

**DETECCIÓN DE PATOLOGÍAS EN VÍAS PAVIMENTADAS
- PROTOTIPO Y PROTOCOLO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE LA
SUPERFICIE DEL PAVIMENTO -**



Presentado por:

Autor: Sergio David Acero Henao

Director: Peter Thomson, Ph.D.

CO-Director: Lizette Tello, MSc.

Trabajo de grado para optar por el Título de
Ingeniero Civil



G7

Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G7)

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Universidad del Valle

Agosto de 2025

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mis agradecimientos a todas las personas que, de diversas maneras, contribuyeron al desarrollo de ese trabajo. A mi tutora por su valiosa orientación, compromiso y acompañamiento constante, así como por suministrarme las imágenes con daños identificados que fueron fundamentales para mi trabajo.

Extiendo mi gratitud al grupo de investigación G7, por el respaldo académico y técnico brindado, incluyendo el apoyo en la integración y funcionamiento del módulo GPS, así como en las inspecciones y en la provisión de información esencial para el análisis. A mis compañeros, por su colaboración y disposición durante este proceso, y a quien participó en la elaboración de la estructura de soporte. A mis amigos y familia, por su acompañamiento y ánimo incondicional en cada etapa.

Finalmente, un agradecimiento especial y profundo a mi madre. No solo me brindó su apoyo inquebrantable durante todo este camino, sino que también puso a disposición su vehículo para la realización de las pruebas necesarias para el proyecto. Mas allá de lo material, ha sido mi mayor fuente de motivación y fortaleza, recordándome siempre que los logros son alcanzados con perseverancia y amor.

RESUMEN

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema semiautomático de bajo costo para la adquisición de imágenes de la superficie del pavimento, con el objetivo de facilitar la evaluación de los daños en pavimentos asfálticos y mejorar la gestión de la infraestructura vial en Colombia. La red vial del país, administrada en su mayoría por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), enfrenta desafíos debido a los métodos tradicionales de inspección visual, los cuales son lentos, subjetivos y tediosos. Por lo tanto, se hace necesario implementar tecnologías que optimicen la recolección de información para el análisis de pavimentos. El sistema propuesto consiste en un prototipo móvil que integra una cámara ZED 2i y un módulo GPS, montados en una estructura compacta y adaptable a un vehículo. Este dispositivo permite la captura de imágenes de alta resolución, junto con la localización precisa de cada punto de la vía. En la fase de desarrollo, se implementaron algoritmos específicos para automatizar la adquisición y el procesamiento de las imágenes. Luego, se formuló un protocolo detallado para optimizar la captura, seleccionando los horarios adecuados para minimizar las sombras y maximizar la calidad de las imágenes. El sistema fue validado mediante pruebas experimentales en diversas condiciones, asegurando su robustez y fiabilidad. Finalmente, se comparó el método propuesto con las metodologías manuales tradicionales, evaluando el tiempo de adquisición de datos, costos, personal requerido y la precisión en la medición de daños. Los resultados muestran que el sistema desarrollado ofrece ventajas significativas en eficiencia, reducción de costos y objetividad en la evaluación de pavimentos.

Esta contribución se enmarca en un proyecto de investigación doctoral titulado “*Methodology for Diagnosing Damage in Colombian Flexible Pavement Roads Using Computer Vision and Machine Learning techniques*”, orientado a mejorar los procesos de evaluación y diagnóstico de pavimentos, que se complementa con el desarrollo del sistema aquí presentado, siendo un paso significativo hacia la modernización de la evaluación de la infraestructura vial en Colombia.

Palabras clave: Sistema de inspección de pavimentos, captura de imágenes digitales, sistema semiautomático, fotogrametría, automóvil, GPS integrado, índice de condición de pavimento (PCI), pavimento flexible, daño del pavimento, procesamiento de imágenes, prototipo móvil, protocolo de captura, calibración cámara estéreo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
2.1. Descripción	2
2.2. Formulación del problema	3
2.3. Objetivos	4
2.3.1. Objetivo general.....	4
2.3.2. Objetivos específicos	4
2.4. Justificación	4
3. MARCO DE REFERENCIA	6
3.1. Antecedentes	6
3.1.1. Nacional	10
3.1.2. Local	10
4. MARCO CONCEPTUAL	12
4.1. Pavimentos.....	12
4.2. Gestión de Pavimentos (PM)	12
4.3. Sistemas de gestión de pavimentos (PMS)	12
4.4. Fotogrametría.....	12
4.5. Deterioro del pavimento	12
4.6. Recolección de datos para la evaluación del Pavimento	14
4.7. Evaluación de la condición superficial del pavimento	15
4.8. Sistemas de adquisición de datos	21
4.9. Visión y Cámara estereoscópica	22
4.10. Calibración estéreo.....	24
4.11. Rectificación estereoscópica.....	26
4.12. Correspondencia estéreo	27
4.13. Triangulación	27
4.14. Campo de visión FOV	28
4.15. Área de cobertura de la cámara.....	30
4.16. Conversión de pixeles a medida Real	33
4.17. Resolución espacial GSD.....	33
4.18. Índice de nitidez.....	34
4.19. Modulo GPS.....	34
4.20. Fórmula del determinante para el cálculo del Volumen.	35
5. METODOLOGÍA	37
5.1. FASE 1: DISEÑO DE UN PROTOTIPO MÓVIL.....	38
5.1.1. Elementos del prototipo	38
5.1.2. Diseño del prototipo.....	38
5.2. FASE 2: DESARROLLO DEL SISTEMA DE CAPTURA DE DATOS.....	38

5.2.1.	Instrumentación computarizada de la captura de imágenes.....	38
5.2.2.	Calibración cámara estéreo	39
5.3.	FASE 3: FORMULACIÓN DEL PROTOCOLO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.....	40
5.3.1.	Montaje del sistema de captura.....	40
5.3.2.	Definición de la velocidad de circulación del vehículo	42
5.3.3.	Selección de horarios de la toma de datos	42
5.3.4.	Integración de la captura de imágenes con su ubicación mediante GPS.	43
5.4.	FASE 4: VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	44
5.4.1.	Método desarrollado frente a método Manual	44
5.4.2.	Reconstrucción en 3D	48
6.	RESULTADOS.....	50
6.1.	FASE 1: DISEÑO DE UN PROTOTIPO MOVIL.....	50
6.2.	FASE 2: DESARROLLO DEL SISTEMA DE CAPTURA DE DATOS.....	52
6.2.1.	Instrumentación computarizada de la captura de imágenes.....	52
6.2.2.	Calibración cámara estéreo	55
6.3.	FASE 3: FORMULACIÓN DEL PROTOCOLO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.....	58
6.3.1.	Montaje del sistema de captura.....	58
6.3.2.	Velocidad de circulación del vehículo	59
6.3.3.	Integración de la captura de imágenes con su ubicación mediante GPS	64
6.4.	FASE 4: VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	67
6.4.1.	Método digital frente a método manual	67
6.4.2.	Enfoque 3D	74
7.	CONCLUSIONES.....	78
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
9.	ANEXOS	86
9.1.	Protocolo para la captura de imágenes del pavimento.....	86

TABLA DE TABLAS

Tabla 1	Proceso de recolección manual.	14
Tabla 2	Escala del valor de Deterioro Superficial (Is).....	15
Tabla 3	Niveles de gravedad de los deterioros del tipo A (VIZIR).	16
Tabla 4	Niveles de gravedad los deterioros del Tipo B (VIZIR).	16
Tabla 5	Escala de Clasificación del PCI.	18
Tabla 6	Niveles de severidad deterioros (PCI).	18
Tabla 7	Especificaciones generales de la cámara.	23
Tabla 8	Especificaciones de la antena GPS.	35
Tabla 9	Especificaciones generales del computador portátil.	38
Tabla 10	Severidad y medición de los daños (PCI digital).	46
Tabla 11	Datos imágenes a Color	52

Tabla 12 Datos imágenes en Escala de grises.....	52
Tabla 13 Parámetros de configuración de Imágenes.....	55
Tabla 14 Parámetros de salida Calibración estéreo.....	55
Tabla 15 Distancia focal.	56
Tabla 16 Coeficientes de distorsión.	56
Tabla 17 Resultados FOV.....	58
Tabla 18 Distancias de trabajo y Ancho del campo de visión.	58
Tabla 19 Resumen Resolución espacial de la cámara.....	59
Tabla 20 Datos GPS interpolados para imágenes dentro de un intervalo de 1 segundo.	66
Tabla 21 Diferencia entre medida digital y manual de los baches.....	68
Tabla 22 Diferencia entre medida digital y manual de la piel de cocodrilo (A).	69
Tabla 23 Diferencia entre medida digital y manual de la piel de cocodrilo (B).	69
Tabla 24 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 3-Via 1.....	69
Tabla 25 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 4-Via 1.....	70
Tabla 26 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 1-Via 2 (A).	70
Tabla 27 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 2-Via 2 (A).	70
Tabla 28 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 1-Via 2 (B).....	71
Tabla 29 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 1-Via 2 (B).....	71
Tabla 30 Comparación de tiempos de adquisición de datos entre métodos manual y digital.	72
Tabla 31 Comparación de costos operativos entre los métodos manual y digital.....	72
Tabla 32 Comparativa de Métodos y Resultados en la Medición y Evaluación de Pavimentos Utilizando Diferentes Tecnologías.....	76

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de diseño de rehabilitación del pavimento.....	4
Figura 2 Deterioros del tipo A.	13
Figura 3 Deterioros de tipo B.	14
Figura 4 Resumen de la metodología VIZIR.	17
Figura 5 Resumen de la metodología PCI.	21
Figura 6 Técnicas de adquisición de datos.	22
Figura 7 Visión estereoscópica natural y artificial.	22
Figura 8 Procesos de formación de la visión estereoscópica.	23
Figura 9 Cámara ZED 2i.....	24
Figura 10 Ejemplo Distorsión Radial.	25

Figura 11 Ejemplo distorsión Tangencial.....	25
Figura 12 Patrón de calibración estéreo.....	26
Figura 13 Configuración del sistema de visión estereoscópica de tipo paralelo.....	26
Figura 14 Correspondencia estéreo y generación del mapa de disparidad.	27
Figura 15 Representación de la proyección estéreo desde una perspectiva superior.....	28
Figura 16 Campo de visión de una lente de cámara.	29
Figura 17 Modelo de la cámara estenopeica.....	29
Figura 18 Modelo geométrico del ángulo de visión.	29
Figura 19 Proyección del campo de visión en un plano inclinado.....	30
Figura 20 Modelo geométrico del ángulo de visión inclinado θ°	31
Figura 21 Geometría del campo de Visión vertical.	31
Figura 22 Esquema Geométrico de la Proyección del Campo de Visión y la Longitud Efectiva Cubierta.....	32
Figura 23 Esquema Geométrico de la Proyección del Campo de Visión y Cálculo del Ancho de Cobertura.....	32
Figura 24 Ejemplo variación del valor de GSD.....	34
Figura 25 Antena GPS y Raspberry PI Zero.....	35
Figura 26 Generación de malla y tetraedros a partir de una nube de puntos.	36
Figura 27 Esquema de las Fases de desarrollo.....	37
Figura 28 Captura de imágenes de calibración.....	40
Figura 29 Configuración de la cámara para la captura.	41
Figura 30 Proyección del campo de visión vertical en el pavimento.....	41
Figura 31 Esquema del módulo GPS.	43
Figura 32 Curvas de Valor de deducción digitales-Piel de cocodrilo.....	47
Figura 33 Curvas de Valor de deducción digitales-Baches	47
Figura 34 Curvas de Valor de deducción digitales-Grietas longitudinales y transversales. ...	47
Figura 35 Curvas de Valor de deducción corregidos Digital.....	48
Figura 36 Método del cono y arena.	48
Figura 37 Captura de baches para analizar.	49
Figura 38 Modelo 3D de la estructura de soporte.....	50
Figura 39 Estructura de soporte ubicada en el vehículo tipo Hatchback.	50
Figura 40 Dimensiones de la estructura de soporte en cm.....	51
Figura 41 Esquema de integración elementos del prototipo.	51
Figura 42 Tamaño de archivos de imagen según su formato.....	53
Figura 43 Cantidad de imágenes adquiridas según su formato.....	53
Figura 44 Tamaño de archivos de imagen en escala de grises según su formato.	54
Figura 45 Cantidad de imágenes adquiridas en escala de grises según su formato.	54
Figura 46 Detección de las esquinas internas del patrón, proceso de calibración.	55

Figura 47 Errores de Reproyección	56
Figura 48 Rectificación de imágenes, líneas epipolares.	57
Figura 49 Área de cobertura de la cámara.	59
Figura 50 Datos GPS e imágenes para diferentes velocidades.	60
Figura 51 Histograma de índice de nitidez.	61
Figura 52 Boxplot Nitidez por velocidad.....	62
Figura 53 Imágenes a diferentes velocidades.	62
Figura 54 Índice de nitidez por velocidad.....	63
Figura 55 Imágenes con Zoom.	63
Figura 56 Datos GPS capturados para una salida de campo.....	64
Figura 57 Diferencias entre los datos de tiempo GPS y de tiempo de internet.....	65
Figura 58 Asignación de fotogramas de la cámara a los intervalos de un segundo GPS.	66
Figura 59 Definición del área de detección para un segmento de carretera.....	67
Figura 60 Imagen satelital Vía 1.....	67
Figura 61 Imagen satelital Vía 2.....	68
Figura 62 Costos operativos Manual vs Digital.....	73
Figura 63 Km de vías inspeccionadas Manual vs Digital.....	73
Figura 64 Nube de puntos de los baches seleccionados.	74
Figura 65 Imágenes y superficies generadas de los baches capturados.	74
Figura 66 Superficie usada para determinar el volumen digitalmente.....	75
Figura 67 Medición manual del Volumen.	75
Figura 68 Comparación entre Medición Manual y Digital del Volumen de Baches.	75

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial desempeña un papel esencial en el desarrollo y la conectividad de cualquier país, y Colombia no es una excepción. Con una red de carreteras que abarca más de 206 mil kilómetros, el mantener estas carreteras en condiciones óptimas para garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios se ha convertido en parte fundamental del comercio y el crecimiento económico de la nación, lo cual representa un desafío significativo [Sandoval & Merchán, 2010] [Ministerio, 2024].

En Colombia la evaluación constante del estado de la red vial es esencial para tomar medidas preventivas y mejorar el servicio brindado a los usuarios. La eficacia de la infraestructura vial es crítica para la seguridad y el bienestar de todos los ciudadanos. Esta evaluación se lleva a cabo mediante metodologías que analizan diversos aspectos de las vías, utilizando una escala de clasificación técnica que permite clasificar las carreteras según su estado, desde las que requieren pocas reparaciones hasta aquellas que necesitan intervenciones más extensas [Ministerio, 2024]. En este contexto, los sistemas de gestión de pavimentos se convierten en una herramienta clave, ya que permiten una evaluación continua y detallada del estado de las carreteras. Uno de los aspectos más críticos de este proceso es la recopilación de información sobre el daño presente en el pavimento, puesto que esta información es fundamental para el análisis del estado en que se encuentra [Ministerio, 2008].

Actualmente, en el país, prevalece el uso de metodologías manuales para la inspección de los pavimentos. Sin embargo, este proceso resulta ser tedioso, lento y subjetivo. Por lo tanto, es esencial el desarrollar de manera eficiente el proceso de recolección de información del estado del pavimento. Este proyecto se enfoca en abordar estos desafíos mediante el desarrollo de un sistema semiautomático de bajo costo para la captura de imágenes del pavimento. Utilizando una cámara estéreo (ZED 2i) y un módulo GPS, integrados en un prototipo compacto para equipar en automóviles. Este enfoque tiene el potencial de reducir los costos de personal, disminuir la subjetividad en las evaluaciones y acelerar la detección de daños en los pavimentos, contribuyendo así a una gestión más eficiente de la infraestructura vial del país.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1.Descripción

Para el año 2024 Colombia cuenta con una red de carreteras de 206.102km, la cual se distribuye en vías primarias, secundarias y terciarias. El 9% corresponde a la red primaria es decir 18.160km; el 22% que equivale a 45.658km a la red secundaria; finalmente, el 69%, que representa 142.284 km, corresponde a la red terciaria. De este total, el 57 % de los 18.160km de la red primaria es administrado por el Instituto Nacional De Vías (INVIAS) y el 43% restante es administrado por la Agencia Nacional De Infraestructura (ANI) bajo concesión [Ministerio, 2024]. INVIAS lleva a cabo una constante actualización del estado de la red vial bajo su responsabilidad. Esta actualización incluye la clasificación de las vías en dos categorías: pavimentadas y no pavimentadas, con el propósito de determinar su estado actual. A través de este proceso, se establecen las condiciones en las que se encuentran las vías, lo que facilita un control continuo y un seguimiento detallado. Esta información resulta fundamental para tomar medidas preventivas necesarias con el fin de mejorar el servicio proporcionado a los usuarios de las carreteras, abarcando aspectos claves como la velocidad y tiempo de recorrido, libertad de maniobrar y seguridad vial [INVIAS, 2023].

Dada la importancia de la eficiencia de la infraestructura vial para la seguridad y comodidad de los usuarios, es esencial supervisar y mantener adecuadamente el estado de las carreteras en el país. No obstante, gestionar los procesos necesarios para garantizar que estas vías se mantengan en condiciones óptimas presentan un desafío significativo. Por esta razón se han desarrollado los sistemas de gestión de pavimentos (PMS, por su sigla en inglés) como una herramienta clave en la planificación y el mantenimiento de la infraestructura nacional [Macea, 2016]. Estos sistemas permiten una evaluación continua y detallada del estado de las carreteras, lo que facilita la toma de medidas preventivas necesarias para mejorar la calidad de servicio brindado.

Como una de las labores más importantes de la gestión de pavimentos se destaca la recolección de información, incluido los relacionados con el daño presente en el pavimento, siendo este el aspecto más importante para el análisis del estado en que se encuentra [Timm, 2004]. El propósito de la inspección de pavimentos es precisar el área afectada en la vía de forma porcentual, formalizando los daños presentes, su extensión y severidad, factores que permiten explicar sus causas o de programar actividades para estudiar dichas causas, así como para establecer alternativas de reparación más adecuadas y enfrentar oportunamente los factores que producen el daño.

En la actualidad, INVIAS emplea técnicas para la evaluación del estado de la superficie de las vías como la metodología VIZIR (visión Inspection de Zones et Itinéraires Á Risque) utilizada para pavimento flexible y el método PCI (Paviment condition Index) que es utilizado para pavimento rígido y flexible [Gutiérrez, 2006]. Las metodologías empleadas se basan en la valoración de múltiples elementos constitutivos de las vías, tales como la superficie de rodadura, las bermas, las obras de drenaje, la señalización y sus zonas adyacentes. Cada uno de estos componentes recibe un peso relativo en la evaluación final, y se diferencian los parámetros a considerar según si se trata de una vía pavimentada o no pavimentada.

Estas dos técnicas, VIZIR y PCI que son ampliamente utilizadas en Colombia, se basan en la inspección visual acorde al juicio de un administrador vial, el cual se embarca en un proceso que conlleva ciertas limitaciones y desafíos, caracterizando esta labor por ser tediosa, lenta y peligrosa. Además, la evaluación se torna subjetiva y particular a la experiencia y criterio del administrador vial lo que pone en juicio la validez y objetividad en la toma de decisiones de mantenimientos en el pavimento [INVIAS, 2022]. Dicha evaluación se hace de manera terrestre con una persona a cargo, usando como herramientas: un odómetro manual, para medir las longitudes; regla y cinta métrica para establecer las profundidades de los daños o depresiones y el formato que registra todo tipo de daños, para posteriormente ser analizados digitalmente. Con estos métodos es tedioso analizar todo el pavimento, debido al consumo de tiempo y recursos que implica la revisión y el reporte periódico del estado de tramos específicos de carreteras en el país. En vista de lo expuesto, se cuida la necesidad de

adoptar un enfoque metodológico que, basándose en criterios técnicos, permita un mejor desarrollo del proceso de recolección de la información del estado del pavimento.

Por otro lado, es relevante mencionar que instituciones como el Banco Mundial han realizado inversiones significativas en el desarrollo de sistemas informáticos que respaldan la gestión de pavimentos [Archondo, 2019]. Estas inversiones se llevan a cabo con el propósito de optimizar recursos y garantizar que las carreteras cumplan su función de manera más eficiente. Así, mediante softwares utilizados por las administraciones de carreteras para analizar, planificar, gestionar y evaluar el mantenimiento, mejoras e inversiones en carreteras [Macea, 2016].

Otra organización, como el Programa internacional de evaluación de Carreteras (IRAP), ha puesto su atención en la creación de métodos para recopilar información de campo utilizando tecnologías avanzadas en programas de evaluación de carreteras. Su enfoque se basa en llevar a cabo inspecciones sistemáticas y detalladas de las vías, donde se recolecta información digital sobre el estado actual de las carreteras. Esto se realiza mediante vehículos equipados con cámara de alta resolución, sistemas GPS, equipos de computación, odómetros y la presencia de un técnico especializado [Macea, 2018]. La implementación de esta tecnología permite la evaluación de las condiciones de la infraestructura de tal forma que se priorizan las inversiones dirigidas a preservar la seguridad de los usuarios. El propósito del IRAP es desarrollar planes de inversión que contribuyan de manera sustancial a la reducción de accidentes mortales y lesiones graves en las carreteras. Así mismo, es importante destacar que estos accidentes de tránsito influyen en el Producto Interno Bruto (PIB), según lo documenta la herramienta de datos *iRAP's Vaccines for Roads Big Data Tool*. En Colombia, aproximadamente 100 mil personas mueren o sufren lesiones graves en accidentes viales cada año, lo que se traduce en un impacto económico de alrededor de 12 mil millones de dólares para la economía del país [Williams, 2022].

Estos procesos implican costos sustanciales relacionados con la adquisición de servicios de consultoría, y tales gastos habitualmente plantean desafíos para las naciones en desarrollo. Este hecho se ilustra en el informe de *Análisis de la capacidad de gestión de la seguridad vial*, el cual resalta la necesidad de una inversión inicial estimada en un rango de 1000 a 1200 millones de pesos colombianos. Esta inversión comprende aspectos como adquisición de mobiliarios, equipamiento y vehículos, y engloba la implementación de vigilancia y control, así como programas de incorporación de sistemas automáticos de control [Ferrer et al, 2013].

En consecuencia, es fundamental el desarrollo de tecnologías de bajo costo para recolectar información de los elementos de la infraestructura vial, donde el elemento básico sean los pavimentos. Dado que la construcción y mantenimiento de los pavimentos requieren recursos significativos, en este contexto, una metodología óptica presenta un gran potencial que puede ser explotado mediante tecnologías semiautomáticas de captura de información. Esto a su vez, reduciría los costos de personal, disminuiría la subjetividad y aceleraría la evaluación de daños en los pavimentos, estableciendo así un sistema sólido y versátil para esta tarea. Por eso, se propone un sistema semiautomático de adquisición de datos que utiliza cámaras estéreo y GPS para capturar imágenes de alta resolución del pavimento. Este sistema automatiza la recolección de información, reduciendo la subjetividad y los tiempos de inspección. Al mejorar la precisión y eficiencia, permite una evaluación más rápida y objetiva del estado de las carreteras, optimizando recursos y costos en el proceso de mantenimiento vial.

2.2. Formulación del problema

¿Cómo capturar imágenes de forma semiautomática y a bajo costo para la evaluación de daño en pavimentos?

2.3.Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Diseñar y desarrollar un sistema semiautomático de bajo costo para la captura de imágenes del pavimento.

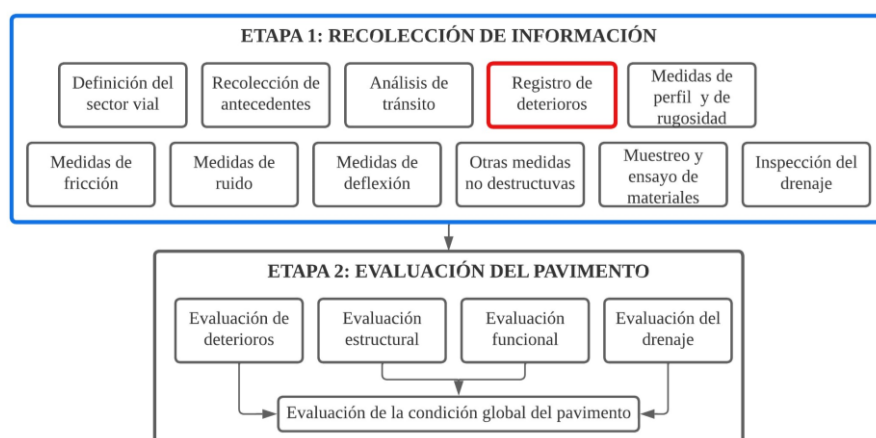
2.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo móvil.
- Desarrollar el sistema de captura de datos.
- Formular un protocolo para la captura de las imágenes de la superficie del pavimento.
- Validar el funcionamiento del sistema.

2.4.Justificación

La calidad de un pavimento se mide por su capacidad para ofrecer a los usuarios comodidad, seguridad y eficiencia. En determinados momentos es necesario realizar obras de rehabilitación en pavimentos en uso, debido a diversas razones, como problemas de circulación vehicular, presencia excesiva de defectos superficiales y altos costos de operación para los usuarios. La magnitud y el costo de las acciones requeridas para rehabilitar pavimentos aumentan significativamente en función de su grado de deterioro [Sánchez, 2003]. En lo que respecta al proceso de diseño de la rehabilitación de pavimentos, es importante tener en cuenta diversas estrategias alternativas. Sin embargo, estas estrategias están limitadas por consideraciones tecnológicas, ambientales y presupuestales. A pesar de que existen sistemas bien desarrollados desde un punto de vista conceptual y técnico, estos enfrentan desafíos insuperables en países en desarrollo que atraviesan situaciones económicas y socialmente inestables. Esto se debe a la incertidumbre en la asignación de recursos a corto o mediano plazo para el mantenimiento de la infraestructura vial. Según lo anterior, INVIAS se enfrenta a la necesidad de implementar una metodología que basada en criterios técnicos, cuente con un sólido respaldo conceptual y al mismo tiempo ser económicamente viable, evitando así gastos excesivos en la realización de esta tarea de gran importancia [Mintransporte, 2021]. En el inicio del proceso de rehabilitación de pavimentos, una de las labores más significativas consiste en la recopilación de información, incluyendo datos sobre el estado deteriorado del pavimento, según el proceso acogido por Colombia a través del INVIAS **Figura 1**. Dado que en esta etapa se proporciona la información necesaria para identificar las razones del deterioro del pavimento, y con base a estas, se elaboran soluciones apropiadas para remediar los daños y evitar que vuelvan a ocurrir.

Figura 1 Proceso de diseño de rehabilitación del pavimento



Fuente: Adaptado de Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, Ministerio de Transporte segunda edición, 2008.

Para la ciudad de Cali, según el informe interadministrativo realizado por planeación municipal y la universidad del Valle. Existen 449,62 km de vías arterias principales, de las cuales el 34% (155,1 km) se encuentra en buen estado, el 58% (262,75 km) se encuentran en estado regular con afectaciones en la capa de rodadura, el 6,7% (30,03 km) en mal estado y el 0,38% (1,73 km) sin pavimentar [Universidad del Valle, 2015]. Dicho esto, el conservar el buen estado y realizar el mantenimiento preventivo de la infraestructura vial de una ciudad como Cali que en conjunto con el Valle del Cauca es el tercer centro económico del país [Muñoz, 2021], es de vital importancia para así brindar comodidad, seguridad y a su vez eludir altos costos de operación en el transporte de personas y bienes. Esta situación hace que las labores necesarias de rehabilitar el pavimento y a su vez la recolección de información de los daños tome mayor relevancia. Sin embargo, dada la metodología de administración vial adoptada para la evaluación de patologías en las carreteras, el conservar un buen estado en las vías no es tarea fácil. Esta labor se hace tediosa, lenta y subjetiva por la forma en que se realiza la inspección de deterioros en el pavimento (inspección visual) comprometiendo su eficiencia y efectividad del proceso por temas económicos y de tiempo [Porrás et al., 2014].

En los procesos de gestión de pavimentos es posible desarrollar tecnologías de apoyo hacia la valoración funcional de pavimentos para la captación de datos de manera automática o semiautomática, que agilizan los procesos de inspección. Este proyecto se enfocó en diseñar y desarrollar un sistema semiautomático de captura de imágenes de vías pavimentadas, con el objetivo de proporcionar una herramienta de bajo costo para el posterior estudio patológico de los daños presentes en la superficie de la capa de rodadura. Esta forma de realizar la inspección vial permite posteriormente la identificación de daños de distintos deterioros superficiales en el pavimento flexible con una mayor precisión y datos de toda la malla vial, eliminando la subjetividad del administrador vial. También, permite reducir costos de operación y de personal. Además, la disminución del tiempo empleado para el proceso en campo es significativa con el uso de este método, sin implicar riesgos para el personal [Porrás et al., 2014].

Es clave el uso de esta tecnología como parte de la modernización de la forma de evaluar la infraestructura vial del país, a través de la mejora de los procesos y de las prácticas en las obras viales que permitan una gestión más eficiente de los pavimentos. Generando un sistema de apoyo de fácil acceso orientado en facilitar la valoración del estado de las vías, integrando un sistema semiautomático de captación de imágenes, como un insumo necesario para la oportuna toma de decisiones en cuanto al mantenimiento de la malla vial.

En línea con este objetivo, se comparte un interés común con la tarea del gobierno nacional a través del INVIAS, que tiene el compromiso de lograr una infraestructura moderna y eficiente. Para el cual, el desarrollo de una herramienta tecnológica que permite almacenar y posteriormente analizar información de la infraestructura de transporte, y a su vez, permite facilitar la toma de decisiones a las autoridades municipales y departamentales en el desarrollo de los planes de movilidad urbana.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Antecedentes

La Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) se encarga de recopilar información relevante para administradores e ingenieros de carreteras, la cual proviene principalmente de investigaciones y experiencias de otros profesionales. Su objetivo es reunir y resumir este conocimiento de manera concisa, elaborando informes que se enfocan en los esfuerzos de investigación y desarrollo relacionados con la recopilación y procesamiento automatizado de datos sobre el estado del pavimento, que son comunes en la gestión de pavimentos.

La recolección información de los daños en la superficie del pavimento mediante inspecciones visuales experimentó un declive a principios de los años ochenta. Debido a dificultades presentes en su proceso como su subjetividad, inconsistencias y a menudo inseguridad. Es por esto, que se ha invertido gran trabajo en el desarrollo de sistemas que permiten mecanizar la recolección de información a través del uso de imágenes del pavimento con el fin de extraer información de su deterioro, con niveles de éxito variados [Yu, 2011]. Estos sistemas han permitido reemplazar los métodos tradicionales, disminuyendo afectaciones en el tráfico vehicular, además, de costos y riesgos asociados al proceso. En una síntesis de la práctica de las carreteras, proporcionada por la AASHTO [McGhee, 2004], para los años 80's los métodos enfocados en la automatización se utilizaban cada vez más, dentro de los principales métodos usados de captura de imágenes de pavimentos se encontraban los denominados "analógicos" y "digitales". Para el cual las imágenes digitales se convirtieron en el método más popular, debido a la calidad de las imágenes que se producían, la facilidad de manipulación de datos y la aplicabilidad a la reducción automatizada de datos.

En 1999, Wang y Elliott llevaron a cabo un estudio en el departamento de carreteras y transporte del estado de Arkansas, centrándose en la identificación de problemas en el pavimento a partir de imágenes. Su principal objetivo fue desarrollar un sistema automatizado para identificar y clasificar grietas en el pavimento. Durante ese periodo, la mayoría de las imágenes del pavimento se generaban mediante grabaciones de video de alta velocidad en formato VHS, ya que las tecnologías digitales aún estaban emergiendo del campo de la evaluación de pavimentos [McGhee, 2004]. Este estudio permitió una comprensión temprana de la automatización en la evaluación de pavimentos y señala las restricciones que existían en ese momento, relacionadas con la precisión y la velocidad.

Desde entonces, la recopilación y procesamiento automatizado de datos sobre el estado del pavimento ha avanzado significativamente. En los años 2000, se anticipaba una mayor automatización de los estudios de condición del pavimento, previendo la implementación de sistemas GPS para proporcionar referencias de ubicación a elementos de la infraestructura vial. Además, se esperaba el uso de conceptos de inteligencia artificial e imágenes digitales para la recopilación de datos [Kulkarni, 2003].

Estos avances mencionados se pueden evidenciar en una revisión realizada por [Porras et al., 2014], en la cual se exploran los sistemas comerciales utilizados por diferentes países para el estudio y la prevención del estado de las vías. Esta revisión clasifica estos sistemas según su función: de localización y de inspección. Destaca la importancia de tecnologías como el posicionamiento global GPS, utilizadas para la sincronización y localización de la toma de datos en estos sistemas. Además, se exponen prototipos de sistemas de captura de imágenes que se encuentran en la literatura. Porras concluye que, en su mayoría se ha optado por el uso de cámaras digitales para la adquisición de datos, lo que demuestra la tendencia hacia una mayor automatización en la recopilación de información sobre el estado de las carreteras.

En consonancia con estos avances, se encuentra el trabajo de [Daniel, 2014] quien propuso un sistema integrado para la detección automática y caracterización de los daños en la superficie del pavimento, con el objetivo de evaluar su gravedad. Este enfoque incorpora tecnologías avanzadas de adquisición de imágenes, como el sistema PAVUE, CSIRO y LRIS. Es importante destacar que LRIS,

por ejemplo, es capaz de capturar imágenes de la superficie del pavimento a una velocidad superior a los 100 km/h. Este sistema está, equipado con cámaras de escaneo de línea de alta velocidad y resolución, lo que demuestra la continua evolución utilizadas en la detección automatizada y evaluación de daños en el pavimento.

Además, [Coenen, 2017] proporciona otra revisión exhaustiva sobre daños en el pavimento y los métodos relacionados a detección. En su trabajo, enfatizan la importancia de determinar tanto el estado del pavimento como su ubicación, así como la distancia entre los deterioros, mediante el uso de un solo vehículo de inspección. También se centran en la evaluación de soluciones comerciales disponibles. En sus análisis comparativo de varios dispositivos, aplicaron un método para evaluar la idoneidad en la detección dinámica del deterioro del pavimento. Destacan que las cámaras de dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés), por ejemplo, pueden utilizarse en modo dinámico integrado en un vehículo para detectar grietas, parches y baches con una precisión muy buena. En cuanto a la visión estéreo, ofrecen una evaluación moderada de integralidad y una buena precisión en la detección de problemas como el bache. Además, subrayan que las empresas comerciales han estado usando furgonetas altamente equipadas durante las últimas tres décadas, aunque estos equipos eran costosos y precisaban de tecnología avanzada. Sin embargo señala que el avance en los métodos ha sido impulsado por la creciente capacidad de computadores asequibles y el uso de sensores de alta precisión.

En línea con la evolución de los sistemas, se ha incrementado el uso de cámaras digitales RGB, equipadas con sensores CCD o CMOS, que han sido ampliamente utilizadas en la detección de deterioros en pavimentos mediante imágenes 2D [Zamora, 2024]. Su bajo costo y fácil montaje en vehículos o drones las convierten en una herramienta versátil para inspecciones visuales semiautomáticas y automatizadas. Este enfoque ha sido utilizado históricamente en sistemas como PASCO RoadRecon [Joni et al., 2020]. Numerosos estudios han demostrado que, con una resolución adecuada y algoritmos robustos, estas cámaras pueden lograr tasas de precisión de hasta 95% en la detección de grietas, incluso en imágenes tomadas en movimiento [Tapamo et al., 2023] [Tsaimou et al., 2024]. No obstante, estas cámaras pueden verse afectadas por factores ambientales como la iluminación natural, sombras o suciedad en el pavimento.

Para superar los desafíos asociados a las cámaras RGB convencionales, se ha recurrido a tecnologías más especializadas como las cámaras lineales. Diversos estudios han demostrado que estos sistemas permiten una captura precisa de grietas a velocidad de autopista y en condiciones de iluminación variables, gracias a la sincronización con fuente de luz estroboscópicas o láser. [Medina et al., 2014] [Han et al., 2018]. Además, implementaciones como Basler raL2048-80km empleada en el dataset PaveDistress, han demostrado que esta tecnología puede operar en entornos complejos como túneles y condiciones de nubosidad, logrando imágenes detalladas con precisión [Liu et al., 2024]. La mayor desventaja de estos sistemas radica en los elevados volúmenes de datos generados, sistemas como el VPADS han destacado que, aunque los sistemas de imagen lineal ofrecen alta precisión, su uso a gran escala puede ser limitado por la necesidad de procesamiento posterior intensivo [Yan & Yuan, 2018].

Más allá de la captura de imágenes en 2D, la reconstrucción 3D del pavimento mediante tecnología láser ha ganado prominencia por su capacidad de detectar deformaciones y defectos superficiales con alta precisión. El sistema LCMS (Laser Crack Measurement System), desarrollado por Pavemetrics junto al INO y el Ministerio de Transportes de Quebec, utiliza dos escáneres láser y cámaras 3D para medir perfiles transversales completos. El sistema es capaz de detectar y clasificar grietas (transversales, longitudinales y tipo cocodrilo), parches y ahuellamientos de manera automática con una precisión superior al 95% en clasificaciones generales [Laurent et al., 2012] [Chan et al., 2016]. Esta tecnología ha sido implementada comercialmente en sistemas como ARAN, Dynatest, ROMDAS, Pavetesting y PaVision, integrándose a sistemas de gestión vial con software como Pave3D para la clasificación automática de deterioros [Serigos et al., 2016] [Tsai & Li, 2012]. Aunque se trata de una tecnología madura y altamente automatizada, el principal obstáculo para su adopción masiva sigue siendo su elevado costo de adquisición y mantenimiento.

