcionado, fichas inequívocas de pavimento adoquinado con calle, abscisa, área y tipo de deterioro. Por esta razón, los resultados se separan expresamente en dos bloques: pavimento flexible, desarrollado con los datos disponibles; y pavimento adoquinado, presentado como una sección independiente cuya matriz queda preparada para incorporar los registros específicos sin mezclar tipologías de pavimento ni generar resultados no respaldados por evidencia.

El procesamiento de las imágenes aéreas y la revisión de las fichas de inspección permitieron localizar espacialmente diferentes manifestaciones de deterioro superficial en los tramos viales evaluados. La información disponible integra, para cada observación, el nombre de la calle, el intervalo de abscisas, un valor de área consignada y la identificación del tipo de deterioro. Esta organización facilita relacionar la evidencia fotográfica con la posición del daño y permite transformar la inspección visual en un inventario espacialmente referenciado que puede servir como base para posteriores decisiones de mantenimiento.

Después de depurar los registros repetidos, se obtuvieron nueve observaciones únicas: tres en la calle 24 de Mayo, dos en la calle Rocafuerte y cuatro en la calle

Juan Montalvo. Las patologías registradas incluyen piel de cocodrilo, parcheo, parcheo asociado a una alcantarilla dañada, fisuración longitudinal, hinchamiento o abultamiento, desgaste superficial y combinaciones de desgaste o fisuración con baches. Esta diversidad evidencia que el deterioro de la red estudiada no responde a un único mecanismo visible, sino a diferentes procesos de pérdida de condición superficial y posibles afectaciones localizadas de naturaleza estructural, funcional o hidráulica.

Tabla 8

Inventario depurado de observaciones de deterioro en pavimento flexible.

N.º	Calle	Abscisa	Área consignada (m²)	Deterioro identificado
1	24 de Mayo	0+125 a 0+162	375,52	Piel de cocodrilo
2	24 de Mayo	0+400 a 0+420	375,52	Parcheo
3	24 de Mayo	0+560 a 0+580	375,52	Parcheo asociado a alcantarilla dañada
4	Rocafuerte	0+000 a 0+020	149,42	Fisuración longitudinal
5	Rocafuerte	0+200 a 0+280	723,62	Hinchamiento / abultamiento
6	Juan Montalvo	0+020 a 0+040	112,19	Desgaste superficial
7	Juan Montalvo	0+145 a 0+185	495,76	Desgaste superficial y baches
8	Juan Montalvo	0+340 a 0+460	678,90	Piel de cocodrilo y baches
9	Juan Montalvo	0+440 a 0+480	306,21	Piel de cocodrilo y baches

Tabla 9**Distribución de observaciones y áreas consignadas por calle.**

Calle	Observaciones únicas	Suma de áreas consignadas (m²)	Participación sobre el total registrado
24 de Mayo	3	1126,56	31,36%
Rocafuerte	2	873,04	24,30%
Juan Montalvo	4	1593,06	44,34%

4.1. Pavimento flexible

Los registros analizados en esta sección se agrupan como pavimento flexible debido a que las imágenes muestran una superficie continua de mezcla asfáltica y las patologías reportadas corresponden a categorías comúnmente empleadas para describir deterioros de este tipo de pavimento. La separación por tipología resulta necesaria porque la interpretación de fisuras, deformaciones, pérdidas superficiales y reparaciones depende del sistema estructural de la vía; por tanto, no es técnicamente recomendable mezclar en una misma estadística los daños de una carpeta asfáltica con los de un pavimento de adoquines.

4.1.1. 4.2.1. Calle 24 de Mayo

En la calle 24 de Mayo se consolidaron 3 observaciones únicas. con una suma de áreas consignadas de 1.126,56 m², Este valor se utiliza únicamente como referencia descriptiva del conjunto de fichas y no debe interpretarse como área neta total deteriorada cuando existan superposiciones espaciales o valores pendientes de verificación,

4.1.2. 24 de Mayo - 0+125 a 0+162: Piel de cocodrilo

En el intervalo comprendido entre las abscisas 0+125 y 0+162 se identificó una configuración de grietas interconectadas clasificada en la ficha como piel de cocodrilo. Esta manifestación constituye una de las evidencias visuales más relevantes del tramo porque no corresponde a una fisura aislada, sino a un patrón reticulado que indica pérdida de continuidad de la capa asfáltica. Desde el punto de vista del diagnóstico visual, la presencia de este patrón obliga a considerar la posibilidad de un proceso de fatiga y a verificar si el daño se concentra en las trayectorias de carga o se extiende transversalmente sobre la calzada. La ficha

consigna 375,52 m², valor que debe comprobarse antes de interpretarse como superficie neta afectada.

Figura 31

Evidencia fotogramétrica del tramo 24 de Mayo, abscisas 0+125 a 0+162.

Fuente: *ficha* suministrada.



Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.3. 24 de Mayo - 0+400 a 0+420: Parcheo

Entre las abscisas 0+400 y 0+420 se registró una zona de parcheo. A diferencia de una patología originada directamente por el deterioro progresivo del pavimento, el parche constituye también una evidencia de intervención previa. Su presencia permite inferir que el sector fue objeto de una reparación localizada, aunque la imagen por sí sola no permite determinar la causa original que motivó la intervención ni la profundidad de la reparación. La evaluación posterior debe revisar el estado de los bordes del parche, su regularidad superficial, la presencia de fisuras reflejadas y la diferencia de nivel respecto de la carpeta existente.

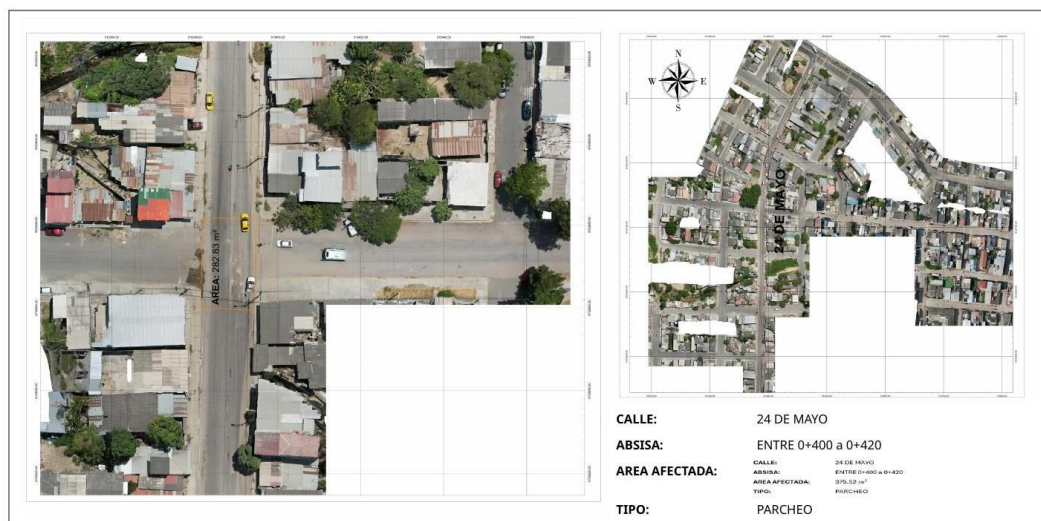


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo 24 de Mayo, abscisas 0+400 a 0+420. Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.4. 24 de Mayo - 0+560 a 0+580: Parcheo asociado a alcantarilla dañada

El tercer registro de la calle 24 de Mayo se localiza entre las abscisas 0+560 y 0+580 y se describe como parcheo asociado a una alcantarilla dañada. Este resultado adquiere especial importancia porque relaciona el deterioro superficial con un elemento de drenaje. La interacción entre agua, estructura del pavimento y condición de las obras hidráulicas puede acelerar la pérdida de soporte o generar reparaciones recurrentes si la fuente del problema no es corregida. En consecuencia, este punto no debería tratarse exclusivamente como una reparación de superficie: requiere inspeccionar la alcantarilla, el relleno lateral, posibles filtraciones, asentamientos y el funcionamiento del drenaje en el entorno inmediato.

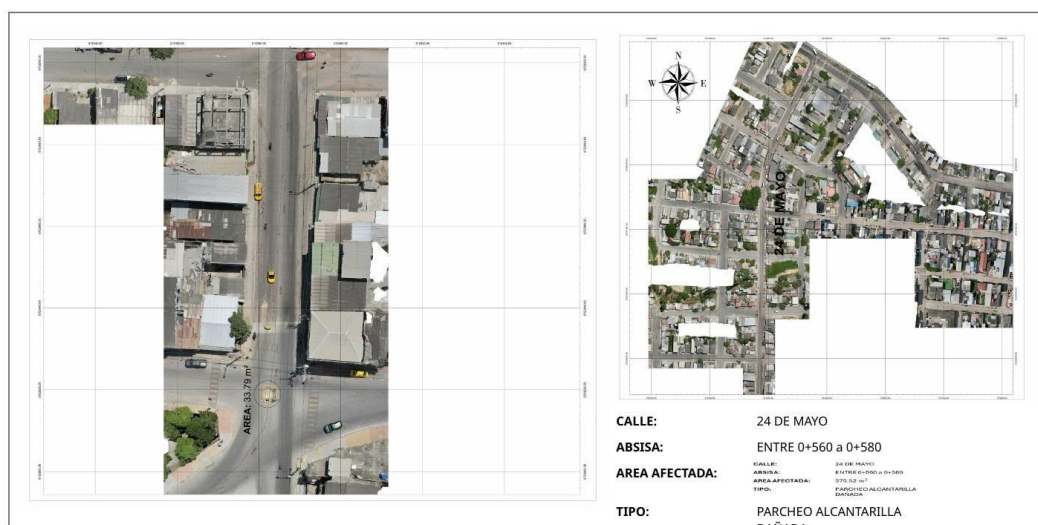


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo 24 de Mayo, abscisas 0+560 a 0+580. Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.5. 4.2.2. Calle Rocafuerte

En la calle Rocafuerte se consolidaron 2 observaciones únicas. con una suma de áreas consignadas de 873,04 m², Este valor se utiliza únicamente como referencia descriptiva del conjunto de fichas y no debe interpretarse como área neta total deteriorada cuando existan superposiciones espaciales o valores pendientes de verificación,

4.1.6. Rocafuerte - 0+000 a 0+020: Fisuración longitudinal

En el inicio de la calle Rocafuerte, entre 0+000 y 0+020, se identificó fisuración longitudinal y se consignó un área de 149,42 m². La orientación de la fisura paralela al eje vial permite diferenciarla de patrones de fisuración transversal o reticulada. La interpretación de su origen requiere precaución, puesto que una fisura longitudinal puede relacionarse con juntas de construcción, trayectorias de rueda,

contracción, movimientos diferenciales o deficiencias localizadas. La evidencia fotogramétrica resulta adecuada para su localización y seguimiento en planta, pero la determinación causal debe complementarse con inspección de campo y, cuando corresponda, información sobre construcción y tránsito.