Entre las soluciones más precisas para la inspección del pavimento, destaca el escaneo láser terrestre, basado en tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging), permite generar nubes de puntos 3D de alta densidad, capturando la geometría detallada del pavimento. [Famili et al., 2020][Feng et al., 2022]. Esta tecnología utiliza sensores de tiempo de vuelo o desplazamiento de fase para medir distancias con una precisión de hasta 1 cm [Zou et al., 2023]. Cuando se monta sobre plataformas móviles (vehículos, trenes, drones), permite inspecciones rápidas y detalladas, con aplicaciones en análisis de rugosidad, drenaje, pendientes y deformaciones [Shams et al., 2018]. Empresas como *Michael Baker International* y *Stantec* han implementado soluciones avanzadas que integran escáneres láser con sistemas LCMS y GPR (Ground Penetrating Radar), generando inspecciones estructurales y superficiales simultáneas. Estos sistemas presentan correlaciones de hasta 99% con mediciones estándar como el IRI (The international roughness index) y han sido validados en diversos escenarios de mantenimiento vial [Wix & Leschinski, 2013][Miah et al., 2015][Sharma & Aggarwal, 2023]. Su alto costo y complejidad operativa justifican su aplicación principalmente en proyectos de gran escala, donde se requiere análisis estructural completo.

Como parte de un enfoque más integral, los sistemas híbridos multisensor incorporan distintas tecnologías como cámaras digitales, escáneres láser, sensores inerciales y GPS, integrados con algoritmos de inteligencia artificial para mejorar la precisión, georreferenciación y automatización de las inspecciones de pavimento. Esta integración permite obtener datos tridimensionales y atributos de deterioro de manera precisa y rentable [Dabous et al., 205] [Tello-Cifuentes et al., 2024]. Dentro de esta categoría, las cámaras estereoscópicas RGB han ganado terreno como una solución rentable para obtener mapas 3D sin necesidad de sensores LiDAR. Estas cámaras utilizan dos lentes sincronizadas que capturan imágenes desde diferentes ángulos, permitiendo reconstruir la topografía del pavimento mediante visión estereó y técnicas como Structure From Motion (SFM) [Iglhaut et al., 2019]. Estudios recientes muestran que este enfoque puede identificar grietas, baches y otros daños con precisión milimétrica, incluso usando cámaras comerciales de bajo costo [Guan et al., 2022][Romero-Chambi et al., 2020][Anvo et al., 2023][Wang, et al., 2023]. Uno de los principales beneficios de estas soluciones es su escalabilidad y facilidad de implementación en vehículos comunes, permitiendo reducir significativamente los costos operativos sin comprometer la calidad de los datos recolectados [Hou & Wang, 2007][Luo et al., 2024].

En este contexto de avances tecnológicos aplicados a la inspección de pavimentos, el desarrollo a lo largo de los años ha fortalecido el uso de sistemas automáticos o semiautomáticos capaces de recolectar datos de la condición de los pavimentos. Aún así, el uso de la metodología manual, es decir, la inspección visual sigue siendo la más común en el país. A partir de esta base tecnológica en constante expansión, es importante destacar los avances recientes en proyectos relacionados a nivel internacional, nacional y local que han abordado desafíos similares, tanto en el desarrollo de tecnologías accesibles para la captura de datos como en la evaluación digital de su desempeño. A continuación, se profundiza en una serie de artículos y proyectos que servirán de referencia relevantes para el desarrollo de este proyecto.

Por ejemplo, [Loprencipe y Pantuso, 2017] propusieron un procedimiento innovador para la evaluación de pavimentos urbanos, centrado en la digitalización de la metodología PCI. Utilizando un algoritmo automatizado para calcular el Índice de Condición del Pavimento (PCI), implementaron un nuevo catálogo de identificación de deterioros que incluye defectos comunes en áreas urbanas, como pozos de registro y raíces de árboles. Los resultados mostraron que el método propuesto, basado en nuevas curvas de valor de deducción y un sistema automatizado, proporciona valores de PCI muy similares a los obtenidos con la norma ASTM D6433. Este enfoque digital mejora la precisión, eficiencia y la automatización del proceso, eliminando la subjetividad y reduciendo el tiempo necesario para la evaluación de pavimentos urbanos.

Por otro lado, [Joni et al., 2020] propusieron un método robusto para la detección automática de daños como grietas, baches y desprendimientos a partir de videos de carreteras Iraquíes. En lugar de recurrir a métodos tradicionales lentos y costosos, este enfoque recopiló imágenes de la superficie mediante una cámara GoPro7 de alta velocidad (240FPS) instalada en un vehículo que circulaba a

80km/hr. Determinaron una altura optima de montaje de la cámara a 0,96m del pavimento, para así capturar un carril completo de 3,5m de ancho. Dada la variabilidad de los factores como la hora del día, el clima y contaminantes en la superficie, incorporaron un algoritmo de preprocesamiento que restringió la intensidad óptica en un rango definido. Para mitigar aún más esa fluctuación de luminosidad, usaron una fuente de luz fija junto con la cámara y realizaron capturas durante la noche. Concluyeron que, con equipos y herramientas simples, es posible recopilar imágenes de daños en pavimento con un nivel adecuado de precisión. Además, destacaron que el consumo de tiempo es menor que la inspección manual por un (89%-92%).

Complementando este tipo de desarrollos, [Guan et al., 2021] desarrollaron un enfoque automatizado para detectar defectos en el pavimento a nivel de píxel, que combina la visión estéreo y el aprendizaje profundo. Para llevar a cabo su estudio, adquirieron imágenes en color y profundidad, así como imágenes superpuestas. Utilizaron un vehículo equipado con tres cámaras GoPro hero8 montadas en un soporte horizontal desmontable en la parte trasera del vehículo. Estas cámaras capturaron imágenes mientras el vehículo se desplazaba a velocidades que oscilaban entre 3 y 15 km/h, utilizando un control remoto inteligente para asegurar la simultaneidad de la captura de imágenes. La precisión del modelo se evaluó mediante la comparación de profundidad obtenida digitalmente y las mediciones experimentales. Los resultados demuestran que la representación tridimensional de la superficie del pavimento logra una precisión a nivel milimétrico.

Por otra parte, la integración de sistemas de posicionamiento también ha sido explorada como una mejora clave. En este sentido [Luo et al., 2023] propusieron un sistema de posicionamiento automático de kilometraje para inspección vial, combinando visión estéreo binocular con GNSS. Los resultados revelaron una desviación promedio de solo 4,06 metros en la estimación del kilometraje, cumpliendo con los requisitos de precisión para tareas de inspección y localización de daños.

A estos avances se suma el trabajo de [Anvo et al., 2023], quienes utilizaron una cámara estéreo RGB (Zed 2i) junto con una unidad de medición inercial (IMU) montada en un vehículo. Se implementó un algoritmo para la reconstrucción de la superficie de la carretera que no requiere calibración de los datos del sensor. Se llevaron a cabo pruebas en dos tipos de carreteras para comprar la reconstrucción del pavimento y los datos de IMU. Los resultados obtenidos indican que este enfoque resultó efectivo en la representación del deterioro del pavimento.

De igual manera,[Lin et al., 2023] presentaron un enfoque económico y preciso para detectar y cuantificar deterioros en pavimentos mediante una cámara RGB-D y un algoritmo de segmentación de instancias. A partir de imágenes RGB y datos de profundidad, se generan nubes de puntos 3D que permiten calcular área y volumen de baches y grietas. Los resultados muestran alta precisión en la cuantificación de baches y un desempeño aceptable para grietas, validando el método como una alternativa efectiva y de bajo costo para el mantenimiento de pavimentos.

De forma complementaria,[Luo et al., 2024] presentaron un sistema de hardware de visión estereoscópica binocular para la extracción de texturas de pavimentos en un entorno de prueba de interior, conformado por una cámara digital Canon EOS 80D, un macrómetro y un soporte fijo para la cámara. Realizaron la calibración de la cámara utilizando imágenes con una placa de celebración y herramientas de Matlab y OpenCV-Python. Usaron algoritmos en Python para realizar la coincidencia estereoscópica y construir la nube de puntos del pavimento asfáltico, demostraron que el algoritmo SGBM tiene el mejor efecto en la reconstrucción del mapa de paralaje de la nube de puntos del pavimento asfáltico. Concluyeron que puede medir con precisión la forma tridimensional del pavimento asfáltico en interiores, aunque su uso en exteriores es limitado.

En cambio, [Yang et al.,2025] se centró en la mejora de la evaluación del Índice de Condición del Pavimento (PCI) mediante un enfoque automatizado para la detección de defectos en pavimentos. Los resultados mostraron que las desviaciones entre los valores del PCI calculados automáticamente y los valores estándar fueron inferiores al 5% en los cuatro tramos de carretera evaluados. Esto demuestra que el método propuesto ofrece una medición precisa y fiable del estado del pavimento, con una mínima

diferencia en la evaluación del PCI, lo que respalda su efectividad en la evaluación de las condiciones de las vías. Sin embargo, el estudio también identificó algunos errores de segmentación en defectos como baches y grietas tipo "piel de cocodrilo", lo que sugiere áreas de mejora para una precisión aún mayor.

Finalmente, [Perri et al., 2025] presentaron un sistema automatizado para detectar grietas y calcular el Índice de Condición del Pavimento (PCI) en pavimentos aeroportuarios, integrando vehículos aéreos no tripulados (UAV) y técnicas de inteligencia artificial (IA). Utilizando un UAV con cámaras de alta resolución, se generaron ortofotos que fueron analizadas con IA para detectar y clasificar grietas. Los resultados mostraron una precisión elevada con errores de $\pm 3,7\%$ en longitud y $\pm 4,24\%$ en ancho de grietas. El PCI calculado automáticamente tuvo una desviación de solo $\pm 1,33\%$ respecto a la medición manual, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de inspección, con un impacto ambiental menor.

3.1.1. Nacional

[Díaz et al., 2013] presentaron un artículo titulado “Sistema automático para la adquisición de imágenes de vías pavimentadas” en el cual se propone un sistema automatizado para la captura de imágenes del pavimento. Este sistema se compone de una cámara de escaneo por línea, una tarjeta de captación de imágenes conectada a una computadora portátil robusta y un codificador relativo. Llevaron a cabo pruebas en una camioneta 4x4 a velocidades que oscilaron entre 20 y 60 km/h, en diversas condiciones climáticas, logrando una precisión de 1mm/píxel. Además, destacaron ventajas del sistema automático en comparación al método manual.

Siguiendo esta línea de innovación tecnológica, [Macea-Mercado et al. 2016] en su artículo “Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo”, propusieron un sistema de inspección que integra tecnologías de bajo costo con georreferenciación de los daños. Utilizando un vehículo equipado con Arduino Uno, una placa GPS, una tarjeta microSD, una cámara y un mecanismo de activación por perturbación (MAPP), el sistema permitió capturar y ubicar daños en el pavimento, generando además mapas de deterioro en plataformas web. Sus resultados demostraron alta precisión en la localización, al comparar las coordenadas del GPS del sistema con puntos de referencia evaluados en campo.

Más recientemente, [Carrillo, 2024] presentó un enfoque orientado al uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) combinados con algoritmos de aprendizaje profundo para la detección automatizada de deterioros en pavimentos asfálticos. A través de la captura de imágenes aéreas y su análisis con modelos como Faster R-CNN, se logró identificar y clasificar daños como baches y fisuras con una precisión promedio entre 70 % y 89 %. Además, se integró el uso del Índice de Condición del Pavimento (PCI) como herramienta para la toma de decisiones en mantenimiento vial. La metodología demostró ser una alternativa eficiente a los métodos convencionales, permitiendo cubrir áreas extensas en menor tiempo y con un mayor grado de objetividad.

3.1.2. Local

[Tello-Cifuentes et al., 2021] en el artículo titulado “Evaluación de daños en el pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales” introdujeron una metodología para evaluar el deterioro de pavimentos flexibles mediante el uso de fotogrametría terrestre y redes neuronales. Para la recopilación de datos, adaptaron un vehículo equipado con una cámara digital GoPro, un teléfono inteligente y una estructura de soporte. Capturaron imágenes tomadas a 25 km/h entre las 3:00 y 5:00 de la tarde debido a su menor borrosidad y sombra. Los resultados demostraron un porcentaje de precisión superior al 93% en los análisis realizados a partir de las fotografías obtenidas.

En la misma línea de avance hacia la automatización, el proyecto *VisualPAV* [Salazar Manrique, 2022] se enfocó en el desarrollo de un dispositivo para la adquisición automatizada de datos sobre la condición superficial de pavimentos asfálticos. El sistema se basó en el método VIZIR, seleccionado por su facilidad de aplicación y uso extendido a nivel nacional. Se entrenó una red

neuronal con una base de datos propia de deterioros, logrando una precisión del 95 % en la clasificación de 15 tipos de fallas. A pesar de que no se pudo culminar completamente por factores externos, como la pandemia y el orden público en Cali, se estableció una metodología estadística de validación frente a inspecciones manuales. El sistema mostró ser una herramienta confiable para apoyar la toma de decisiones sobre mantenimiento vial conforme a la normativa del INVÍAS, destacando el papel de la inteligencia artificial y la automatización en el fortalecimiento de los sistemas de gestión de pavimentos en el país.

Complementando estas iniciativas con nuevas tecnologías, [Ortega Rengifo et al., 2024], en el artículo “Sistemas de aeronaves no tripuladas en la evaluación de carreteras: un nuevo enfoque para el índice de condición del pavimento y las metodologías VIZIR”, propusieron una metodología innovadora que combina sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) con los métodos tradicionales de evaluación PCI y VIZIR. Mediante la captura de imágenes de alta resolución y la generación de ortomosaicos, el estudio demostró que el uso de UAS reduce significativamente el tiempo y costo de las inspecciones, obteniendo resultados confiables con márgenes de error que variaron según el tipo de defecto (0 % a 42,40 %). Este enfoque resalta el potencial de los UAS como alternativa eficiente y menos riesgosa en la gestión del pavimento urbano.

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1.Pavimentos

Según la definición técnica dada por INVIAS, el pavimento se describe como “Un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactos”. Este se divide principalmente en dos categorías: el pavimento flexible con capas de rodadura bituminosa sobre material no ligado, adecuados para adaptarse a las deformaciones y cambios climáticos; y los rígidos, con losas de concreto hidráulico sobre subrasante o subbase, ideales para cargas pesadas y tráfico intenso [*Glosario Manual Diseño Geométrico Carreteras*, 2018].

4.2.Gestión de Pavimentos (PM)

En principio, la gestión de pavimentos se define como una estrategia efectiva y eficiente que abarca una serie de actividades destinadas a mantener los pavimentos en condiciones aceptables para los usuarios, todo ello con el objetivo de minimizar los costos a lo largo de su ciclo de vida, tal como lo establece la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte [AASHTO, 1995].

4.3.Sistemas de gestión de pavimentos (PMS)

De igual forma, la AASHTO define los sistemas de gestión de pavimentos de la siguiente manera: “Un conjunto de herramientas o métodos que ayudan a los tomadores de decisiones a encontrar estrategias óptimas para proporcionar, evaluar y mantener pavimentos en condiciones de servicio durante un periodo de tiempo” [AASHTO, 2012]. Esta definición destaca la relevancia de la gestión de pavimentos al brindar una evaluación del pavimento tanto de las condiciones actuales como de las futuras. Además, es fundamental mencionar que la base esencial para un PMS es el uso de un procedimiento y sistema establecido para recopilar, almacenar, procesar y recuperar información requerida, que forma parte de un Sistema de información de Gestión de Pavimento (PMIS, por sus siglas en inglés).

4.4.Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición que permite obtener información tridimensional de objetos y superficies a partir de imágenes bidimensionales. Esta técnica se fundamenta en el principio de la estereoscopia, que reproduce el relieve de un objeto mediante imágenes capturadas desde dos puntos de vista diferentes, lo que permite estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición espacial del objeto [Quirós, 2014].

Además de su aplicación en la obtención de modelos tridimensionales, la fotogrametría utiliza algoritmos matemáticos avanzados para calcular la posición y la forma de los objetos a partir de la información visual proporcionada por las fotografías. Esta técnica es ampliamente utilizada en campos como la cartografía, la topografía, la arquitectura, la ingeniería civil, la arqueología y la geología, debido a su capacidad para generar datos precisos y detallados a partir de imágenes. Para asegurar la efectividad de la fotogrametría, es crucial contar con imágenes de alta calidad y precisión. Esto implica el uso de cámaras de alta resolución y un control cuidadoso de la geometría de la toma de las fotografías. Además, se deben realizar correcciones de errores geométricos y radiométricos en las imágenes para garantizar la exactitud de los resultados obtenidos. [Fiorella et al., 2023].

4.5.Deterioro del pavimento

El deterioro del pavimento se puede clasificar en dos categorías principales, según el tipo de pavimento: flexibles y rígidos. En pavimentos flexibles, los principales tipos de daños incluyen grietas, deformaciones, pérdida de capas estructurales, daños superficiales y otros daños [Gutiérrez, 2006]. Por

otro lado, en pavimentos rígidos, los tipos de deterioro más comunes son grietas, deterioro de las juntas, deterioro superficial y otros deterioros [Gutiérrez, 2006]. Cada tipo de deterioro se describe minuciosamente en cuanto a su nivel de severidad, métodos de medición, posibles causas y su probable evolución, según lo detallado en los manuales de inspección visual de pavimentos flexibles y rígidos proporcionados por INVIAS.

En los pavimentos flexibles, se presentan diversos tipos de deterioro, cada uno con distintos niveles de gravedad. Para una correcta identificación, es esencial considerar tres factores clave: el tipo de deterioro, su gravedad y la extensión del daño. La omisión de cualquiera de estos elementos puede comprometer la calidad de la evaluación, dificultando la emisión de un juicio preciso sobre la condición del pavimento. En la Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras [Ministerio de Transporte, 2008], se establece un sistema estructurado para identificar, clasificar y evaluar los daños en los pavimentos flexibles. Este sistema define tanto los tipos de severidad asociados a cada tipo de daño, así como los métodos de medición que deben emplearse para obtener datos precisos sobre la condición del pavimento.

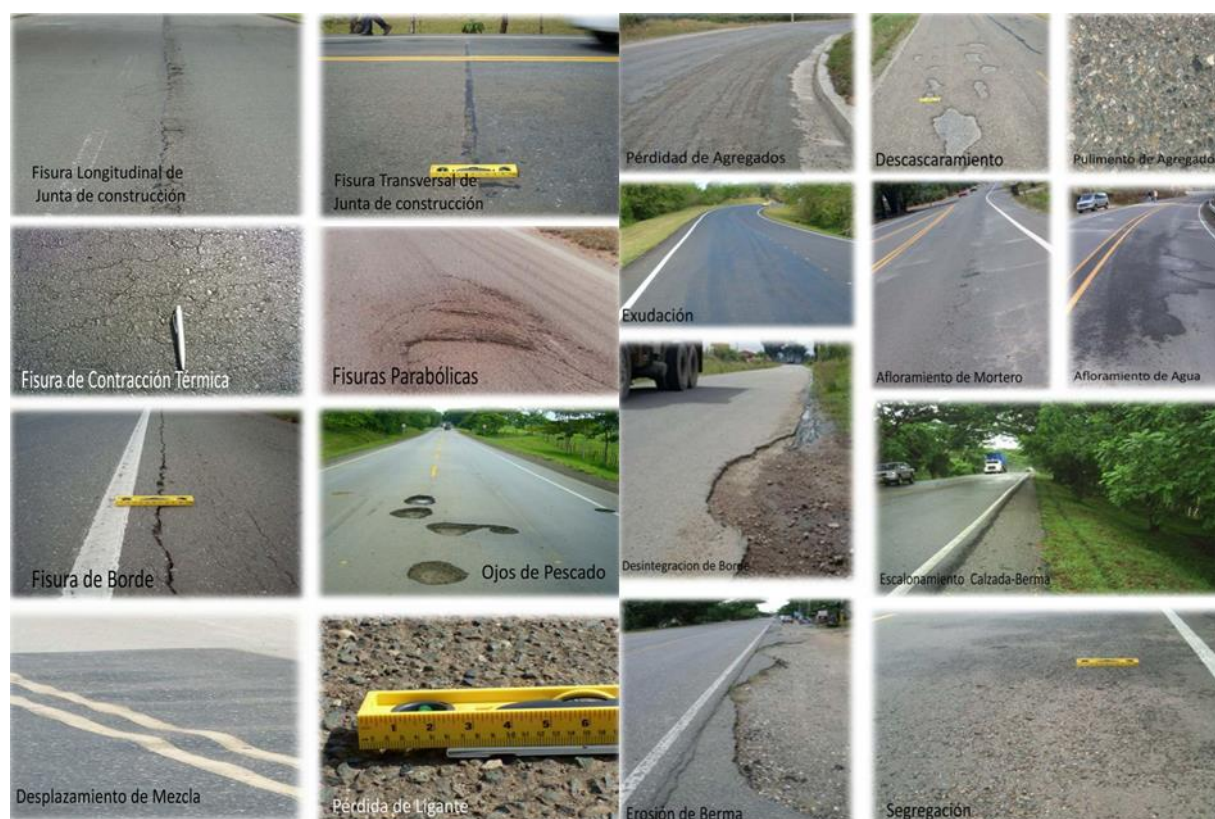
Para representar la condición global de la superficie del pavimento, los deterioros individuales se combinan en índices que permiten cuantificar su estado. Entre los más utilizados se encuentran el Índice de Degradación Superficial adoptado por el LCPC en el método VIZIR [Autret & Brousse, 1991], y el Índice de Condición del Pavimento (PCI), descrito en la norma ASTM-D6433 y en el reporte FHWA/OH-99/004. En Colombia, la metodología de rehabilitación de pavimentos adoptada por el Ministerio de Transporte toma como referencia principal el sistema VIZIR para la inspección y evaluación del estado del pavimento.

Figura 2 Deterioros del tipo A.



Fuente: Ministerio de Transporte, 2008.

Figura 3 Deterioros de tipo B.



Fuente: Ministerio de Transporte, 2008.

4.6.Recolección de datos para la evaluación del Pavimento

Existen diversos métodos para la recolección de datos durante el inventario de los deterioros de los pavimentos, los cuales se pueden agrupar en métodos automatizados y métodos visuales. Los métodos visuales manuales son los más utilizados en la actualidad debido a su accesibilidad y bajo costo de implementación. Estos requieren la inspección directa de la superficie del pavimento por parte de un equipo de evaluadores, quienes identifican y cuantifican los deterioros presentes con base en guías estandarizadas como el método VIZIR o PCI. La información se registra mediante herramientas básicas como plantillas, cámaras fotográficas, cinta métrica, odómetros, reglas y niveles, lo que permite documentar la severidad y extensión de los daños en el campo.

Proceso de recolección de datos en campo

Para ambas metodologías a pesar de ser desarrolladas en diferentes contextos, presentan una estructura similar en el proceso de recolección de datos, que incluye las siguientes etapas:

Tabla 1 Proceso de recolección manual.

Etapa	PCI	VIZIR
Delimitación y selección de unidades de análisis	Se emplean unidades de muestreo de tamaño estándar, normalmente 255m ² para pavimentos flexibles, seleccionadas aleatoriamente dentro de la sección de pavimento a evaluar.	Se trabaja con tramos homogéneos de pavimento, generalmente de 200 metros, que se dividen en subtramos más pequeños para facilitar el levantamiento de información.
Identificación y clasificación de deterioros	Clasifica 19 tipos de deterioros en pavimentos flexibles, detallando	Considera también 19 tipos, organizados en categoría A (estructurales) y categoría B

Etapas	PCI	VIZIR
	características como tipo, severidad (baja, media, alta) y área afectada.	(funcionales), evaluando la severidad con base a descripciones preestablecidas.
Medición de la severidad y extensión del daño	Utiliza un sistema de ponderación basado en el porcentaje de afectación dentro de la unidad de muestreo.	Emplea mediciones con flexómetro, odómetro o cinta métrica para determinar el área deteriorada dentro de cada tramo homogéneo.
Registro de datos en campo	Utiliza formularios específicos para el cálculo del PCI, donde se registra la cantidad y severidad de cada deterioro.	Maneja fichas de inspección visual, en las que se anotan los deterioros identificados junto con observaciones cualitativas y cuantitativas.

4.7. Evaluación de la condición superficial del pavimento

Método VIZIR

El método VIZIR (Visión Inspection de Zones et Itinéraires à Risque), desarrollado por el laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en 1991, se utiliza para evaluar el deterioro superficial del pavimento. Este método introduce dos índices principales. Índice de fisuración (If) el cual evalúa los agrietamientos de tipo estructural, considerando su gravedad y extensión. El índice de deformación (Id) que se refiere a las deformaciones de origen estructural también evaluadas en función de su gravedad y extensión. La combinación de estos índices permite determinar el índice de Deterioro Superficial (Is), que clasifica la condición del pavimento en una escala del 1 al 7, donde valores más altos indican mayor deterioro [Herrera, 2021]. En Colombia, INVIAS adoptó y adaptó el método VIZIR para evaluar la condición superficial de la condición de los pavimentos asfálticos en la red vial nacional. Esta adaptación se formalizó en la norma “INV E-813: Determinación del índice de deterioro superficial de un pavimento asfáltico mediante método VIZIR” [INVIAS, 2013]. La guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras del ministerio de transporte también incorpora este método, detallando los tipos y severidades de los daños, así como el procedimiento para determinar el índice de condición superficial.

Tabla 2 Escala del valor de Deterioro Superficial (Is)

Categoría	Is
Condición buena	1-2
Condición marginal	3-4
Condición deficiente	5-6-7

Fuente: Ministerio de Transporte, 2008.

La clasificación del deterioro se divide en dos categorías. La categoría A se caracteriza por una condición estructural del pavimento, se trata de degradaciones causadas por insuficiencia en la capacidad estructural de la calzada. Por otro lado, los deterioros de categoría B son de tipo funcional, no están ligados a la capacidad estructural de la calzada, sino que derivan de deficiencias constructivas o condiciones particulares de tráfico.

Tabla 3 Niveles de gravedad de los deterioros del tipo A (VIZIR).

DETERIORO	NIVEL DE GRAVEDAD		
	①	②	③
Ahuellamiento y otras deformaciones estructurales	Sensible al usuario, pero poco importante Prof < 20 mm	Deformaciones importantes. Hundimientos localizados o ahuellamientos. 20 mm ≤ Prof ≤ 40 mm	Deformaciones que afectan de manera importante la comodidad y la seguridad de los usuarios. Prof > 40 mm
Fisuras longitudinales por fatiga	Fisuras finas en la huella de rodamiento. <6 mm	Fisuras abiertas y a menudo ramificadas.	Fisuras muy ramificadas, y/o muy abiertas. Bordes de fisuras ocasionalmente degradados.
Piel de cocodrilo	Piel de cocodrilo formada por mallas (> 500 mm) con fisuración fina, sin pérdida de materiales.	Mallas más densas (<500mm), con pérdidas ocasionales de materiales, desprendimientos y ojos de pescado en formación.	Mallas con grietas muy abiertas y con fragmentos separados. Las mallas son muy densas (<200 mm), con pérdida ocasional o generalizada de materiales.
Bacheos y parcheos	Intervención de superficie ligada a deterioros del tipo B.	Intervenciones ligadas a deterioros tipo A Comportamiento satisfactorio de la reparación.	Ocurrencia de fallas en las zonas reparadas.

Fuente: Ministerio de Transporte, 2008.

Tabla 4 Niveles de gravedad los deterioros del Tipo B (VIZIR).

DETERIORO	NIVEL DE GRAVEDAD				
	①	②	③		
Fisura longitudinal de junta de construcción	Fina y única < 6 mm	• Ancha (≤ 6 mm) sin desprendimiento o • Fina ramificada	Ancha (≤ 6 mm) con desprendimientos o ramificada		
Fisuras de contracción térmica.	Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimiento, o finas con desprendimientos o fisuras ramificadas	Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos		
Fisuras parabólicas.	Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimientos	Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos		
Fisuras de borde	Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimientos	Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos		
Abultamientos	h < 20 mm	20 mm ≤ h ≤ 40 mm	h > 40 mm.		
Ojos de pescado*(por cada 100m)	Cantidad.	< 5	5 a 10	< 5	> 10
	Diámetro (mm)	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	≤ 300
Desprendimientos:					
• Pérdida de película de ligante.	Pérdidas aisladas	Pérdidas continuas	Pérdidas generalizadas y muy marcadas		
• Pérdida de agregado					
Descascaramiento	Prof.(mm)	≤ 25	≤ 25	> 25	> 25
	Área(m²)	≤ 0.8	> 0.8	≤ 0.8	> 0.8
Pulimento agregados	Long. Comprometida < 10% de la sección (100m).	Long. Comprometida ≥ 10% a < 50% de la sección (100m)	Long. Comprometida > 50% de la sección (100m)		
Exudación	Puntual, área específica	Continúa sobre las trayectorias por donde circulan las ruedas del vehículo	Continua y muy marcada, en diversas áreas		
Afloramientos:					
• De mortero	Localizados y apenas perceptibles.	Intensos	Muy intensos		
• De agua					
Desintegración de los bordes del pavimento	Inicio de la desintegración, sectores localizados.	La calzada ha sido afectada en un ancho de 500 mm o más	Erosión extrema que conduce a la desintegración del revestimiento		
Escalonamiento entre calzada y berma.	Desnivel entre 10 mm y 50 mm.	Desnivel entre 50 y 100mm	Desnivel superior a 100mm.		
Erosión de las bermas	Erosión incipiente	Erosión pronunciada	La erosión pone en peligro la estabilidad de la calzada y la seguridad de los usuarios		
Segregación	Long. comprometida < 10% de la sección (100m)	Long. comprometida ≥ 10% a < 50% de la sección (100m)	Long. comprometida > 50% de la sección (100m)		

Fuente: Ministerio de Transporte, 2008.

La información recolectada en cada sector debe documentarse considerando la extensión y la gravedad de los daños observados. Dado que en una misma sección pueden presentarse varios tipos de

deterioros con diferentes niveles de gravedad, se aplica un promedio ponderado, calculado mediante la siguiente formula.

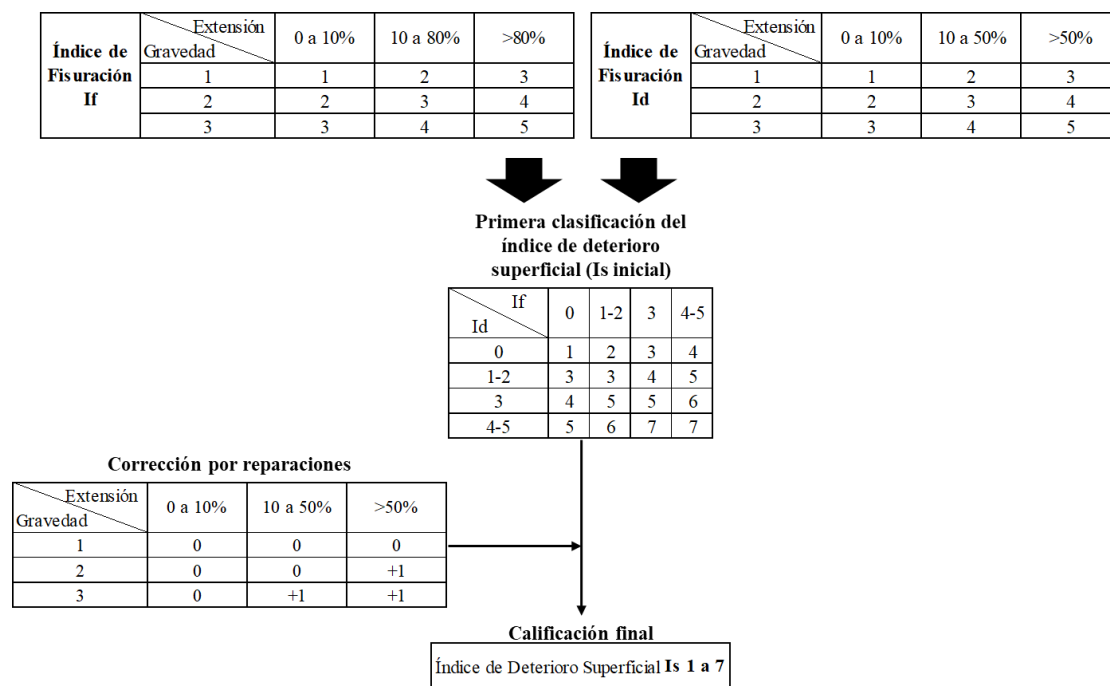
$$G = \frac{l_1 + 2l_2 + 3l_3}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (1)$$

Donde l_i es la longitud ocupada por el deterioro con gravedad i dentro del tramo bajo evaluación (100m). A partir de estos datos, se procede a la determinación del índice de fisuración I_f , el cual ofrece una visión global del estado del pavimento. Este índice se obtiene en tres etapas principales que integran tanto los daños relacionados con fisuración como aquellos asociados a deformaciones.

En primer lugar, se determina el índice de fisuración (I_f), un valor numérico que varía entre 1 y 5. Este índice depende de la extensión y gravedad de las grietas de origen estructural presentes en el pavimento. En segundo lugar, se calcula el índice de Deformación (I_d), también comprendido entre 1 y 5. Este índice se enfoca en las deformaciones estructurales del pavimento. Al igual que I_f , el valor de I_d está directamente relacionado con la magnitud y extensión de esos daños en la superficie del pavimento.

Finalmente, el índice de deterioro Superficial (I_s) se obtiene como una combinación de los índices I_f e I_d . Este índice varía entre 6 y 7 y refleja de manera integral las condiciones de fisuración y deformación en la sección evaluada. No obstante, este valor debe ser corregido teniendo en cuenta factores adicionales, como la calidad y extensión de los trabajos de parcheo y bacheo realizados previamente en la sección. Por ejemplo, si existen numerosos parches mal ejecutados, el índice I_s puede ajustarse hacia valores más altos, reflejando el impacto negativo de estas intervenciones en la condición general del pavimento.

Figura 4 Resumen de la metodología VIZIR.



Fuente: Invia, 2013.

Índice de condición del pavimento (PCI)

Es un indicador numérico de la condición superficial del pavimento, que provee una medida de la condición con base en las fallas observadas en la superficie, este indicador oscila entre 0 y 100, un valor de 100 indica un pavimento en condiciones óptimas, mientras que 0 representa un pavimento completamente deteriorado. La metodología desarrollada inicialmente por el cuerpo de ingenieros del

ejército de los estados unidos en la década de 1970 y estandarizado por la ASTM en la norma ASTM D6433 para carreteras y estacionamientos. La metodología PCI identifica y clasifica el deterioro en función del tipo de daño, su gravedad y su extensión o densidad.

Tabla 5 Escala de Clasificación del PCI.

PCI	Clasificación
85-100	Excelente
70-85	Muy bueno
55-70	Bueno
40-55	Regular
25-40	Malo
10-25	Muy Malo
0-10	Fallado

Fuente: ASTM, 2024.

Tabla 6 Niveles de severidad deterioros (PCI).

DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	Bajo	Medio	Alto
GRIETA DE COCODRILO (FATIGA)	Grietas finas y longitudinales que corren paralelas entre sí sin grietas interconectadas o con solo unas pocas. Las grietas no están escritas.	Desarrollo posterior de grietas de cocodrilo ligeras en un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente descascaradas.	La formación de grietas en forma de red o patrón ha avanzado de modo que las piezas están bien definidas y descascaradas en los bordes. Algunas de las piezas pueden tambalearse bajo el tráfico.
EXUDACIÓN	El sangrado se ha producido en un grado muy leve y se nota solo durante unos pocos días del año. El asfalto no se adhiere a los zapatos ni a los vehículos.	El sangrado se ha producido hasta el punto de que el asfalto se adhiere a los zapatos y a los vehículos sólo durante unas pocas semanas del año.	Se ha producido un sangrado extenso y una cantidad considerable de asfalto se adhiere a los zapatos y vehículos durante al menos varias semanas del año.
GRIETA DE BLOQUE	Los bloques se definen por grietas de baja severidad.	Los bloques se definen por grietas de media severidad.	Los bloques se definen por grietas de alta severidad.
ABULTAMIENTOS Y HUNDIMIENTOS	Los golpes o hundimientos provocan una calidad de conducción de baja severidad.	Los golpes o hundimientos provocan una calidad de conducción de media severidad.	Los golpes o hundimientos provocan una calidad de conducción de alta severidad.
CORRUGACIÓN	La corrugación produce una calidad de conducción de baja severidad.	La corrugación produce una calidad de conducción de media severidad.	La corrugación produce una calidad de conducción de alta severidad.
DEPRESIÓN	13 a 25 mm (1/2 a 1 in.)	25 a 50 mm (1 a 2 in.)	Más de 50 mm (2 in.)
FISURA DE BORDE	Agrietamiento bajo o medio sin rotura ni deshilachado.	Grietas medianas con algunas roturas y deshilachamientos.	Rotura considerable o desplazamiento por el borde.
FISURA DE REFLEXIÓN DE JUNTA (DE LOSAS DE CONCRETO LONGITUDINALES O TRANSVERSALES)	El ancho de la grieta sin rellenar es inferior a 10 mm (3/8 pulg.) o la grieta rellena tiene cualquier ancho (relleno en condiciones satisfactorias).	El ancho de la grieta no rellena es mayor o igual a 10 mm (3/8 pulg.) y menor a 75 mm (3 pulg.); grieta no rellena es menor o igual a 75 mm (3 pulg.) rodeada por grietas secundarias ligeras; o grieta rellena de cualquier ancho rodeada por grietas secundarias ligeras.	Cualquier grieta rellena o no rellena rodeada de grietas secundarias de severidad media o alta; grietas no rellenas mayores de 75 mm (3 pulg.); o una grieta de cualquier ancho donde aproximadamente 100 mm (4 pulg.) del pavimento alrededor de la grieta estén severamente deshilachados o rotos.
FISURAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES (NO REFLEXIVAS DE JUNTAS EN LOSAS DE CONCRETO)	grieta sin relleno cuyo ancho es inferior a 10 mm (3/8 pulg.) o grieta rellena de cualquier ancho (relleno en estado satisfactorio).	el ancho de la grieta no rellena es mayor o igual a 10 mm y menor a 75 mm (3/8 a 3 pulg.); la grieta no rellena es menor o igual a 75 mm (3 pulg.) rodeada por grietas ligeras y aleatorias; o, la grieta	cualquier grieta rellena o no rellena rodeada de grietas aleatorias de severidad media o alta; grieta no rellena de más de 75 mm (3 in); o una grieta de cualquier ancho donde aproximadamente 100 mm (4 in) del pavimento alrededor de la grieta esté severamente roto.

DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	Bajo	Medio	Alto
		rellena es de cualquier ancho rodeada por grietas ligeras aleatorias.	
PARCHES Y PARCHES DE CORTES UTILITARIOS	El parche está en buenas condiciones y es satisfactorio. La calidad de conducción se clasifica como de baja severidad o mejor.	El parche está moderadamente deteriorado, o la calidad del andar se clasifica como de gravedad media, o ambas cosas.	El parche está muy deteriorado o la calidad de conducción se considera de alta gravedad, o ambas cosas; es necesario reemplazarlo pronto.
AGREGADO PULIDO	No hay niveles de severidad definidos; sin embargo, el nivel de pulido debe ser claramente notable en la unidad de muestra, y la superficie de agregado debe ser suave al tacto.		
BACHES	Los niveles de severidad para baches de menos de 750 mm (30 pulgadas) de diámetro se basan tanto en el diámetro como en la profundidad del bache, según la Tabla X1.1. Si el bache tiene más de 750 mm (30 in) de diámetro, se debe determinar el área en metros cuadrados y dividirla por 0,5 m ² (5,5 ft ²) para encontrar el número equivalente de agujeros. Si la profundidad es de 25 mm (1 in) o menos, los agujeros se consideran de gravedad media. Si la profundidad es de más de 25 mm (1 in), se consideran de gravedad alta.		
CRUCE DE VÍA FÉRREA	El cruce de vías provoca una calidad de viaje de baja gravedad.	El cruce de vías provoca una calidad de viaje de media gravedad.	El cruce de vías provoca una calidad de viaje de alta gravedad.
AHUELLAMIENTO	6 a 13 mm (1/4 a 1/2 in.)	13 a 25 mm (>1/2 a 1 in.)	25 mm (>1 in.)
DESPLAZAMIENTO	El empujón provoca una calidad de conducción de baja gravedad.	El empujón provoca una calidad de conducción de media gravedad.	El empujón provoca una calidad de conducción de alta gravedad.
FISURA PARABOLICA POR DESLIZAMIENTO		Pérdida considerable de agregado grueso, más de 20 por yarda cuadrada (metro cuadrado), o grupos de agregados gruesos faltantes (o ambos).	La superficie es muy rugosa y picada, puede estar completamente eliminada en algunos lugares.
HINCHAMIENTO			
PELADURA POR INTEMPERISMO Y DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS	La superficie del asfalto comienza a mostrar señales de envejecimiento que pueden acelerarse por las condiciones climáticas. La pérdida de la matriz de agregado fino es notoria y puede ir acompañada de un desvanecimiento del color del asfalto. Los bordes de los agregados gruesos comienzan a quedar expuestos (menos de 1 mm o 0,05 pulgadas). El pavimento puede ser relativamente nuevo (de hasta seis meses de antigüedad).	Se observa una pérdida de la matriz de agregado fino y los bordes del agregado grueso han quedado expuestos hasta 1/4 del ancho (del lado más largo) del agregado grueso debido a la pérdida de la matriz de agregado fino	Los bordes del agregado grueso han quedado expuestos a más de 1/4 del ancho (del lado más largo) del agregado grueso. Hay una pérdida considerable de la matriz de agregado fino, lo que conduce a una posible o mínima pérdida de agregado grueso.

Fuente: ASTM, 2024.

El cálculo del PCI se realiza mediante un proceso que traduce los datos de deterioro superficial en un índice cuantitativo de 0 a 100. El primer paso consiste en determinar los valores de deducción (Deduct Values), que reflejan la severidad y extensión de los daños presentes. Para ello, se calcula la densidad del deterioro, que corresponde al porcentaje de daño en relación con el área de la unidad de muestra, mediante la fórmula:

$$Densidad = \left(\frac{Cantidad\ de\ daño}{Área\ de\ la\ unidad\ de\ muestra} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Con este valor se consulta en la curva específica del tipo de deterioro (por ejemplo, un deterioro de tipo de bache) para asignar un valor de deducción correspondiente. Estas curvas están estandarizadas y permiten vincular la extensión del daño con su impacto en el índice. Una vez determinados los valores de deducción, se procede a calcular el número máximo permitido de deducciones relevantes (*m*). Este valor se obtiene utilizando la fórmula:

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right)(100 - HDV) \quad (3)$$

Donde HDV representa el valor de deducción más alto. Si el número total de valores de deducción supera a m , solo se consideran los valores más altos en orden descendente hasta alcanzar ese límite. Por el contrario, si hay menos de m valores, se toman todos. Posteriormente, se pasa a determinar el valor máximo de deducción corregido (Corrected Deduct Value, CDV). Para esto, se identifica cuántos valores de deducción son mayores a 2 (q) y se calcula la suma total de todos los valores de deducción. Con estos datos, se consulta una tabla de corrección que ajusta los valores según la cantidad de deducciones y su suma total. Si hay valores menores a 2, se ajustan a este mínimo y se repite el cálculo. Al final, el mayor valor corregido obtenido se selecciona como el CDV máximo. Finalmente, el PCI se calcula restando el CDV máximo al valor inicial de 100:

$$PCI = 100 - CDV_{\text{máximo}} \quad (4)$$

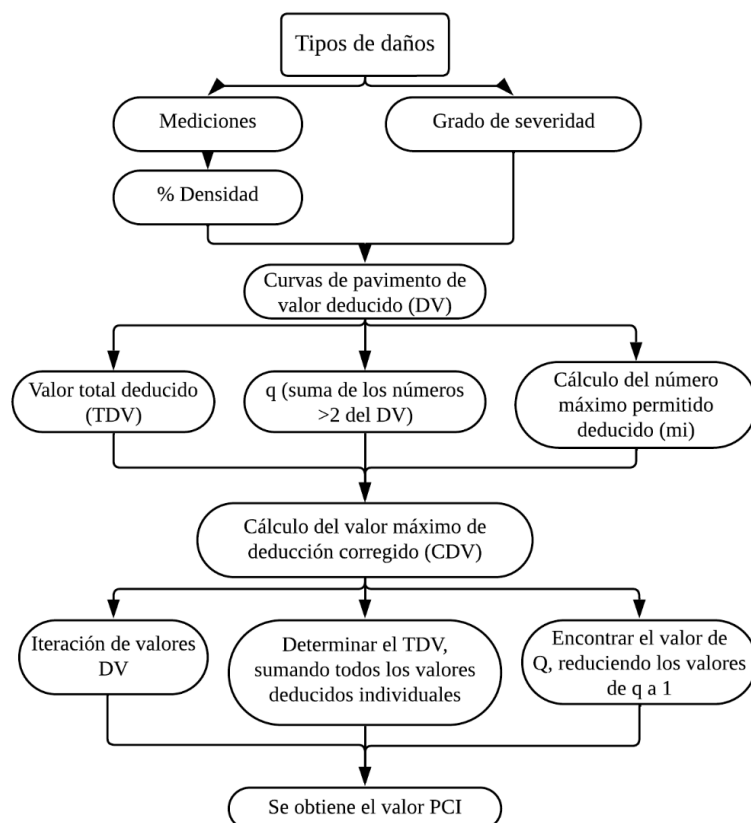
En el contexto de la automatización del cálculo del PCI, la norma ASTM D6433 ha sido implementada en diversos lenguajes de programación para facilitar el procesamiento de grandes volúmenes de datos de inspección de pavimentos. Un enfoque basado en la digitalización del procedimiento describe el cálculo del PCI mediante una ecuación más detallada que contempla explícitamente cada uno de los parámetros involucrados en la determinación del índice [Dynatest, 2022] [Ibragimov et al., 2024]. En este sentido, la ecuación utilizada en la implementación computacional de ASTM D6433 permite calcular automáticamente el PCI de cada unidad de muestra (SU), integrando los valores de deducción, la corrección por severidad y extensión de los daños, así como la ponderación de los deterioros presentes [Loprencipe & Pantuso, 2017].

$$PCI = 100 - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} a[T_i, S_j, D_{ij}] \cdot F(t, d) \quad (5)$$

Donde: a es el valor deducido que depende del tipo de deterioro T_i , el nivel de severidad S_j , y la densidad del deterioro D_{ij} ; i es el contador para cada tipo de deterioro; j es el número de niveles de gravedad en el i -ésimo tipo de deterioro; y $F(t, d)$ un factor de ajuste por dificultades que varía con el valor total deducido t y el número de deducciones d .

Esta ecuación más completa no solo facilita la automatización del proceso, sino que también garantiza la reproducibilidad y exactitud en los resultados obtenidos, reduciendo la influencia de errores humanos en la interpretación de los datos [Loprencipe & Pantuso, 2017]. Dado que en este trabajo se implementará el cálculo del PCI mediante código en Python, esta formulación más detallada permitirá optimizar la evaluación del estado del pavimento y mejorar la eficiencia en el análisis de las unidades de muestra inspeccionadas.

Figura 5 Resumen de la metodología PCI.



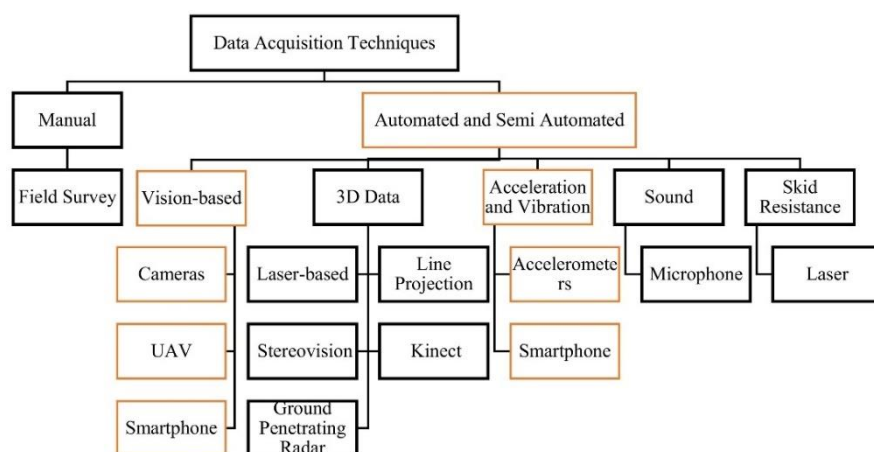
Fuente: Ortega Rengifo et al., 2024.

4.8. Sistemas de adquisición de datos

Para llevar a cabo la recolección de información sobre el estado del pavimento, existen principalmente tres métodos ampliamente empleados: el método manual, el método semiautomático y el método automatizado [Rakshitha, 2022]. En particular, la recopilación automatizada de datos presenta ventajas significativas, ya que involucra el uso de equipos especializados para cuantificar el deterioro superficial del pavimento, al mismo tiempo minimiza el impacto en el flujo de tráfico. Se han desarrollado diversos dispositivos y tecnologías para capturar información detallada sobre el estado de la superficie del pavimento.

Actualmente, existen diversos métodos para extraer información espacial de una escena, destacándose los sistemas de visión basados en cámaras estéreo, que permiten obtener datos tridimensionales con precisión. En los últimos años, estos sistemas han ganado relevancia debido a su simplicidad y facilidad de uso [Sholevar, 2022][Ríos C., 2022]. La **Figura 6** presenta las técnicas de recopilación de datos según las tecnologías aplicadas.

Figura 6 Técnicas de adquisición de datos.

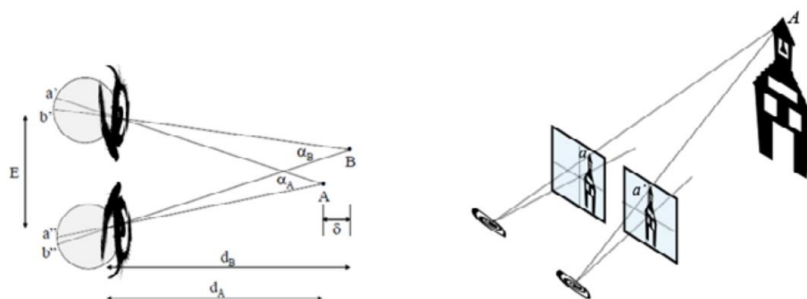


Fuente: Técnicas de aprendizaje automático para la evaluación del estado del pavimento (2022).

4.9. Visión y Cámara estereoscópica

La visión estereoscópica o estereoscopia, es un proceso natural en el cual un observador visualiza simultáneamente dos imágenes de un objeto, cada una tomada desde una posición diferente. Cada ojo procesa una de estas imágenes y el resultado es la percepción de la profundidad o tercera dimensión de la escena observada [Cárdenas et al., 2015]. Por otro lado, la cámara estereoscópica es un dispositivo que utiliza este principio para emular fotográficamente la sensación de profundidad de una imagen, similar a la percepción visual humana de tres dimensiones, logrando así una representación tridimensional.

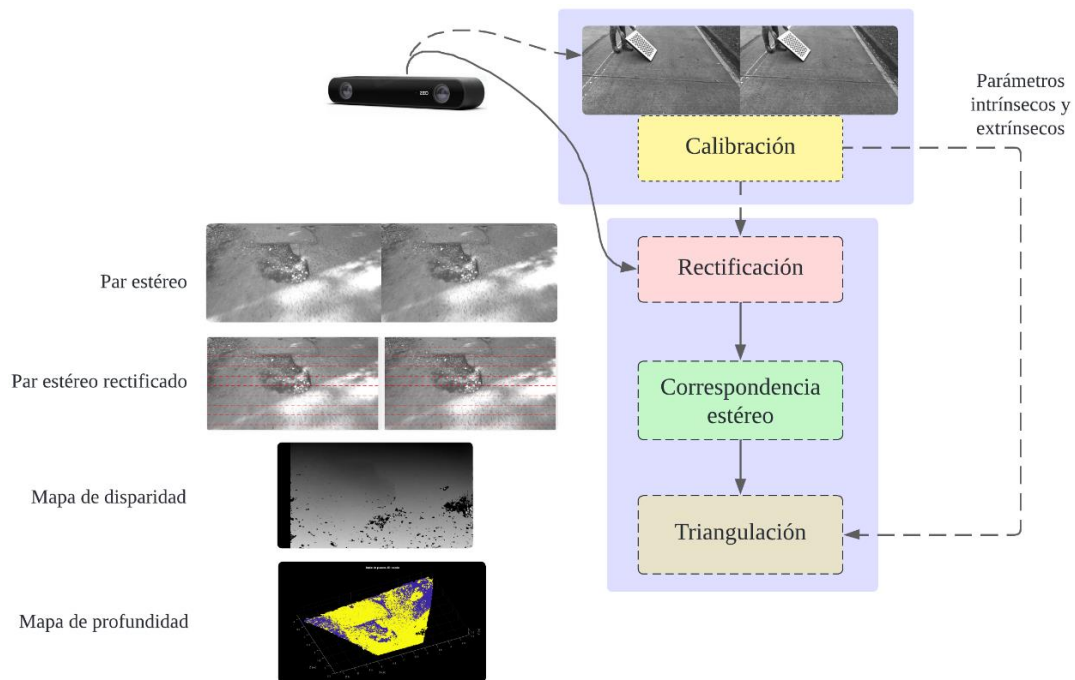
Figura 7 Visión estereoscópica natural y artificial.



Fuente: Recuperado Y adaptado de Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil (2014).

La visión estereoscópica implica resolver dos problemas principales la correspondencia y la reconstrucción 3D [Jiménez et al., 1995]. La correspondencia consiste en identificar, para un punto en el plano imagen de una de las cámaras, el punto correspondiente en el plano imagen de la otra cámara, es decir, determinar qué puntos en ambas imágenes representan el mismo punto físico en la escena [Scharstein & Szeliski, 2002]. Una vez establecida esta correspondencia, la reconstrucción 3D se encarga de calcular coordenadas tridimensionales del punto en el espacio, basándose en los puntos correspondientes en ambas imágenes [Fan et al., 2018]. Este proceso permite obtener una representación tridimensional de la escena observada. El proceso de visión estereoscópica consta de cuatro etapas principales: calibración, rectificación, correspondencia estereoscópica y triangulación [Zou & Li, 2010], como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 8 Procesos de formación de la visión estereoscópica.



Fuente: Adaptado de Bradski & Kaehler, 2008.

Cámara ZED 2i

En este proyecto se utiliza una cámara RGB llamada Zed 2i, el cual es el dispositivo principal captura de información, este se encarga de obtener imágenes del pavimento, equipado con dos cámaras RGB, las cuales están en capacidad de adquirir datos de profundidad para diferentes resoluciones y velocidades de captura del lente.

Tabla 7 Especificaciones generales de la cámara.

Resoluciones	2x(2208x1242)
	2x(1920x1080)
	2x(1280x720)
	2x(662x376)
FPS	15, 30, 60, 100
Sensor RGB	Dual 1/3" 4MP
Campo de visión	Máx. 110°(H)x70°(W)x120°(D)
Rango de profundidad	0.3m a 20m
Precisión profundidad	<1% hasta 3m
	<3% hasta 15m
Línea base	11.98cm
Distancia focal	2.1mm

La cámara Zed 2i se trata de un dispositivo de visión estereoscópica desarrollado por Stereolabs, que opera como una cámara estéreo de alta resolución empleando dos sensores de imagen para la captura de imágenes tridimensionales y la generación de datos de profundidad. Su diseño se inspira en el funcionamiento del sistema visual humano, aprovechando dos sensores y la técnica de triangulación para proporcionar una representación tridimensional precisa de la escena observada. Esto capacita a las aplicaciones que la utilizan para tener un conocimiento consciente del espacio y del movimiento en su entorno [ZED 2i - Industrial AI Stereo Camera, 2023].

Figura 9 Cámara ZED 2i



Fuente: ZED 2i - Industrial AI Stereo Camera. (2023). Stereolabs.com

4.10. Calibración estéreo

La calibración de la cámara es un proceso esencial en la utilización de sistemas de visión estereoscópica. Su importancia radica en la capacidad de afrontar los desafíos resultantes de cambios en el entorno, la posición, la orientación y las separación de las lentes de la cámara [Barranco, 2013]. Estos cambios afectan tanto a los parámetros intrínsecos (como el desplazamiento del centro de la imagen, la distancia focal, los coeficientes de distorsión y el tamaño de cada píxel) como a los parámetros extrínsecos (que incluyen la rotación y traslación), estableciendo relación entre la posición y orientación de la cámara en relación con el sistema global de coordenadas [Alcalde, 2014]. La calibración es esencial para garantizar que las imágenes capturadas por las cámaras se correspondan de manera precisa en términos de escala y orientación, lo que permite una reconstrucción precisa de la escena en tres dimensiones.

Parámetros intrínsecos

Describen las propiedades ópticas de cada lente y su influencia en la formación de la imagen.

- **Matriz intrínseca (k):** Contiene la información de la distancia focal y la posición del centro óptico en la imagen.
- **Distancia focal (f_x, f_y):** Representa en valores de píxel, es la distancia desde la lente hasta el foco principal, es un valor crucial que define la capacidad de la cámara para enfocar objetos en función de su distancia.
- **Centro óptico (C_x, C_y):** Ubicación del punto principal de la imagen en el sensor.
- **Coefficientes de distorsión:** Características inherentes de las lentes que si no se corrigen afectan la precisión y fidelidad de las imágenes capturadas.

La matriz intrínseca k tiene la siguiente forma, donde s es el factor de inclinación (generalmente cero si los píxeles no están inclinados entre sí).

$$k = \begin{bmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Parámetros extrínsecos

Definen la posición y orientación de la cámara en relación con un sistema de referencia global, permitiendo transformar coordenadas del mundo real en coordenadas de imagen.

- **Matriz de rotación (R):** Describe la orientación relativa entre las dos cámaras del sistema estéreo.
- **Vector de traslación (T):** Indica la posición relativa de una cámara respecto a la otra. En este caso, la posición de la cámara derecha respecto a la cámara izquierda.
- **Línea base:** Indica la distancia física entre los centros ópticos de las dos lentes de la cámara estéreo.

Distorsión óptica

Las imágenes capturadas pueden ser afectadas por dos tipos principales de distorsión: Radial y Tangencial. La distorsión radial se manifiesta cuando las líneas rectas situadas lejos del centro óptico aparecen curvas o deformadas [Distorsión, 2023]. Existen dos tipos de distorsión radial. La distorsión de barril ocurre cuando las líneas rectas parecen abombarse hacia afuera desde el centro de la imagen, asociado a coeficientes negativos. En contraste, la distorsión de cojín provoca que las líneas se curven hacia adentro, hacia el centro de la imagen, y se relaciona con coeficientes positivos [Mathworks, 2025].

Por otro lado, la distorsión tangencial ocurre cuando la lente no está alineada con el plano de la cámara, causando un desplazamiento en la posición de los puntos de la imagen. Valores cercanos a cero indican una alineación adecuada, mientras que valores más altos reflejan una mayor desalineación. Para describir matemáticamente la distorsión óptica de una cámara, se utilizan cinco coeficientes que suelen representarse como un vector de distorsión, expresado de la siguiente manera:

$$DistCoeffs = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] \quad (7)$$

Donde k_i corresponde a los coeficientes de distorsión radial y p_i corresponde a los coeficientes de distorsión tangencial. El valor k_1 tiene el mayor impacto en la corrección de la distorsión de barril o cojín, k_2 ajusta la distorsión en regiones más alejadas del centro y k_3 se usa para correcciones más precisas para lentes de gran angular. Los coeficientes p_1 y p_2 modelan el desplazamiento en la dirección horizontal y vertical respectivamente, de los puntos en la imagen debido a la desalineación de la lente respecto al sensor.

Figura 10 Ejemplo Distorsión Radial.

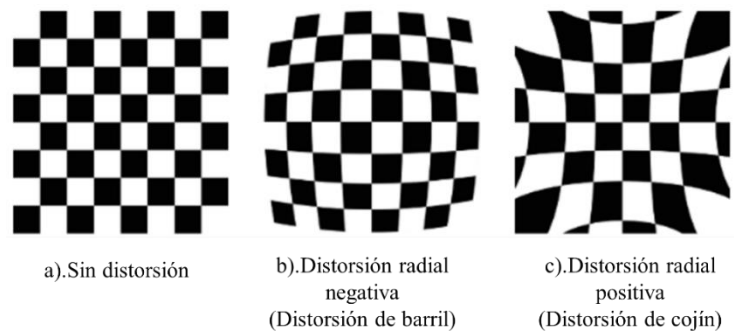
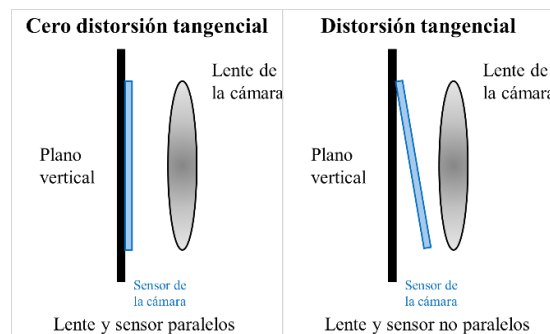


Figura 11 Ejemplo distorsión Tangencial.



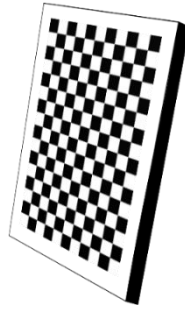
Fuente: Adaptado de Mathworks, 2025.

Patrón de calibración

La calibración de una cámara se basa en el uso de un patrón de referencia con puntos de control cuyas coordenadas en el espacio son conocidas. Al capturar una imagen, la proyección perspectiva transforma estas coordenadas tridimensionales en un sistema 2D, permitiendo su identificación

mediante visión artificial. A partir de estos datos, se calculan los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara utilizando ecuaciones de colinealidad [Hernandez, 2011]. Un algoritmo de extracción de características localiza los puntos en la imagen y establece la correspondencia entre las coordenadas del mundo (x, y, z) y las coordenadas de la imagen (x, y), asegurando una correcta calibración del sistema óptico.

Figura 12 Patrón de calibración estéreo.

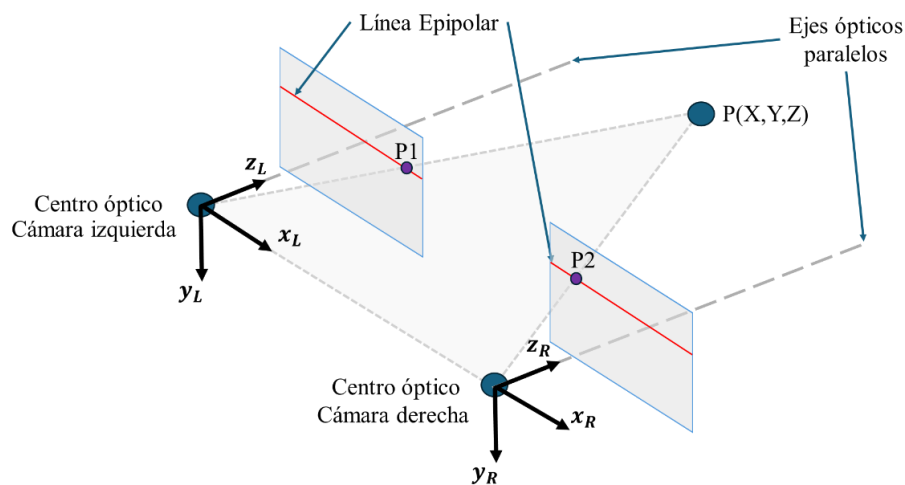


4.11. Rectificación estereoscópica

La rectificación estereoscópica tiene como objetivo alinear los pares de imágenes capturadas desde diferentes perspectivas de una misma escena, facilitando la identificación de puntos característicos coincidentes en ambas vistas. Este proceso corrige las distorsiones de la lente al transformar las imágenes a un sistema de coordenadas estándar, lo que permite un análisis más preciso de la correspondencia estéreo. Puede dividirse en dos tipos: rectificación en cámaras calibradas [Su & He, 2010] y rectificación en imágenes obtenidas de cámaras no calibradas [Kumar et al., 2010].

En un sistema de visión estéreo calibrado, los centros ópticos de ambas cámaras y un punto del mundo $P(X,Y,Z)$ conforman el plano epipolar. La intersección entre este plano y el plano de imagen de cada cámara se denomina línea epipolar (**Figura 13**). Cuando se utiliza una configuración estéreo paralela, las líneas epipolares permanecen alineadas en la misma altura y los ejes ópticos de ambas cámaras se mantienen paralelos. Esto permite que la búsqueda de correspondencia entre puntos en las imágenes se realice exclusivamente a lo largo de la dirección horizontal, lo que simplifica significativamente el proceso de correspondencia [Su & He, 2010].

Figura 13 Configuración del sistema de visión estereoscópica de tipo paralelo.



Fuente: Adaptado de Bautista & Granados, 2015.

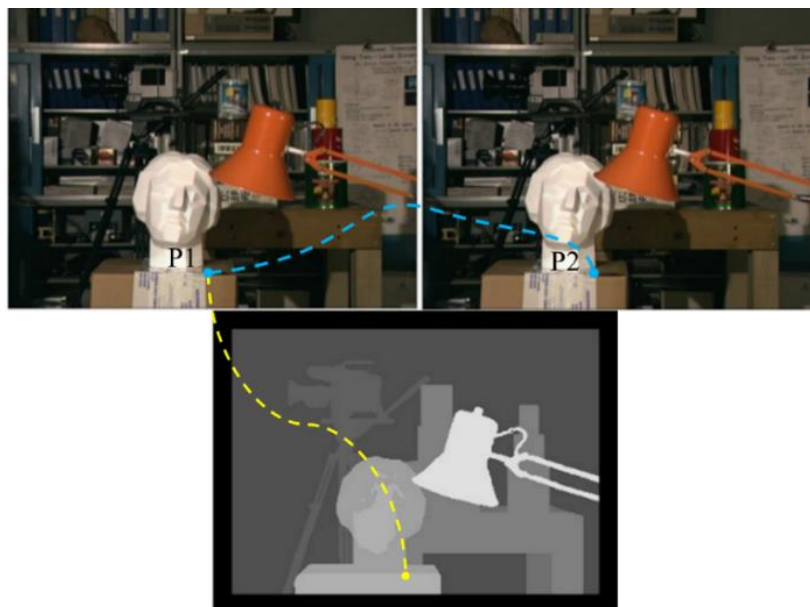
4.12. Correspondencia estéreo

La correspondencia estéreo intenta encontrar puntos homólogos en dos imágenes de la misma escena capturadas desde diferentes posiciones por un sistema de cámaras estéreo. Por ejemplo, dado un punto P1 en la imagen izquierda, habrá un punto P2 correspondiente en la imagen derecha (**Figura 13**). La diferencia de posición entre estos puntos en ambas imágenes se denomina disparidad, representada matemáticamente como:

$$disp = P_1 - P_2 \quad (8)$$

Donde *dis* es la disparidad y determina la profundidad del punto en la escena [Muhammad et al., 2022]. Cuando una escena tridimensional se proyecta en imágenes bidimensionales, diversos factores influyen en la apariencia de los objetos, como la iluminación, la forma geométrica, el ruido, la distorsión óptica y las propiedades de la cámara. Estos factores pueden afectar la precisión en la estimación de la correspondencia estéreo y, por lo tanto, en la generación del mapa de disparidad, que representa las diferencias de profundidad en la escena mediante un único valor de gris en la imagen 2D [Zou & Li, 2010]. Existen dos enfoques principales para la correspondencia estéreo. El primero son los métodos basados en área, que comparan regiones de las imágenes mediante técnicas de coincidencia de bloques. El segundo son los métodos basados en características, los cuales identifican puntos clave en ambas imágenes y establecen correspondencias mediante descriptores robustos [Hernandez, 2011].

Figura 14 Correspondencia estéreo y generación del mapa de disparidad.

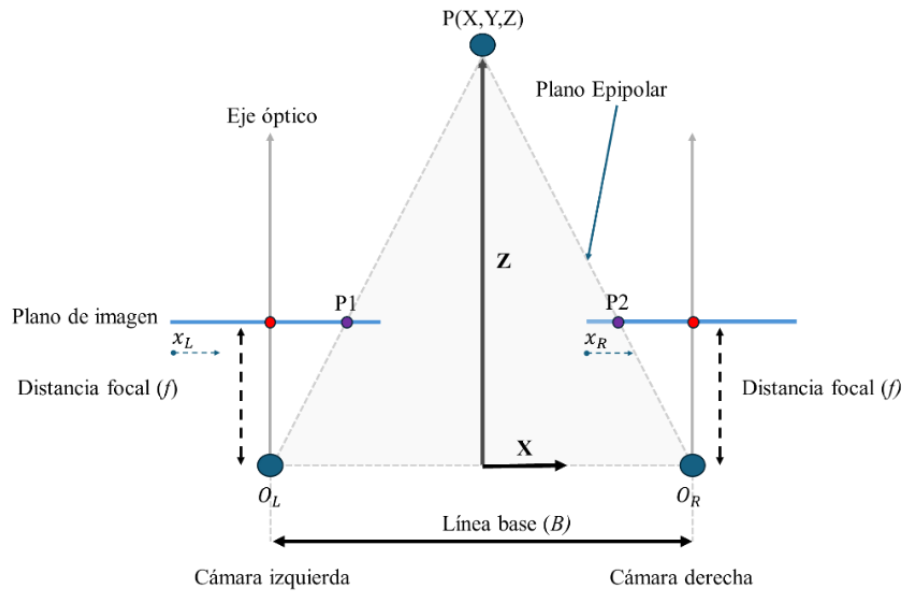


Fuente: Peris Martorell, 2012.

4.13. Triangulación

La visión estereoscópica permite recuperar la información tridimensional de un objeto a partir de la disparidad y la triangulación. La triangulación consiste en calcular las coordenadas de un punto en el espacio tridimensional, determinando su distancia a partir del ángulo formado con dos puntos de referencia cuya posición y separación son conocidas.

Figura 15 Representación de la proyección estéreo desde una perspectiva superior.



Fuente: Adaptado de Bautista & Granados, 2015.

El cálculo de la distancia de un objeto a la cámara estéreo se basa en la geometría estereoscópica y se desarrolla a partir de las tres etapas previas del proceso. Como se ilustra en la **Figura 15**, se forman dos triángulos principales P, O_L, O_R y $P, P1, P2$ lo que permite establecer la siguiente relación [Lecumberry, 2005][Peris Martorell, 2012] [Hernandez, 2011] [Muhammad et al., 2022][Luo et al., 2024].

$$Z = \frac{B \cdot f}{dis} \quad (9)$$

Donde:

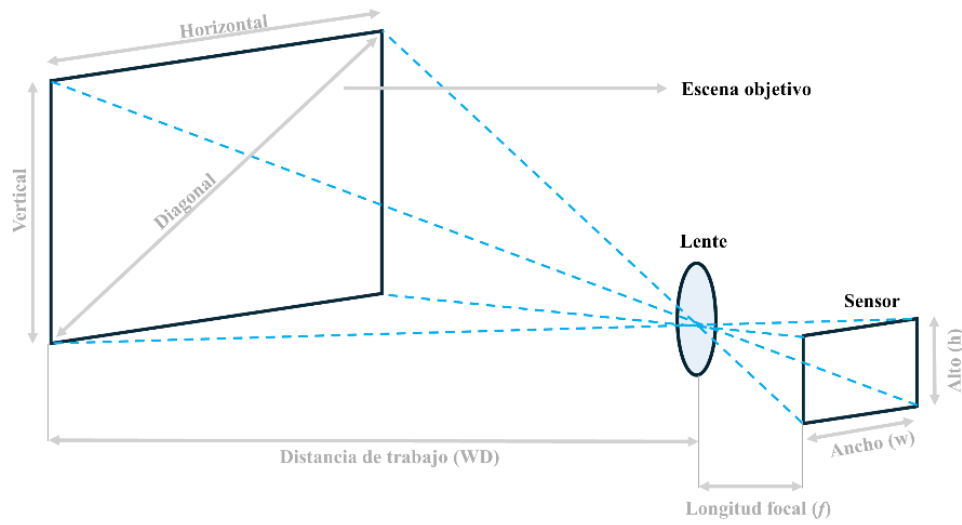
- B es la línea base, es decir, la distancia entre los centros ópticos de las cámaras (px).
- Z representa la distancia del objeto a la cámara (m).
- f es la distancia focal de la cámara (mm).
- dis es la disparidad del punto en píxeles (px).

Esta ecuación permite calcular la profundidad de un objeto en la escena a partir de la diferencia de posición entre sus proyecciones en las imágenes capturadas por la cámara estéreo.

4.14. Campo de visión FOV

El campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés) se refiere al área del mundo real que puede capturarse mediante la lente de la cámara y proyectarse sobre su sensor. Representa las dimensiones reales de la escena observable a través del sistema óptico de la cámara. Por otro lado, la distancia de trabajo (WD, por sus siglas en inglés) es la separación entre el objeto y la lente en la que la imagen alcanza su punto de enfoque más nítido. Este valor representa la distancia exacta entre el extremo de la lente y el plano óptico de enfoque, donde debe ubicarse el objeto a inspeccionar [Martinolich, M., 2015].

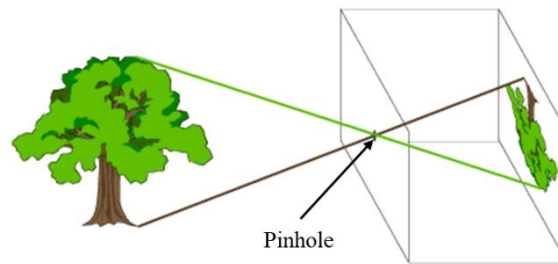
Figura 16 Campo de visión de una lente de cámara.



Fuente: Rahul Awati, 2022.

El campo de visión se expresa también con frecuencia como el tamaño angular del cono de visión, como un ángulo de visión. Este ángulo de visión es función de la distancia focal de la lente y el tamaño del sensor de la cámara. Para entenderlo de manera gráfica, se puede modelar utilizando el principio de la cámara estenopeica. Los rayos de luz emitidos por un objeto iluminado atraviesan un pequeño orificio (pinhole) para proyectar puntos en el sensor, generando una imagen nítida [Aconcha, 2024].

Figura 17 Modelo de la cámara estenopeica.



Fuente: Narmin Murshudova, 2023.

Figura 18 Modelo geométrico del ángulo de visión.

El ángulo de visión $FOV/2$ corresponde al ángulo formado entre el eje óptico de la lente y el rayo que conecta el centro óptico de la lente con el borde de la escena visible. Este ángulo delimita el mayor objeto que puede ser capturado en la escena. La relación matemática para calcular el campo de visión se deriva utilizando trigonometría básica, donde d es la mitad de la dimensión del sensor en la dirección considerada y f la distancia focal.

$$\tan \frac{FOV}{2} = \frac{d}{f} \quad (10)$$

Para un enfoque al infinito, donde la distancia entre el objeto y la cámara es suficientemente grande, el FOV se calcula como:

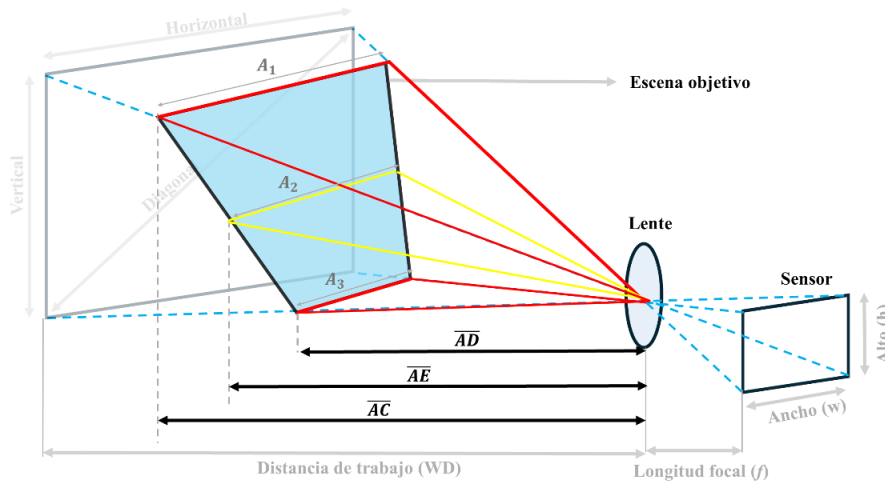
$$FOV = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\text{Tamaño del sensor}}{2 \cdot f} \right) \quad (11)$$

Donde el tamaño del sensor puede tomar el valor del ancho w o la altura h , dependiendo del tipo de campo de visión que se desee calcular, ya sea horizontal (FOV_x) o vertical (FOV_y). Además, la combinación de los campos de visión horizontal y vertical permite obtener el campo de visión diagonal ($DFOV$) que representa el ángulo máximo de cobertura de la cámara.

$$DFOV = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{2 \cdot f}\right) \quad (12)$$

En el caso de cámaras con inclinación, la geometría del campo de visión no cambia, ya que el cálculo del ángulo de visión se sigue realizando de la misma manera. Sin embargo, la inclinación de la cámara modifica la proyección del campo de visión sobre el pavimento, afectando el área de cobertura de la imagen. El nuevo modelo geométrico del campo de visión, representado en la **Figura 19**, muestra como esta inclinación altera la proyección, incorporando las distancias de trabajo en la escena y los anchos reales proyectados sobre la superficie. Esto permite una representación precisa del área de cubierta por la cámara.