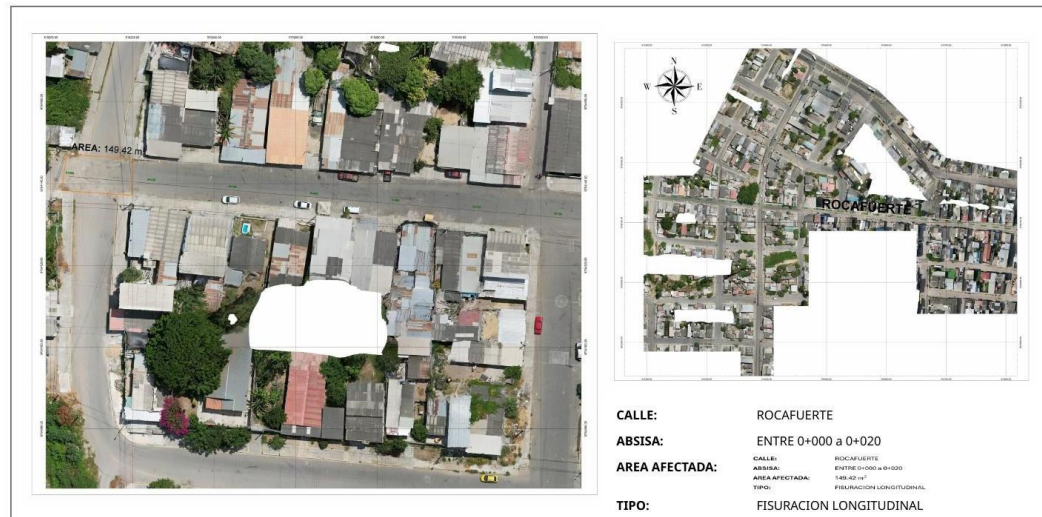


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo Rocafuerte, abscisas 0+000 a 0+020.
Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.7. Rocafuerte - 0+200 a 0+280: Hinchamiento / abultamiento

Entre las abscisas 0+200 y 0+280 se registró una deformación identificada como hinchamiento o abultamiento, con 723,62 m² consignados. Este valor constituye el mayor registro individual de la información depurada. A diferencia de las fisuras, una deformación modifica la geometría y regularidad de la superficie y puede tener un efecto funcional directo sobre la circulación. La imagen aérea permite delimitar la zona general, pero la magnitud vertical del abultamiento no puede establecerse con precisión a partir de una ortofoto convencional; para ello sería conveniente

utilizar el modelo digital de superficie, perfiles obtenidos del levantamiento o mediciones topográficas de control. La amplitud del sector justifica considerarlo prioritario para una inspección complementaria.

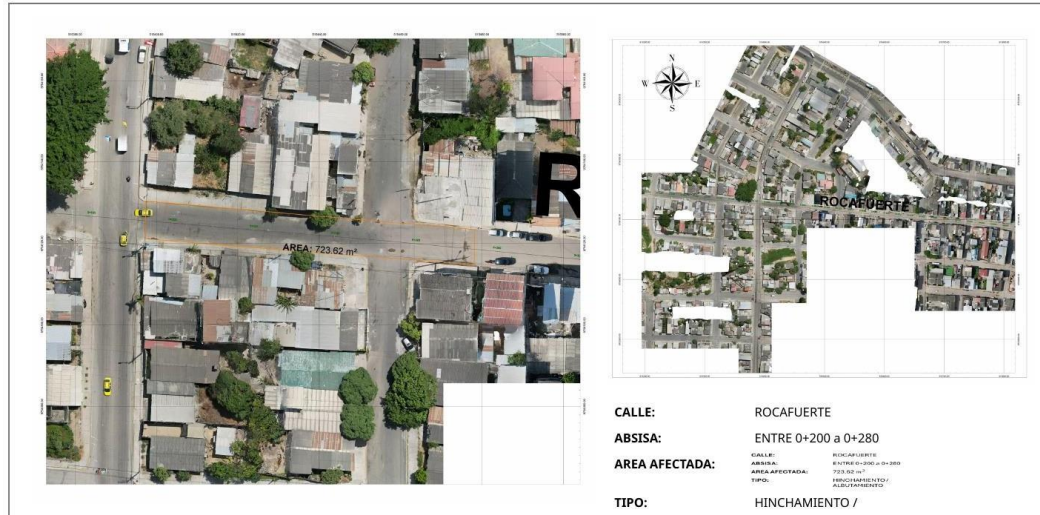


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo Roca fuerte, abscisas 0+200 a 0+280.
Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.8. 4.2.3. Calle Juan Montalvo

En la calle Juan Montalvo se consolidaron 4 observaciones únicas. con una suma de áreas consignadas de 1.593,06 m², Este valor se utiliza únicamente como referencia descriptiva del conjunto de fichas y no debe interpretarse como área neta total deteriorada cuando existan superposiciones espaciales o valores pendientes de verificación,

4.1.9. Juan Montalvo - 0+020 a 0+040: Desgaste superficial

En el tramo comprendido entre 0+020 y 0+040 se reportó desgaste superficial, con un área consignada de 112,19 m². Este daño representa el registro de menor área de

la base depurada. El desgaste superficial se manifiesta como pérdida progresiva de la condición de la capa de rodadura y puede afectar textura, impermeabilidad y comodidad de circulación. En una etapa inicial puede ser predominantemente funcional; sin embargo, su evolución puede favorecer la exposición de agregados, la pérdida de material y la entrada de agua hacia estratos inferiores.

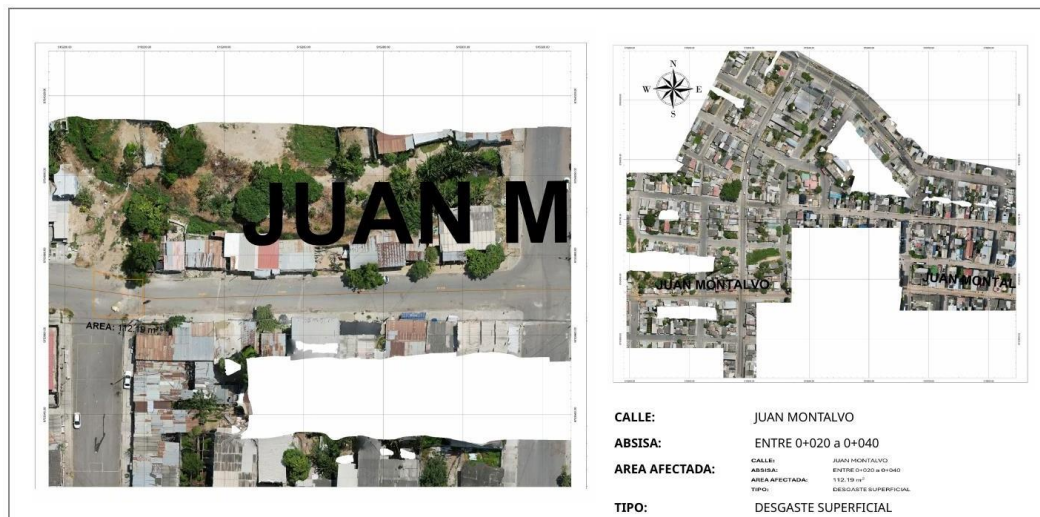


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo Juan Montalvo, abscisas 0+020 a 0+040. Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.10. Juan Montalvo - 0+145 a 0+185: Desgaste superficial y baches

Entre las abscisas 0+145 y 0+185 se registró la coexistencia de desgaste superficial y baches, con 495,76 m² consignados. La combinación es relevante porque muestra una transición desde un deterioro generalizado de superficie hacia pérdidas localizadas de material de mayor severidad funcional. En términos de mantenimiento, la presencia de baches exige identificar y reparar los puntos donde se ha perdido material, pero también revisar el estado del área circundante para

evitar que una intervención puntual se limite a cubrir el síntoma sin tratar la superficie deteriorada adyacente.