Figura 19 Proyección del campo de visión en un plano inclinado.

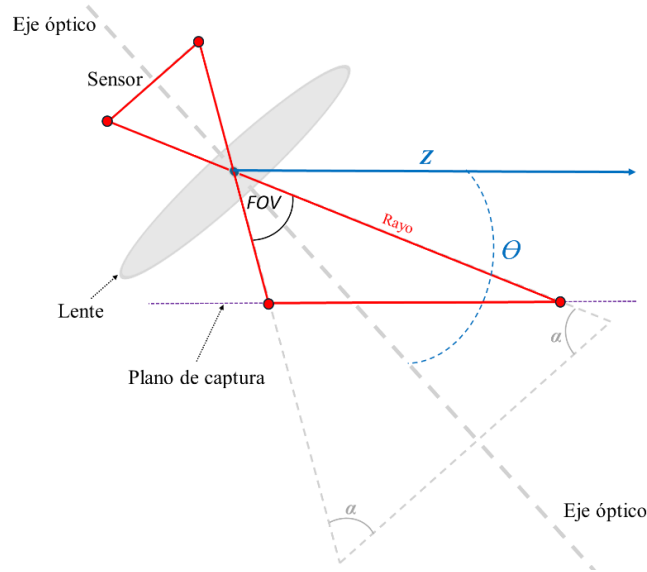


4.15. Área de cobertura de la cámara

El campo de visión de la cámara se define como la región observable en una dirección específica, y su proyección sobre una superficie paralela al sensor forma un triángulo. Este triángulo se considera isósceles, ya que los rayos de luz que delimitan el campo de visión emergen desde el centro óptico de la cámara, formando ángulos simétricos respecto al eje óptico principal, como se muestra en la **Figura 18**. A continuación, la **Figura 20** presenta el modelo geométrico del ángulo de visión inclinado, ilustrando cómo la inclinación de la cámara afecta la proyección de la región observable sobre la superficie.

Para determinar el área de cobertura proyectada, se parte del modelo geométrico descrito en la **Figura 20**, que muestra el campo de visión vertical, similar al modelo de la **Figura 18** (que representa el FOV), pero con una inclinación θ respecto a un plano paralelo al plano de captura. En la **Figura 19**, se presenta una vista 3D de la proyección del campo de visión en un plano inclinado, lo que ilustra cómo se modifica el área de cobertura con la inclinación de la cámara. A partir de la **Figura 20**, que ofrece una vista 2D del modelo geométrico del ángulo de visión inclinado, se puede observar cómo la inclinación afecta la proyección y, por lo tanto, el área de cobertura en el pavimento. Con esta representación se procede a calcular el área cubierta, considerando la geometría de la cámara y la inclinación del eje óptico respecto a un eje paralelo al plano de captura.

Figura 20 Modelo geométrico del ángulo de visión inclinado θ° .



El ángulo α , correspondiente al campo de visión, se obtiene utilizando la relación de los ángulos internos de un triángulo. Dado que el triángulo es isósceles, α se calcula como:

$$\alpha = \frac{180^\circ - FOV_y}{2} \quad (13)$$

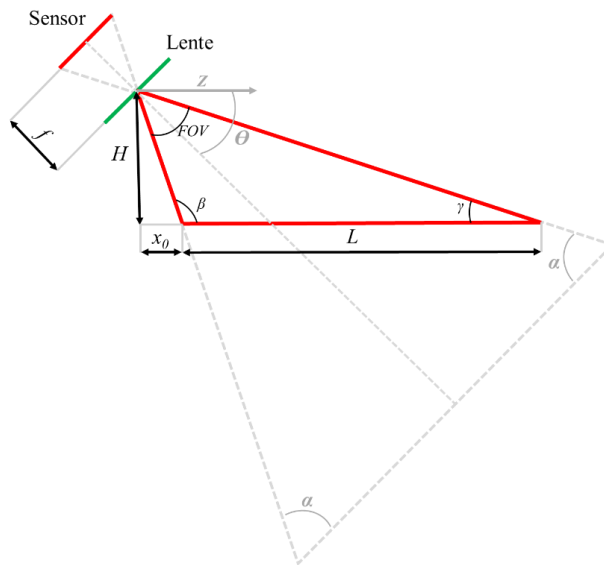
Una vez conocido α , se determina el ángulo γ mediante la expresión:

$$\gamma = \alpha - \theta \quad (14)$$

Finalmente, el ángulo β se calcula considerando que la suma de los ángulos internos de cualquier triángulo es 180° , lo que resulta en:

$$\beta = 180^\circ - FOV_y - \gamma \quad (15)$$

Figura 21 Geometría del campo de Visión vertical.



Una vez se determinan los ángulos del triángulo que representa el campo de visión proyectado en el plano de captura, se calculan las dimensiones x_0 y L . Estas corresponden, respectivamente, a la distancia desde la base del triángulo al punto más cercano de la proyección y a la longitud total cubierta

por la cámara a lo largo de la vía. Para calcular x_0 , se aplica el concepto de trigonometría y el principio de la tangente en un triángulo rectángulo, donde:

$$x_0 = H \cdot \tan(\sigma) \quad (16)$$

Aquí σ es el ángulo complementario definido como:

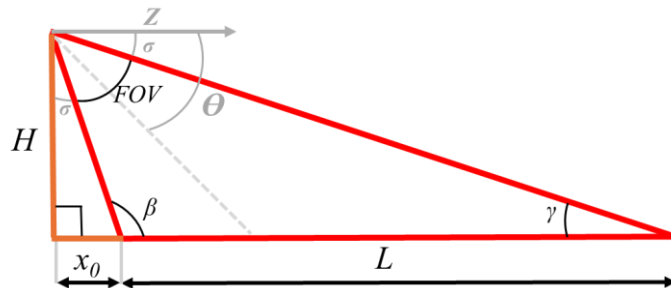
$$\sigma = \theta - \frac{FOV_y}{2} \quad (17)$$

Por otro lado, la longitud total cubierta por la cámara L se determina como:

$$L = H \cdot \tan(\sigma + FOV_y) - x_0 \quad (18)$$

En este caso la ecuación utiliza la proyección adicional generada por el ángulo complementario del campo de visión ($\sigma + FOV_y$) y resta x_0 para obtener únicamente la longitud efectiva cubierta por la cámara.

Figura 22 Esquema Geométrico de la Proyección del Campo de Visión y la Longitud Efectiva Cubierta.



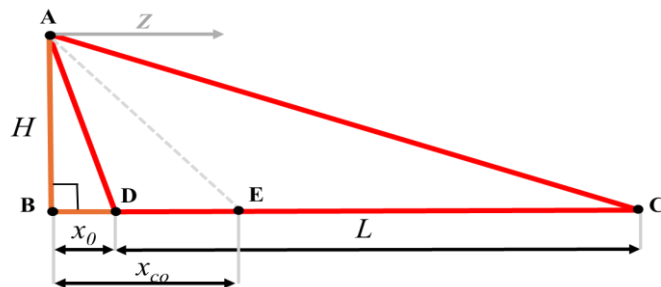
Para determinar el ancho de cobertura de la cámara, se emplean principios geométricos y trigonométricos basados en la posición y configuración de la cámara respecto al plano de captura. Dada la inclinación de la cámara y su distancia al plano, el ancho de la escena capturada varía a lo largo de la proyección del campo de visión.

En el análisis se identifican tres puntos clave:

- **D:** El inicio de la proyección del campo de visión.
- **E:** La intersección del eje óptico con el plano de captura.
- **C:** El punto final de la longitud cubierta.

Para determinar la posición horizontal del punto E, se utiliza el ángulo $(\sigma + FOV/2)$ junto con la altura H , lo que permite calcular la distancia horizontal x_{co} que define la proyección del eje óptico de visión.

Figura 23 Esquema Geométrico de la Proyección del Campo de Visión y Cálculo del Ancho de Cobertura.



Se calculan las distancias diagonales desde la cámara hasta cada uno de estos puntos clave (D, E y C) utilizando el teorema de Pitágoras obteniendo los segmentos $\overline{AD}$, $\overline{AE}$ y $\overline{AC}$. Estas distancias permiten establecer la relación entre el campo de visión y el área cubierta, lo que es fundamental para convertir las medidas del sensor (en píxeles) en dimensiones reales sobre el plano capturado, según el modelo geométrico del ángulo de visión descrito previamente (ver **Figura 18**). Para determinar el ancho real de la escena, se considera el campo de visión horizontal FOV_x que depende de la distancia focal de la lente, el tamaño horizontal del sensor w y la distancia de trabajo WD . Según la relación de triángulos semejantes en el modelo de la cámara, la ecuación (11) del campo de visión, puede adaptarse como:

$$FOV = 2 \cdot \arctan \left(\frac{D}{2 \cdot WD} \right) \quad (19)$$

Al considerar la proyección en el plano de captura, el tamaño del sensor se reemplaza por la dimensión real en la escena D y la distancia focal f por la distancia de trabajo WD . Esto permite despejar D , obteniendo el ancho real de la escena para cada punto del análisis mediante la ecuación:

$$D = 2 \cdot WD \cdot \tan \left(\frac{FOV_x}{2} \right) \quad (20)$$

4.16. Conversión de píxeles a medida Real

En el proceso de medición de daños en el pavimento a partir de imágenes estereoscópicas, es fundamental convertir las dimensiones obtenidas en píxeles a unidades del mundo real, como metros o milímetros. Para ello, se emplea una fórmula basada en la geometría del modelo geométrico del ángulo de visión, ver **Figura 18**, que permite obtener las dimensiones reales de los objetos representados en las imágenes a partir de la disparidad entre los puntos correspondientes en las imágenes izquierda y derecha. La conversión de la medida en píxeles a unidades reales se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{d \cdot WD}{f} \quad (21)$$

Donde:

- D es la medida real del daño en milímetros o metros.
- d es la medida del daño en píxeles, medido en la imagen.
- WD equivale a Z , es decir la distancia entre el daño y la cámara, medida en milímetros o metros.
- f es la distancia focal de la cámara en píxeles.

4.17. Resolución espacial GSD

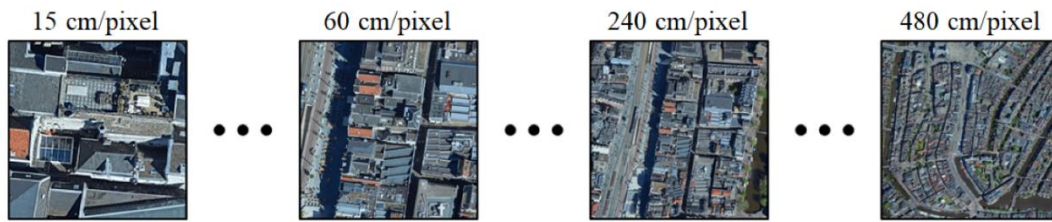
La resolución espacial, también conocida Ground Sampling Distance (GSD), define el tamaño de cada píxel sobre la superficie terrestre. Es un parámetro fundamental para evaluar la capacidad de un sistema de adquisición de imágenes para identificar detalles en el suelo. A mayor valor de GSD, menor será la resolución espacial de la imagen. Este valor está influenciado por varios factores, como el tamaño del sensor, la resolución de la imagen, la distancia focal y la distancia entre la cámara y el objeto de interés [R. Vacas et al., 2022]. Se puede determinar el valor de GSD empleando la siguiente fórmula:

$$GSD = \frac{\text{Área de cobertura}}{\text{Número total de píxeles}} \quad (22)$$

El GSD es particularmente relevante en la fotogrametría terrestre, donde se utiliza para determinar la precisión de la reconstrucción tridimensional de objetos y superficies a partir de imágenes. Una estimación correcta del GSD es fundamental para generar modelos digitales de terreno (DTM) precisos. Se ha demostrado que una mayor resolución espacial (es decir, un menor GSD) mejora la

calidad de los productos fotogramétricos, como los modelos 3D y las ortofotos, lo que a su vez optimiza la precisión de las mediciones en el terreno [Jiménez-Jiménez et al., 2021].

Figura 24 Ejemplo variación del valor de GSD.



Fuente: Lee & Sull, 2019.

4.18. Índice de nitidez

El índice de nitidez se determina como una medida cuantitativa de la claridad o nitidez de una imagen. En el contexto del procesamiento de imágenes, la nitidez se refiere a la capacidad de una imagen para representar con precisión los detalles y los bordes de los objetos presentes en ella. La fórmula general para calcular el índice de nitidez se puede expresar como:

$$NI = \sum_{i=1}^n (\text{Gradiente}(i))^2 \quad (23)$$

Donde:

NI es el valor resultante que representa la nitidez de la imagen, **n** es el número total de píxeles en la imagen y **Gradiente(i)** es el valor del gradiente en el píxel **i**.

La magnitud del gradiente de un píxel indica la variación de intensidad en las direcciones de los ejes *x* e *y*, reflejando qué tan rápido cambia la imagen en esas direcciones. Además, la dirección del gradiente señala hacia donde ocurre el cambio más rápido [Jacobs, D.,2005]. Este concepto es fundamental para resaltar características importantes en las imágenes y es empleado en diversos algoritmos de detección, como los que identifican esquinas de bordes. De acuerdo con [Vázquez, 2014], para la evaluación de la nitidez se puede emplear una variación del gradiente basada en la suma de los cuadrados de este. Este enfoque fue seleccionado porque, al utilizar la potencia, se logra una mayor diferenciación entre imágenes con distintos niveles de enfoque. El uso de esta fórmula permite acentuar las diferencias de intensidad, haciendo más evidente la variación entre áreas con mayor a menor claridad. Después de calcular el gradiente para cada píxel en la imagen, se eleva al cuadrado para enfatizar las diferencias de intensidad y para evitar que los valores negativos afecten negativamente al índice de nitidez. Luego, se suman todos los cuadrados de los valores de gradiente en toda la imagen para obtener el índice de nitidez final. Este índice proporciona una medida cuantitativa de la claridad de la imagen. Imágenes con bordes y detalles más nítidos tendrán valores de índice de nitidez más altos, mientras que las imágenes borrosas o poco claras tendrán valores más bajos.

4.19. Modulo GPS

EL módulo GPS se emplea en la adquisición de datos GPS, está conformado por un microcontrolador Raspberry PI Zero para analizar los datos GPS transmitidos desde una antena GPS. Esta información incluye datos como la latitud, longitud, altitud, fecha y hora. La comunicación en serie se establece entre la placa Raspberry PI y la antena GPS, utilizando bibliotecas de software como softwareSerial y TinyGPS++. Las coordenadas geoespaciales se capturan en el sistema Universal Transverse Mercator (UTM) y se guardan en una tarjeta microSD a intervalos de un segundo. Además, la Raspberry Pi Zero adquiere la hora actual de Internet a través de Wi-Fi, lo que garantiza marcas de tiempo precisas para los datos recopilados. Esta hora sincronizada se almacena junto con los datos GPS, asegurando una correlación precisa entre la posición y el tiempo de cada captura

El sistema de posicionamiento global (GPS) es una red de satélites y dispositivos receptores que se utilizan para determinar la ubicación de algo en la Tierra [National Geographic, 2022]. El módulo GPS utiliza tecnología GPS para recibir información de posicionamiento mediante la recepción de señales satelitales, las cuales son transmitidas a través del puerto serie, permitiendo así obtener datos de ubicación en tiempo real. Este módulo se compone de una antena GPS y una Raspberry Pi Zero.

Figura 25 Antena GPS y Raspberry Pi Zero.



Tabla 8 Especificaciones de la antena GPS.

Tipo de antena	Cerámica de alta sensibilidad de 25x25x4mm
Frecuencia	L1- 1575.42 MHz
Posición horizontal de precisión	Autónoma <2.5m de media
Sistema de coordenadas de referencia	WGS-84
Frecuencia de actualización de posicionamiento	De 1 a 10 Hz

El Raspberry PI Zero es un microprocesador de bajo costo y de talla pequeña, compuesto por una placa base, que está en la capacidad de soportar diferentes componentes de un ordenador [Raspberry Pi, 2019]. Al ser un pequeño computador permite explorar la programación en lenguajes como Python con una amplia variedad de aplicaciones. Su versatilidad lo convierten en una buena opción para controlar y procesar los datos de captura de información de ubicación.

4.20. Fórmula del determinante para el cálculo del Volumen.

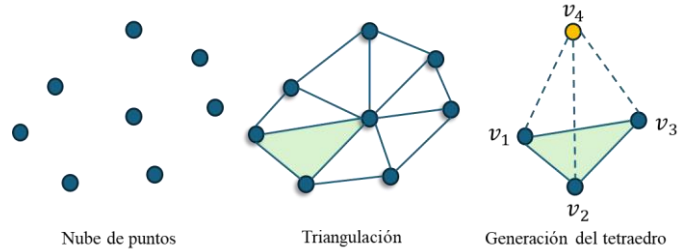
El cálculo del volumen de una superficie a partir de una nube de puntos se basa en la triangulación de Delaunay, un proceso utilizado en geometría computacional para dividir un conjunto de puntos en un plano en una serie de triángulos. Este método garantiza que ningún punto del conjunto se encuentre dentro del círculo circunscrito de cualquier triángulo formado. La triangulación de Delaunay es una técnica eficiente para generar redes de triángulos no solapados, lo cual resulta esencial en diversas aplicaciones, como la creación de mallas para modelado 3D y el cálculo de volúmenes [Ito, 2015]

Cada triángulo generado por la triangulación define una región básica de la superficie, la cual se utiliza como base para formar tetraedros en el espacio tridimensional. Este proceso consiste en conectar cada triángulo con un cuarto punto adicional de la nube, formando así un tetraedro cerrado. En el caso de superficies 3D cerradas, los triángulos de la parte superior se enlazan sistemáticamente con puntos en la base, permitiendo generar una malla de tetraedros que cubre el volumen total del objeto. Este enfoque es similar al utilizado en estudios como los de [Liu & Zheng, 2021], donde se emplea la triangulación de Delaunay para construir estructuras poliedrales a partir de nubes de puntos y así estimar volúmenes con alta precisión y eficiencia. El volumen de cada tetraedro se determina mediante el cálculo del determinante de una matriz compuesta por las coordenadas de sus cuatro vértices [Muirhead, RF 1921], utilizando la siguiente fórmula geométrica:

$$V_i = \frac{1}{6} |det([v_2 - v_1, v_3 - v_1, v_4 - v_1])| \quad (24)$$

Donde v_1, v_2, v_3 y v_4 son los vértices del tetraedro, y la matriz representa las diferencia de las coordenadas de los vértices respecto al vértice de referencia v_1 . Este método permite calcular el volumen de cada tetraedro de manera eficiente [Skala, 2006].

Figura 26 Generación de malla y tetraedros a partir de una nube de puntos.



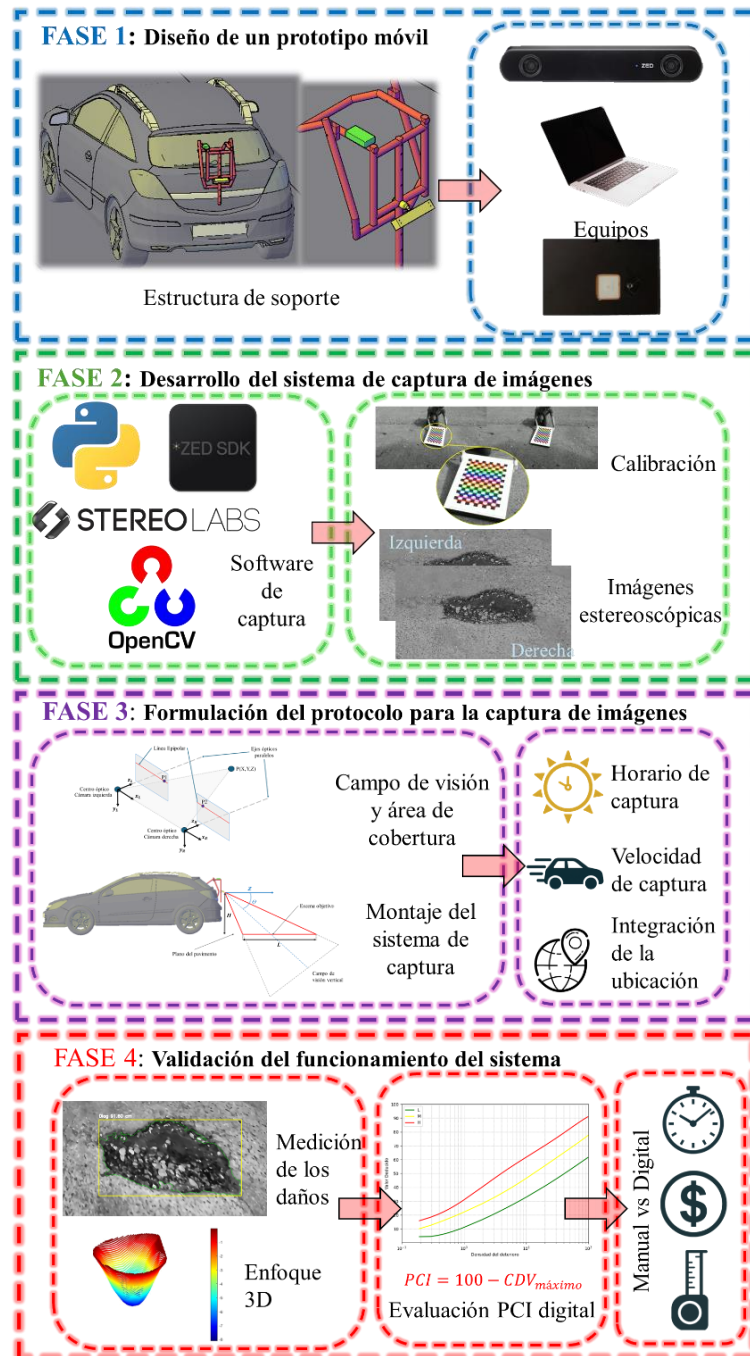
Este procedimiento se aplica iterativamente a todos los tetraedros generados a partir de la triangulación de Delaunay sobre la nube de puntos. Al sumar los volúmenes individuales de estos tetraedros, se obtiene una estimación precisa del volumen total del objeto tridimensional representado por la nube [Srinivasan, 2010] [Skala, 2006]. Donde, V_{total} es el volumen total del objeto tridimensional representado por la nube de puntos y V_i es el volumen de cada tetraedro calculado individualmente.

$$V_{total} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (25)$$

5. METODOLOGÍA

Este capítulo describe el enfoque metodológico que desarrolla el sistema semiautomático de captura de imágenes del pavimento, utilizando un prototipo adaptable a vehículos convencionales. Siendo el objetivo establecer un protocolo eficiente para recolectar datos precisos del estado del pavimento, integrando una cámara ZED 2i y un sistema de posicionamiento GPS. A través de técnicas de procesamiento de imágenes se busca medir y validar los daños presentes en el pavimento, contribuyendo a una gestión más efectiva de las infraestructuras viales. El proceso se estructura en cuatro fases que guían el desarrollo y la validación del sistema propuesto.

Figura 27 Esquema de las Fases de desarrollo.



5.1.FASE 1: DISEÑO DE UN PROTOTIPO MÓVIL

La consideración principal del uso del prototipo radica en demostrar la viabilidad de implementar este proyecto en cualquier automóvil convencional. Con el montaje propuesto, busca evidenciar que la recolección de datos de la superficie del pavimento puede llevarse a cabo de manera efectiva utilizando vehículos automóviles de uso cotidiano. Además, optar por un vehículo en lugar de dispositivos UAV evita la obstrucción visual provocada por elementos como árboles, puentes y la densidad del tráfico vehicular, los cuales podrían afectar la captura de datos desde una perspectiva aérea, como se menciona en [Anvo et al., 2023].

Decidir ubicar la estructura en la parte trasera se fundamenta en consideraciones prácticas y funcionales. Este enfoque ha sido adoptado por proyectos similares, entre ellos, los abordados por [Guan et al. 2021] y [Díaz et al. 2013]. Colocar la estructura en la parte trasera conlleva diversas ventajas: proporciona una cobertura visual óptima de la superficie de la carretera, reduce la interferencia visual con el conductor y añade una capa adicional de protección contra posibles daños causados por objetos lanzados hacia la parte frontal del vehículo. También simplifica el proceso de instalación. En comparación con ubicaciones más complejas, como el techo o la parte delantera, montar la cámara en la parte trasera resulta más accesible y práctico.

5.1.1. Elementos del prototipo

El prototipo de captura se compone principalmente de la estructura de soporte, la cual es diseñada para albergar tanto el módulo GPS como la cámara Zed 2i y las conexiones específicas para facilitar la comunicación, soporte y alimentación de estos elementos. Además, dentro del vehículo que alberga el prototipo se requiere de la presencia de un computador portátil. Este computador se encarga de controlar la cámara y almacenar las imágenes capturadas durante el recorrido. El computador portátil utilizado para esta labor es un ASUS Vivobook Pro-15, que cuenta con una tarjeta gráfica capaz de soportar el SDK de Zed. Las especificaciones técnicas de este equipo se presentan a continuación.

Tabla 9 Especificaciones generales del computador portátil.

Componente	Especificación
Procesador	Core™ i7-11370H
Memoria RAM	16 GB
Almacenamiento	SSD 512 GB
Tarjeta Gráfica	GeForce RTX™ 3050
Sistema operativo	Windows 11

5.1.2. Diseño del prototipo

Para asegurar una estructura de soporte versátil, liviana, firme, de fácil instalación y económica, se opta por utilizar un soporte de bicicleta o portabicicletas con una capacidad de carga aproximada de 80kgs, reacondicionado según los requisitos específicos de los elementos del prototipo. Para visualizar esta elección se realiza una modelación 3D previa que incluye la estructura de soporte, el vehículo tipo, la cámara, el módulo GPS y el soporte de la cámara. Esto empleando el apartado de diseño en tres dimensiones de AutoCAD, asegurando que todos los componentes encajen correctamente, añadiendo al diseño los detalles que permitan ajustar el ángulo y la altura de la cámara, para diferentes configuraciones de captura.

5.2.FASE 2: DESARROLLO DEL SISTEMA DE CAPTURA DE DATOS.

5.2.1. Instrumentación computarizada de la captura de imágenes

Software

Python es el lenguaje de programación utilizado debido a su eficiencia y versatilidad en la codificación y configuración de los parámetros de captura, así como en el control de la cámara para la

toma de imágenes. Para el entorno de desarrollo, se emplea la interfaz gráfica de usuario (GUI) de Anaconda Navigator, que facilita la gestión de paquetes y entornos necesarios en Python. Para realizar la captura de imágenes, se emplea un sistema basado en Python que utiliza la biblioteca OpenCV en compañía del SDK (Software Development Kit, por sus siglas en inglés) de la cámara ZED Stereolabs. Este SDK actúa como el puente entre la cámara y Python, ofreciendo diversas opciones de desarrollo y personalización para facilitar el control de la cámara y la captura de fotogramas [Stereolabs, 2024]. El procesamiento y análisis de las imágenes se lleva a cabo principalmente mediante OpenCV, utilizando las herramientas avanzadas de esta biblioteca para manipular y analizar las imágenes capturadas.

Tipo de Imagen

Se hace énfasis en las características fotográficas esenciales como la iluminación, nitidez, exposición y saturación, así como en los atributos técnicos de las imágenes digitales, incluyendo la resolución, el formato de archivo, la forma de almacenamiento y los fotogramas por segundo (FPS). La resolución de las capturas se define en 1080HD para garantizar un alto nivel de detalle sin comprometer significativamente la capacidad de almacenamiento, asegurando imágenes claras y precisas para el análisis del pavimento.

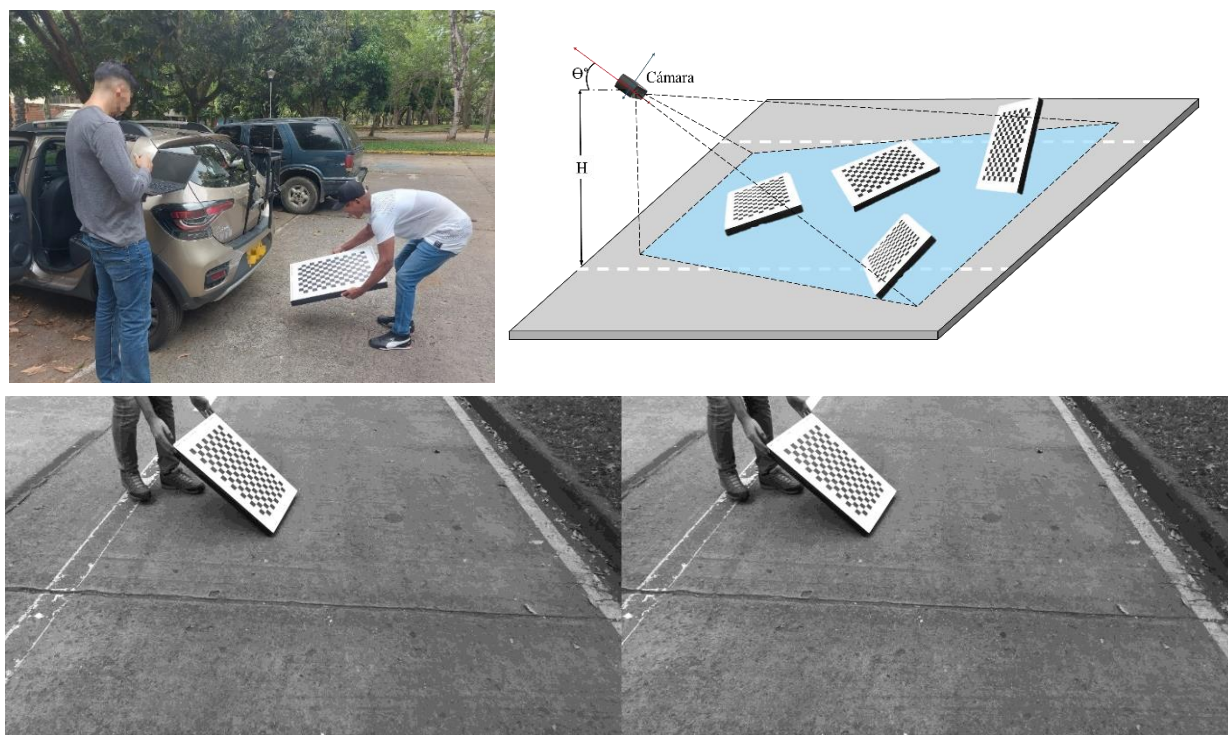
Para determinar el formato más eficiente en términos de calidad y tamaño de archivo, se prueban diferentes formatos de imagen (BMP, JPG, PNG y TIFF). Se realizan capturas de 20 minutos de duración en cada formato, tanto a color como en escala de grises, con el objetivo de comparar el espacio en disco utilizado y la velocidad del proceso de guardado. Este enfoque permite identificar el formato que proporcione un equilibrio óptimo entre calidad de la imagen y la eficiencia en el almacenamiento y procesamiento. Adicionalmente se contempla la posibilidad de ajustar parámetros como la exposición, nitidez y saturación para optimizar la calidad de captura, se prevé que estos se mantendrán en configuraciones automáticas. Esto asegura una operación consistente y adaptable a diversas condiciones de iluminación y escenarios de captura, sin necesidad de ajustes manuales.

5.2.2. Calibración cámara estéreo

La calibración de la cámara resulta fundamental en el proceso para medir el tamaño de objetos en unidades globales o determinar la ubicación de la cámara en la escena. Aunque el software SDK de la cámara Zed ofrece una interfaz para esta tarea, se opta por realizar una calibración independiente. Esto se debe a que la recomendación del software sugiere llevar a cabo la calibración en un entorno oscuro y libre de luces brillantes que puedan interferir con que la cámara reconozca patrones en un monitor. Además, así considerar las variaciones del entorno, la posición y la orientación de la cámara durante la captura como factores importantes para tener en cuenta.

El propósito de realizar la calibración es obtener información precisa sobre las características físicas internas de la cámara. Esto incluye la identificación y corrección de la distorsión de la lente, tanto radial como tangencial, que puede afectar la calidad y precisión de las imágenes capturadas. El proceso de calibración comienza con la cámara ubicada en un punto fijo, capturando un conjunto de imágenes del patrón de tablero de ajedrez, como se ve en la **Figura 28**. Este patrón se desplaza en diversas posiciones y orientaciones relativas a la cámara en toda la escena de captura, asegurando una representación lo más completa posible del área de la imagen.

Figura 28 Captura de imágenes de calibración



Para llevar a cabo el proceso de calibración, se utiliza un patrón de 38,5 x 56 cm con cuadrados de lados de 3,5 cm de longitud, con el que se obtiene un conjunto de imágenes capturadas desde diferentes ángulos y posiciones. Estas imágenes se procesan utilizando herramientas como la aplicación Stereo Camera Calibrador de MATLAB o librerías como OpenCV de Python, que permiten obtener una matriz con los parámetros de calibración para cada uno de los sensores de la cámara. El fundamento teórico de la calibración se basa en investigaciones específicas en el campo de la visión computarizada como el de [Zhang, 2000] y [Heikkila, 1997]. La calibración de la cámara proporciona una serie de parámetros esenciales para corregir distorsiones, mejorar la precisión en la captura y análisis de imágenes y medir el tamaño de objetos en unidades globales. Los parámetros extrínsecos de la cámara determinan la geometría de la disposición estéreo, lo que permite la triangulación de puntos en el espacio tridimensional a partir de imágenes estereoscópicas.

5.3.FASE 3: FORMULACIÓN DEL PROTOCOLO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.

5.3.1. Montaje del sistema de captura

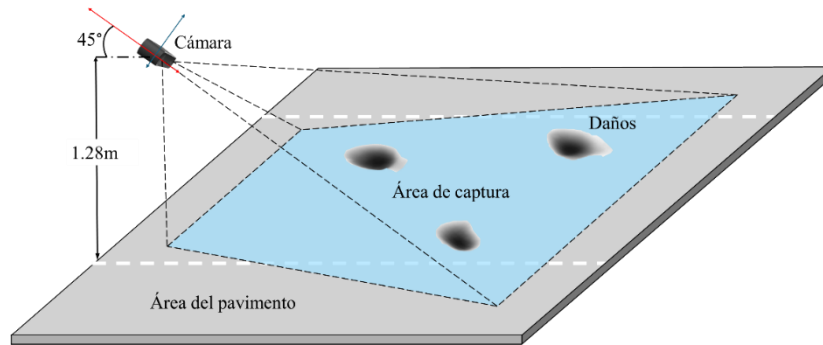
El montaje del sistema de captura se realiza en un vehículo Renault Sandero Stepway modelo 2022. La estructura de soporte, elaborada en la Fase 1, se ancla a la parte trasera del vehículo. La altura del vehículo es aproximadamente 162cm, y se establece una altura de 128 cm para la cámara. Esta altura permite capturar un área considerable del pavimento mientras se mantiene un alto nivel de detalle debido a su cercanía al suelo. [Lin et al., 2023] evaluaron el efecto de la altura de una cámara RGB-D en la medición de baches simulados en espuma de poliestireno con alturas variables de 75cm a 150cm. Sus resultados mostraron errores de hasta 14,3% en las mediciones de área y hasta de 49,9% en las mediciones de volúmenes, debido a la disminución de resolución con el aumento de la altura de la cámara. Para minimizar la aparición de sombras generadas por el propio vehículo y el dispositivo de captura, la cámara se inclina a -45° respecto al nivel del pavimento. Esta configuración maximiza la visibilidad del área de interés y mejora la calidad de las imágenes capturadas. [Lin et al., 2023] también realizaron capturas con varios ángulos de inclinación, indicando que la reducción del ángulo a -45° de la cámara no afectó significativamente la precisión de determinación del área de los baches.

Campo de Visión y Área de Cobertura

A partir de los parámetros obtenidos durante la calibración de la cámara, se determinan de manera precisa tanto el campo de visión como el área cubierta por cada imagen capturada. La configuración propuesta, que incluye una altura de la cámara de 128cm y un ángulo de inclinación de -45° , se plantea como una alternativa para maximizar la cobertura del área de interés del pavimento, como un carril completo de 3,65m de ancho. Para complementar este análisis, se opta por utilizar un modelo de cámara estenopeica [Sturm, P., 2021] con el fin de representar geoméricamente la proyección de la escena y calcular el área de cobertura del sistema de visión estéreo. Este enfoque permite simplificar la estimación del campo de visión sin considerar las distorsiones ópticas, facilitando la evaluación de la extensión de la superficie capturada en cada imagen y asegurando una distribución adecuada del área inspeccionada.

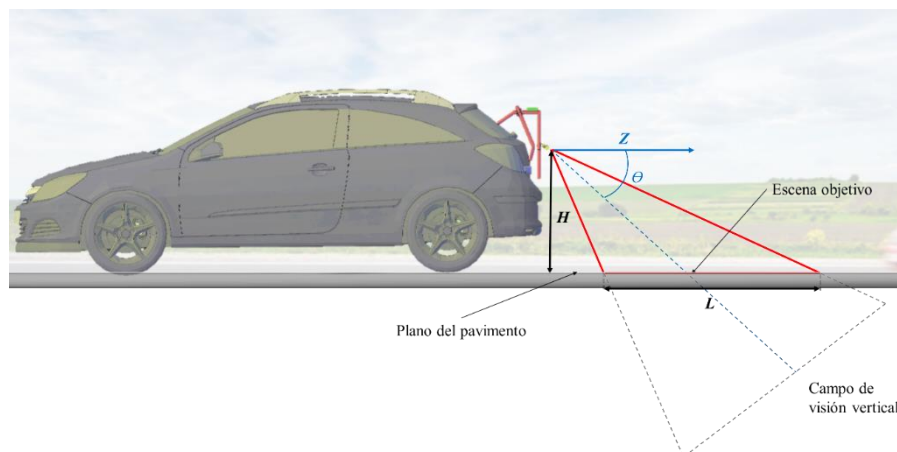
En consecuencia, la cobertura geométrica de la cámara se define como un trapecio, cuya forma resulta de la inclinación de -45° y la proyección angular del campo de visión sobre la superficie del pavimento, ver **Figura 29**. Esta forma trapezoidal surge de la perspectiva angular generada por la altura de montaje y el ángulo de inclinación, en conjunto con los parámetros ópticos intrínsecos de la cámara. El área proyectada se calcula mediante el análisis geométrico de los rayos que definen el campo de visión (FOV) de la cámara al intersectar el plano del pavimento, tal como se ilustra en la **Figura 30**.

Figura 29 Configuración de la cámara para la captura.



Fuente: Tello-Cifuentes et al., 2024.

Figura 30 Proyección del campo de visión vertical en el pavimento.



Conociendo la altura H el ángulo de inclinación de la cámara θ y el campo de visión vertical FOV_y se calculan las dimensiones del triángulo que representa la proyección del campo de visión sobre el pavimento. El ángulo α , correspondiente al campo de visión, se obtiene a partir de la relación de los ángulos internos del triángulo isósceles, dado que los rayos de luz que delimitan el campo de visión

emergen simétricamente desde el centro óptico de la cámara. Este cálculo se realiza siguiendo el apartado 4.15 del marco teórico.

Resolución Espacial (GSD)

Además de la configuración del sistema de captura, determinar el valor de Ground Sampling Distance (GSD) es esencial para garantizar la precisión de las mediciones realizadas a partir de las imágenes capturadas. El GSD, que está relacionado directamente con la geometría del montaje y la calibración de la cámara, es un indicador clave de la resolución espacial de la imagen. Un GSD más pequeño implica una mayor resolución, lo que permite que cada píxel cubra una porción más pequeña del área del pavimento. [Lee & Sull, 2019] muestran que una correcta estimación del GSD mejora la segmentación y la medición de objetos, lo cual es esencial en aplicaciones que requieren alta precisión como la medición de irregularidades del pavimento. Además, el GSD tiene un impacto directo en la calidad general de las imágenes, ya que influye en la capacidad del sistema para distinguir detalles finos. [Ayala et al., 2024] destacan que una mayor resolución espacial, derivada de un GSD más pequeño, facilita una segmentación más precisa y eficiente en tareas de monitoreo y clasificación de superficies, lo que resulta crucial para la identificación y evaluación de defectos en la superficie del pavimento.

5.3.2. Definición de la velocidad de circulación del vehículo

El desarrollo del proyecto se da en la ciudad de Cali, Colombia, como área de enfoque. Según el decreto No. 4112.010.20 del año 2020 [Alcaldía de Santiago de Cali, 2020], se establece que la velocidad máxima permitida dentro de la ciudad es de 50km/hr. Con este marco regulatorio en mente, se lleva a cabo un estudio de campo en un tramo de vía pavimentada dentro del campus de la universidad del Valle. Este estudio implica la captura de imágenes a diferentes velocidades de circulación del vehículo. Se realizan siete pruebas en total, controlando la velocidad del vehículo a 20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60 km/hr respectivamente. Estas pruebas proporcionan datos relevantes que permiten establecer parámetros adecuados para la velocidad de circulación durante el proceso de captura de imágenes en condiciones reales de operación. Además, el incluir velocidades mayores al límite establecido de 50 km/hr permite evaluar la variación de calidad de las imágenes y la efectividad del sistema en condiciones extremas.

Para asegurar la máxima claridad y precisión en las imágenes obtenidas, se realizan análisis específicos de la nitidez. Como mencionan [Méndez et al., 2012], la nitidez es decisiva para la evaluación posterior, ya que en una imagen distorsionada los píxeles presentan alteraciones que resultan en errores al analizar la imagen. Estos análisis consideran no sólo la velocidad del vehículo durante la adquisición de información con exposición automática, sino también evalúan otros factores que podrían afectar la nitidez, como la estabilidad de la cámara y las condiciones ambientales.

5.3.3. Selección de horarios de la toma de datos

El seleccionar un horario para la toma de datos es un aspecto crucial como parte del protocolo de captura de imágenes de la superficie del pavimento. En este proyecto, se han considerado diversas condiciones de iluminación determinadas tanto por el clima como por la hora del día. Sin embargo, se ha optado por realizar las capturas principalmente en horas del mediodía y media tarde.

La decisión de capturas imágenes durante el mediodía entre 11:00am y 1:00pm se basa en la ventaja de contar con luz directa y mínima sombra por la posición del sol, lo que permite obtener una iluminación uniforme con mínima interferencia de sombras. Esta condición es ideal para asegurar la claridad y la precisión de las imágenes capturadas. Por otro lado, la captura en horas de media tarde entre 3:00pm y 5:00pm se justifica por la intensidad moderada de sol, que proporciona una luz suficientemente brillante pero sin las sombras alargadas y pronunciadas que se presentan en las primeras horas de la mañana. Esta condición de iluminación suave reduce el riesgo de deslumbramientos y reflejos, garantizando una calidad constante y consistente en las imágenes.

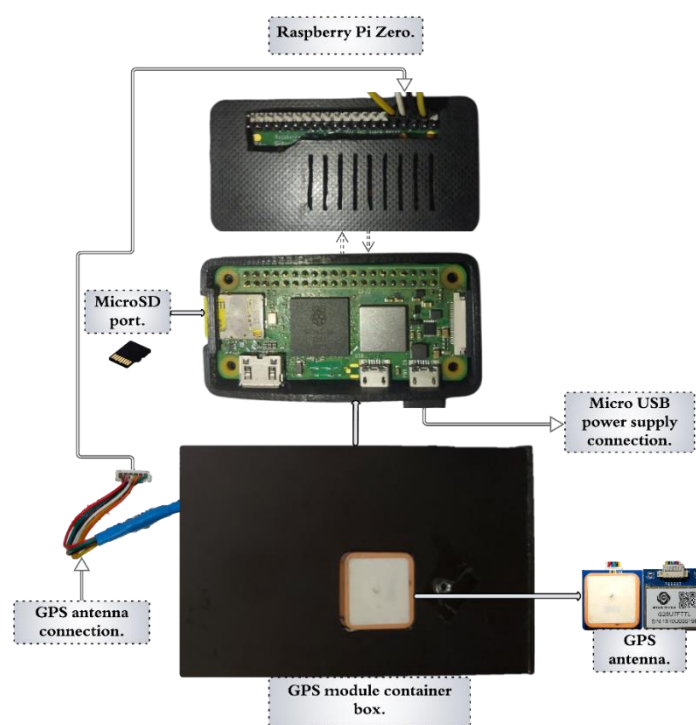
Se planifican sesiones de captura en estos horarios específicos, estableciendo rutas y tramos de pavimentos a ser capturados en cada sesión. La cámara se configura e instala según los parámetros definidos en la Fase 2, asegurando el funcionamiento adecuado del prototipo móvil y del software de captura. Durante cada sesión, se lleva un registro preciso de los tiempos de captura y las condiciones de iluminación, documentando los detalles necesarios para garantizar la calidad y consistencia de los datos recopilados.

5.3.4. Integración de la captura de imágenes con su ubicación mediante GPS.

Se utiliza las coordenadas UTM para referenciar cada imagen al tramo de la vía correspondiente. Los datos de ubicación se adquieren mediante una antena GPS controlada por un Raspberry Pi Zero, y se capturan a intervalos de un segundo. Dado que la captura de imágenes se realiza a una frecuencia de 5 FPS, es necesario interpolar los datos del GPS para obtener una coordenada precisa para cada imagen capturada y almacenada.

La asociación de las imágenes y las coordenadas se basa en los tiempos de captura registrados tanto para los datos GPS como para las imágenes estéreo. Para este proceso, se desarrolla un programa en Python que se utiliza después de la captura de los datos. Este programa sincroniza los tiempos registrados de las imágenes con los datos del GPS, asegurando que cada imagen esté correctamente referenciada con su ubicación. Se proporciona a continuación un diagrama esquemático exclusivo del módulo GPS y sus partes.

Figura 31 Esquema del módulo GPS.



La sincronización de los datos GPS se logra mediante un enfoque basado en la comparación de los tiempos de captura de las imágenes y los datos de ubicación GPS. El flujo general del proceso es el siguiente.

- **Extracción de datos:** Primero, se extraen los datos de las imágenes y del GPS. Se obtiene la información de las imágenes a través de un proceso de extracción de metadatos, mientras que los datos GPS se leen desde un archivo CSV que contiene las coordenadas geográficas y las marcas de tiempo correspondientes.

- **Preprocesamiento de datos GPS:** Los datos GPS se convierten a coordenadas decimales y se ajustan las fechas y horas para que todas estén en un formato adecuado para la comparación. Esto incluye la conversión de las horas GPS y locales a un formato *datetime*.
- **Filtrado de datos por tiempo:** Para asegurar que los datos GPS coinciden con las imágenes, se filtra el rango de datos GPS para que solo se considere el período de tiempo en el que las imágenes fueron capturadas. Esto asegura que solo se tomen únicamente los datos relevantes del rango de captura de imágenes.
- **Interpolación de datos:** Debido a la posible pérdida de datos GPS en ciertos momentos, se utiliza un proceso de interpolación para estimar los valores faltantes de las coordenadas de latitud y longitud. Esto se hace de manera que se mantenga la coherencia de los datos GPS durante todo el intervalo de tiempo.
- **Sincronización final:** Una vez que los datos GPS se han interpolado para llenar los vacíos, el siguiente paso es asociar cada imagen con su correspondiente coordenada GPS. Para lograr esto, se comparan las marcas de tiempo de las imágenes con las de los datos GPS. Dado que las imágenes y los datos GPS tienen frecuencias de captura diferentes, se realiza un *merge* o unión de las tablas de imágenes y datos GPS, basándose en las fechas y horas exactas de captura. En caso de que haya diferencias entre los tiempos de captura de las imágenes y los datos GPS (por ejemplo, si una imagen se toma en un tiempo intermedio entre dos registros de GPS), se realiza una interpolación temporal de las coordenadas GPS. Esto significa que las coordenadas de latitud y longitud correspondientes a ese intervalo intermedio se estiman y se asignan a la imagen de forma precisa, utilizando los datos GPS adyacentes más cercanos. Este enfoque asegura que cada imagen esté correctamente asociada con la coordenada GPS más precisa disponible, respetando la temporalidad de la captura de la imagen y la localización precisa en el pavimento.

5.4.FASE 4: VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

En esta fase, se valida el funcionamiento del sistema de captura de imágenes del pavimento, evaluando su eficacia y precisión en comparación con métodos tradicionales de inspección visual. La validación se centra en una comparación directa con el método manual utilizado en un caso real, permitiendo una evaluación de la precisión de las mediciones de daño en la superficie del pavimento, obtenidas mediante el sistema propuesto. Además, se incorpora un análisis de profundidad a través de la generación de un modelo 3D del pavimento como complemento.

5.4.1. Método desarrollado frente a método Manual

En esta sección se compara la metodología propuesta para la captura de imágenes del pavimento y la funcionalidad del prototipo en un caso real de inspección visual, contrastándose con el método manual en la recolección de información sobre fallas en la superficie del pavimento flexible. Para ello, se llevará a cabo una inspección manual en una zona específica de la ciudad de Cali, siguiendo un procedimiento estructurado de identificación y evaluación de las fallas a partir de un análisis visual. En esta inspección, se emplearán herramientas convencionales, como una cinta métrica y un odómetro, para registrar la extensión y severidad de los deterioros observados. El objetivo de este estudio es caracterizar el tipo y grado de los daños más relevantes en los tramos evaluados, permitiendo así un diagnóstico detallado de la red vial. Posteriormente, se realizará la captura de imágenes de los mismos tramos inspeccionados manualmente, con el fin de comparar la efectividad y precisión del prototipo en relación con el método tradicional. El enfoque de esta comparación es múltiple:

- I. **Comparación de los tiempos empleados de adquisición de datos entre ambos métodos:** Se analiza la eficacia en términos de tiempo necesario para recolectar y procesar la información con cada metodología.
- II. **Evaluación de los costos y el personal requerido:** Se comparan los costos asociados a cada método, considerando equipos, materiales y personal necesario.
- III. **Comparación de las mediciones de algunos daños representativos obtenidos por ambos métodos:** Este aspecto se lleva a cabo a partir de los resultados obtenidos del procesamiento

externo de las imágenes capturadas, donde se detectan los daños. A partir de estos resultados, se mide la extensión de los daños y se estima su severidad, y posteriormente, se contrasta con las mediciones obtenidas en campo mediante el método manual.

Medición digital

El proceso comienza con la carga de las imágenes estereoscópicas originales y las imágenes segmentadas que han sido previamente procesadas para resaltar los daños en el pavimento. También se carga la calibración de la cámara estéreo, que es fundamental para realizar la rectificación y estimación de la disparidad. Una vez cargadas las imágenes, el siguiente paso es realizar una segmentación para identificar los daños presentes utilizando técnicas de procesamiento de imágenes, como las implementadas en OpenCV, que permiten identificar las áreas de interés. Posteriormente, se agrupan los contornos en regiones de interés (ROI) que corresponden a los daños en el pavimento, como grietas y baches.

Una vez identificados los contornos de los daños, se procede a realizar la esqueletización, un proceso que convierte los daños en líneas delgadas que representan el eje central del daño. Este paso es particularmente importante en el caso de la piel de cocodrilo (AC), donde las grietas tienen patrones complejos. La esqueletización facilita la medición de la geometría del daño al definir un eje central, que sirve como referencia para medir el ancho de la grieta. Este eje permite realizar mediciones perpendiculares a lo largo de la grieta, asegurando que el ancho se mida correctamente en puntos específicos, sin importar la orientación o forma de la grieta (vertical, horizontal o diagonal), lo que garantiza una medición coherente.

Posteriormente, se realiza la selección de las líneas de referencia (ROIs), en las que el usuario define las áreas de interés dentro de la imagen. Este paso permite enfocar el análisis en zonas específicas, asegurando que las mediciones se tomen únicamente dentro de las regiones relevantes de daño. Al seleccionar estas áreas, se define un espacio de medición efectivo, facilitando la obtención de datos precisos al centrarse en las zonas más críticas del daño.

Las imágenes se rectifican para corregir las distorsiones originadas por el lente y facilitar la correspondencia entre puntos de la misma escena en ambas imágenes, lo que permite medir con precisión las dimensiones del daño. A través de la disparidad entre los puntos en las imágenes rectificadas, se compensa las distorsiones de la cámara, garantizando que las mediciones horizontales (como el largo y el ancho) sean precisas. Se utiliza la ecuación de triangulación estéreo (9) para calcular la distancia de un punto a la cámara. Aunque la triangulación estéreo se usa comúnmente para reconstruir la escena tridimensionalmente, en este caso se aplica para compensar la perspectiva causada por la inclinación de la cámara y medir con precisión las distancias horizontales del daño en el plano 2D de la imagen.

Una vez detectados los contornos, se dividen en secciones longitudinales, como en el caso de las grietas (Cr) y piel de cocodrilo (AC), de acuerdo con su extensión. Para los baches (Po), los puntos se obtienen automáticamente a partir del bounding box que rodea el daño, permitiendo medir su diámetro. La conversión de las mediciones de píxeles a unidades reales se realiza utilizando los datos de correspondencia estéreo entre las imágenes izquierda y derecha. Esta conversión se lleva a cabo mediante la ecuación (21), que relaciona la medida en píxeles con la medida real. A continuación, se calculan las medidas de las grietas y los baches en términos de longitud y área. En el caso de las grietas, el sistema estima el ancho máximo detectado. Para la piel de cocodrilo, se calcula el promedio de los anchos detectados por malla de daño. Para los baches, el área afectada se calcula tomando los contornos de los daños identificados y utilizando un enfoque de caja delimitadora.

Adaptación del PCI a la digitalización automática

La adaptación del PCI en este estudio consiste en la digitalización del proceso de cálculo del índice de condición del pavimento, utilizando mediciones digitales extraídas de las imágenes

capturadas. A través de técnicas de visión artificial, se obtiene un sistema capaz de detectar con precisión los tipos más relevantes de daños en la superficie del pavimento. Las imágenes capturadas son procesadas posteriormente utilizando algoritmos diseñados para medir diferentes tipos de daños en el pavimento. Este procesamiento permite obtener mediciones precisas, aplicadas a los siguientes tipos de daños:

- **Grietas:** Se detectan grietas longitudinales y transversales por igual, clasificándolas según su severidad mediante la medición de su ancho y registrando su longitud.
- **Baches:** Se identifican baches de diversos tamaños, con mediciones del diámetro y área de estos.
- **Piel de Cocodrilo:** Las deformaciones superficiales tipo piel de cocodrilo también se identifican, con mediciones de su extensión, así como la determinación de su severidad, medida por el ancho promedio de las grietas presentes en la malla.

Tabla 10 Severidad y medición de los daños (PCI digital).

Dañó	Baja/ Low (L)	Media/ Medium (M)	Alta/Hight (H)	Medición
Grietas	Grietas cuyo ancho es inferior a 10 mm	Grieta cuyo ancho es mayor a 10 mm y menor a 75 mm	Grieta cuyo ancho sea mayor a 75 mm	Se miden en metros lineales, se registra la longitud y la gravedad de cada grieta.
Piel de cocodrilo	Grietas cuyo ancho es inferior a 10 mm	Grieta cuyo ancho es mayor a 10 mm y menor a 75 mm	Grieta cuyo ancho sea mayor a 75 mm	Se mide en metros cuadrados de superficie.
Baches	Baches cuyo diámetro es inferior a 200 mm	Baches cuyo diámetro sea mayor a 200 mm y menor a 450 mm	Baches cuyo diámetro sea mayor a 450 mm y menor a 750 mm	Se cuentan la cantidad de baches por nivel de severidad. Si el bache tiene más de 750 mm de diámetro, de determina el área en m ² y se divide por 0,50 m ² .

También se considera la digitalización de las gráficas de valor deducido, lo que facilita la automatización del cálculo del PCI para pavimentos flexibles urbanos. Este enfoque, similar al utilizado por [Loprencipe & Pantuso 2017] en su estudio, consiste en digitalizar las gráficas para obtener una ecuación matemática que describe las curvas de deducción de cada tipo de daño. Con las gráficas digitalizadas y las ecuaciones obtenidas, se calcula el valor deducido para cada daño, teniendo en cuenta su severidad y densidad. Este proceso mejora la precisión en la determinación del índice de condición del pavimento, permitiendo una evaluación más exacta y automatizada de las condiciones de la vía.

Para llevar a cabo la digitalización, se utiliza la herramienta *WebPlotDigitizer*, que permite extraer los puntos de las curvas directamente desde la imagen de la gráfica. Mediante esta herramienta, se obtienen las coordenadas X e Y de los puntos que conforman las curvas de valor de deducción y valor de deducción corregido. Una vez obtenidos los puntos, se ajusta una curva a los datos mediante un ajuste polinómico, lo que permite generar una ecuación matemática precisa que describe las curvas de deducción para cada tipo de daño. Estas ecuaciones, junto con las mediciones que se obtengan de las imágenes, serán la herramienta para calcular el PCI de forma automatizada, proporcionando un método preciso y eficiente para la evaluación del estado del pavimento.

Figura 32 Curvas de Valor de deducción digitales-Piel de cocodrilo.

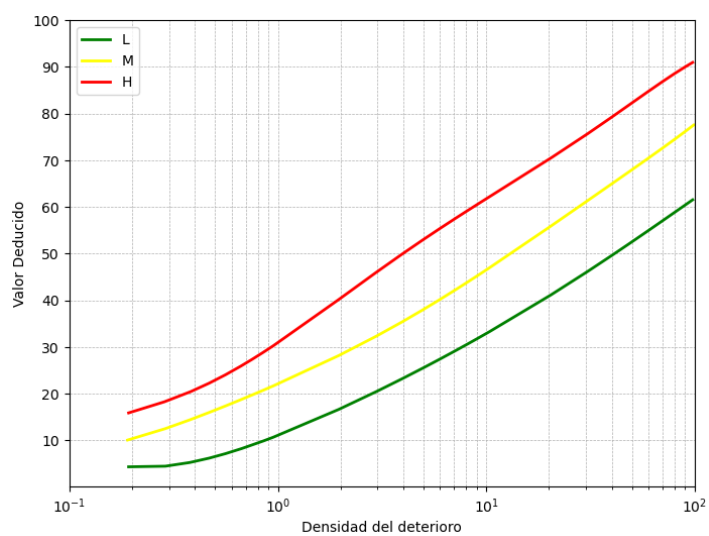


Figura 33 Curvas de Valor de deducción digitales-Baches

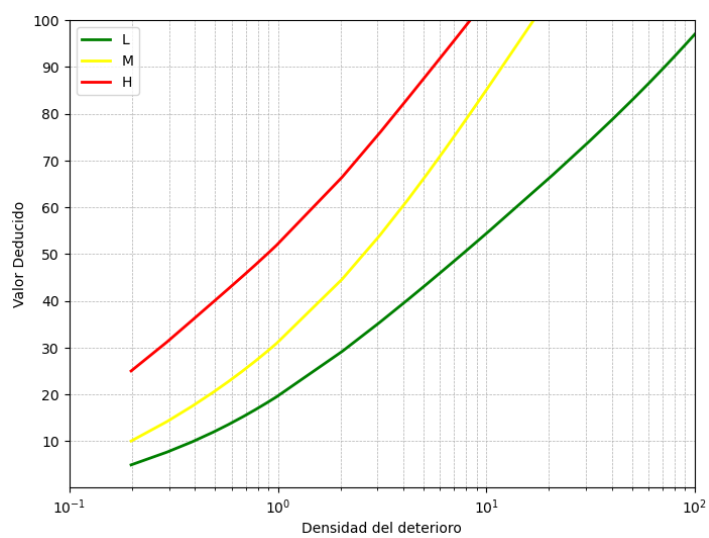


Figura 34 Curvas de Valor de deducción digitales-Grietas longitudinales y transversales.

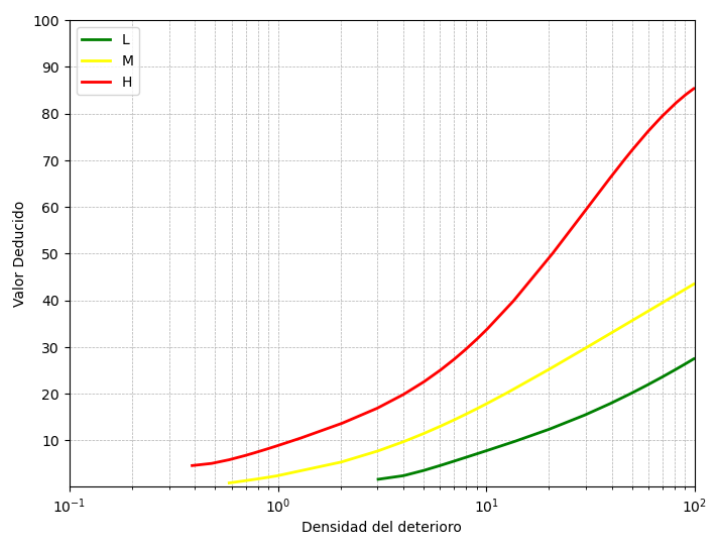
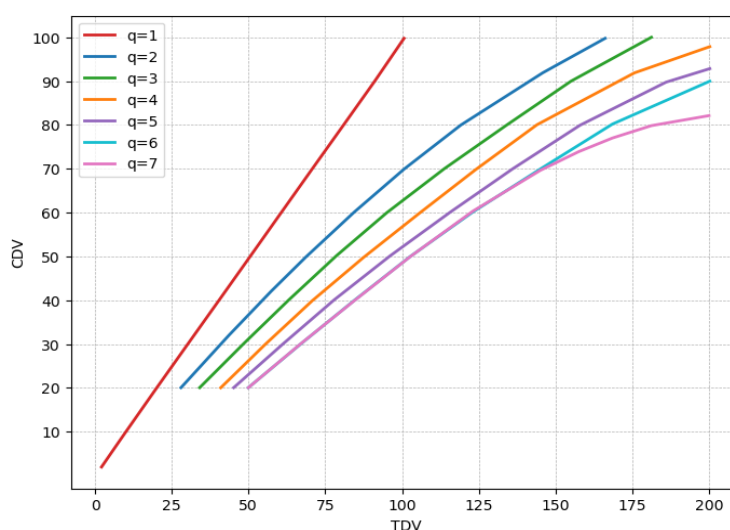


Figura 35 Curvas de Valor de deducción corregidos Digital.



El cálculo automático del PCI se realiza utilizando los datos obtenidos de las mediciones de los daños y su severidad, que se asocian a cada imagen a través de información de GPS. Esta información permite definir las unidades de muestreo, considerando la longitud del tramo de interés y el ancho de la vía o carril. Posteriormente, se inspeccionan todas las imágenes presentes en las unidades de muestreo y se evalúan según su severidad y dimensiones.

Luego de obtener las mediciones y clasificar la severidad de cada tipo de daño (grietas, baches y piel de cocodrilo), se calcula la densidad de cada daño. Como se describe en la ecuación (2) esta densidad se utiliza en conjunto con las curvas de valor deducido (DV) digitalizadas y obtenidas a partir de las gráficas de deducción. Mediante el uso de las ecuaciones digitales de las curvas de Valor deducción (**Figura 32, 30 y 31**), se calcula el valor deducido total (TDV). A continuación, se obtiene el valor corregido (CDV) y, finalmente, se determina el PCI de manera automatizada, lo que permite una evaluación precisa y eficiente del estado del pavimento sin necesidad de intervención manual.

5.4.2. Reconstrucción en 3D

Este análisis se enfoca medir el volumen de daños tipo bache de manera digital como de manera manual usando el método del cono y arena como referencia para validar las mediciones automatizadas, similar a lo empleado por [Guan et al., 2021], con el fin de asegurar la precisión del método automatizado. El método del cono y arena empleado para determinar los volúmenes de los baches es basado en el ensayo INV E -161-13 y en la norma NTC 1667:2002, comienza limpiando la superficie y colocando una capa de plástico para recuperar la arena y evitar pérdidas. Luego, se llena el bache con arena que fluye libremente desde el cono, asegurando una distribución uniforme y evitando vacíos. Una vez la arena alcanza la superficie, se enrasa, luego se mide la profundidad de la superficie de arena respecto al borde del bache y finalmente se recupera y pesa la arena utilizada.

Figura 36 Método del cono y arena.



Para realizar el análisis de profundidad de los daños en el pavimento flexible, se utiliza el software SDK de la cámara ZED para la captura de datos y la generación de la nube de puntos correspondiente a la escena . A partir de esta nube, se implementa un enfoque de estimación volumétrica basado en triangulación, que permite construir una red de tetraedros que modela el espacio del daño. El volumen de cada tetraedro se calcula utilizando la fórmula geométrica indicada en la ecuación (24), y luego el volumen total se obtiene sumando los volúmenes de todos los tetraedros generados, como se describe en la ecuación (25).

Figura 37 Captura de baches para analizar.

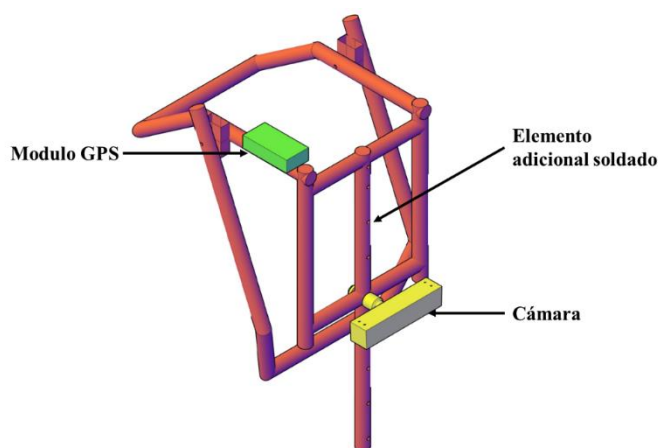


6. RESULTADOS

6.1.FASE 1: DISEÑO DE UN PROTOTIPO MOVIL

La estructura permitió transportar tanto la cámara de captura como el sensor GPS de manera segura. La estructura se caracteriza por un elemento adicional que ha sido soldado en la zona media del soporte. Este componente cuenta con perforaciones estratégicamente ubicadas, las cuales permiten ajustar una rótula de soporte para cámaras con un diámetro estándar de 3/8". Cada perforación se encuentra a una distancia de 7 cm y su disposición ofrece la flexibilidad necesaria para variar la altura de la cámara en un rango de 50 cm. Esta versatilidad es esencial para adaptarse a distintos escenarios y necesidades de captura de imágenes en las vías pavimentadas. Además, el diseño del soporte destaca también por su capacidad para adaptarse e instalarse en una gran variedad de carrocerías existentes. Esta característica asegura una amplia aplicabilidad del sistema, permitiendo su integración de manera eficiente en diferentes tipos de automóviles.

Figura 38 Modelo 3D de la estructura de soporte.



El anclaje de la estructura en el vehículo consistirá en cuatro correas: dos en la parte superior, ancladas entre el techo y la puerta trasera del vehículo, y dos en la parte inferior, también en la puerta trasera. Esta disposición proporcionará una gran estabilidad en el eje vertical de la estructura. Por otro lado, la cámara se fija a la estructura mediante una rótula de soporte con un diámetro de 3/8", que permite una rotación libre de 360° y garantiza una fijación segura.

Figura 39 Estructura de soporte ubicada en el vehículo tipo Hatchback.

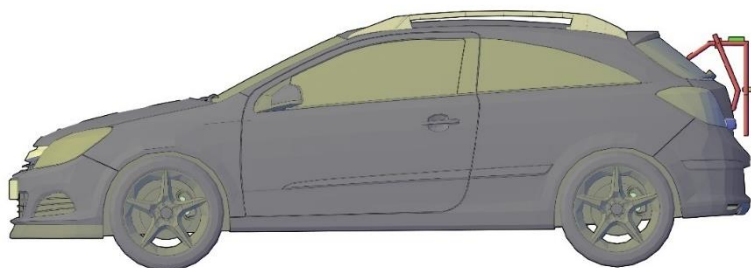
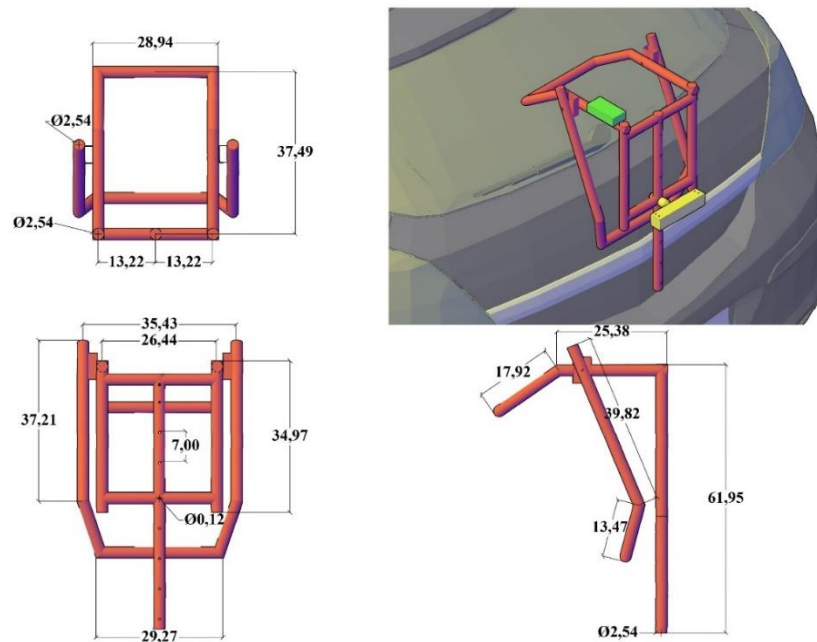


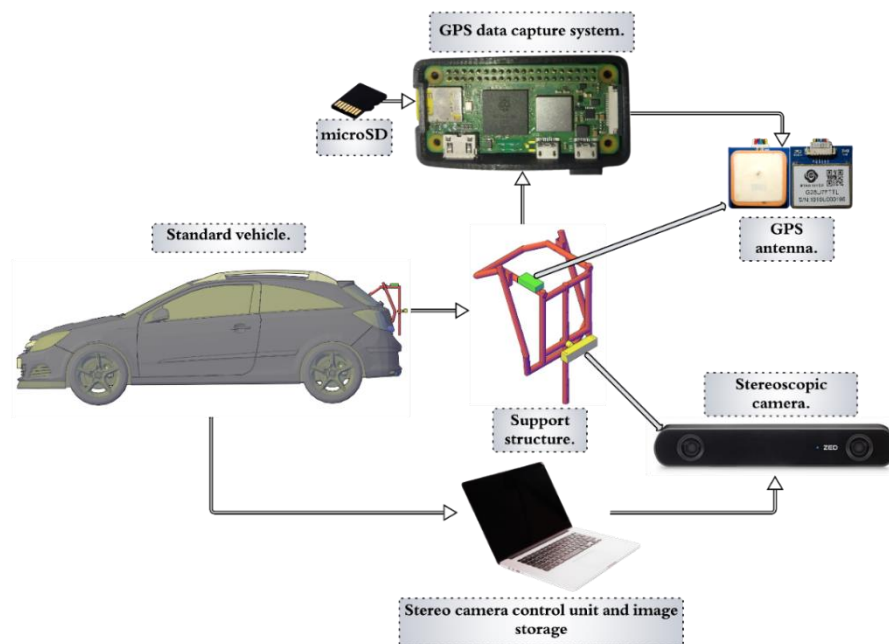
Figura 40 Dimensiones de la estructura de soporte en cm.



Fuente: Tello-Cifuentes et al., 2024.

Para la conexión entre el computador y la cámara, se utilizó un cable de bloqueo de doble tornillo USB 3.0 tipo C, diseñado específicamente por el mismo fabricante de la cámara (Stereolabs). Esta elección permite una conexión segura y estable durante el proceso de captura de imágenes del pavimento. Por último, se garantizó un suministro de energía constante y fiable al computador portátil mediante la alimentación por un convertidor de corriente para vehículos, conectado a un tomacorriente del automóvil. Con esta alimentación continua, se evitan interrupciones en la operación del sistema, permitiendo así una recolección de datos ininterrumpida y precisa a lo largo del recorrido. A continuación, se presenta un esquema que representa visualmente el prototipo móvil y sus integraciones.

Figura 41 Esquema de integración elementos del prototipo.



Fuente: Tello-Cifuentes et al., 2024.

6.2.FASE 2: DESARROLLO DEL SISTEMA DE CAPTURA DE DATOS

6.2.1. Instrumentación computarizada de la captura de imágenes

I. Software

El software desarrollado se implementó íntegramente mediante scripts, permitiendo realizar configuraciones esenciales para la captura de imágenes de manera eficiente y directa. A través de estos scripts, el usuario puede definir parámetros clave como la carpeta de destino para las imágenes capturadas, seleccionar la resolución de captura, y ajustar el valor de FPS. El software también ofrece opciones avanzadas de configuración para características fotográficas, incluyendo la posibilidad de establecer el brillo, nitidez, exposición, y saturación. Además, permite capturar y guardar imágenes en escala de grises o a color.

Cada imagen es guardada automáticamente con un nombre que corresponde a la fecha y hora de su captura hasta en milisegundos, asegurando una identificación precisa y ordenada de los archivos. La estructura de los scripts permite también la gestión y organización de las imágenes de manera efectiva. Las funcionalidades desarrolladas permiten iniciar y detener el proceso de captura de imágenes, así como monitorear parámetros críticos como los FPS y la exposición en tiempo real a través de registros en consola. Esta metodología de trabajo elimina la necesidad de visualizar imágenes durante la captura, lo que fue crucial para mantener la estabilidad y eficiencia del proceso, especialmente al trabajar con resoluciones altas que demandan considerable capacidad computacional.

I. Tipo de Imagen

El objetivo fue identificar el formato más eficiente en términos de tamaño de archivo, calidad y velocidad de procesamiento para guardarse, y optimizar la configuración de captura para un análisis eficiente del pavimento. Se evaluaron cuatro formatos de imagen: BMP, JPG, PNG y TIFF. Las pruebas consistieron en capturas de 20 minutos de duración para cada formato en color y en escala de grises, utilizando una velocidad de captura de 15 FPS. Este intervalo de tiempo fue seleccionado debido a limitaciones de almacenamiento, ya que pruebas más prolongadas representaban ser excesivas para esta fase. Sin embargo, se llevaron los resultados de 20 minutos a una proyección de 1 hora para evaluar el rendimiento a largo plazo.

Tabla 11 Datos imágenes a Color

FPS	15	
Tiempo [min]	20	
Formato	Numero de imágenes	Peso total [GB]
BMP	5600	88,48
JPG	9020	24,53
PNG	4500	31,55
TIFF	4840	35.82

Se decidió capturar las imágenes en escala de grises para reducir la cantidad de datos por imagen. Las imágenes a color generalmente utilizan un formato de 24 bits por píxel (8 bits para cada canal de color: rojo, verde y azul), mientras que las imágenes en escala de grises solo requieren de 8 bits por píxel. Se realizó de esta manera con el fin de optimizar el almacenamiento y procesamiento rápido de las imágenes.