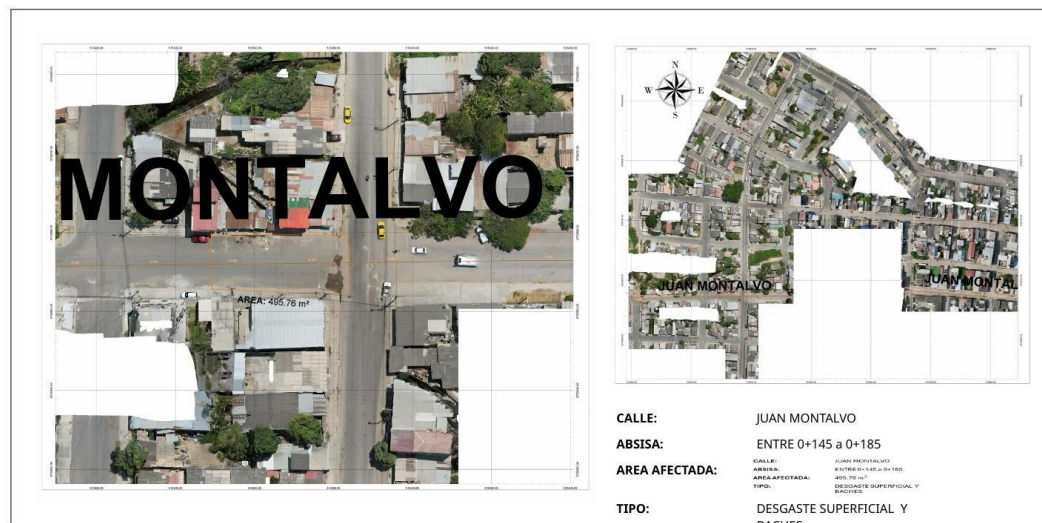


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo Juan Montalvo, abscisas 0+145 a 0+185. Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.11. Juan Montalvo - 0+340 a 0+460: Piel de cocodrilo y baches

El intervalo 0+340 a 0+460 presenta piel de cocodrilo y baches, con 678,90 m² consignados, por lo que constituye uno de los sectores de mayor extensión registrada. La coexistencia de fisuración reticulada y pérdida localizada de material sugiere un grado de deterioro superficial más avanzado que el observado en zonas con una única manifestación. La presencia simultánea de ambos daños incrementa la importancia del tramo para una evaluación de mantenimiento, debido a que la reparación aislada de baches puede resultar insuficiente si la carpeta circundante continúa mostrando un patrón de fatiga.

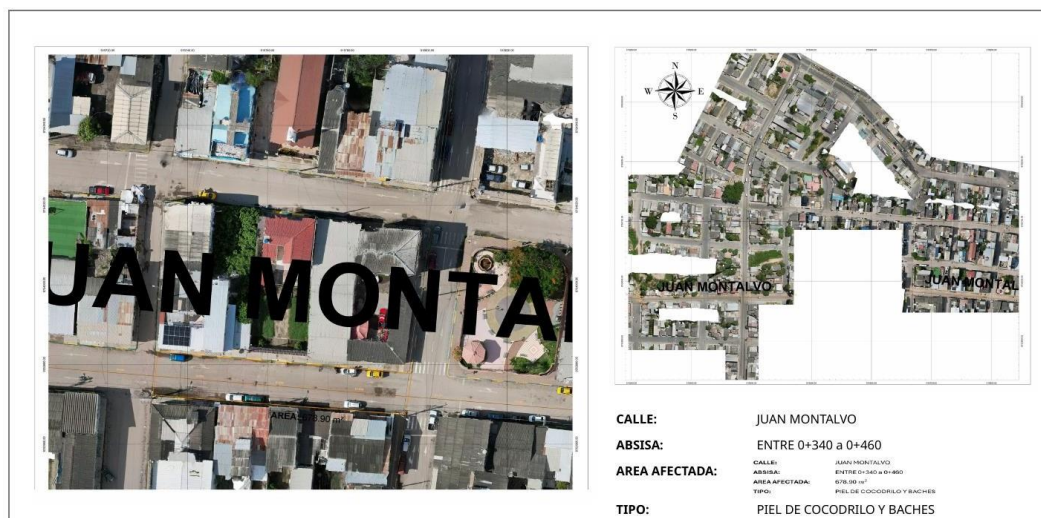


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo Juan Montalvo, abscisas 0+340 a 0+460. Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.12. Juan Montalvo - 0+440 a 0+480: Piel de cocodrilo y baches

Entre 0+440 y 0+480 se vuelve a registrar la combinación de piel de cocodrilo y baches, con 306,21 m² consignados. Debe advertirse que este intervalo se superpone parcialmente con el registro 0+340 a 0+460, específicamente entre 0+440 y 0+460. Por ello, las áreas de ambos registros no deben sumarse automáticamente como si fueran superficies completamente independientes. Esta superposición es un hallazgo importante del control de calidad de datos y debe ser revisada en el ortomosaico o en el archivo GIS original para establecer si se trata de dos polígonos distintos, de una subdivisión de un mismo deterioro o de una duplicación parcial de la delimitación.

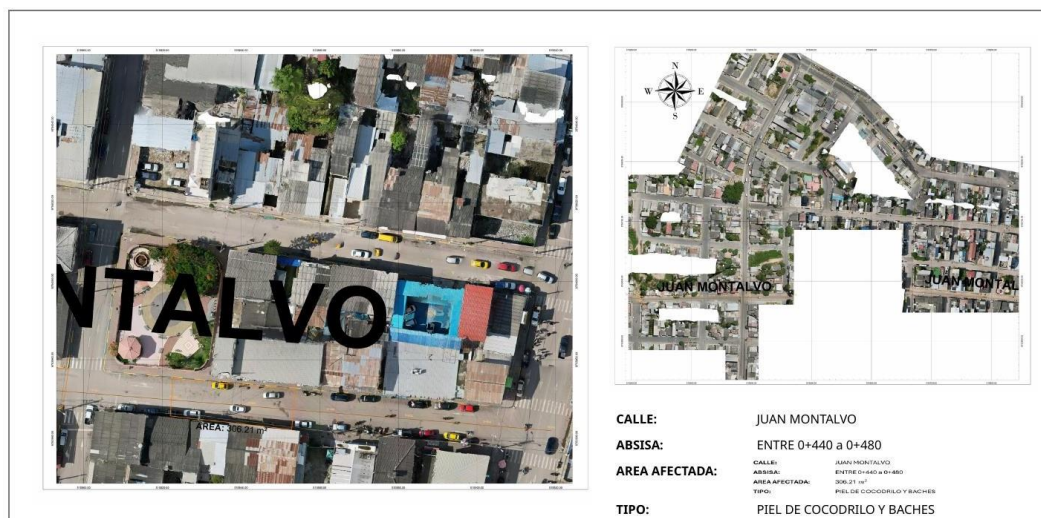


Figura. Evidencia fotogramétrica del tramo Juan Montalvo, abscisas 0+440 a 0+480. Fuente: ficha suministrada.

Interpretación para la tesis: la evidencia gráfica permite identificar la posición y distribución en planta del deterioro y facilita su documentación reproducible. No obstante, la clasificación visual debe entenderse como diagnóstico superficial. La profundidad del daño, la condición de las capas inferiores, la capacidad estructural residual y la causa definitiva no pueden establecerse únicamente con la imagen aérea. Por ello, cualquier recomendación de rehabilitación de mayor alcance debe apoyarse en inspección de campo y, cuando la severidad lo justifique, en ensayos complementarios.

4.1.13. 4.2.4. Comparación entre calles de pavimento flexible

La comparación entre las tres calles muestra comportamientos diferenciados. La calle 24 de Mayo presenta una combinación de fisuración por fatiga y evidencias de intervenciones previas, una de ellas vinculada a una obra de drenaje. Rocafuerte concentra menos observaciones, pero incluye la mayor área consignada en un registro individual debido al sector clasificado como hinchamiento o abultamiento. Juan Montalvo presenta la mayor diversidad de daños y concentra observaciones donde coexisten deterioros, especialmente desgaste con baches y piel de cocodrilo con baches.

Tomando únicamente la suma aritmética de las áreas consignadas en las fichas depuradas, Juan Montalvo representa aproximadamente el 44,34 % del total registrado, 24 de Mayo el 31,36 % y Rocafuerte el 24,30 %. Estos porcentajes deben

interpretarse como indicadores descriptivos de la base suministrada y no como porcentajes definitivos de superficie deteriorada de toda la red, porque no se dispone en estas fichas del área total de cada tramo de análisis y existe una superposición parcial entre dos intervalos de Juan Montalvo.

Tabla 10

Tabla 4. Matriz preliminar de priorización cualitativa. No sustituye una evaluación PCI ni un diseño de rehabilitación.

Calle	Abscisa	Deterioro	Prioridad preliminar	Criterio de revisión
24 de Mayo	0+125 a 0+162	Piel de cocodrilo	Media-Alta	Patología que puede evolucionar o indicar pérdida de integridad superficial; requiere caracterizar severidad y extensión.
24 de Mayo	0+400 a 0+420	Parcheo	Media	Deterioro funcional o evidencia de reparación; requiere seguimiento y mantenimiento localizado según condición.
24 de Mayo	0+560 a 0+580	Parcheo asociado a alcantarilla dañada	Alta	Daño combinado, deformación o posible interacción con drenaje; requiere verificación de campo prioritaria.

Calle	Abscisa	Deterioro	Prioridad preliminar	Criterio de revisión
Rocafuerte	0+000 a 0+020	Fisuración longitudinal	Media-Alta	Patología que puede evolucionar o indicar pérdida de integridad superficial; requiere caracterizar severidad y extensión.
Rocafuerte	0+200 a 0+280	Hinchamiento / abultamiento	Alta	Daño combinado, deformación o posible interacción con drenaje; requiere verificación de campo prioritaria.
Juan Montalvo	0+020 a 0+040	Desgaste superficial	Media	Deterioro funcional o evidencia de reparación; requiere seguimiento y mantenimiento localizado según condición.
Juan Montalvo	0+145 a 0+185	Desgaste superficial y baches	Media-Alta	Patología que puede evolucionar o indicar pérdida de integridad superficial; requiere caracterizar severidad y extensión.