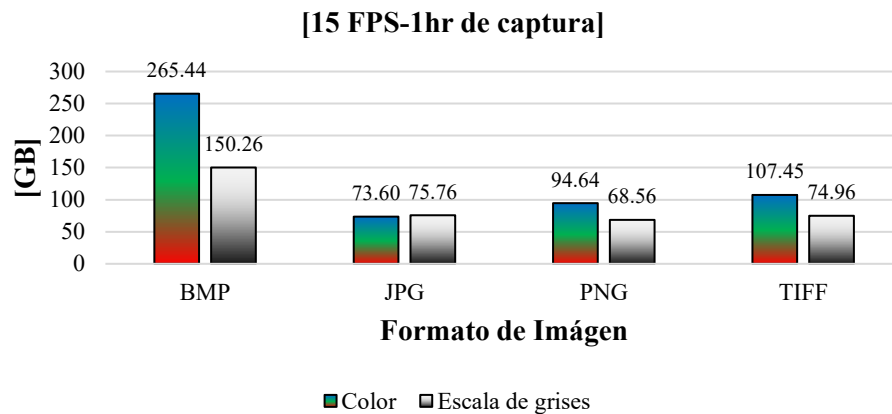
Tabla 12 Datos imágenes en Escala de grises.

FPS	15	
Tiempo [min]	20	
Formato	Numero de imágenes	Peso total [GB]
BMP	12680	50,09
JPG	12200	25.25

PNG	11600	22,85
TIFF	10240	24,99

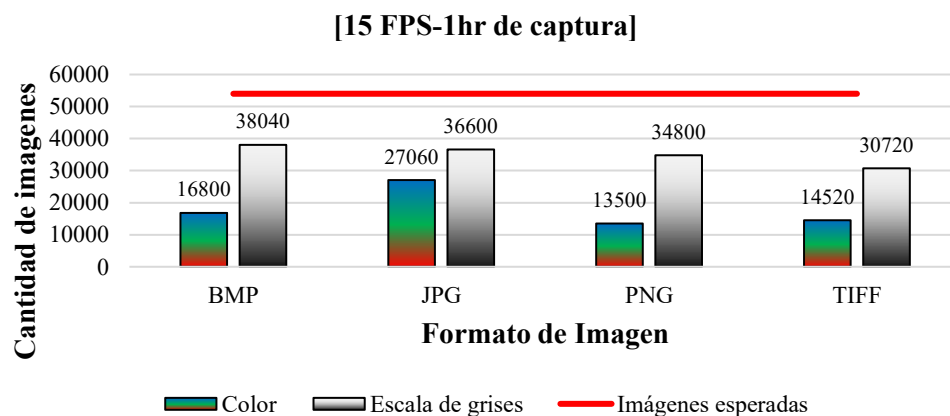
La **Figura 42** ilustra el tamaño en disco estimado que ocuparían las imágenes en una hora de captura para cada formato. Se observó que el formato BMP produce imágenes de alta calidad pero con tamaños de archivo extremadamente grandes, impactando negativamente la capacidad de almacenamiento y la velocidad de procesamiento. El formato TIFF, similar al BMP en cuanto a calidad y tamaño de archivo, también resultando en archivos voluminosos. El formato PNG ofrece buena calidad de imagen con un tamaño de archivo moderado. El formato JPG permite una compresión eficiente, reduciendo significativamente el tamaño de archivo sin comprometer excesivamente la calidad visual.

Figura 42 Tamaño de archivos de imagen según su formato.



La **Figura 43** muestra la cantidad de imágenes que se obtendrían durante una hora de captura. Es evidente que la velocidad de procesamiento para guardar las imágenes se ve afectada por el formato, especialmente para guardar imágenes en color. Por otro lado, las imágenes capturas en escala de grises presentan una mejor eficiencia en este aspecto. Aun así, las imágenes obtenidas difieren entre un 29,6% y 43,1% menos de las que se esperarían para una captura de una hora a 15 FPS.

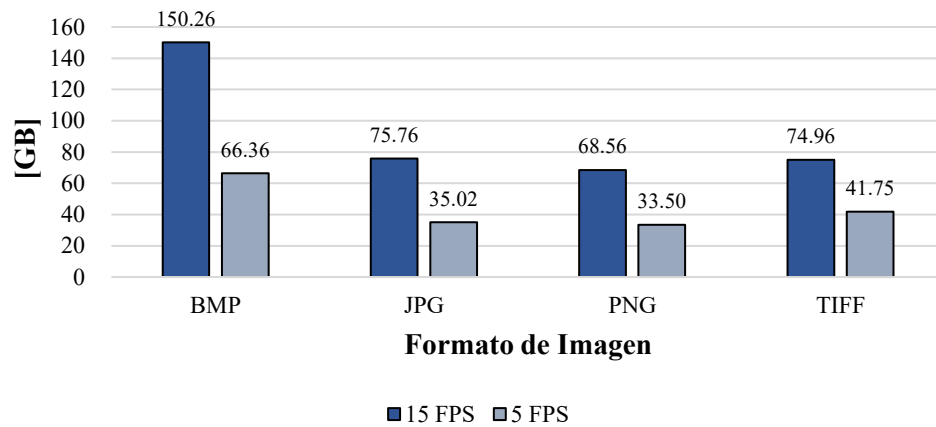
Figura 43 Cantidad de imágenes adquiridas según su formato.



Para optimizar el espacio en disco y mejorar el proceso de captura, se decidió almacenar solo 5 de los 15 FPS capturados inicialmente y utilizar la escala de grises. Esta decisión permite reducir significativamente la cantidad de datos almacenados, manteniendo una cantidad adecuada de imágenes para el análisis del pavimento, lo cual se verifica en la Fase 3.

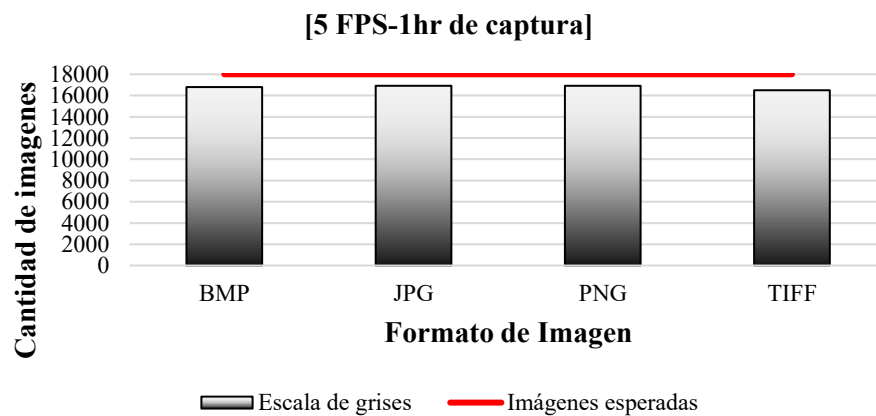
La **Figura 44** muestra la comparación del espacio en disco requerido antes y después de implementar la reducción en la frecuencia de almacenamiento. La mayor reducción se observó en el formato BMP, con un 55,8% menos de espacio en disco comparado con la captura a 15 FPS, seguido de JPG con un 53,8% menos, PNG con un 51,1% menos y TIFF con un 44,3% menos.

Figura 44 Tamaño de archivos de imagen en escala de grises según su formato.



Finalmente, la **Figura 45** ilustra una mejora en la fluidez de adquisición de imágenes en escala de grises guardando 5 FPS, con el formato JPG y BMP mostrando solo un 6,0% de diferencia respecto a las imágenes esperadas, demostrando así la eficiencia de esta estrategia.

Figura 45 Cantidad de imágenes adquiridas en escala de grises según su formato.



Por lo anterior, se optó por utilizar el formato JPG debido a las siguientes razones:

- **Compresión y tamaño de archivo:** El formato JPG permite una compresión eficiente, lo que reduce significativamente el tamaño de archivos de imagen sin comprometer excesivamente la calidad visual.
- **Velocidad de captura:** La calidad de JPG disminuye la cantidad de datos que el equipo de cómputo necesita procesar y almacenar, lo que resulta en una mejora en la velocidad de captura.

Además, durante el proceso de captura los parámetros de la cámara fueron configurados como se detalla en la **Tabla 13**. Estos parámetros son inherentes a la cámara y pueden ajustarse antes de la captura para obtener imágenes óptimas según las condiciones ambientales. Sin embargo, se optó por mantener los valores predeterminados para los parámetros mencionados sin realizar modificaciones, con excepción de la exposición, la cual se configuró de forma automática. Esta variación exclusiva de

la exposición se fundamenta en la fluctuación de las condiciones de iluminación durante la captura, ya que al definir un valor fijo las imágenes resultantes exhibían niveles de luminosidad inadecuados, presentando o bien sobreexposición excesiva (brillantes) o una subexposición notable (oscuras).

Tabla 13 *Parámetros de configuración de Imágenes.*

Parámetros	Valor	Rango	Tipo
Brillo	4	0-8	Por Defecto
Contraste	4	0-8	Por Defecto
Saturación	4	0-8	Por Defecto
Nitidez	4	0-8	Por Defecto
Exposición	Variable	0-100	Automático
Ganancia	64	0-100	Por Defecto

6.2.2. Calibración cámara estéreo

Se llevó a cabo la calibración de la cámara estéreo utilizando un algoritmo basado en OpenCV en Python, lo que permitió obtener un conjunto de parámetros fundamentales para corregir distorsiones y optimizar la precisión de las imágenes capturadas. Estos parámetros fueron almacenados en un archivo compatible con el sistema de procesamiento, asegurando su integración eficiente en las etapas posteriores del análisis.

Figura 46 *Detección de las esquinas internas del patrón, proceso de calibración.*

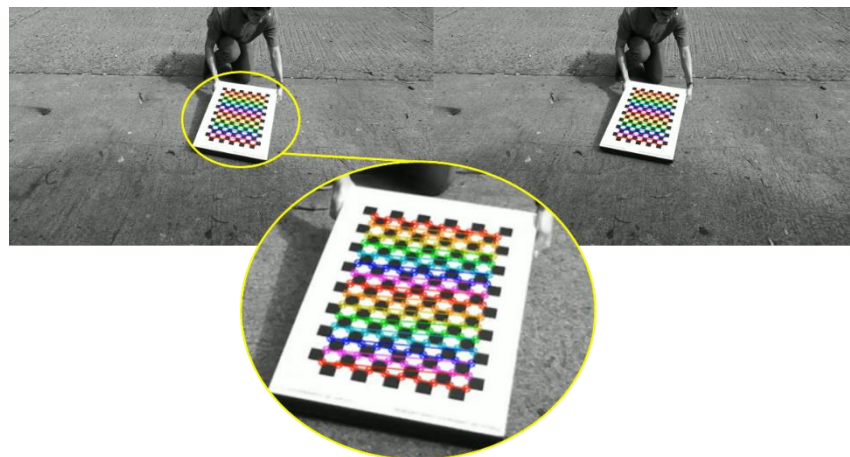


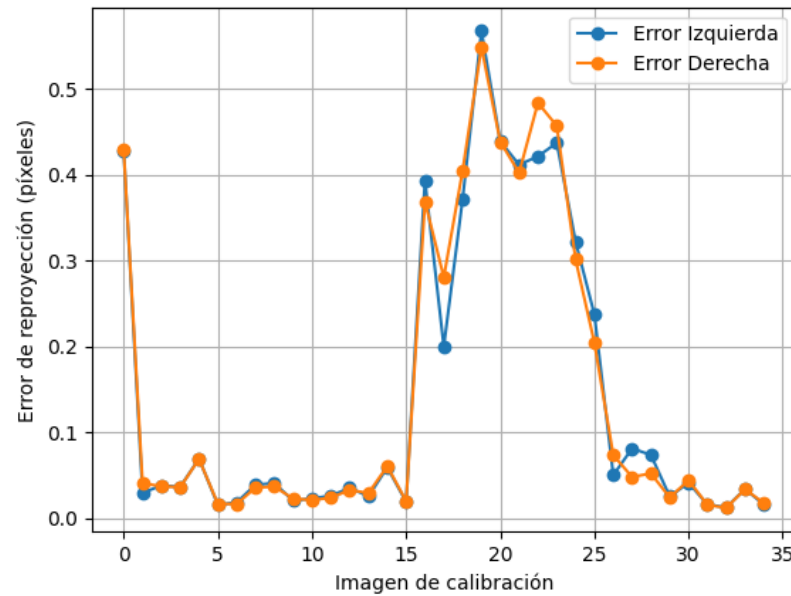
Tabla 14 *Parámetros de salida Calibración estéreo.*

Parámetro	Descripción	Unidades
mtxL, mtxR	Matrices de cámara (izquierda y derecha)	Píxeles
distL, distR	Coefficientes de distorsión (izquierda y derecha)	Adimensional
R	Matriz de rotación entre cámaras	Adimensional
T	Vector de rotación entre cámaras	Centímetros
F	Matriz fundamental	Adimensional
E	Matriz esencial	Adimensional
R1, R2	Matrices de rectificación	Adimensional
P1, P2	Matrices de proyección rectificadas	Píxeles
Q	Matriz de Reproyección 3D	Depende de la escala usada
Baseline	Distancia entre cámaras	Centímetros
Focal length	Longitud focal promedio	Píxeles

De la calibración se obtienen los errores de reproyección como una medida para evaluar la calidad de la calibración de la cámara estéreo. Este error indica la diferencia entre la posición real de

un punto en la imagen y su posición estimada tras aplicar la calibración. Un menor error de reproyección sugiere una calibración más precisa y una mejor corrección de distorsiones ópticas. En este caso, los errores de reproyección promedio obtenidos fueron para la cámara izquierda 0,1449px y para la cámara derecha 0,1467px.

Figura 47 Errores de Reproyección



Además, se determinaron los parámetros intrínsecos de la cámara, entre los cuales destaca la distancia focal, ya que define la escala de la proyección de los objetos en la imagen. Los valores obtenidos para la distancia focal son consistentes con las especificaciones de la cámara ZED 2i, lo que confirma la correcta calibración del sistema. Dado que la distancia focal se expresa en píxeles, es posible convertirla a milímetros utilizando el tamaño de píxel del sensor. En la **Tabla 15** se presentan los valores obtenidos de la distancia focal para ambas cámaras y su valor promedio en milímetros.

Tabla 15 Distancia focal.

Cámara	Parámetro	Distancia focal [px]	Distancia focal promedio [mm]
Izquierda	f_x	1065,61	2,10
	f_y	1046,93	
Derecha	f_x	1043,22	
	f_y	1026,51	

Los valores obtenidos de la distancia focal, tanto en píxeles como en milímetros son consistentes con las especificaciones proporcionados por el fabricante.

De igual forma, se obtienen los coeficientes de distorsión, los cuales reflejan las correcciones necesarias para compensar las deformaciones ópticas de las lentes. Los coeficientes de distorsión radial (k_1 , k_2 y k_3) indican una leve distorsión de barril en ambas cámaras, donde los bordes de la imagen presentan una ligera expansión. Sin embargo, es mínima y se corrige eficazmente mediante la calibración (ver **Figura 48**). Por otro lado, la distorsión tangencial es insignificante, lo que indica una buena alineación entre el sensor y la lente, garantizando una geometría de imagen estable.

Tabla 16 Coeficientes de distorsión.

Cámara	k_1	k_2	p_1	p_2	k_3
Izquierda	-0,07582568	0,14313791	-0,00676122	-0,00423269	-0,07906013
Derecha	-0,06715536	0,12636687	-0,00614502	-0,00781706	-0,06893027

También se obtienen los parámetros extrínsecos de la cámara. Estos parámetros se expresan a través de la matriz de rotación R y el vector de traslación T . La matriz R es una matriz de transformación de 3x3 que describe la orientación de la cámara en el espacio. Su estructura es la siguiente:

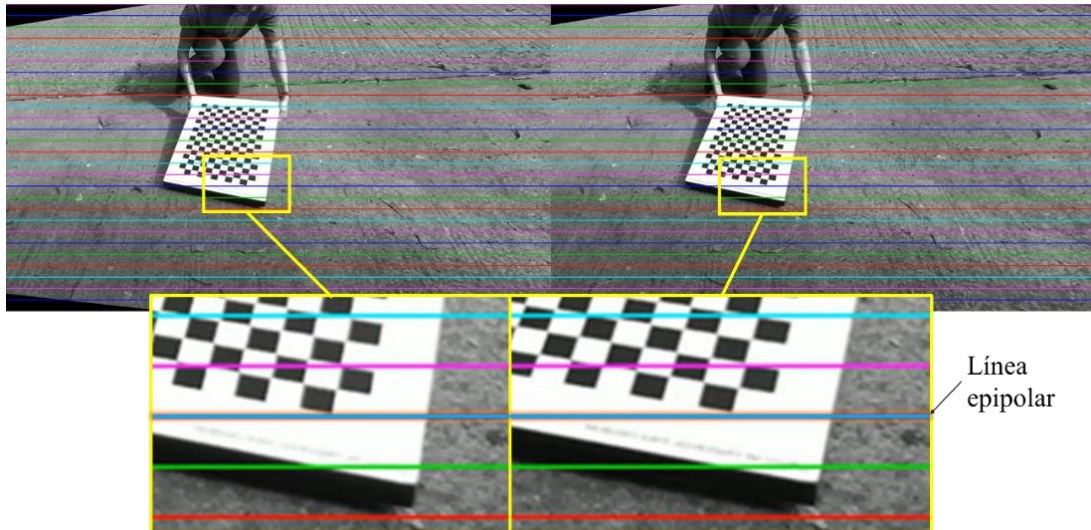
$$R = \begin{bmatrix} 0,9999 & 0,0015 & 0,0093 \\ -0,0013 & 0,9997 & -0,0206 \\ -0,0092 & 0,0206 & 0,997 \end{bmatrix}$$

Se observa que los valores diagonales son muy cercanos a 1, lo que indica que la rotación respecto al sistema de referencia es mínima. Este sistema de referencia se encuentra establecido en la primera cámara (cámara izquierda), la cual define el origen del sistema de coordenadas tridimensional (X,Y,Z). Por otro lado, los elementos fuera de la diagonal son valores cercanos a 0, lo que sugiere que la cámara está casi alineada con los ejes principales sin una inclinación significativa. Complementariamente, el vector T indica la posición de la cámara en el espacio respecto al sistema de referencia.

$$T = \begin{bmatrix} -11,99 \\ -0,12 \\ -2,88 \end{bmatrix}$$

Este vector indica que la segunda cámara está desplazada principalmente en el eje X (-11,99cm) con respecto a la primera, lo cual corresponde a la línea base del sistema estéreo, siendo esta muy cercano al valor indicado por el fabricante (ver **Tabla 7**). Así mismo, los valores en Y y Z reflejan una mínima desviación de profundidad y altura, lo que confirma una correcta alineación del sistema de captura de imágenes. Una vez completada la calibración, se realizó la rectificación de imágenes, un paso esencial para alinear las vistas de ambas cámaras, garantizando que los pares de píxeles correspondientes se ubiquen en la misma línea epipolar. Esta alineación es clave para mejorar la precisión en el cálculo de la disparidad, la cual representa la diferencia de posición de los puntos en las dos imágenes capturadas.

Figura 48 Rectificación de imágenes, líneas epipolares.



Los resultados obtenidos son la base para el proceso fotogramétrico, que se realiza utilizando las imágenes rectificadas y los parámetros calibrados. La calibración exitosa y la correcta implementación de estos parámetros resultaron fundamentales para garantizar mediciones precisas en la detección y cuantificación de daños en la superficie del pavimento.

6.3.FASE 3: FORMULACIÓN DEL PROTOCOLO PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.

6.3.1. Montaje del sistema de captura

Campo de Visión

En esta etapa, a partir de los parámetros obtenidos durante la calibración de la cámara y la configuración propuesta, se determinó el campo de visión (FOV) y el área de cobertura de la cámara para garantizar que el sistema de captura sea capaz de abarcar un carril completo a lo ancho del pavimento. La cobertura geométrica de la cámara se define como un trapecio, resultado de la inclinación de -45° y la proyección angular del campo de visión sobre la superficie del pavimento (ver **Figura 49**). Esta forma trapezoidal surge de la perspectiva angular generada por la altura de montaje y el ángulo de inclinación, en conjunto con los parámetros ópticos intrínsecos de la cámara.

El campo de visión horizontal y vertical de la cámara fue calculado considerando las características físicas del sensor, como el tamaño de los píxeles ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$) y las dimensiones del sensor dual $1/3''$ 4MP. A partir de los parámetros de calibración, como la distancia focal, se calcularon los ángulos del campo de visión mediante relaciones trigonométricas. El campo de visión (FOV) se define por las ecuaciones (11) y (12). A continuación, se presentan los valores calculados para el campo de visión de la cámara.

Tabla 17 Resultados FOV.

Campo de visión	
FOV_x	$84,63^\circ$
FOV_y	$54,24^\circ$
$DFOV$	$92,50^\circ$

Área de cobertura

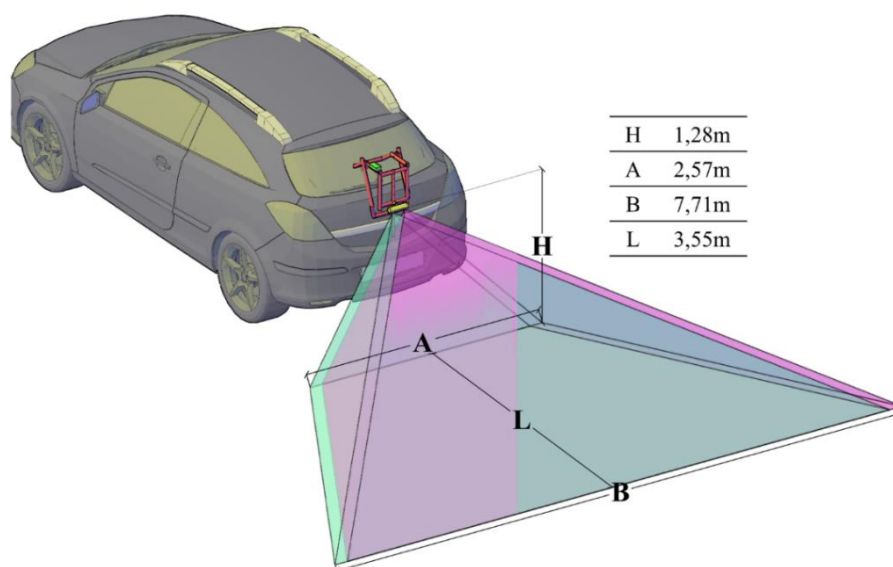
Los resultados obtenidos en cada punto de análisis, correspondientes a las dimensiones proyectadas, se registraron en la **Tabla 18**. A partir de los datos obtenidos con el sensor izquierdo de la cámara estereoscópica, se duplicaron las proyecciones considerando la separación entre ambos sensores. Así considerando la cobertura combinada del sistema, ampliando la cobertura del área observada. Finalmente el área de cobertura proyectada en el pavimento se calculó como el área de un trapecio.

Tabla 18 Distancias de trabajo y Ancho del campo de visión.

Distancias Horizontales [m]		Distancias de trabajo WD [m]		Ancho real D [m]	
x_0	0,41	$\overline{AC}$	4,17	A_3	2,45
x_{co}	1,28	$\overline{AE}$	1,81	A_2	3,30
L	3,55	$\overline{AD}$	1,35	A_1	7,59

Se obtuvo un área de cobertura por cada sensor de $17,84\text{m}^2$, dando como resultado un área total combinada de $18,28\text{m}^2$ y un solapamiento horizontal entre cámaras de $97,54\%$. Además el ancho total de cobertura en los extremos, correspondiente al punto más cercano y lejano del campo de visión proyectado, fue de $2,57\text{m}$ y $7,71\text{m}$, respectivamente. Esta configuración de altura e inclinación de la cámara garantizó la cobertura completa de un carril de $3,65\text{m}$ de ancho, cumpliendo con los requisitos establecidos para el análisis del pavimento y asegurando la captura adecuada de la información vial dentro del área de interés. Finalmente, la **Figura 49** presenta las dimensiones del área de cobertura total de la cámara en el plano del pavimento.

Figura 49 Área de cobertura de la cámara.



Resolución espacial GSD

Para definir la resolución espacial de las imágenes capturadas, se utilizó el área de cobertura proyectada por el campo de visión de la cámara y la resolución de la imagen de 1920x1080 píxeles. A partir de estos valores, se calculó el GSD mediante la ecuación (22). A partir de esto, se obtuvo un valor promedio de GSD de $8.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{píxel}$, lo que equivale a $8.6 \text{ mm}^2/\text{píxel}$. Esta cifra indica que cada píxel en la imagen cubre un área aproximada de 8.6 mm^2 sobre la superficie del pavimento. Para obtener la resolución lineal en milímetro por píxel, se calculó la raíz cuadrada de este valor, lo que da como resultado $2.93 \text{ mm}/\text{píxel}$. Esto significa que, teóricamente, las características mínimas detectables en la superficie del pavimento deben tener al menos 2.93 mm de ancho o largo (equivalente a un píxel) para ser identificadas con confiabilidad.

Es importante destacar que la resolución espacial varía significativamente dependiendo de la distancia a la cámara. En la zona cercana a la cámara, donde la distancia es menor, cada píxel cubre un área más pequeña. Se determinó que la resolución espacial cerca de la cámara es de $2.45 \text{ m}/1920 \text{ px}$ lo que indica que cada píxel representa aproximadamente 1.27 mm en la superficie del pavimento.

En contraste, en la zona más alejada a la cámara, la resolución espacial aumenta a $7.59 \text{ m}/1920 \text{ px}$ lo que significa que los píxeles cubren un área mucho mayor. Esto implica que las características del pavimento serán más fácilmente detectables y con mayor detalle en las zonas cercanas a la cámara, donde la resolución es más alta. Sin embargo, a medida que se aleja la cámara, la resolución disminuye, lo que podría dificultar la detección de irregularidades pequeñas o detalles finos en la superficie del pavimento.

Tabla 19 Resumen Resolución espacial de la cámara.

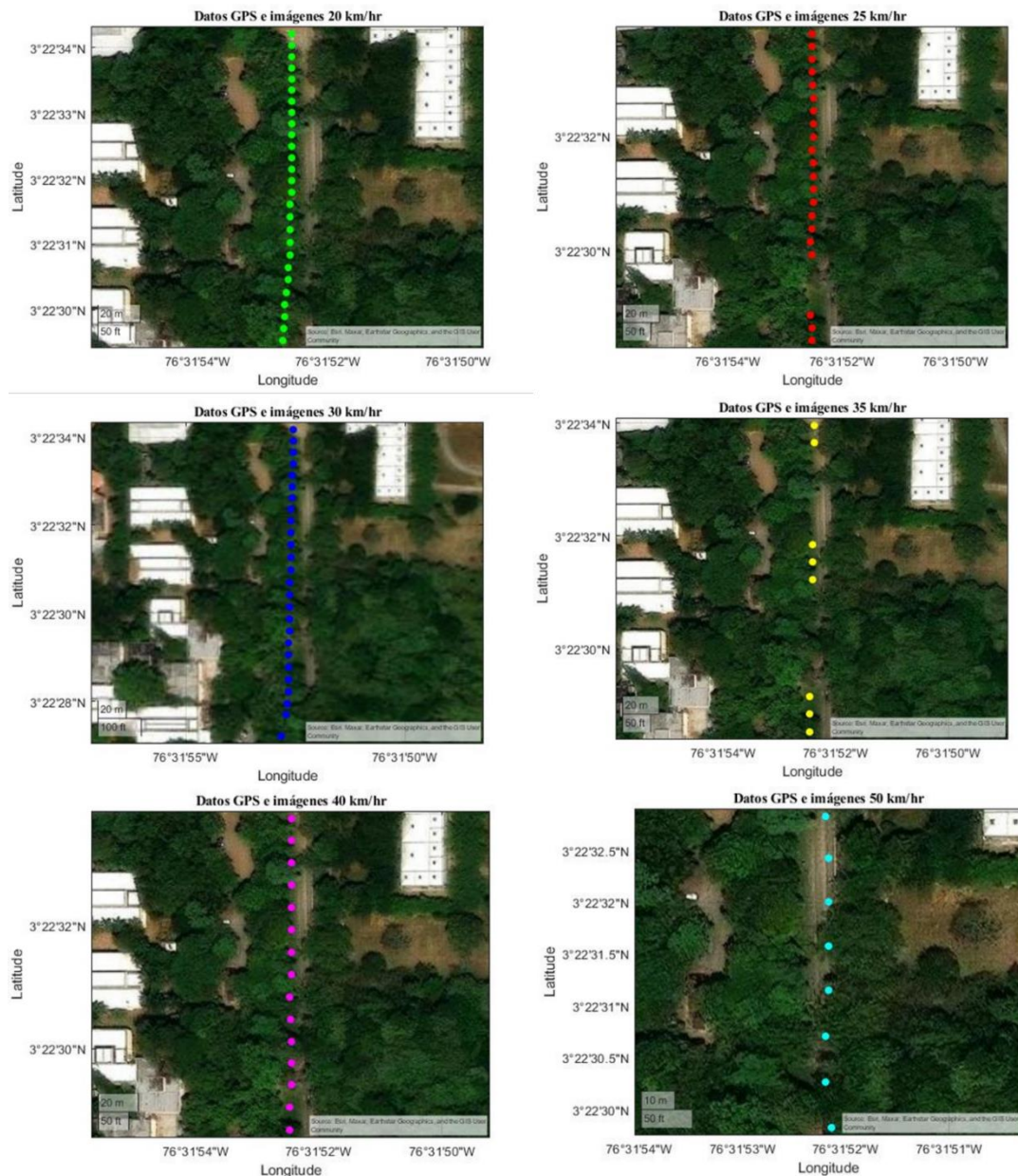
GSD	2.93 mm/píxel
GSD cercano	1.27 mm/píxel
GSD lejano	3.95 mm/píxel

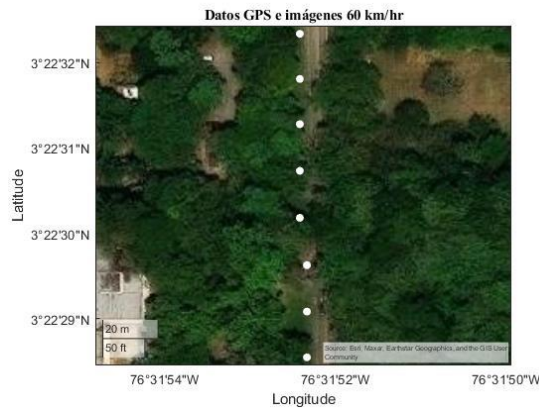
6.3.2. Velocidad de circulación del vehículo

Se llevó a cabo un análisis visual y estadístico de las imágenes capturadas, asociándolas con los valores de nitidez en función de las distintas velocidades. Para ello, se cargaron los datos GPS e imágenes correspondientes únicamente a aquellas que registraron una velocidad cercana a los valores establecidos ($20, 25, 30, 35, 40, 50$ y 60 km/h). Dado que la frecuencia de captura de la cámara es de

5FPS, a medida que aumentaba la velocidad, la cantidad de datos disponibles disminuía proporcionalmente, lo que resultó en una distribución variable de puntos en los gráficos. Esto explica la menor cantidad de datos para velocidades más altas. Se aplicó un filtro geográfico con rangos específicos de longitud y latitud para delimitar la zona de interés y eliminar puntos irrelevantes.

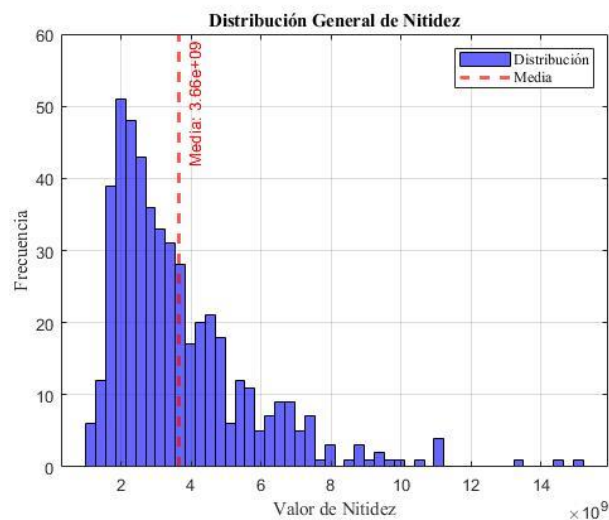
Figura 50 Datos GPS e imágenes para diferentes velocidades.





Con los datos filtrados, se calcularon los valores de nitidez de las imágenes utilizando la variación del gradiente, con el índice de nitidez determinado según el procedimiento detallado en la sección 0. Este coeficiente proporcionó una medida cuantitativa de la claridad de la captura, donde las imágenes con bordes más definidos presentaron coeficientes de nitidez más altos. Para analizar estos resultados de manera detallada, se generaron un histograma y un boxplot. El histograma permitió observar la distribución de los valores de nitidez, destacando la dispersión y el valor central (media) lo que ofreció una medida general de la nitidez.

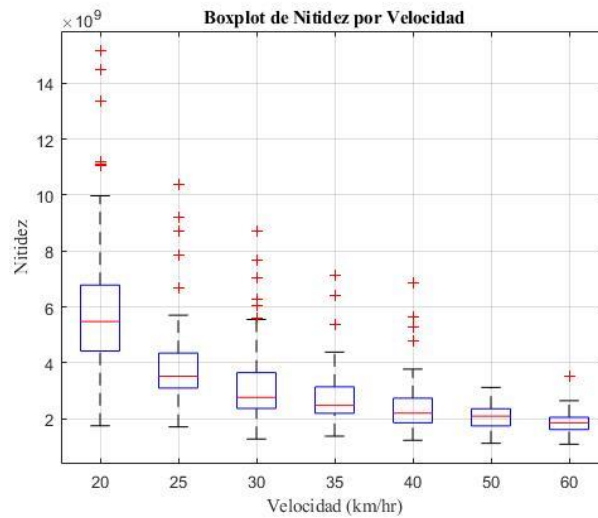
Figura 51 Histograma de índice de nitidez.



El histograma reveló que la mayoría de las imágenes (299 de 495) tenían valores de nitidez por debajo de la media, concentrándose en el rango de 2 a 3.6×10^9 . Este patrón sugiere que una gran parte de las imágenes procesadas no alcanza los niveles más altos de definición, lo cual podría estar relacionado con variaciones en las condiciones de captura, aunque no necesariamente implique baja calidad. Además, se observaron algunos valores extremos, indicando imágenes con alta nitidez, en las cuales los bordes y detalles están claramente definidos, lo que sugiere que en esos casos las condiciones de captura fueron óptimas. En contraste, los valores más bajos de nitidez se asociaron a imágenes borrosas, probablemente debido a falta de enfoque o movimiento excesivo del vehículo.

Por otro lado, el boxplot de nitidez por velocidad ilustró cómo varía la distribución de la nitidez para cada velocidad. En el boxplot, cada grupo de datos (correspondiente a una velocidad) está representado por un cuadro, con una línea central que indica la mediana, los cuartiles que muestran la variabilidad de los datos y los "bigotes" que indican el rango de valores.

Figura 52 Boxplot Nitidez por velocidad.



Este gráfico destacó que, a medida que la velocidad aumentaba, la variabilidad de la nitidez también aumentaba, con menor consistencia en la calidad de las imágenes a altas velocidades. A velocidades de 30 km/h o menores, las imágenes mostraban una mayor consistencia en su calidad, mientras que a velocidades superiores a 35 km/h, los valores de nitidez mostraron una clara disminución en la calidad visual, evidenciada por los valores de mediana más bajos.

Se seleccionó una coordenada específica para evaluar cómo varía el índice de nitidez en un mismo tramo de vía a diferentes velocidades. Este análisis permitió observar de manera precisa cómo la nitidez de la imagen se ve afectada por el aumento de la velocidad de captura. la **Figura 53** facilitó la comparación visual del impacto de la velocidad en la nitidez de las imágenes a 20km/hr, 30km/hr y 60km/hr. Así mismo, se incluye un gráfico en la **Figura 54**, que muestra cómo el índice de nitidez disminuye a medida que aumenta la velocidad, destacando la caída en la calidad de las imágenes.

Figura 53 Imágenes a diferentes velocidades.



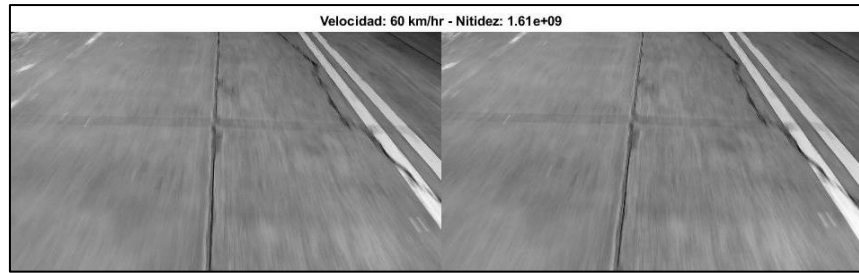
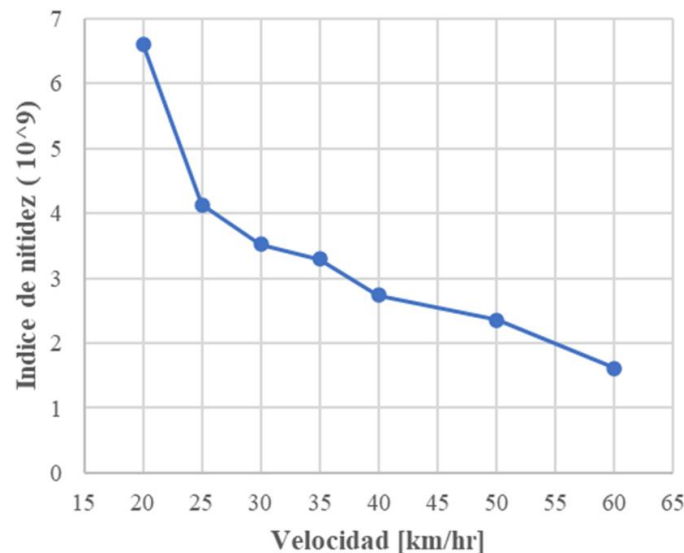


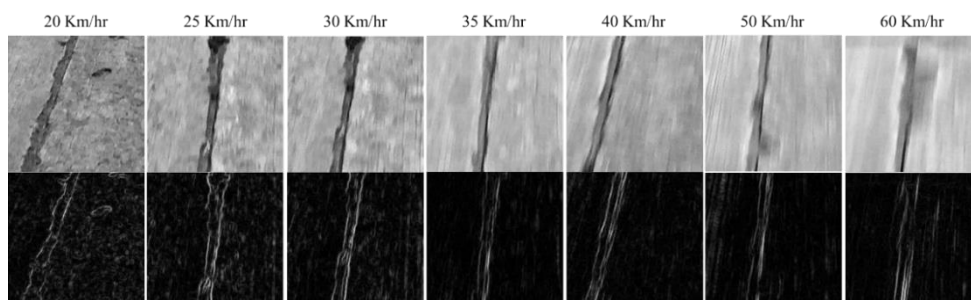
Figura 54 Índice de nitidez por velocidad.