Calle	Abscisa	Deterioro	Prioridad preliminar	Criterio de revisión
Juan Montalvo	0+340 a 0+460	Piel de cocodrilo y baches	Alta	Daño combinado, deformación o posible interacción con drenaje; requiere verificación de campo prioritaria.
Juan Montalvo	0+440 a 0+480	Piel de cocodrilo y baches	Alta	Daño combinado, deformación o posible interacción con drenaje; requiere verificación de campo prioritaria.

4.2. 4.3. Resultados correspondientes a pavimento adoquinado

Para mantener una separación metodológicamente correcta, los resultados de pavimento adoquinado deben presentarse de manera independiente de los resultados de pavimento flexible. En el archivo de fichas utilizado para elaborar este documento no se identificaron registros completos e inequívocos de pavimento adoquinado que incluyeran simultáneamente calle, abscisa, área afectada, tipo de falla e imagen de evidencia. En consecuencia, no se asignan a esta categoría ninguno de los nueve registros anteriores y no se generan porcentajes, áreas o frecuencias que no estén respaldados por datos originales.

Esta separación es importante porque el comportamiento del adoquín depende de unidades discretas, juntas, arena de sello, capa de asiento y confinamiento lateral. Por ello, las fallas no deben interpretarse con los mismos mecanismos empleados para una capa asfáltica continua. En un pavimento adoquinado conviene registrar, entre otros aspectos, piezas rotas o ausentes, pérdida de arena en juntas, desplazamientos, hundimientos, levantamientos, irregularidad superficial, pérdida de confinamiento y deterioro de bordes. Si en la investigación se cuenta con calles adoquinadas adicionales, sus fichas deben incorporarse en la matriz que se propone a continuación y analizarse dentro de esta sección.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos confirman la utilidad de la fotogrametría UAV como herramienta para organizar un diagnóstico superficial de la infraestructura vial. Su principal aporte en este estudio no consiste únicamente en producir imágenes aéreas de alta resolución, sino en generar una representación espacial continua sobre la cual pueden localizarse deterioros, establecerse intervalos de abscisas, delimitarse zonas de interés y conservarse evidencia gráfica del estado de la vía en un momento determinado. Esta capacidad resulta especialmente útil en entornos urbanos, donde la inspección tradicional a pie puede requerir más tiempo y donde la visión cenital facilita observar la continuidad de fisuras, la distribución de parches y la extensión relativa de zonas deterioradas.

La interpretación de las fichas es coherente con el enfoque de los manuales de identificación de deterioros de pavimentos asfálticos de la Federal Highway Administration, que distinguen familias de daños como fisuración por fatiga, fisuración longitudinal, parches, baches, deformaciones y defectos superficiales. Este marco respalda la conveniencia de mantener categorías diferenciadas y de registrar la geometría del deterioro de manera uniforme. Sin embargo, la fotogrametría no reemplaza la evaluación estructural: una ortofoto describe con alta utilidad la manifestación visible en planta, mientras que la capacidad portante, la profundidad de una falla o la condición de base y subrasante requieren información adicional.

Otro aspecto relevante es la reproducibilidad. Cuando el vuelo, el sistema de coordenadas y el procesamiento se mantienen controlados, el ortomosaico puede utilizarse como línea base para comparar campañas posteriores. Esto transforma el levantamiento UAV en una herramienta potencial de seguimiento, ya que no solo permite identificar dónde existe un deterioro, sino evaluar si el polígono de daño aumenta, si aparecen nuevos baches o si un parche mantiene un comportamiento estable con el tiempo.

4.3.1. Discusión de la piel de cocodrilo y su asociación con baches.

La piel de cocodrilo aparece en tres de las nueve observaciones depuradas: una en la calle 24 de Mayo y dos en Juan Montalvo, estas últimas acompañadas por baches. Su recurrencia es técnicamente significativa porque el patrón reticulado constituye una pérdida de integridad de la superficie asfáltica y, cuando se combina

con desprendimiento de material, evidencia una evolución del deterioro hacia condiciones que afectan con mayor intensidad la serviciabilidad. La Federal Highway Administration clasifica la fisuración por fatiga como una categoría específica de deterioro en pavimentos con superficie de concreto asfáltico y recomienda medirla por área afectada y por nivel de severidad.

En Juan Montalvo, la coexistencia de piel de cocodrilo y baches en intervalos consecutivos o parcialmente superpuestos sugiere que el problema no debería abordarse únicamente mediante relleno puntual de cavidades. Desde una perspectiva de gestión de mantenimiento, el bache representa el daño más evidente para el usuario, pero el patrón de fisuración circundante constituye información esencial para definir el límite real de una reparación. Si el material que rodea al bache se encuentra fracturado, una intervención demasiado localizada puede presentar una vida útil reducida. La decisión final, no obstante, depende de la severidad, profundidad, condición de las capas inferiores y disponibilidad de recursos.

La fotogrametría aporta una ventaja particular en este tipo de daño: permite reconocer la continuidad espacial del patrón y observar si la fisuración forma zonas aisladas o áreas extensas. No obstante, para convertir esta evidencia en un indicador cuantitativo robusto sería necesario delimitar con precisión cada polígono de piel de cocodrilo y separar el área ocupada por baches cuando ambos daños se superponen. Los manuales de levantamiento de deterioros advierten precisamente la necesidad de evitar doble conteo de áreas cuando distintas patologías se encuentran dentro de una misma superficie.

4.3.2. Discusión de la fisuración longitudinal

La fisuración longitudinal fue registrada en la calle Rocafuerte entre 0+000 y 0+020. Aunque su extensión consignada es menor que la del hinchamiento identificado en la misma vía, su presencia es relevante porque la orientación de una grieta puede aportar información diagnóstica. La clasificación visual debe considerar su posición respecto de las trayectorias de rueda y juntas constructivas. La documentación aérea facilita trazar la fisura y conservar su posición, pero la interpretación de la causa requiere observaciones de detalle, especialmente del ancho de abertura, ramificaciones, sellado previo, desplazamientos y relación con la geometría de la vía.

En términos de mantenimiento, una fisura longitudinal temprana puede ser susceptible de acciones preventivas si conserva una condición adecuada y no está acompañada por pérdida de material o deformaciones importantes. La ventaja del inventario fotogramétrico es que permite ubicarla para una inspección dirigida en campo, reduciendo la necesidad de recorrer de forma indiscriminada toda la red y orientando al equipo hacia los puntos previamente detectados.

4.3.3. Discusión del hinchamiento o abultamiento

El registro de Rocafuerte entre 0+200 y 0+280 merece atención particular porque presenta la mayor área consignada de la base depurada, con 723,62 m². Las deformaciones de la superficie pueden afectar directamente la regularidad del rodamiento y, dependiendo de su geometría y magnitud, influir en seguridad, comodidad y drenaje superficial. A diferencia de una grieta, su caracterización no debe limitarse a su huella en planta; es necesario conocer la componente vertical de la deformación.

Por esta razón, el uso de una ortofoto debe complementarse con el modelo digital generado por el proceso fotogramétrico o con perfiles topográficos. Si la tesis dispone de nube de puntos, modelo digital de superficie o curvas de nivel, estos productos pueden aprovecharse para cuantificar diferencias de elevación y fortalecer considerablemente el análisis. La posibilidad de pasar de una identificación visual a una medición tridimensional constituye uno de los principales potenciales de la fotogrametría cuando la calidad del levantamiento, la resolución y los puntos de control son adecuados.

La causa del abultamiento no debe asignarse exclusivamente a partir de la imagen. Puede relacionarse con movimientos de materiales, humedad, condiciones de base, reparaciones, raíces u otros mecanismos locales. La discusión académica debe separar con claridad el hallazgo —deformación visible— de la hipótesis causal, que requiere verificación. Esta distinción fortalece la validez de la investigación y evita presentar como conclusión aquello que únicamente puede inferirse de forma preliminar.

4.3.4. Discusión del desgaste superficial y los baches

El desgaste superficial fue observado en Juan Montalvo tanto de manera aislada como acompañado por baches. Esta secuencia es compatible con un proceso de reducción gradual de la calidad de la capa de rodadura, donde la pérdida superficial de material puede coexistir con daños localizados más profundos. Desde

el punto de vista funcional, el desgaste puede disminuir la textura y favorecer una mayor sensibilidad frente al agua; cuando aparecen cavidades, la afectación se vuelve más evidente para la circulación y requiere atención localizada.

La combinación de desgaste y baches también demuestra la importancia de no usar una sola etiqueta para toda la vía. Un inventario por segmentos permite reconocer transiciones y concentraciones de daño. Para la gestión vial, esta información puede utilizarse para establecer diferentes niveles de intervención dentro de una misma calle: mantenimiento superficial en sectores con desgaste moderado y reparaciones más profundas o localizadas en los puntos donde se haya producido pérdida de material.

4.3.5. Discusión de los parcheos y la relación con el drenaje

Los dos registros de parcheo en la calle 24 de Mayo muestran que parte de la condición actual de la vía responde a intervenciones previas. El parche no debe analizarse únicamente como una señal negativa: también representa una acción de conservación realizada sobre un daño anterior. Su desempeño debe evaluarse observando la integridad del material colocado, la adherencia de los bordes, la diferencia de nivel, la aparición de fisuras y el comportamiento del área circundante.

El parcheo asociado a una alcantarilla dañada tiene mayor relevancia diagnóstica porque incorpora un posible condicionante hidráulico. En infraestructura vial urbana, el estado del drenaje puede influir de manera decisiva sobre la durabilidad de las reparaciones. Si existe infiltración, erosión del material de relleno o asentamiento junto a la estructura, colocar solamente una nueva capa superficial puede no resolver el origen del problema. La inspección debe considerar, por tanto, el sistema vía-drenaje como un conjunto y no como elementos independientes.

4.3.6. Comparación espacial entre las calles estudiadas

La distribución de los deterioros evidencia tres perfiles distintos. La calle 24 de Mayo combina una patología de fisuración con dos evidencias de mantenimiento, incluyendo un punto condicionado por una alcantarilla. Rocafuerte presenta menos observaciones pero incorpora una deformación de gran extensión consignada, además de fisuración longitudinal. Juan Montalvo concentra el mayor número de observaciones y la mayor diversidad de combinaciones de deterioro, con desgaste, baches y piel de cocodrilo.

A partir de la suma descriptiva de áreas consignadas, Juan Montalvo concentra la mayor participación. Sin embargo, la interpretación espacial revela que dos de sus intervalos se superponen entre 0+440 y 0+460. Este hecho demuestra por qué un análisis basado únicamente en sumas de tablas puede conducir a sobreestimaciones. La fotogrametría y los sistemas de información geográfica permiten resolver este problema mediante operaciones de intersección y unión de polígonos, obteniendo el área neta afectada sin doble conteo. Incorporar esta depuración en la versión final de la tesis fortalecería el rigor cuantitativo del capítulo de resultados.

4.4. Implicaciones para la priorización del mantenimiento

Los resultados permiten proponer una priorización preliminar basada en la naturaleza visible del daño, sin reemplazar metodologías formales de evaluación como índices de condición. Los sectores con piel de cocodrilo y baches, deformaciones de superficie o interacción con obras de drenaje deberían verificarse primero, debido a que combinan señales de pérdida de integridad, afectación funcional o factores que podrían favorecer una evolución acelerada. Los sectores con desgaste superficial aislado o parcheos estables pueden incorporarse a programas de seguimiento y mantenimiento preventivo, siempre que la inspección de campo confirme una severidad baja o moderada.

La utilidad práctica de la fotogrametría radica en convertir la inspección en un mapa de decisiones. En lugar de realizar intervenciones generales sin diferenciación espacial, el municipio o entidad responsable puede identificar puntos de alta prioridad, programar visitas de campo y documentar antes y después de cada reparación. Esto puede contribuir a optimizar recursos, particularmente cuando la red a inspeccionar es extensa y la disponibilidad presupuestaria exige intervenir primero los sectores con mayor necesidad.

4.5. Fortalezas y limitaciones del uso de drones en el estudio

Entre las principales fortalezas de la metodología se encuentran la cobertura rápida de corredores urbanos, la generación de una visión cenital continua, la posibilidad de georreferenciar hallazgos y la disponibilidad de un registro visual que puede revisarse posteriormente. También permite disminuir la dependencia de anotaciones exclusivamente manuales realizadas en campo y facilita elaborar productos cartográficos, fichas y mapas temáticos para comunicar los resultados. Las limitaciones deben ser expuestas con la misma claridad. La capacidad de detectar una fisura depende de la resolución espacial, altura de vuelo, enfoque,

iluminación, contraste y calidad del ortomosaico. La presencia de vehículos, sombras, árboles u objetos urbanos puede ocultar sectores del pavimento. Las ortofotos describen principalmente la geometría en planta, por lo que no son suficientes para medir profundidad de baches o amplitud vertical de deformaciones si no se complementan con información tridimensional confiable. Además, la clasificación visual puede contener subjetividad si no se utiliza un protocolo uniforme de severidad y medición.

Otra limitación observada en los datos suministrados corresponde a la consistencia de las fichas. La repetición de registros, la coincidencia exacta de áreas en intervalos distintos y la superposición parcial de abscisas muestran que el control de calidad de la base es una etapa indispensable. Estos aspectos no invalidan el uso de la fotogrametría; al contrario, evidencian la necesidad de vincular cada ficha con un polígono único en el ortomosaico y de automatizar, cuando sea posible, la extracción del área desde el mismo sistema espacial.

4.6. Relación de los resultados con los objetivos de la investigación

En relación con el objetivo orientado a diagnosticar el estado superficial de las vías, los resultados demuestran que fue posible reconocer y localizar diferentes deterioros en los tramos analizados. El inventario depurado identifica nueve observaciones únicas y diferencia fisuración, deformaciones, pérdida superficial de material, baches y reparaciones. Esta información constituye una caracterización inicial del estado superficial y permite señalar sectores que requieren una revisión más detallada.

Respecto del objetivo de aplicar la fotogrametría UAV como herramienta de detección, las fichas evidencian que el ortomosaico permite asociar el deterioro con su ubicación y mantener un registro gráfico de cada tramo. La metodología facilita pasar de una observación general de la vía a una evidencia georreferenciada, lo cual representa una ventaja para el diagnóstico y para la planificación de recorridos de inspección.

Finalmente, si el estudio busca apoyar la planificación del mantenimiento, la combinación de ubicación, tipo de deterioro y área constituye una base útil para establecer prioridades. No obstante, la discusión muestra que antes de convertir los resultados en un programa definitivo de intervención es necesario validar las áreas, resolver superposiciones, clasificar la severidad y complementar los puntos críticos

con inspecciones de campo. La fotogrametría debe entenderse, por tanto, como una herramienta de apoyo a la gestión y no como sustituto absoluto de la evaluación técnica integral del pavimento.

4.7. Síntesis de la discusión

En conjunto, los hallazgos muestran que la metodología permite documentar de forma clara y espacialmente organizada el deterioro superficial de vías urbanas. La mayor fortaleza del levantamiento UAV es la posibilidad de visualizar simultáneamente la condición del pavimento y su contexto, facilitando la identificación de patrones y la generación de fichas. Entre los resultados más relevantes se encuentran la presencia recurrente de piel de cocodrilo y baches en Juan Montalvo, la deformación de gran extensión registrada en Rocafuerte y la existencia de reparaciones asociadas a un elemento de drenaje en 24 de Mayo.

El análisis también evidencia que la calidad del resultado final depende tanto de la captura de imágenes como del manejo posterior de los datos. Una base de deterioros debe evitar duplicaciones, superposiciones no controladas y áreas que no correspondan exactamente al polígono del daño. Por esta razón, la siguiente fase de fortalecimiento de la tesis debería consistir en vincular cada observación con una geometría única en el ortomosaico y calcular automáticamente sus dimensiones. Con esta mejora, la investigación podría ofrecer no solo una identificación cualitativa, sino un inventario cuantitativo más robusto y replicable.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La aplicación de fotogrametría con drones permitió diagnosticar, identificar y clasificar deterioros superficiales presentes en las vías de la cabecera cantonal de Santa Elena, demostrando que esta tecnología constituye una herramienta técnica eficiente para la inspección vial urbana. Mediante el uso del dron DJI Air 2S, la planificación de vuelos en DroneDeploy y el procesamiento fotogramétrico en Agisoft Metashape, se obtuvo una ortofoto general del área de estudio que permitió visualizar, localizar y medir preliminarmente grietas, fisuras, baches, desgaste superficial, deformaciones, zonas de parcheo y otros deterioros presentes en la superficie de rodadura.

El estudio permitió evaluar nueve tramos viales, con una longitud total de 1.975 metros lineales, correspondientes a seis tramos de pavimento flexible y tres calles adoquinadas. Los resultados evidenciaron la presencia de deterioros de diferente tipo y extensión, confirmando la utilidad de la fotogrametría UAV como herramienta de apoyo para la evaluación del estado superficial de la infraestructura vial y para la identificación de sectores que requieren acciones de mantenimiento preventivo o correctivo.

Con respecto al primer objetivo específico, se diagnosticó el estado superficial de los tramos viales seleccionados mediante inspecciones aéreas con drones y observación directa de campo. El diagnóstico permitió reconocer las condiciones actuales de las vías evaluadas y diferenciar los deterioros presentes según el tipo de superficie de rodadura, estableciendo una separación entre los daños registrados en pavimentos flexibles y aquellos correspondientes a calles adoquinadas.

En los pavimentos flexibles, los nuevos resultados obtenidos permitieron identificar principalmente grietas tipo piel de cocodrilo, fisuración longitudinal, desgaste superficial, baches, hinchamientos o abultamientos, zonas de parcheo y deterioros asociados a elementos de drenaje. Estas patologías fueron registradas particularmente en las calles 24 de Mayo, Rocafuerte y Juan Montalvo, donde se localizaron sectores con diferentes características y extensión de afectación.

En la calle 24 de Mayo se identificó, entre las abscisas 0+125 y 0+162, un sector con presencia de grietas tipo piel de cocodrilo, registrándose en la ficha un área de

375,52 m². Este deterioro evidencia un proceso de agrietamiento interconectado de la superficie asfáltica y constituye una de las patologías más relevantes encontradas durante la inspección. Adicionalmente, entre las abscisas 0+400 y 0+420 se identificó una zona de parcheo, mientras que entre las abscisas 0+560 y 0+580 se registró un parcheo relacionado con una alcantarilla deteriorada. Estos resultados muestran que la calle 24 de Mayo presenta tanto deterioros propios de la carpeta asfáltica como intervenciones anteriores y afectaciones relacionadas con la infraestructura de drenaje.

En la calle Rocafuerte se identificaron dos tipos principales de deterioro. Entre las abscisas 0+000 y 0+020 se registró fisuración longitudinal, asociada a un área consignada de 149,42 m². Posteriormente, entre las abscisas 0+200 y 0+280 se evidenció un sector con hinchamiento o abultamiento de la superficie de rodadura, con un área registrada de 723,62 m². La presencia de este tipo de deformación resulta significativa debido a que modifica la regularidad superficial de la vía y puede afectar las condiciones de comodidad y seguridad durante la circulación vehicular.