Latitud	3.375567							3° 22' 32.041" N							
Longitud	-76.5312							76° 31' 52.320" W							
Velocidad [km/hr]	20	25	30	35	40	50	60								
Índice de nitidez (10 ⁹)	6.61	4.13	3.52	3.30	2.74	2.36	1.61								

Se generaron figuras adicionales que muestran las imágenes con zoom, tanto de las imágenes originales como de sus gradientes, para una comparación más detallada de la calidad visual de las imágenes a distintas velocidades. Cada imagen fue recortada en una región específica que corresponde a la junta entre dos losas de concreto, una característica, que aunque no es una grieta, puede simularse visualmente como tal, lo que la hace relevante para el análisis de daños en pavimento flexible. Al comparar las imágenes con y sin gradiente, se observó que a velocidades mayores, las imágenes presentaban una pérdida de la definición en los bordes, lo que dificulta la identificación de detalles críticos para el análisis de la superficie del pavimento. A 20km/hr, las imágenes mostraban una nitidez casi completa, con bordes bien definidos y una mínima borrosidad. A 30 km/hr, la nitidez permanecía adecuada, aunque se apreciaba una leve borrosidad que comenzaba a afectar los detalles finos. En cambio, a partir de 35 km/hr, la imagen se volvía considerablemente borrosa, perdiendo definición y detalle necesarios para un análisis preciso.

Figura 55 Imágenes con Zoom.

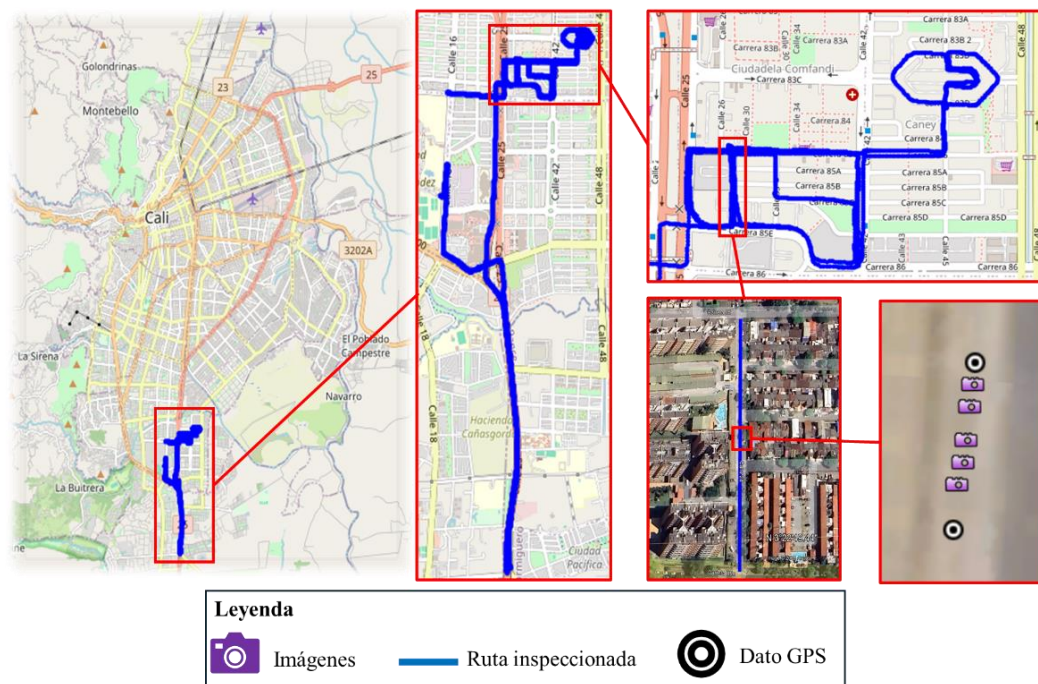


Estas visualizaciones detalladas mostraron cómo, a altas velocidades, los detalles clave de las imágenes se volvían menos claros. En cambio, a bajas velocidades, las imágenes mantenían una mayor definición y detalle, esenciales para un análisis preciso de la superficie del pavimento. A partir de los análisis visuales y estadísticos, se define que velocidades superiores a 30km/hr reducen significativamente la nitidez de las imágenes, lo que afecta la precisión del análisis posterior. Este deterioro en la calidad de las imágenes se atribuye al movimiento del vehículo y a la mayor dispersión en los valores de nitidez a velocidades más altas. Por lo tanto, se establece que el vehículo circule a una velocidad máxima de 30km/hr para garantizar que las imágenes sean lo suficientemente nítidas y permitan un análisis detallado y preciso de la superficie del pavimento.

6.3.3. Integración de la captura de imágenes con su ubicación mediante GPS

El sistema de adquisición de datos se integró de manera precisa la captura de imágenes con las coordenadas geospaciales utilizando el módulo GPS. Este módulo recopiló las coordenadas de latitud y longitud, así como las marcas de tiempo asociadas a cada captura. Los datos se transmitieron del sistema de procesamiento, donde se realizan varias etapas para garantizar la correcta sincronización entre las imágenes y las coordenadas GPS.

Figura 56 Datos GPS capturados para una salida de campo.



Sincronización de la hora y Captura de datos

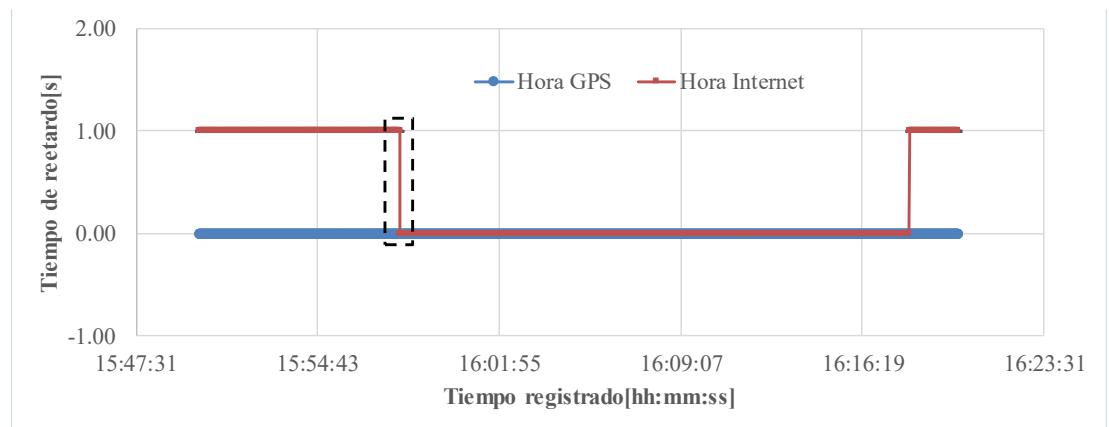
La Raspberry Pi Zero obtuvo la hora actual a través de Wi-Fi, lo que asegura una sincronización precisa entre los datos GPS y las imágenes capturadas. Esta marca de tiempo fue esencial para garantizar que cada imagen se asocie correctamente con su ubicación en el momento exacto de captura. Cuando la conexión a internet no está disponible, el sistema sigue recopilando y almacenando los datos GPS en una tarjeta microSD, asegurando que el proceso de adquisición no se vea interrumpido. Esta estrategia permite mantener la precisión temporal de los datos, incluso cuando las condiciones de conectividad cambian.

Ajuste por latencia y corrección temporal

Se identificó que en ocasiones se presenta un tiempo de retardo entre los datos GPS y la hora de internet, debido a factores como la latencia de la conexión de red, la distancia de los servidores NTP

y la congestión de la red. Este desfase, que ocurría durante ciertos momentos de captura de datos, puede causar variaciones menos predecibles en comparación con las interrupciones en la señal GPS. Para corregir este desfase y asegurar una sincronización precisa, se decidió restar un segundo de la hora de internet durante los periodos en los que no estaba completamente sincronizada con la hora GPS. Este ajuste permitió compensar la latencia observada y mantener una alineación temporal precisa entre los datos GPS e imágenes capturadas. La **Tabla 20** y la **Figura 57** presentan un análisis del retraso entre la hora GPS y la hora de Internet, mostrando una diferencia de solo un segundo. En algunos segmentos de tiempo, no se observó ningún retraso, lo que indicó que la sincronización entre el GPS y la hora de Internet se mantuvo con alta precisión en la mayoría de los casos.

Figura 57 Diferencias entre los datos de tiempo GPS y de tiempo de internet.



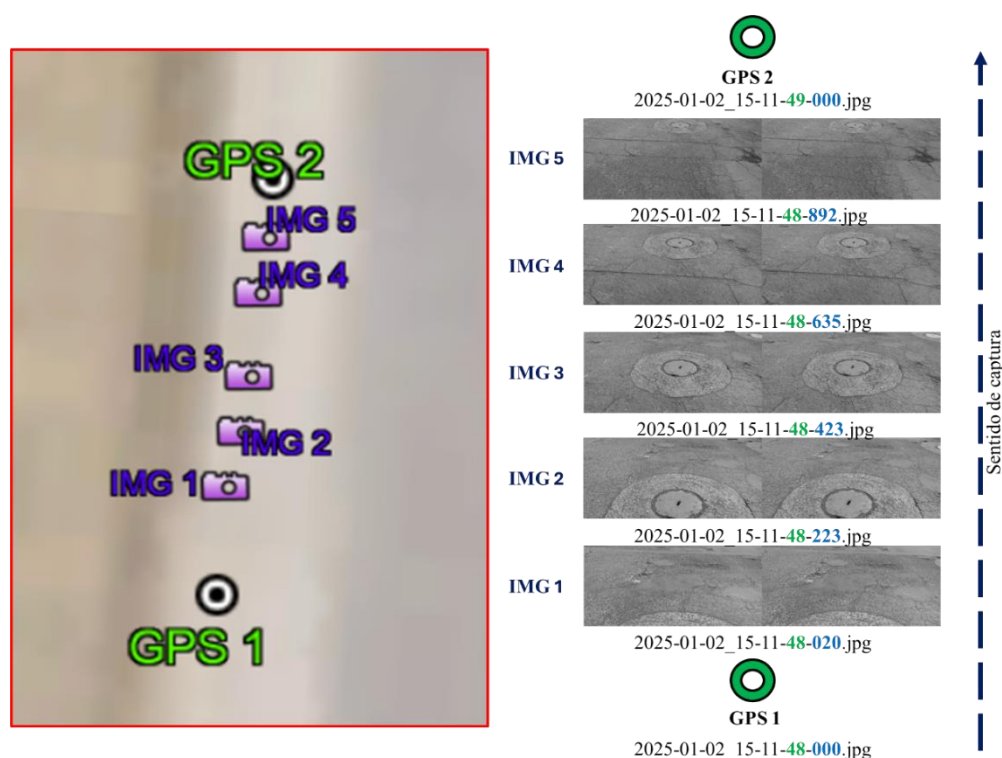
Hora GPS	15:57:54	15:57:55	15:57:56	15:57:57	15:57:58	15:57:59	15:58:00	15:58:01	15:58:02	15:58:03
Hora Internet	15:57:55	15:57:56	15:57:57	15:57:58	15:57:59	15:57:59	15:58:00	15:58:01	15:58:02	15:58:03

Fuente: Tello-Cifuentes et al., 2024.

Procesamiento de los datos GPS

El intervalo de recopilación de los datos GPS es de 1 segundo, mientras que las imágenes de la cámara se toman a una frecuencia de 5 fotogramas por segundo (FPS). Para garantizar una sincronización temporal precisa, se compararon las marcas de tiempo de las imágenes con las del GPS. Dado que los datos GPS se capturan cada segundo y las imágenes se tomaron en intervalos de 0.2 segundos aproximadamente, se asignan los fotogramas de la cámara a los intervalos correspondientes dentro de cada segundo de captura de datos GPS.

Figura 58 Asignación de fotogramas de la cámara a los intervalos de un segundo GPS.



Georeferenciación de las imágenes

Se realizó una interpolación lineal de los valores de latitud, longitud y velocidad. Dado que los datos GPS se capturaron a intervalos de 1 segundo y las imágenes se tomaron a 5 FPS los fotogramas carecen de la información correspondiente. La interpolación lineal aseguró que cada fotograma tenga asociados los valores continuos y consistentes de latitud, longitud y velocidad, lo que permite mantener la sincronización precisa entre las imágenes y las coordenadas geoespaciales. En la **Tabla 20** se muestran un ejemplo de los datos GPS interpolados para las imágenes dentro de un intervalo de 1 segundo. Además este proceso de interpolación puede observarse visualmente en la **Figura 58**, donde se ilustran las coordenadas GPS asignadas a cada imagen en función de las marcas de tiempo.

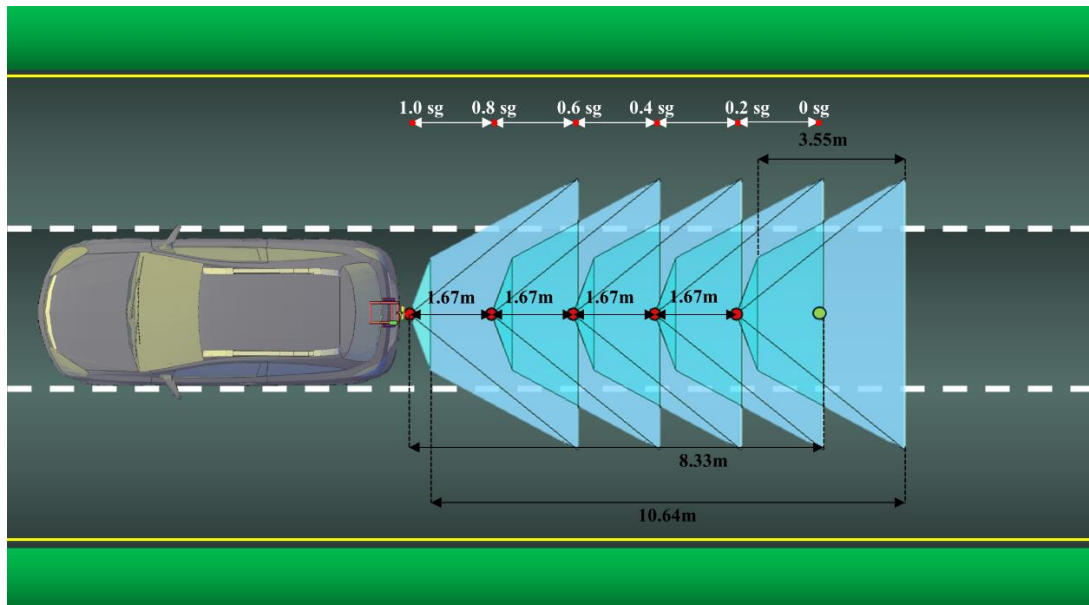
Tabla 20 Datos GPS interpolados para imágenes dentro de un intervalo de 1 segundo.

Dato	Hora	Latitud	Longitud	Velocidad [km/hr]
GPS 1	15:11:48,000	3,3810058	-76,5234135	16,7
IMG 1	15:11:48,020	3,3810125	-76,5234131	16,69
IMG 2	15:11:48,223	3,3810192	-76,5234127	16,68
IMG 3	15:11:48,423	3,3810259	-76,5234123	16,67
IMG 4	15:11:48,635	3,3810326	-76,5234119	16,65
IMG 5	15:11:48,892	3,3810393	-76,5234115	16,64
GPS 2	15:11:49,000	3,381046	-76,5234112	16,62

Finalmente, se filtraron los datos GPS que no son relevantes, eliminando aquellos con velocidades inferiores a 1 km/h ya que estos no contribuyen significativamente al análisis de las imágenes capturadas. Este filtro permitió reducir un porcentaje considerable de los datos, optimizando el procesamiento posterior de la información. Además, los datos GPS se filtran según el rango de fechas

de las imágenes, garantizando que solo se utilicen los datos relevantes dentro del periodo en el que se tomaron las imágenes. Los datos filtrados y sincronizados se almacenan en un archivo Excel, que permite su posterior análisis.

Figura 59 Definición del área de detección para un segmento de carretera.



6.4.FASE 4: VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

6.4.1. Método digital frente a método manual

Los tramos evaluados corresponden a dos vías ubicadas en la zona del Barrio Caney, en la ciudad de Cali. La Vía 1, que abarca el carril derecho de la Calle 28 entre Carrera 85 y 85E, con una longitud de 200 metros el cual presentó baches de diversas dimensiones. Por otro lado, la Vía 2, correspondiente a la Calle 45 y la Carrera 83D 3, con una longitud de 75 metros, presentó daños en forma de piel de cocodrilo en ambos carriles.

Figura 60 Imagen satelital Vía 1.



Figura 61 Imagen satelital Vía 2.



Comparación de mediciones de Daños representativos

En la medición de daños en la vía 1, se identificaron manual y digitalmente 11 baches diferentes en la zona analizada. Para cada uno de estos baches, se obtuvieron las medidas del diámetro y el área tanto con el método manual como con el digital. En el caso del área, se utilizó el producto de las máximas dimensiones del bache (ancho y largo). Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 21**, donde se muestra la diferencia entre las mediciones manuales y digitales para cada bache.

Se observa que las diferencias en la medición del diámetro entre ambos métodos son inferiores al 8.54%, lo que demuestra una precisión de hasta un 91,46% en esta medición, lo cual es crucial para determinar la severidad del bache. Sin embargo, para algunos baches, se registran diferencias más significativas en el área, lo que puede atribuirse a variaciones en la forma o irregularidades de los baches, así como a la variabilidad inherente en cómo se mide el bache, tanto en campo como digitalmente. Estas diferencias resaltan la efectividad del sistema digital para medir los baches, aunque algunas áreas de mayor complejidad geométrica muestran un mayor margen de error.

Tabla 21 Diferencia entre medida digital y manual de los baches.

Daño	Diámetro (cm)			Área (cm ²)		
	Manual	Digital	Error %	Manual	Digital	Error %
1	87,32	86,75	0,66	3752	3188,47	15,02
2	76,49	78,42	2,52	2907	3069,06	5,57
3	90,03	90,61	0,65	4012	4065,71	1,34
4	59,91	65,02	8,54	1650	1929,08	16,91
5	45,49	45,42	0,15	950	928,67	2,25
6	120,25	128,43	6,80	7050	7932,46	12,52
7	93,51	89,95	3,81	4340	4043,34	6,84
8	47,51	47,28	0,48	984	870,68	11,52
9	45,28	45,08	0,44	1023	1008,98	1,37
10	39,40	39,26	0,34	576	579,99	0,69

En la medición de la Vía 2, se identificaron daños de tipo Piel de cocodrilo tanto manual como digitalmente a lo largo de toda la vía. Para este tipo de daño se registró el área afectada y el espesor de las grietas mediante ambos métodos. En cuanto a la determinación del área de cobertura del daño, se emplearon enfoques diferentes. El primer enfoque (A) consistió en calcular el área de daño digitalmente

tomando el ancho de la vía (o carril, según sea el caso) y multiplicándolo por la longitud total del daño, replicando el enfoque utilizado manualmente en campo. Este enfoque se basó en una medición más general del daño.

Tabla 22 Diferencia entre medida digital y manual de la piel de cocodrilo (A).

Daño	Espesor de grieta (cm)			Área (m ²)		
	Manual	Digital	Error %	Manual	Digital	Error %
1	4,50	4,98	10,67	156	156	0,00
2	4,50	4,93	9,56	138	138	0,00

El segundo enfoque (B), aplicado únicamente en el ámbito digital, consistió en medir el área que realmente ocupa el daño (en este caso, la malla de grietas) detectado, lo cual resultó en un valor significativamente diferente.

Tabla 23 Diferencia entre medida digital y manual de la piel de cocodrilo (B).

Daño	Espesor de grieta (cm)			Área (m ²)		
	Manual	Digital	Error %	Manual	Digital	Error %
1	4,50	4,98	10,67	156	61,2	60,77
2	4,50	4,93	9,56	138	70,3	49,06

Al comparar ambos enfoques de medición, se observa una discrepancia significativa en los valores del área, especialmente cuando se aplica el método digital más detallado, que se enfoca exclusivamente en medir el área ocupada por la malla de grietas. En este caso, el enfoque digital más específico muestra un área considerablemente menor en comparación con el enfoque general. Sin embargo, este enfoque ofrece una medición más precisa, ya que se centra únicamente en la parte del daño efectivamente afectada por las grietas, excluyendo las áreas adyacentes que no presentan daños visibles.

Cálculo del PCI

El cálculo del Índice de Condición del Pavimento se llevó a cabo tanto mediante el método manual como de forma digital, siguiendo el procedimiento detallado en la metodología. En el caso del método manual, las mediciones se realizaron durante la inspección visual in situ, considerando el diámetro, la abertura de las grietas y el área de los daños, los cuales fueron clasificados según su severidad. En contraste, el enfoque digital permitió obtener mediciones precisas utilizando imágenes segmentadas y procesadas mediante técnicas avanzadas de visión artificial, tal como se explicó en la metodología.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de ambos métodos para la Vía 1 y Vía 2, los cuales incluyen el cálculo de la severidad de cada daño, la densidad del daño (D), el valor deducido (DV) y el PCI correspondiente. En las **Tabla 24 y 25** se detallan los valores obtenidos para cada unidad de muestra de la Vía 1, mostrando tanto los resultados de los baches detectados manualmente como los calculados digitalmente. En cuanto a la precisión del método digital, se observó que los errores absolutos en el valor del PCI por unidad de muestreo fueron de un máximo de 2 unidades, lo que refleja una alta concordancia con los resultados obtenidos manualmente, subrayando la eficacia y precisión del enfoque digital en la evaluación del pavimento.

Tabla 24 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 3-Vía 1.

Método de evaluación	Daño	Diámetro (cm)	Área (m ²)	S (-)	D (%)	DV (-)	PCI (-)	Error (-)
Digital	Bache	86,75	0,319	H				
	Bache	78,42	0,307	H	3,26	79	17	1
	Bache	90,61	0,407	H				

Manual	Bache	65,02	0,193	H	2,53	50	18
	Bache	89,95	0,404	H			
	Bache	47,28	0,087	M			
	Bache	45,08	0,101	M			
	Bache	39,26	0,058	M			
	Bache	87,32	0,375	H	3,37	80	
	Bache	76,49	0,291	H			
	Bache	90,03	0,401	H			
	Bache	59,91	0,165	H			
	Bache	93,51	0,434	H			
	Bache	47,51	0,098	M	2,53	50	
	Bache	45,28	0,102	M			
	Bache	39,40	0,058	M			

Tabla 25 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 4-Vía 1.

Método de evaluación	Daño	Diámetro(cm)	Área (m²)	S (-)	D (%)	DV (-)	PCI (-)	Error
Digital	Bache	45,42	0,093	H	2,18	69	31	2
	Bache	128,43	0,793	H				
Manual	Bache	45,49	0,095	H	2,03	67	33	
	Bache	120,25	0,705	H				

En la Vía 2, se utilizaron dos enfoques distintos para calcular el área de daño de manera digital, lo que resultó en dos valores de PCI diferentes para la misma vía. El primer enfoque replicó el cálculo manual utilizando el ancho de la vía y la longitud del daño, mientras que el segundo enfoque se centró en medir exclusivamente el área ocupada por las grietas detectadas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los enfoques.

En las **Tabla 26 y 27** se observa una estrecha concordancia entre los valores del PCI calculados mediante el método manual y digital, con un error absoluto de 0 en ambas unidades de muestra. Esto sugiere que el primer enfoque digital, basado en la medición general del área de daño utilizando el ancho de la vía y la longitud del daño, proporciona una evaluación similar a la realizada manualmente, con respecto tanto a la severidad como al valor deducido (DV). Ambas tablas presentan los resultados de las mediciones para el daño tipo Piel de cocodrilo en la Vía 2, mostrando que los valores de severidad (S), densidad de daño (D), y PCI son idénticos en ambos métodos de evaluación.

Tabla 26 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 1-Vía 2 (A).

Método de evaluación	Daño	Espesor de la grieta (mm)	Área (m²)	S (-)	D (%)	DV (-)	PCI (-)	Error ()
Digital	Piel de cocodrilo	49,86	156	M	70,84	72	28	0
Manual	Piel de cocodrilo	45,00	156	M	70,84	72	28	

Tabla 27 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 2-Vía 2 (A).

Método de evaluación	Daño	Espesor de la grieta (mm)	Área (m²)	S (-)	D (%)	DV (-)	PCI (-)	Error ()
----------------------	------	---------------------------	-----------	-------	-------	--------	---------	----------

Digital	Piel de cocodrilo	49,38	138	M	62,67	71	29	0
Manual	Piel de cocodrilo	45,00	138	M	62,67	71	29	

En los resultados obtenidos con el segundo enfoque de medición digital, donde se consideró únicamente el área directamente ocupada por el daño (malla de grietas), se observa una discrepancia significativa en los valores del PCI en comparación con los resultados obtenidos mediante el método manual. A pesar de que las mediciones de espesor de grieta son consistentes entre los métodos, el valor del PCI calculado digitalmente es considerablemente mayor que el calculado manualmente, con errores absolutos de -41 y -38 unidades en las unidades de muestra 1 y 2, respectivamente.

Tabla 28 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 1-Vía 2 (B).

Método de evaluación	Daño	Espesor de la grieta (mm)	Área (m ²)	S (-)	D (%)	DV (-)	PCI (-)	Error ()
Digital	Piel de cocodrilo	49,86	61,2	M	27,79	31	69	-41
Manual	Piel de cocodrilo	45,00	156	M	70,84	72	28	

Tabla 29 Comparación del PCI calculado mediante un modelo digital e inspección in situ; unidad de muestra N.º 1-Vía 2 (B).

Método de evaluación	Daño	Espesor de la grieta (mm)	Área (m ²)	S (-)	D (%)	DV (-)	PCI (-)	Error ()
Digital	Piel de cocodrilo	49,38	70,3	M	31,91	33	67	-38
Manual	Piel de cocodrilo	45,00	138	M	62,67	71	29	

En resumen, los resultados obtenidos para las Vías 1 y 2 muestran una alta concordancia entre los valores del PCI calculados manual y digitalmente en el primer enfoque, con un error absoluto de 0. Sin embargo, en el segundo enfoque digital, que solo consideró el área ocupada por las grietas, los valores del PCI fueron significativamente más altos, con errores absolutos de hasta -41 unidades. Esta discrepancia se debe a la variabilidad en la medición del área de daño, destacando la importancia del enfoque utilizado en el cálculo del PCI. Y su impacto en la evaluación final del estado del pavimento.

Comparación de los tiempos y costos de adquisición de datos

La comparación entre los tiempos empleados en la adquisición de datos con los métodos manual y digital se centró en la eficiencia de cada metodología para la recolección de información relacionada con los daños en el pavimento. En el enfoque manual, la captura de datos se realizó durante la inspección visual in situ, que incluyó la identificación de los daños, la medición de dimensiones y la clasificación de estos según su severidad. Este proceso se llevó a cabo de forma directa por el personal en el campo, donde el tiempo de recolección dependió de la extensión de la vía a analizar, el tráfico, las condiciones climáticas y la experiencia de los evaluadores.

Por otro lado, el proceso digital implicó la captura de imágenes estereoscópicas, así como su posterior segmentación y análisis mediante técnicas de visión artificial. La recolección de datos en este enfoque fue más rápida que en el método manual, debido a la automatización del proceso de medición. A continuación, se presentan los tiempos comparativos entre ambos métodos. En la **Tabla 30** se muestra el tiempo total empleado para la captura de datos de las unidades de muestra en la Vía 1 y Vía 2, tanto en el enfoque manual como en el digital.

Tabla 30 Comparación de tiempos de adquisición de datos entre métodos manual y digital.

Método	Vía 1 (min)	Vía 2 (min)	Tiempo total (min)
Manual	52	37	89
Digital	1,14	3,45	4,59

Es evidente que la metodología digital ofrece una ventaja significativa en cuanto a la velocidad de recolección de datos en comparación al método manual. Esta diferencia de tiempos resalta la eficiencia del enfoque digital, que no solo reduce considerablemente el tiempo de recolección, sino que también elimina la exposición a riesgos para los inspectores, ya que el proceso se realiza de manera remota a través de imágenes estereoscópicas y procesamiento automatizado.

En cuanto a los costos asociados a los dos métodos, se evaluaron los recursos materiales y humanos necesarios para cada uno. El enfoque manual, aunque requiere menos equipos, demanda una mayor cantidad de personal especializado en la inspección visual y en la medición de los daños. Este método también implica costos relacionados con el transporte, el personal en campo y el tiempo invertido en la inspección, que tiende a ser más prolongado debido a la naturaleza manual de la tarea.

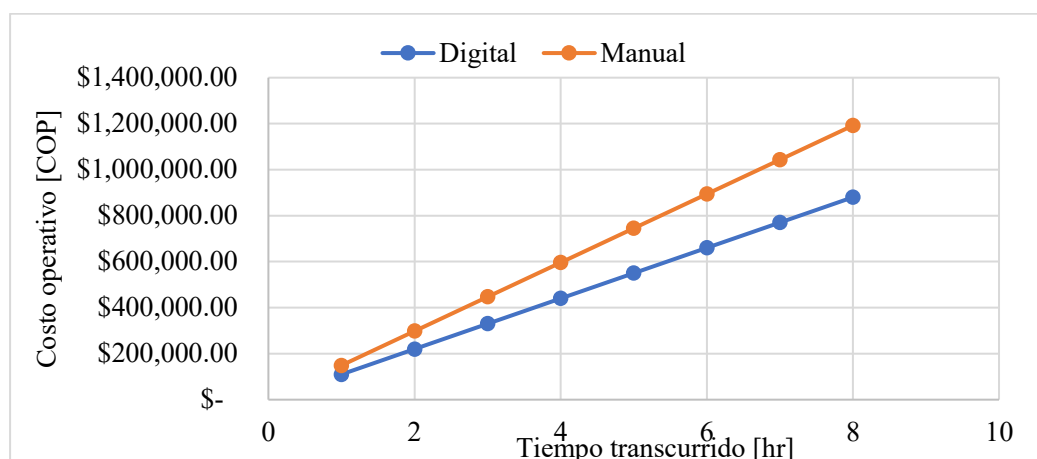
El método digital, por su parte, requiere equipos, como cámaras estéreo y sistemas de procesamiento de imágenes, así como personal capacitado para operar las herramientas y software de análisis. La **Tabla 31** presenta una comparación de los costos asociados a cada método, incluyendo equipos, materiales y personal. Se estimaron los costos de operación tanto del sistema propuesto como el método manual convencional, considerando un lapso de 1hr, incluyendo también el cálculo de la longitud que es posible cubrir en un mismo periodo para cada método.

Tabla 31 Comparación de costos operativos entre los métodos manual y digital.

Método	Ítem	Valor \$/hr	Cantidad	Subtotal	Total	km Inspeccionados
Digital	Conductor	\$ 30,000.00	1	\$ 30,000.00	\$ 119,085.00	25
	Técnico especializado	\$ 80,000.00	1	\$ 80,000.00		
	Vehículo	\$ 9,085.00	1	\$ 9,085.00		
Manual	Administrador vial	\$ 80,000.00	1	\$ 80,000.00	\$ 140,000.00	0,25
	Técnico	\$ 30,000.00	2	\$ 60,000.00		

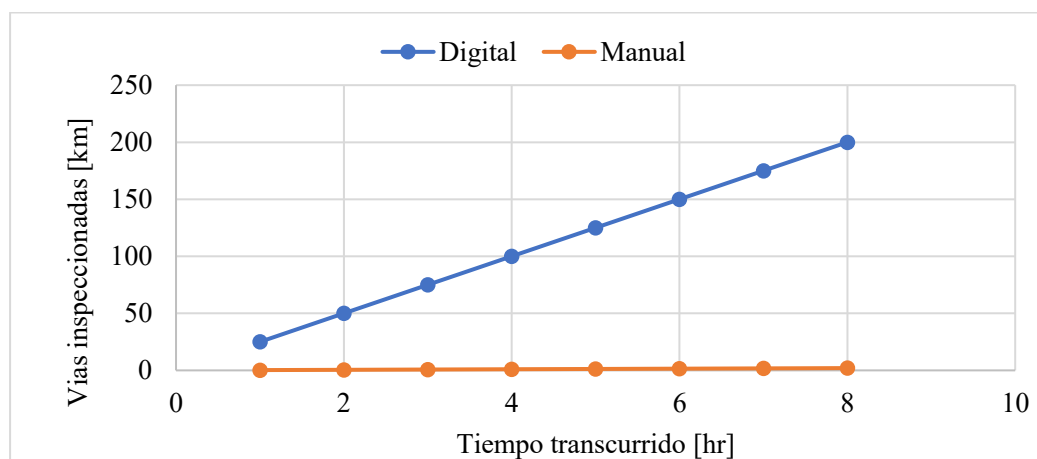
Con el fin de visualizar de forma clara el impacto operativo de ambos métodos, se elaboraron dos gráficos comparativos. El primero presentó una estimación de la evolución de los costos de operación acumulados durante una jornada de 8 horas, mientras que el segundo mostró una estimación de la distancia total que se pudo inspeccionar en ese mismo intervalo de tiempo utilizando cada uno de los métodos evaluados.

Figura 62 Costos operativos Manual vs Digital.



Para el método digital, se asumió una velocidad promedio constante de 25 km/h, basada en las pruebas realizadas con el sistema propuesto. En el caso del método manual, la distancia cubierta se determinó a partir de la experiencia previa en trabajos de campo, lo que permitió establecer un ritmo realista de avance para este tipo de inspección.

Figura 63 Km de vías inspeccionadas Manual vs Digital.



En el caso del método manual, los costos asociados a la adquisición de equipos y materiales fueron de \$564.200 pesos colombianos, ya que solo se requirieron de instrumentos básicos de medición, equipos de protección personal y formatos de registro físicos. En comparación, el método digital presentó un costo inicial más alto debido a la adquisición de equipos (\$8.306.116,54 COP), pero los costos de personal y tiempo de trabajo son considerablemente menores, lo que lo convierte en una opción más eficiente a largo plazo, especialmente en proyectos de mayor envergadura.

En resumen, aunque el método manual fue más económico en términos de equipos, el enfoque digital demostró ser más eficiente en la recolección de datos, lo que redujo el tiempo de trabajo y el personal requerido. A pesar de su mayor costo inicial en equipos, el método digital resultó ser más rentable, gracias a su capacidad para automatizar la captura de información y agilizar el proceso de medición y análisis digital. En términos de costos estimados por jornada, el método manual presentó un incremento constante, alcanzando \$1.192.000 COP, mientras que el método digital totalizó \$880.000 COP, lo que refleja una diferencia significativa en eficiencia económica operativa. Además, el sistema digital fue capaz de inspeccionar hasta 200 km en 8 horas, mientras que el método manual solo cubrió 2 km, mostrando una mejora sustancial en el alcance operativo con una eficiencia 100 veces superior en distancia cubierta.

6.4.2. Enfoque 3D

El análisis de los baches se llevó a cabo mediante la reconstrucción tridimensional (3D) de la superficie del pavimento, utilizando el software SDK de la cámara estéreo ZED 2i. Se capturaron aproximadamente 170 fotogramas por bache a intervalos regulares, lo que permitió obtener una cobertura completa de la zona afectada. Estas capturas se realizaron a una velocidad máxima de 5km/hr, pasando varias veces por encima del daño para asegurar una alta densidad de imágenes. Este proceso se llevó a cabo con tres baches representativos seleccionados dentro de la Universidad del Valle, los cuales variaban en forma y tamaño. Con las imágenes obtenidas se generó una nube de puntos detallada que representa con precisión la topografía de cada bache.

Figura 64 Nube de puntos de los baches seleccionados.

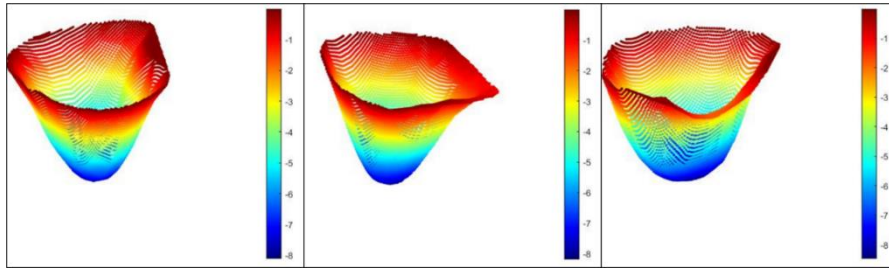
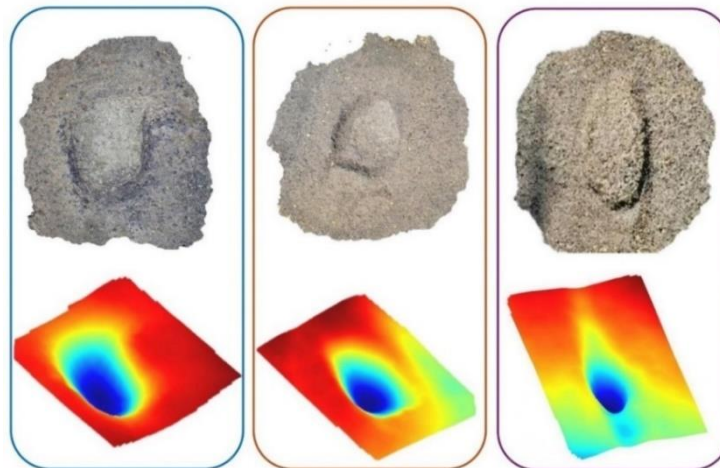


Figura 65 Imágenes y superficies generadas de los baches capturados.