La calle Juan Montalvo presentó una mayor diversidad y continuidad de deterioros superficiales dentro de los registros analizados. Entre las abscisas 0+020 y 0+040 se identificó desgaste superficial, con un área registrada de 112,19 m². Entre las abscisas 0+145 y 0+185 se observó la presencia combinada de desgaste superficial y baches, correspondiente a un área de 495,76 m². Posteriormente, entre las abscisas 0+340 y 0+460 se registró una afectación caracterizada por grietas tipo piel de cocodrilo y baches, con un área consignada de 678,90 m². Finalmente, entre las abscisas 0+440 y 0+480 se identificó nuevamente la combinación de piel de cocodrilo y baches, con un área registrada de 306,21 m².

Los resultados obtenidos en la calle Juan Montalvo evidencian una progresión importante de los deterioros superficiales, debido a que se presentan sectores donde el desgaste de la superficie aparece acompañado de baches y otros donde el agrietamiento tipo piel de cocodrilo se encuentra combinado con pérdida localizada de material. Esta combinación de patologías constituye una condición que requiere especial atención dentro de la planificación del mantenimiento vial.

En las calles adoquinadas se mantuvieron como principales deterioros identificados la separación de juntas, los asentamientos localizados, hundimientos, adoquines fracturados y pérdida del material de relleno de las juntas. Estos deterioros poseen

características diferentes a las observadas en el pavimento flexible, debido a que afectan principalmente la estabilidad, nivelación y confinamiento de los elementos que conforman el pavimento articulado.

La información obtenida permitió establecer una línea base actualizada del estado superficial de las vías estudiadas. La identificación detallada mediante calle, abscisa, área registrada y tipo de deterioro permitió mejorar el nivel de precisión del diagnóstico y disponer de información más específica para el análisis posterior de las condiciones de conservación de la infraestructura vial urbana.

La selección de los nueve tramos permitió evaluar diferentes condiciones superficiales dentro del área de estudio, considerando vías de importancia urbana, acceso público, tráfico regular y presencia visible de deterioros. La información recopilada mediante inspección directa, registro fotográfico y levantamiento aéreo sirvió como base para el procesamiento fotogramétrico y la posterior representación espacial de los daños encontrados.

Respecto al segundo objetivo específico, las imágenes capturadas con el dron DJI Air 2S fueron procesadas de manera conjunta en Agisoft Metashape, obteniéndose una ortofoto general del área de estudio. Este producto fotogramétrico permitió integrar las imágenes aéreas individuales en una representación continua de los sectores inspeccionados y facilitó el análisis técnico de la superficie vial.

La ortofoto general permitió identificar con mayor claridad la ubicación de los diferentes deterioros y relacionarlos con las abscisas correspondientes a cada sector. De esta manera, fue posible reconocer en la calle 24 de Mayo los sectores afectados por piel de cocodrilo, parcheos y deterioros asociados a la alcantarilla; en la calle Rocafuerte se localizaron sectores con fisuración longitudinal y deformaciones tipo hinchamiento o abultamiento; mientras que en la calle Juan Montalvo se identificaron zonas con desgaste superficial, baches y agrietamiento tipo piel de cocodrilo.

La posibilidad de visualizar estos daños desde una perspectiva aérea facilitó la delimitación de las áreas afectadas y permitió organizar la información obtenida durante las inspecciones de campo. A partir de este producto se pudieron representar las patologías mediante líneas, polígonos y puntos de referencia, generando una base digital de información sobre las condiciones superficiales de las vías estudiadas.

El procesamiento conjunto demostró ser adecuado para el análisis global del área estudiada, debido a que permitió mantener continuidad espacial entre los sectores inspeccionados, reducir la dispersión de la información y facilitar la generación de mapas temáticos de deterioro vial. Además, permitió disponer de un registro visual permanente de las condiciones existentes durante el periodo en que fue ejecutado el levantamiento.

Respecto al tercer objetivo específico, los deterioros fueron clasificados de acuerdo con su tipología y características observadas sobre la superficie vial. La actualización de los resultados permitió realizar una clasificación más detallada de las patologías presentes, diferenciando principalmente agrietamientos, deformaciones, pérdida superficial de material, baches, reparaciones anteriores y afectaciones relacionadas con elementos de drenaje.

Dentro de los pavimentos flexibles, las grietas tipo piel de cocodrilo constituyeron uno de los deterioros de mayor importancia debido a su presencia en diferentes sectores, especialmente en las calles 24 de Mayo y Juan Montalvo. En esta última vía, además, el agrietamiento aparece combinado con la presencia de baches, lo cual evidencia una condición de deterioro más avanzada de la superficie asfáltica.

La fisuración longitudinal fue identificada específicamente en la calle Rocafuerte, entre las abscisas 0+000 y 0+020. Este tipo de daño se caracteriza por desarrollarse generalmente en dirección paralela al eje de circulación y debe ser controlado mediante actividades de mantenimiento que reduzcan la posibilidad de infiltración de agua y propagación de las grietas.

Otro deterioro significativo corresponde al hinchamiento o abultamiento localizado entre las abscisas 0+200 y 0+280 de la calle Rocafuerte. Debido a que este sector presenta una deformación de la superficie de rodadura, resulta necesario complementar la inspección superficial con una revisión del comportamiento de las capas inferiores y de las condiciones de drenaje antes de definir el procedimiento definitivo de reparación.

En la calle Juan Montalvo, los resultados muestran sectores afectados inicialmente por desgaste superficial y posteriormente por una combinación de desgaste y baches, hasta llegar a zonas donde se observa piel de cocodrilo acompañada de baches. Esta distribución evidencia que la vía presenta diferentes niveles de evolución del deterioro a lo largo de su recorrido y permite identificar sectores que requieren distintos tipos de intervención.

Los nuevos registros permiten establecer que los sectores comprendidos entre las abscisas 0+340 y 0+460 y entre 0+440 y 0+480 de la calle Juan Montalvo deben recibir especial atención debido a la combinación de agrietamiento tipo piel de cocodrilo y formación de baches. De igual manera, el sector comprendido entre las abscisas 0+200 y 0+280 de la calle Rocafuerte requiere una evaluación prioritaria debido a la extensión registrada del hinchamiento o abultamiento. En la calle 24 de Mayo, el sector comprendido entre 0+125 y 0+162 también constituye un punto de interés debido a la presencia de piel de cocodrilo.

Estos resultados permiten establecer una priorización más específica basada directamente en la ubicación real de los daños encontrados, en lugar de considerar únicamente una valoración general de cada vía. La identificación mediante abscisas facilita que futuras intervenciones puedan dirigirse específicamente hacia los sectores deteriorados y no necesariamente hacia la totalidad de la calle.

Se recomienda ejecutar un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de acuerdo con el tipo, ubicación y características de los deterioros identificados. Para la fisuración longitudinal encontrada en la calle Rocafuerte, se recomienda realizar inicialmente la limpieza de las grietas y, siempre que la evaluación de campo confirme que no existe una afectación estructural significativa, proceder con el sellado mediante un material asfáltico apropiado. Esta intervención permitirá reducir la infiltración de agua y disminuir la propagación de la fisura hacia sectores adyacentes.

Para las zonas donde se identificaron grietas tipo piel de cocodrilo, particularmente en la calle 24 de Mayo entre las abscisas 0+125 y 0+162 y en la calle Juan Montalvo entre las abscisas 0+340 y 0+480, se recomienda realizar una evaluación complementaria de la estructura del pavimento. Debido a que este tipo de agrietamiento puede estar asociado con un deterioro más avanzado, no resulta conveniente limitar la intervención únicamente al sellado superficial cuando exista pérdida de capacidad de soporte. En dichos sectores deberá retirarse el material deteriorado, verificarse el estado de las capas inferiores y, de ser necesario, ejecutarse un parcheo profundo o la reposición localizada de la estructura del pavimento.

En los sectores de la calle Juan Montalvo que presentan baches, especialmente entre las abscisas 0+145 y 0+185 y entre 0+340 y 0+480, se recomienda delimitar adecuadamente las áreas afectadas, retirar el material suelto o deteriorado, limpiar

la superficie, verificar las condiciones de la base y colocar una mezcla asfáltica debidamente compactada. La reparación deberá ejecutarse procurando obtener una adecuada adherencia entre el material existente y el nuevo material colocado.

Para el desgaste superficial identificado en la calle Juan Montalvo, particularmente entre las abscisas 0+020 y 0+040, deberá evaluarse el grado de pérdida de agregado y textura de la superficie. Cuando el deterioro sea únicamente superficial y no exista evidencia de fallas estructurales, podrán aplicarse tratamientos preventivos destinados a proteger y prolongar la vida útil de la carpeta asfáltica.

En el sector de la calle Rocafuerte comprendido entre las abscisas 0+200 y 0+280, donde se registró hinchamiento o abultamiento, se recomienda realizar una inspección complementaria para determinar el origen de la deformación. La intervención deberá considerar la revisión de las capas inferiores, las condiciones de humedad y el sistema de drenaje, debido a que la corrección exclusivamente superficial podría no solucionar la causa que produce el levantamiento de la superficie.

En la calle 24 de Mayo deberán revisarse además las zonas de parcheo existentes. El sector comprendido entre las abscisas 0+400 y 0+420 deberá ser evaluado para verificar la condición del parche y determinar si mantiene una adecuada adherencia y nivelación respecto a la superficie existente. De manera particular, entre las abscisas 0+560 y 0+580 deberá atenderse la afectación relacionada con la alcantarilla, debido a que cualquier deficiencia en este elemento puede favorecer la infiltración de agua y generar nuevos daños en la estructura vial.

En las calles adoquinadas que presenten separación de juntas o pérdida de material de relleno se recomienda limpiar las juntas y reponer la arena correspondiente. En aquellos sectores donde existan adoquines fracturados será necesario retirar y sustituir las piezas afectadas, mientras que en las zonas con hundimientos o asentamientos localizados deberá retirarse temporalmente el adoquinado, corregirse y compactarse la capa de apoyo y posteriormente reinstalarse las piezas, verificando una adecuada nivelación de la superficie.

Las intervenciones deberán priorizar los sectores donde se observa combinación de varios deterioros o deformaciones de mayor extensión. Bajo este criterio, los sectores de la calle Juan Montalvo afectados por piel de cocodrilo y baches, el tramo de la calle Rocafuerte afectado por hinchamiento o abultamiento y el sector de la

calle 24 de Mayo con piel de cocodrilo constituyen puntos relevantes para la programación de actividades de mantenimiento.

La incorporación de las abscisas y áreas registradas permite mejorar considerablemente la planificación de estas intervenciones, debido a que facilita localizar de manera precisa los sectores deteriorados, estimar preliminarmente las cantidades de obra requeridas y establecer prioridades de mantenimiento de acuerdo con la condición observada en cada vía.

Finalmente, los resultados actualizados confirman que la fotogrametría mediante drones no solamente permite identificar visualmente los deterioros presentes, sino que también facilita su localización espacial y la delimitación de las zonas afectadas. La integración entre la ortofoto, las inspecciones terrestres y las fichas de deterioro proporciona una base técnica más detallada para la gestión del mantenimiento vial de la cabecera cantonal de Santa Elena y permite establecer registros que pueden ser comparados con futuros levantamientos para evaluar la evolución de los daños y la efectividad de las intervenciones ejecutadas.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar inspecciones periódicas con drones en la cabecera cantonal de Santa Elena, con el fin de actualizar el diagnóstico superficial de las vías y detectar oportunamente el avance de grietas, fisuras, baches, asentamientos y otros deterioros.

Se recomienda que el GAD Municipal de Santa Elena incorpore el uso de ortofotos y mapas temáticos de deterioro vial como herramientas de apoyo para la planificación del mantenimiento urbano, priorizando los tramos que presenten severidad alta.

Se recomienda complementar la inspección aérea con verificaciones terrestres puntuales, especialmente en zonas donde existan sombras, vehículos estacionados, marcas viales, juntas de adoquines o elementos que puedan generar confusión durante el análisis visual de la ortofoto.

Se recomienda establecer una ficha técnica estandarizada para el registro de deterioros superficiales, diferenciando los daños propios de pavimentos flexibles y

de calles adoquinadas. Esto permitirá uniformar el levantamiento de información y facilitar la comparación entre inspecciones realizadas en diferentes periodos.

Se recomienda utilizar parámetros de vuelo constantes en futuras campañas de monitoreo, manteniendo altura de vuelo, traslape longitudinal, traslape lateral, horario de captura y condiciones climáticas similares, para mejorar la comparabilidad de los resultados obtenidos en diferentes fechas.

Se recomienda ampliar el estudio hacia otros sectores urbanos del cantón Santa Elena, incluyendo una mayor cantidad de tramos y diferentes niveles de tráfico, con el propósito de obtener un diagnóstico vial más completo de la ciudad.

Se recomienda integrar los productos fotogramétricos generados en plataformas SIG o CAD, de manera que la información de grietas, fisuras y deterioros pueda consultarse espacialmente y utilizarse como base para presupuestos, planes de mantenimiento y seguimiento de obras.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen métodos automatizados de detección mediante procesamiento digital de imágenes o inteligencia artificial, para mejorar la rapidez y precisión en la identificación de grietas y fisuras sobre ortofotos de alta resolución.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO. (2018). *AASHTO A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* 2018, 7th Edition (1).
<https://weblink.cityofsebastian.org/WebLink/DocView.aspx?id=208865&dbid=0&repo=City&cr=1>
- AASHTO. (2021, agosto 6). AASHTO Journal—AASHTO Releases 2021 Materials Standards Guide. *AASHTO Journal*.
<https://aashtojournal.transportation.dev/aashto-releases-2021-materials-standards-guide/>
- Agencia nacional de tránsito. (2023). *Plan de Rutas y Frecuencias PERIODO 2023-2025* (p. 22). Agencia nacional de transito.
<https://aportecivico.gobiernoelectronico.gob.ec/system/documents/attachments/000/000/126/original/02005df549cc9f2dd5454c408ca8a64ee119d6c0.pdf>
- Agisoft Metashape. (2026). *Agisoft Metashape User Manual—Professional Edition, Version 2.3*. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_3_en.pdf
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2016). Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 143, 04016025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206)
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *Journal of Surveying*

Engineering, 143(2), 04016025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206)

Alfonso Montejo Fonseca. (2002). *Ingenieria de pavimentos*. Universidad Católica de Colombia. <https://toaz.info/doc-view-4>

Almeda, M. V. (2020). *MANUAL DEL ASFALTQ THE ASPHALT INSTITUTE*. https://www.academia.edu/144320955/MANUAL_DEL_ASFALTQ_THE_ASPHALT_INSTITUTE

ASTM. (2023). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. <https://store.astm.org/d6433-20.html>

Astor, Y., Nabesima, Y., Utami, R., Sihombing, A. V. R., Adli, M., & Firdaus, M. R. (2023). Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey. *Transportation Engineering*, 12, 100168. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100168>

Atencio, E., Plaza-Muñoz, F., Muñoz-La Rivera, F., & Lozano-Galant, J. A. (2022). Calibration of UAV flight parameters for pavement pothole detection using orthogonal arrays. *Automation in Construction*, 143, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104545>

Atik, M. E., & Duran, Z. (2022). *Comparison of open-source and commercial software for 3D modeling with terrestrial photogrammetry*.

Aviterra Solutions. (2016, diciembre 29). Fotogrametría. *Aviterra Solutions*. <https://aviterrasonolutions.com/servicios/fotogrametria/>

Bernal, S. G. (2020). *Alumno: Lukas Simón Manuel Vergara Chapa*.

Bocci, E., & Carpani, C. (2026). The Laboratory Characterization of a Warm Asphalt Mixture Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement. *Infrastructures*, 11(3), 103. <https://doi.org/10.3390/infrastructures11030103>

- Bruzelius, N., Flyvbjerg, B., & Rothengatter, W. (2002). Big decisions, big risks. Improving accountability in mega projects. *Transport Policy*, 9(2), 143-154.
- Burgos, B. (2014). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN PAVIMENTO RÍGIDO Y UN PAVIMENTO FLEXIBLE PARA LA RUTA S/R: SANTA ELVIRA – EL ARENAL, EN LA COMUNA DE VALDIVIA*.
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcib957a/doc/bmfcib957a.pdf>
- Calderón, C., & Servén, L. (2014). *Infrastructure, Growth, and Inequality: An Overview* (SSRN Scholarly Paper No. 2497234). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=2497234>
- Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., & Mejía, G. (2022). Highway Planning Trends: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 14(9), 5544. <https://doi.org/10.3390/su14095544>
- Chen, J., Dan, H., Ding, Y., Gao, Y., Guo, M., Guo, S., Han, B., Hong, B., Hou, Y., Hu, C., Hu, J., Huan, J., Jiang, J., Jiang, W., Li, C., Liu, P., Liu, Y., Liu, Z., Lu, G., ... Zhu, X. (2021). New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(6), 815-999. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.10.001>
- Chen, X., Wang, H., Horton, R., & DeFlorio, J. (2021). Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102697>
- Chen, X., Wang, Y., Chen, Y., Fu, S., & Zhou, N. (2023). NDVI-Based Assessment of Land Degradation Trends in Balochistan, Pakistan, and Analysis of the Drivers. *Remote Sensing*, 15(9), 2388. <https://doi.org/10.3390/rs15092388>

- Chuquiguanga-Auquilla, M. C. (2024). LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN LAS TEORÍAS Y ENFOQUES DEL DESARROLLO: UNA SÍNTESIS DESDE LA LITERATURA. *Epistemia Revista Científica*, 8(1), 86-96. <https://doi.org/10.26495/re.v8i1.2703>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014a). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014b). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Deng, Y., & Shi, X. (2023). Modeling the rutting performance of asphalt pavements: A review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s43065-023-00082-9>
- DIRCAIBEA. (2002). *Catalogo de deterioros de pavimentos flexibles*. <https://sjnavarro.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/manualfallas.pdf>
- FADRON. (2025, junio 27). Pavement Inspection with Drones: Standards, Precision, and Global Applications. *FADRON*. <https://fadron.com/pavement-inspection-with-drones-standards-precision-and-global-applications/>
- Federal Highway Administration. (2021). *Pavements—Federal Highway Administration*. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/>
- Feitosa, I., Santos, B., & Almeida, P. G. (2024). Pavement Inspection in Transport Infrastructures Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Sustainability*, 16(5), 2207. <https://doi.org/10.3390/su16052207>

FHWA. (2013). *Office of Highway Policy Information—Policy | Federal Highway Administration*.

<https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/hpms/hfccccp.cfm>

Giordan, D., Adams, M. S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), 3437-3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>

Giordani, I. C., & Leone, I. D. (2014). *1º Año Ingeniería Civil – Comisión 02 – Turno Tarde*.

Gómez, J. L., Villalonga, G., & López, A. M. (2023). Co-Training for Unsupervised Domain Adaptation of Semantic Segmentation Models. *Sensors*, 23(2), 621. <https://doi.org/10.3390/s23020621>

González-Fernandez, H., Ruiz-Caballero, P., & Guerrero-Valverde, D. (2019). PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS mediante EL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI). *Ciencia en su PC*, 1(4), 58-71.

Huang, Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. PEARSON, Prentice Hall, Kentucky. - *References—Scientific Research Publishing*. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1555821>

Ibrahim, H. B., Salah, M., Zarzoura, F., & El-Mewafi, M. (2024). Smart monitoring of road pavement deformations from UAV images by using machine learning. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01315-2>

- Inzerillo, L., Acuto, F., Di Mino, G., & Uddin, M. Z. (2022a). Super-Resolution Images Methodology Applied to UAV Datasets to Road Pavement Monitoring. *Drones*, 6(7), 171. <https://doi.org/10.3390/drones6070171>
- Inzerillo, L., Acuto, F., Di Mino, G., & Uddin, M. Z. (2022b). Super-Resolution Images Methodology Applied to UAV Datasets to Road Pavement Monitoring. *Drones*, 6(7), 171. <https://doi.org/10.3390/drones6070171>
- Inzerillo, L., Acuto, F., Di Mino, G., & Uddin, M. Z. (2022c). Super-Resolution Images Methodology Applied to UAV Datasets to Road Pavement Monitoring. *Drones*, 6(7), 171. <https://doi.org/10.3390/drones6070171>
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51-66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>
- Jarrín Charro, J. S., & Yáñez Cajas, G. P. (2026). *Evaluación del estado superficial del pavimento flexible mediante el método PCI utilizando fotogrametría con UAV y propuesta de mantenimiento de un tramo de la vía a Ibarra, en el sector de Pesillo, ubicado en la parroquia de Olmedo, cantón Cayambe* [Trabajo de titulación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <https://repositorio.puce.edu.ec/collections/f1671f96-e10c-4ece-89a6-157582b067aa>
- Lee, K.-H., Kim, Y.-C., Kim, B.-J., Lim, J.-S., & Jeong, J.-H. (2012). Laboratory Testing of Material Properties of Asphalt Binder Containing Wasted Vinyl. *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, 14. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2012.14.5.085>

- Lee, S., & Cho, B. H. (2023). Evaluating Pavement Lane Markings in Metropolitan Road Networks with a Vehicle-Mounted Retroreflectometer and AI-Based Image Processing Techniques. *Remote Sensing*, 15(7), 1812. <https://doi.org/10.3390/rs15071812>
- León Torres, L. M., Molina Morales, D. A., Zambrano Guerrero, W. A., Crespo Bravo, J. O., & Ramirez Quincha, D. M. (2025). Diseño y Gestión Sostenible de Pavimentos en Infraestructura Vial: Enfoque basado en el Ciclo de Vida y Análisis Multicriterio. 2025. <https://doi.org/https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i2.646>
- Limones Gabino, P. E. (2021). *Evaluación de los pavimentos flexibles por los métodos PCI y VIZIR*. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/6505>
- Llopiz, D., & Pérez, A. (2020). *Deterioros en pavimentos urbanos*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/139865>
- López Yumiguano, A. R. (2017). *Instructivo técnico para la evaluación, reparación y conservación de la infraestructura vial, utilizando la metodología técnica y teórica del proyecto “Mantenimiento vial por resultados de la red vial estatal e30, tramo Pelileo – Luna Bonsay”*. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25962>
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2019). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. En *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110607253>
- Ma, S., Yang, R., Du, C., Li, H., Wu, Y., Al-Dhahir, N., & Li, S. (2023). Robust Power Allocation for Integrated Visible Light Positioning and Communication Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 71(8), 4764-4777. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3278752>

- Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiya, T., & Omata, H. (2018). Road Damage Detection Using Deep Neural Networks with Images Captured Through a Smartphone. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(12), 1127-1141. <https://doi.org/10.1111/mice.12387>
- Mannering, F., & Washburn, S. (2020). *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. John Wiley & Sons. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=akn8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=highway&ots=ARQqlgedZR&sig=ochEHgyUjsZ2Oyvula_jCC8eMZA&redir_esc=y#v=onepage&q=highway&f=false
- Martínez Pacheco, L. M., & Narváez Tobar, S. D. (2024). *Potencial del uso de equipos VANT convencionales para identificar el ciclo de vida útil de vías mediante el método IRI* [Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo]. <https://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12434>
- Mohan, A., & Poobal, S. (2018). Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 787-798. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.020>
- MTOP. (2013). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP). (2013). Manual de carreteras: Normas de diseño geométrico. Gobierno del Ecuador*.
- MTOP. (2025). *Red Vial Estatal ecuatoriana en kilómetros—Datos Abiertos Ecuador*. <https://www.datosabiertos.gob.ec/dataset/red-vial-estatal-ecuatoriana-en-kilometros/resource/a78821c9-4e78-4606-bd3a-b37ac3206eb0>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

- Oliveira, H., & Correia, P. L. (2013). Automatic Road Crack Detection and Characterization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1), 155-168. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2208630>
- Pavement Management Guide, Second Edition (PMG-2)*. (2012). <https://trid.trb.org/View/1225945>
- Peraka, N. S. P., & Biligiri, K. P. (2020). Pavement asset management systems and technologies: A review. *Automation in Construction*, 119, 103336. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103336>
- Pix4D. (2026). *Un paquete de software de fotogrametría único para mapeo con drones*. Pix4D. <https://www.pix4d.com/es>
- Quinto Prado, C. A., Mallqui Durand, J. T., Cristian Advias Quinto Prado, & Mallqui Durand, J. T. (2023). Evaluación superficial del pavimento asfáltico apoyada por el método PCI en pistas de aterrizaje de aeropuertos. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(118), 87-98. <https://doi.org/10.47460/uct.v27i118.690>
- Reuter & Pedenovi. (2020). *LOS DRONES Y SUS APLICACIONES A LA INGENIERÍA*. https://fcf.unse.edu.ar/wp-content/uploads/2014/07/SD-43-Drones-y-su-aplicacion-a-la-ingenieria-REUTER_r.pdf
- Rind, T., Ahmed, S., Javed, M., & Khan, M. (2026). Data Driven Pavement Management: Leveraging Machine Learning for Resilient and Sustainable Pavement Condition Prediction. *Journal of Engineering*, 2026. <https://doi.org/10.1155/je/4114384>
- Rojas, M. (2024). ¿Qué es Agisoft Metashape y Cómo Revolucionará el Modelado 3D en la Topografía? *Geoinn principal*. <https://geoinn.com/agricultura-de-precision/tecnologia-agricola/software-de-agricultura/metashape/>

- Saha, S., Gu, F., Luo, X., & Lytton, R. L. (2021). *Improved Sensitivity of Base Layer on the Performance of Rigid Pavement* (arXiv:2101.09167). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.09167>
- Salas Juan. (2022). *Análisis comparativo sobre levantamientos topográficos mediante drones respecto a levantamientos topográficos convencionales*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Saleh, M., & Hashemian, L. (2022). Addressing Climate Change Resilience in Pavements: Major Vulnerability Issues and Adaptation Measures. *Sustainability*, 14(4), 2410. <https://doi.org/10.3390/su14042410>
- Salem, Z. A., & Louzi, N. (2023). Pavement Management in Highway Engineering. *Civil Engineering and Architecture*, 11(3), 1512-1522. <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110332>
- saltos, martes. (2021). Mapa Vial de Ecuador » Ecuador en Línea. En *Ecuador en Línea*. <https://ecuadorenlínea.org/geografia/mapa-vial-de-ecuador/>
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement management for airports, roads and parking lots* (2. ed). Springer.
- Silva, L. S. da, Zanoni, V. A. G., Pazos, V. C., Santos, L. M. A. dos, & Jucá, T. R. P. (2022). *Fotogrametria com imagens adquiridas com drones: Do plano de voo ao modelo 3D*. Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / LaSUS. <https://doi.org/10.29327/563260>
- Soto, E., & Sanchez, R. (2025). *Fotogrametría con VANT RTK para capturar detalles topográficos precisos mediante el software Pix4Dmapper para mejorar la calidad constructiva de la renovación del puente Pomallucay en la región de Áncash*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/entities/publication/d6a7f12b-2259-51e0-88ea-77fc315b1671>

- Szypuła, B. (2024). Accuracy of UAV-based DEMs without ground control points. *GeoInformatica*, 28(1), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10707-023-00498-1>
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., Brook, A., Polinova, M., Arranz, J. J., Mészáros, J., Zhuang, R., Johansen, K., Malbeteau, Y., de Lima, I. P., Davids, C., Herban, S., & McCabe, M. F. (2020). Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 12(6), 1001. <https://doi.org/10.3390/rs12061001>
- Wang, W., Wang, L., Miao, Y., Cheng, C., & Chen, S. (2020). A survey on the influence of intense rainfall induced by climate warming on operation safety and service life of urban asphalt pavement. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00003-0>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012a). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012b). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yunda, F. E., Basurto, K. D., & Zurita, A. X. (2026). Infraestructura vial y su incidencia en el desarrollo socioeconómico y territorial del cantón Quinsaloma 2024. *e-Revista Multidisciplinaria del Saber*, 4, e-RMS03032026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.358>

- Zaman, A. A. U., Abdelaty, A., & Yamany, M. S. (2025). Applications of UAV Technologies in Assessment of Transportation Infrastructure Systems. *CivilEng*, 6(2), 32. <https://doi.org/10.3390/civileng6020032>
- Zhao, J., Wang, H., & Lu, P. (2022). Impact analysis of traffic loading on pavement performance using support vector regression model. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(11), 3716-3728. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1915493>
- Zheng, L., Xiao, J., Wang, Y., Wu, W., Chen, Z., Yuan, D., & Jiang, W. (2024). Deep learning-based intelligent detection of pavement distress. *Automation in Construction*, 168, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105772>
- Zhong, M., Li, X., Wang, J., Zhuo, L., & Ling, F. (2025). Cascading Landslide–Barrier Dam–Outburst Flood Hazard: A Systematic Study Using Rockfall Analyst and HEC-RAS. *Remote Sensing*, 17(11), 1842. <https://doi.org/10.3390/rs17111842>
- Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., & Zhou, Y. (2022). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *Automation in Construction*, 133, 103991. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991>