Fuente: Tello-Cifuentes et al., 2024.

A partir de la nube de puntos generada, se reconstruyeron las superficies de los tres baches seleccionados mediante un algoritmo de triangulación, el cual conecta puntos adyacentes para formar una malla poligonal representativa de la geometría del bache. Esta malla fue utilizada para la estimación de las características geométricas de los daños, como el volumen de los baches. El cálculo del volumen se realizó utilizando la fórmula del determinante, ecuación (24). El volumen de cada tetraedro fue calculado y luego sumado para obtener el volumen total del bache.

Figura 66 Superficie usada para determinar el volumen digitalmente.

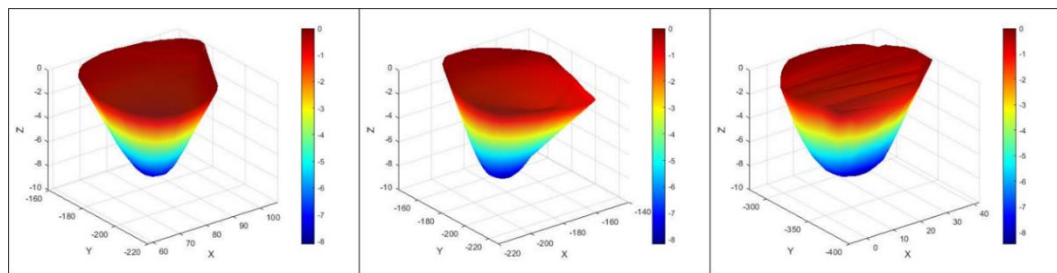
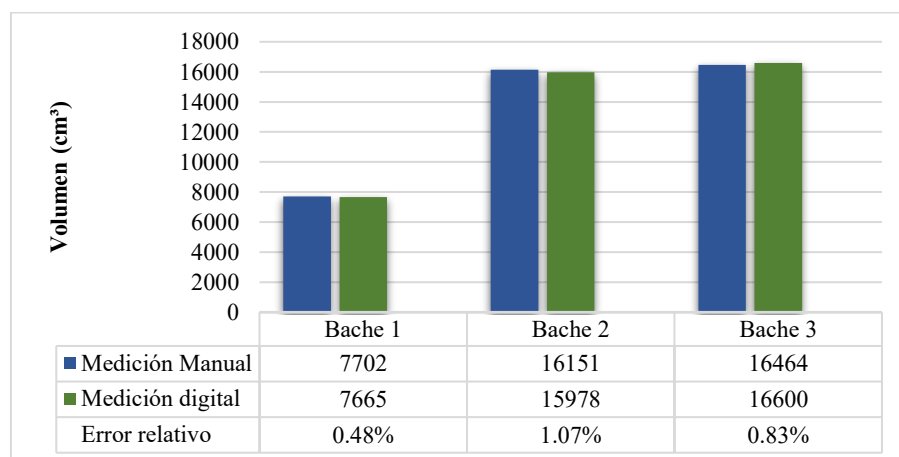


Figura 67 Medición manual del Volumen.



La medición manual del volumen de los baches se realizó utilizando el método tradicional de cono y arena conforme a las normas. Los volúmenes estimados para los tres baches fueron de 7.702 cm³, 16.151 cm³ y 16.464 cm³, respectivamente. La comparación con el método automatizado mostró una precisión destacable, con un error relativo global del 0,80 % y una precisión del 99,20 %, validando la confiabilidad del enfoque digital frente a los métodos tradicionales.

Figura 68 Comparación entre Medición Manual y Digital del Volumen de Baches.



A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume los resultados de este trabajo y de otros estudios relevantes en el ámbito de la evaluación de pavimentos. Esta tabla compara aspectos como los equipos utilizados, los costos, la captura de datos, las mediciones obtenidas y las evaluaciones realizadas, destacando las diferencias en los métodos de medición y las ventajas del enfoque digital en términos de eficiencia, precisión y costos.

Tabla 32 Comparativa de Métodos y Resultados en la Medición y Evaluación de Pavimentos Utilizando Diferentes Tecnologías.

REFERENCIAS	Equipos	Costos	Captura de datos	Medición	Evaluación
Autor	•Automóvil •Cámara estéreo ZED 2i •Módulo GPS (Raspberry pi + GPS) •Computador portátil •Estructura de soporte	Bajo	•25 km/hr •No requiere cierre de la vía •5FPS	Medición 2D y 3D con imágenes estereoscópicas mostró un error máximo del 8,54% en el diámetro de los baches, 16,91% en el área y 1,07% en el volumen	El cálculo del PCI digital mostró una diferencia máxima de 2 unidades respecto al trabajo en campo. Sin embargo, en el segundo enfoque para el análisis de AC, al considerar solo el área afectada, la diferencia alcanzó hasta -41 unidades.
[Perri et al., 2025]	•Vehículo Aéreo no tripulado (UAV) •GPS	Alto	•30 min por cada 800m •Requiere cierre completo de la vía	•Medición 2d en ortofotografías •Errores promedios de 3,7% y 4,24% en la longitud y ancho de las grietas respectivamente	Cálculo del PCI automáticamente con una desviación de $\pm 1,33\%$ respecto a la medición manual
[Ortega Rengifo et al., 2024]	•Aeronave no tripulada (UAS) DJI Mavic Air •Cámara de 12 MP •IMU y GPS	Alto	•20 min por cada 100m •Requiere cierre completo de la vía	•Medición 2D en ortofotografías •Variaciones de medidas de daño respecto a en campo de -14,9% a +42,4%	Cálculo del PCI y VIZIR de forma automática mostraron una calificación similar del estado del pavimento, aunque PCI presentó una ligera diferencia entre la evaluación con los datos de campo
[Carrillo, 2024]	Vehículo Aéreo no tripulado (UAV)	Alto	-	•Medición 2D en ortografías •Medición por medio de Qgis y ArcGIS Pro	Software comercial para el cálculo del PCI (EVALPAL)
[Luo et al., 2023]	•Automóvil •Sistema visión estéreo binocular •IMU y GNSS •Kit de desarrollo (GPU y CPU)	Alto	•100 km/ hr •No requiere cierre de la vía •30 FPS	-	-
[Anvo et al., 2023]	•Automóvil •Cámara estéreo ZED 2i	Moderado	•25 km/hr •No requiere cierre de la vía •50 FPS	-	-
[Lin et al., 2023]	Cámara RGB-D estéreo infrarrojo activo	Bajo	60 FPS	•Medición de área y volumen en nubes de puntos •Errores medios absolutos de 13,2% en área y 10,5% en volumen para baches y para	-

REFERENCIAS	Equipos	Costos	Captura de datos	Medición	Evaluación
				grietas errores del orden de 6,5%	
[Guan et al., 2021]	•Automóvil •Sistema visión estéreo •Cámaras GoPro Hero 8 de 12MP	Bajo	•15 km/hr •No requiere cierre de la vía •2-10 FPS	•Medición de profundidad y volumen de baches en nube de puntos •Errores relativos promedio de 5,40% en profundidad y 4,62% en volumen	-
[Tello-Cifuentes et al. 2021]	•Automóvil •Cámara GoPro de 11 MP •Smartphone •Estructura de soporte	Bajo	•25-30 km/hr •No requiere cierre de la vía	-	-
[Joni et al., 2020]	•Automóvil •Cámara GoPro de 12MP •Estructura de soporte	Bajo	•80 km/hr •No requiere cierre de la vía •240 FPS	-	-

7. CONCLUSIONES

Se diseñó un prototipo móvil y accesible que permite la captura eficiente de imágenes de pavimentos para la evaluación de daños. Este enfoque semiautomático demostró ser preciso, económico y adecuado para ser implementado en entornos urbanos, logrando una captura de datos eficientes sin la necesidad de equipos demasiado costosos.

El prototipo móvil diseñado se adaptó a las necesidades del estudio, ofreciendo flexibilidad y facilidad de uso. Gracias a su diseño, es posible transportar el sistema y realizar las mediciones de manera práctica, lo que facilita su implementación en el campo sin requerir un equipamiento costoso o complicado de manejar. El desarrollo del sistema de captura permitió implementar un software eficiente basado en scripts, optimizado para la adquisición automatizada de imágenes en formato JPG y escala de grises, con configuraciones personalizadas y calibración exitosa.

Se formuló un protocolo técnico de captura que garantiza la adquisición de imágenes nítidas y con datos de ubicación de la superficie del pavimento, abarcando completamente un carril de 3,65m. Se consideró el campo de visión proyectado y el área de cobertura trapezoidal de la cámara, determinado por la altura del montaje y un ángulo de inclinación de -45° , lo que permitió alcanzar un área de cobertura combinada de $18,28\text{m}^2$ con una resolución espacial promedio de $2,93\text{mm/píxel}$. Se estableció una velocidad máxima de desplazamiento de 30km/hr para preservar la calidad visual y minimizar la borrosidad por movimiento. Además, se integró exitosamente el módulo GPS, sincronizando las coordenadas geoespaciales con las imágenes mediante interpolación temporal, para asignar datos de latitud, longitud y velocidad a cada fotograma.

La validación demostró que el sistema propuesto es eficaz para capturar y procesar datos útiles en la evaluación de pavimentos. Las mediciones de daños como baches presentaron errores inferiores al 8,54% en diámetro y una precisión del 99,20% en volumen usando reconstrucción 3D. El cálculo del PCI digital mostró una alta concordancia con el método manual, con errores absolutos de hasta 2 unidades y hasta 0 cuando se utilizó el mismo enfoque de medición. Además, el sistema digital redujo significativamente el tiempo y el personal requerido, permitiendo cubrir hasta 200km en 8 hr, frente a solo 2km con el método manual y con costos operativos un 26% menores.

Este trabajo demostró que un sistema semiautomático para la evaluación de pavimentos combina eficiencia y accesibilidad. La automatización y digitalización permiten aumentar la periodicidad de la evaluación, lo que contribuye a un mantenimiento más efectivo y económico de las infraestructuras viales. Como trabajos futuros, se plantea la automatización completa del proceso de captura y evaluación en tiempo real, además, se espera integrar computadores más robustos y GPS de mayor precisión y frecuencia de captura, lo que optimizará tanto la fiabilidad como la eficiencia en la recolección de datos y la evaluación del estado del pavimento.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ¿Qué es Raspberry Pi? - Raspberry Pi. (2019). Recuperado 3 de junio de 2024, de <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>
- AASHTO, Joint task force on pavements. (1995). Guidelines on pavement management (pp. 1–9). Washington, D.C. Washington, D.C.
- AASHTO, The voice of transportation. (2012). Pavement Management Guide (2.^a ed., pp. 12–15). American Association of State Highway and Transportation Officials. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aconcha, O. F. G. (2024). *LA TRAYECTORIA DE LA LUZ Y LA CAMARA ESTENOPEICA EN LA CONSTRUCCION DE IMAGENES*.
- Alcalde Sanz, J. J. (2014). *Diseño de un protocolo de calibración de cámaras estéreo* [bachelorThesis]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/24905>
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2020). *Decreto No. 4112.010.20.(#CONSECUTIVO) de 2020 “por el cual se establece el límite máximo de velocidad en las vías urbanas de santiago de cali, y se dictan otras disposiciones”*. Portal Alcaldía de Santiago de Cali. <https://www.cali.gov.co/movilidad/publicaciones/157775/cali-modificara-su-limite-maximo-de-velocidad-a-50-kmh/>
- Anvo, N. Z. R., Thuruthel, T. G., Taha, H. M., de Silva, L., Al-Tabbaa, A., Brilakis, I., & Iida, F. (2023, September). Automated 3D Mapping, Localization and Pavement Inspection with Low Cost RGB-D Cameras and IMUs. In Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems (pp. 279–291). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Archondo-Callao, R. (2019). *Applying the HDM-4 model to strategic planning of road works*. World Bank. <https://documentos.bancomundial.org/es/publication/documents-reports/documentdetail/993961468338479540/applying-the-hdm-4-model-to-strategic-planning-of-road-works>
- ASTM International. (2024). Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. ASTM International.
- Autret, P. (1991). Vizir-methode assistee par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un reseau routier. *Techniques et methodes des laboratoires des ponts et chaussees*.
- Autret, P., & Brousse, J. L. (1991). VIZIR method for the quality rating of paved roads. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France*.
- Ayala, C., Aranda, C., & Galar, M. (2024). Guidelines to Compare Semantic Segmentation Maps at Different Resolutions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–16. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2024.3369310>
- Barranco Gutierrez, A. I., & Medel, J. J. (2013). *Calibración estereoscópica de cámaras digitales*. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/11742>
- Bautista, J. O. M., & Granados, L. A. P. (2015). Análisis de simetrías y proporciones faciales mediante visión estereoscópica. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología*, 2, 25–36. <https://doi.org/10.38017/2390058X.105>
- Bradski, G. R., & Kaehler, A. (2011). Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library, [Nachdr.]. *Software that sees. Beijing: O'Reilly*.
- Cárdenas Quiroga, E. A., Morales Martín, L. Y., & Ussa Caycedo, A. (2015). La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. *Revista Científica General José María Córdova*, 13(16), 201–219. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1900-65862015000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Carrillo, J. M. R. (2024). *Determinar el deterioro del pavimento flexible mediante análisis de información capturada a través de vehículo aéreo no tripulado*.

-
- Chan, S., Cui, S., & Lee, S. (2016, September). Transition from manual to automated pavement distress data collection and performance modelling in the pavement management system. In *Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada Conference of the Transportation Association of Canada*.
- Coenen, T. B. J., & Golroo, A. (2017). A review on automated pavement distress detection methods. *Cogent Engineering*, 4(1), 1374822. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1374822>
- Dabous, S. A., Ait Gacem, M., Zeiada, W., Hamad, K., & Al-Ruzouq, R. (2025). Artificial intelligence applications in pavement infrastructure damage detection with automated three-dimensional imaging—A systematic review. *Alexandria Engineering Journal*, 117, 510-533.
- Daniel, A. y Preeja, V. (2014). Detección y análisis automático de problemas en la carretera. *Revista Internacional de Aplicaciones Informáticas*, 101 (10).
- Delgado, K., & Morales, L. (2020). Condicion superficial del Pavimento Flexible con la metodología Vizir y PCI de la carretera Vecinal tramo KM 00+ 00 al KM 05+ 00 de los distritos de la Victoria y Monsefu, Ubicado en la Provincia de Chiclayo-Departamento de Lambayeque.
- Díaz, H. P., Echeverry, D. Y. S., & Melgarejo, Y. H. M. (2013). Sistema Automático Para La Adquisición De Imágenes De Vías Pavimentadas. *Revista GTI*, 12(32), Article 32. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/3211>
- Distortion. (2023). Edmundoptics.com. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/distortion/>
- Dynatest. (2022). *DE with PCI calculation letter*. Dynatest. <https://dynatest.com/wp-content/uploads/2022/01/DE-with-PCI-Calculation-Letter.pdf>
- Famili, A. (2020). *Evaluación de la superficie del pavimento mediante sistemas móviles de escaneo LiDAR terrestre* (Tesis doctoral, Universidad de Clemson).
- Fan, R., Liu, Y., Yang, X., Bocus, M. J., Dahnoun, N., & Tancock, S. (2018). Real-Time Stereo Vision for Road Surface 3-D Reconstruction. *2018 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IST.2018.8577119>
- Feng, H., Li, W., Luo, Z., Chen, Y., Fatholahi, SN, Cheng, M., ... y Li, J. (2021). Detección de grietas en pavimento basada en GCN mediante nubes de puntos LiDAR móviles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (8), 11052-11061.
- Ferrer, A., Smith, R., Espinosa, O., Cuellar, M., & Raffo, V. (2013). Análisis de la Capacidad de Gestión de la Seguridad Vial COLOMBIA.
- Fiorella, K., Mendoza, F., Salomon, N., Flores, R., Vereau, I., & Lima -Perú. (2023). “*APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA CON RPA, PARA ANALIZAR LA CALIDAD DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA CARRETERA LIMA- CANTA -HUALLAY, TRAMO LAGUNA 7 COLORES - FANTASMA CORDILLERA LA VIUDA -2023*” Tesis para optar al título profesional de: Ingeniero Civil Autores: Asesor. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/35622/TESIS%20-NILO-FIORELLA_PDF_TOTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Glosario Manual Diseño Geométrico Carreteras. (2018, enero 25). Glosario de Manual de diseño geométrico de carreteras. <https://www.invias.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/glosario/130-glosario-manual-diseno-geometrico-carreteras>
- Guan, J., Yang, X., Ding, L., Cheng, X., Lee, V. C. S., & Jin, C. (2021). Automated pixel-level pavement distress detection based on stereo vision and deep learning. *Automation in Construction*, 129, 103788. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103788>
- Guan, J., Yang, X., Lee, V. C. S., Liu, W., Li, Y., Ding, L., & Hui, B. (2022). Full field-of-view pavement stereo reconstruction under dynamic traffic conditions: Incorporating height-adaptive vehicle detection and multi-view occlusion optimization. *Automation in Construction*, 144, 104615–104615. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104615>
- Gutiérrez, F. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos. Bogotá, Colombia.
- Gutiérrez, F. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá, Colombia.
-

-
- Han, Y., Tu, S., Yang, Y., Lei, K. y Liu, C. (2018). Método de reconocimiento de grietas por daños en el pavimento basado en cámaras lineales de alta resolución y un algoritmo de elevación adaptativo.
- Heikkila, J. y O. Silven. "Un procedimiento de calibración de cámara de cuatro pasos con corrección de imagen implícita". Conferencia internacional IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones.1997 .
- Hernández, J. M., Sanz, G. P., & Guijarro, M. (2011). Técnicas de procesamiento de imágenes estereoscópicas. *Revista del CES Felipe II*, 13, 1-20.
- Herrera Suarez, G. (2021). Evaluación del deterioro del pavimento asfáltico en el tramo Ramal de Aspuzana-Nuevo Progreso mediante la metodología VIZIR en el año 2021.
- Higuera Sandoval, C. H., & Pacheco Merchán, Ó. F. (2010). Patología de pavimentos articulados. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 75-94.
- Hou, Z., Wang, K. C., & Gong, W. (2007, July). Experimentation of 3D pavement imaging through stereovision. In *International Conference on Transportation Engineering 2007* (pp. 376-381).
- Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J. H., Cho, J., & Lee, J. J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis: An End-to-End Approach. *Sensors*, 24(7), 2333.
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: A Review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155-168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013). *INV E – 813 – 13: Determinación del índice de deterioro superficial de un pavimento asfáltico mediante el método VIZIR*.
- INVIAS. (07 de JULIO de 2023) Estado de la red vial. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-via->
- Ito, Y. (2015). Delaunay Triangulation. En *Encyclopedia of Applied and Computational Mathematics* (pp. 332-334). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70529-1_314
- Jacobs, D. (2005). Degradados de imagen. Notas de clase para CMSC , 426 , 1-3.
- Jiménez García, L. M., Sebastián y Zúñiga, J. M., Peñín Honrrubia, L. F., Ferre Pérez, M., & Torres, F. (1995). Modelado de entornos 3D para planificación de trayectorias de robots mediante visión estereoscópica y control activo de parámetros ópticos.
- Jiménez-Jiménez, SI, Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, MDJ, y Enciso, J. (2021). Modelos digitales del terreno generados con fotogrametría de bajo coste con UAV: Metodología y precisión. *ISPRS International Journal of Geo-Information* , 10 (5), 285.
- Joni, H. H., Alwan, I. A., & Naji, G. (2020). Utilizing artificial intelligence to collect pavement surface condition data. *Engineering and Technology Journal*, 38(1), 74-82.
- Judy.Williams. (2022, mayo 23). 22,000km Colombia assessment underway. iRAP. <https://irap.org/es/2022/05/22000km-colombia-assessment-underway/>
- Kulkarni, RB y Miller, RW (2003). Sistemas de gestión de pavimentos: pasado, presente y futuro. Registro de investigación sobre transporte , 1853 (1), 65–71. <https://doi.org/10.3141/1853-08>
- Kumar, S., Micheloni, C., Piciarelli, C., & Foresti, G. L. (2010). Stereo rectification of uncalibrated and heterogeneous images. *Pattern Recognition Letters*, 31(11), 1445-1452. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.019>
- Laurent, J., Hébert, J. F., Lefebvre, D., & Savard, Y. (2012, July). Using 3D laser profiling sensors for the automated measurement of road surface conditions. In *7th RILEM international conference on cracking in pavements: mechanisms, modeling, testing, detection and prevention case histories* (pp. 157-167). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Lecumberry, F. (2005). Cálculo de disparidad en imágenes estéreo, una comparación. In *XI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
-

-
- Lee, J.-H., & Sull, S. (2019). Regression Tree CNN for Estimation of Ground Sampling Distance Based on Floating-Point Representation. *Remote Sensing*, 11(19), 2276. <https://doi.org/10.3390/rs11192276>
- Lin, W., Li, X., Han, H., Yu, Q., & Cho, Y.-H. (2023). A novel approach for pavement distress detection and quantification using RGB-D camera and deep learning algorithm. *Construction and Building Materials*, 407, 133593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133593>
- Liu, Y., & Zheng, Y. (2021). Accurate Volume Calculation Driven by Delaunay Triangulation for Coal Measurement. *Scientific Programming*, 2021(1), 6613264. <https://doi.org/10.1155/2021/6613264>
- Liu, Z., Wu, W., Gu, X., & Cui, B. (2024). PaveDistress: A comprehensive dataset of pavement distresses detection. *Data in Brief*, 57, 111111.
- Loprencipe, G., & Pantuso, A. (2017). A specified procedure for distress identification and assessment for urban road surfaces based on PCI. *Coatings*, 7(5), 65.
- Luo, W., Qin, Y., Li, Q., Zhang, D., & Li, L. (2023). Automatic mileage positioning for road inspection using binocular stereo vision system and global navigation satellite system. *Automation in Construction*, 146, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104705>
- Luo, Y., Guo, P., Gao, J., Lu, C., & Shang, Y. (2024). Three-dimensional reconstruction of asphalt road surface texture based on binocular stereo vision. *Construction and Building Materials*, 455, 139092.
- Macea M, L. F. (2018). Sistema automático de apoyo a la gestión de pavimentos en vías rurales de primer orden en Colombia (SAAGEP). <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/729>
- Macea-Mercado, L. F., Morales, L., & Márquez-Díaz, L. G. (2016). Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(2), 223-236.
- Martinolich, M. (2015). *Field of View & Working Distance* | *Opto Engineering*. Opto Engineering.
- Mathworks. (2025). ¿Qué es la calibración de la cámara? Recuperado 10 de marzo de 2025, de <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>
- McGhee, K. H. (2004). Automated pavement distress collection techniques. Transportation Research Board.
- Medina, R., Llamas, J., Zalama, E., & Gómez-García-Bermejo, J. (2014, October). Enhanced automatic detection of road surface cracks by combining 2D/3D image processing techniques. In *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 778-782). IEEE.
- Méndez-Vázquez, H., Chang, L., & Morales-González, A. (2012). Evaluación de la calidad de las imágenes de rostros utilizadas para la identificación de las personas. 16(2).
- Miah, S., Uus, A., Liatsis, P., Roberts, S., Twist, S., Hovens, M., & Godding, H. (2015, September). Design of multidimensional sensor fusion system for road pavement inspection. In *2015 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)* (pp. 304-308). IEEE.
- Ministerio de transporte & Instituto Nacional de vías. (2022). Metodología para la determinación y calificación del estado de la red vial-criterio técnico.
- Ministerio de Transporte. (2008). Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras (2ª ed.). Bogotá, Colombia.
- Ministerio de transporte. (2024). Transporte en Cifras. Anuario Nacional de Transporte. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/9443/transporte-en-cifras/>
- Mintransporte. (2021, August 26). *Colombia adopta metodología para desarrollar auditorías e inspecciones de seguridad vial el país*. Mintransporte. <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/10171/colombia-adopta-metodologia-para-desarrollar-auditorias-e-inspecciones-de-seguridad-vial-el-pais/>
- Muirhead, RF (1921). Demostración de la fórmula para el volumen de un tetraedro, en función de las coordenadas rectangulares de sus vértices. *The Mathematical Gazette*, 10 (154), 324–325. doi:10.1017/S0025557200088422
-

-
- Muñoz, L. (2021). DANE - Censo de Unidades Económicas 2021. Censo unidades económicas 2021. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-interno/censo-economico-de-colombia/conteo-de-unidades-economicas-2021>
- Narmin Murshudova. (2023, July 9). *Pinhole Camera - Narmin Murshudova - Medium*. Medium. <https://medium.com/@nrmin.mrdova.01/pinhole-camera-842ce79329b7>
- National Geographic. (2022). *GPS*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/gps>
- OpenCV: Camera Calibration. (2025). Opencv.org. https://docs.opencv.org/3.4/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
- Ortega Rengifo, D. M., Capa Salinas, J., Perez Caicedo, J. A., & Rojas Manzano, M. A. (2024). Unmanned Aircraft Systems in Road Assessment: A Novel Approach to the Pavement Condition Index and VIZIR Methodologies. *Drones*, 8(3), 99. <https://doi.org/10.3390/drones8030099>
- Peris Martorell, M. (2012). *Aproximación del Mapa de Disparidad Estéreo Mediante Técnicas de Aprendizaje Automático*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/15832>
- Perri, V., Ketabdari, M., Cimichella, S., Crispino, M., & Toraldo, E. (2025). Proposal of an Integrated Method of Unmanned Aerial Vehicle and Artificial Intelligence for Crack Detection, Classification, and PCI Calculation of Airport Pavements. *Sustainability*, 17(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su17073180>
- Porras Díaz, H., Ramón Suárez, J. H., Mejía Melgarejo, Y. H., & Parra Rodríguez, J. M. (2014). Sistemas automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 79-98.
- Quirós Rosado, E. M. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones.
- Rahul Awati. (2022). *field of view (FOV)*. WhatIs; TechTarget. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/field-of-view-FOV>
- Rakshitha, R. y Srinath, S. (diciembre de 2022). Una revisión integral sobre la detección y evaluación del deterioro del pavimento asfáltico basada en inteligencia artificial. En la Novena Conferencia Internacional de la Sección de Uttar Pradesh del IEEE de 2022 sobre Ingeniería Eléctrica, Electrónica e Informática (UPCON) (págs. 1-6). IEEE.
- Ríos Cotazo, N. X., Bacca Cortés, B., Caicedo Bravo, E., Orobio Quiñónez, A., Ríos Cotazo, N. X., Bacca Cortés, B., Caicedo Bravo, E., & Orobio Quiñónez, A. (2020). Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 109-127. <https://doi.org/10.18359/rcin.4385>
- Romero-Chambi, E., Villarroel-Quezada, S., Atencio, E., & Muñoz-La Rivera, F. (2020). Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements. *Applied Sciences*, 10(12), 4157.
- Salazar Manrique, B. (2022). *Evaluación de la precisión del sistema Visualpav en la caracterización de deterioros superficiales en pavimentos asfálticos*.
- Sanchez Sabogal, F., & Murgueito Valencia, A. (2003). Guía Metodológica para el diseño de obras de Rehabilitación de pavimentos Asfálticos de carreteras. RUTAS, 95.
- Scharstein, D., & Szeliski, R. (2002). A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1), 7-42. <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>
- Serigos, P. A., Prozzi, J. A., de Fortier Smit, A., & Murphy, M. R. (2016). Evaluation of 3D automated systems for the measurement of pavement surface cracking. *Journal of Transportation Engineering*, 142(6), 05016003.
- Shams, A., Sarasua, WA, Famili, A., Davis, W. J., Ogle, J. H., Cassule, L. y Mammadrahimli, A. (2018). Medición de pendientes transversales en carreteras mediante LiDAR móvil. *Transportation Research Record*, 2672 (39), 88-97.
-

-
- Sharma, A., & Aggarwal, P. R. A. V. E. E. N. (2023). IRI prediction using machine learning models. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 11, 111-116.
- Skala, V. (2006). Length, area and volume computation in homogeneous coordinates. *International Journal of Image and Graphics*, 6(04), 625-639.
- Srinivasan, V. K. (2010). Computation techniques for the volume of a tetrahedron. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 41(7), 979-990. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2010.493237>
- Stereolabs. (2024, May 27). GitHub - stereolabs/zed-sdk: ⚡ The spatial perception framework for rapidly building smart robots and spaces. GitHub. <https://github.com/stereolabs/zed-sdk>
- Sturm, P. (2021). Modelo de cámara estenopeica. En *Computer Vision: A Reference Guide* (págs. 983-986). Cham: Springer International Publishing.
- Su, H., & He, B. (2010). A Simple Rectification Method of Stereo Image Pairs with Calibrated Cameras. *2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICIECS.2010.5678343>
- Tapamo, H., Bosman, A., Maina, J. y Horak, E. (diciembre de 2022). Redes neuronales convolucionales para la detección de grietas en pavimentos flexibles. En *la Conferencia Internacional sobre Computación Suave y Reconocimiento de Patrones* (pp. 194-204). Cham: Springer Nature, Suiza.
- Tello-Cifuentes, L., Acero, S., Marulanda, J., Thomson, P., & Barona, J. J. (2024). Implementation of a low-cost comprehensive pavement inspection system. *Transportation Engineering*, 18, 100274.
- Tello-Cifuentes, L., Aguirre-Sánchez, M., Díaz-Paz, J. P., Hernández, F., Tello-Cifuentes, L., Aguirre-Sánchez, M., Díaz-Paz, J. P., & Hernández, F. (2021). Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales. *TecnoLógicas*, 24(50), 59-71. <https://doi.org/10.22430/22565337.1686>
- Timm, D. H., & McQueen, J. M. (2004). A study of manual vs. automated pavement condition surveys. Alabama, EE. UU: Auburn University.
- Tsai, Y.-C. J., & Li, F. (2012). Critical Assessment of Detecting Asphalt Pavement Cracks under Different Lighting and Low Intensity Contrast Conditions Using Emerging 3D Laser Technology. *Journal of Transportation Engineering*, 138(5), 649-656. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000353)
- Tsaimou, C. N., Kagkelis, G., Sartampakos, P., Karantzalos, K., & Tsoukala, V. K. (2024). Mapping cracks on port concrete pavements by analyzing structural health monitoring metadata with computer vision-based techniques.
- Universidad del Valle & Santiago de Cali. (2015). Análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Santiago de Cali. TOMO II, 334.
- Vacas, R., Vélez, S., Barajas, E., & Rubio, J. A. (2022). Influencia del tamaño de pixel en el terreno (GSD) en imágenes multiespectrales tomadas con dron sobre viñedos en espaldera. In *IV Jornadas del Grupo de Viticultura: Acta de Horticultura: Comunicaciones Técnicas Sociedad Española de Ciencias Hortícolas: 26-28 de octubre 2022, Pamplona/Iruña* (pp. 365-369). SECH (Sociedad Española de Ciencias Hortícolas).
- Wang, N., Dong, J., Fang, H., Li, B., Zhai, K., Ma, D., ... & Hu, H. (2023). 3D reconstruction and segmentation system for pavement potholes based on improved structure-from-motion (SFM) and deep learning. *Construction and Building Materials*, 398, 132499.
- Wix, R., & Leschinski, R. (2013, March). 3D technology for managing pavements. In *Proceedings of the International Public Works Conference*.
- Yan, W. Y., & Yuan, X. X. (2018). A low-cost video-based pavement distress screening system for low-volume roads. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(5), 376-389.
- Yang, J., Mao, Y., Yao, Y., Liang, C., Cao, S., & Chen, Y. (2025). Intelligent recognition and assessment of pavement surface defects based on convolutional neural networks. *Engineering Research Express*, 7(2), 025119.
-

-
- Zamora Lorenzo, C. E., & Vasquez Vergara, E. S. Desarrollo de un equipo electrónico vehicular orientado al monitoreo, detección y registro del estado de deterioro de pistas de tránsito urbano.
- ZED 2i—Industrial AI Stereo Camera. (2023). <https://www.stereolabs.com/zed-2i/>
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- Zou, L., & Li, Y. (2010). A method of stereo vision matching based on OpenCV. 2010 International Conference on Audio, Language and Image Processing, 185-190. <https://doi.org/10.1109/ICALIP.2010.5684978>
- Zou, Z., Lang, H., Lou, Y. y Lu, J. (2023). Registro global basado en planos para la reconstrucción 3D de pavimentos mediante nube de puntos LiDAR híbrida de estado sólido. *Automatización en la Construcción* , 152 , 104907.

9. ANEXOS

9.1. Protocolo para la captura de imágenes del pavimento

PROTOTIPO DE CAPTURA DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DE PAVIMENTO PCISP

Instrucciones

1. Instale el Prototipo en un Vehículo automóvil.
2. Inicie el sistema.
3. Realice la Calibración.
4. Ajuste la Configuración de Captura.
5. Inicie y finalice la Captura.
6. Extraiga los Datos.

Requisitos del PCISP

Equipos principales

1. Estructura de soporte + 4 correas de amarre.
2. Cámara Zed 2i.
3. Modulo GPS (antena GPS + Raspberry Pi).
4. Vehículo automóvil.
5. Rótula de soporte metálica para cámara de 3/8".

Conexiones y otros

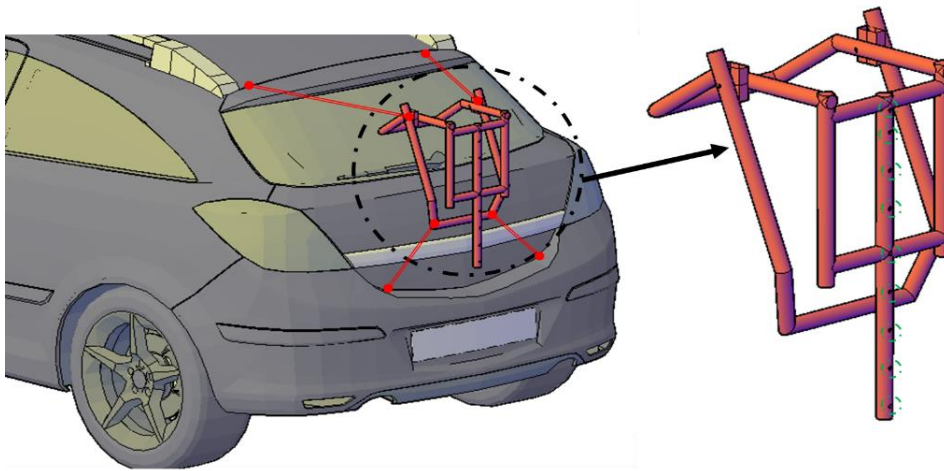
1. Cable USB 3.0 tipo C, de 5 metros.
2. Cable USB 3.0, de 5 metros.
3. Nivel digital.
4. Flexómetro.
5. Bridas plásticas de amarre.
6. Convertidor de corriente para vehículos.
7. Patrón de calibración de tipo tablero de ajedrez.

Software y programación

1. Computador portátil.
2. Putty (para acceder a la Raspberry Pi).
3. RealVNC (para extraer los datos del GPS).
4. Zed SDK (para interactuar con la cámara).
5. Python 3.10 (para ejecutar scripts necesarios).

1. Instalación del Prototipo en el Vehículo automóvil

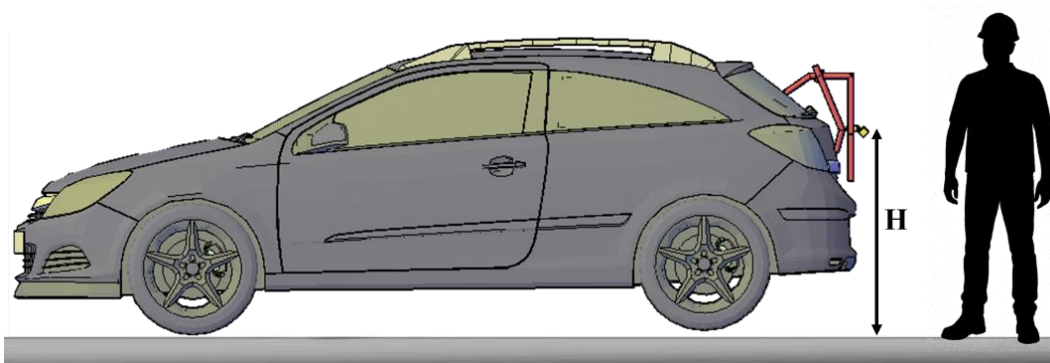
1. Coloque el prototipo en la parte trasera del vehículo, asegurándose de usar las correas de anclaje del soporte para fijar la estructura de manera segura.
2. Verifique que la estructura este alineada correctamente y colocada en una posición estable para evitar posibles vibraciones durante el funcionamiento.



●—● Correas de anclaje

○ Perforaciones de ajuste para la rótula

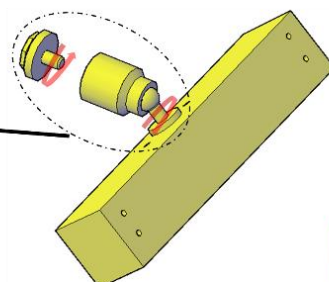
3. Ajuste la altura de la cámara (H) seleccionando la perforación adecuada en la estructura para alcanzar la altura deseada. Use un flexómetro para medir la distancia desde el nivel del pavimento, recomendándose $H=1,28\text{m}$ para cubrir un carril de $3,65\text{m}$ de ancho.



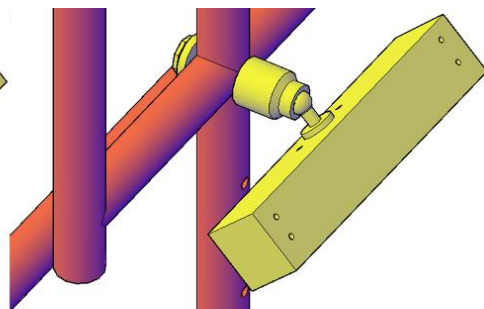
4. Fije la cámara a la rótula de soporte metálica, y asegúrese de que esta esté bien sujeta a la estructura del prototipo.



Rótula de soporte metálica

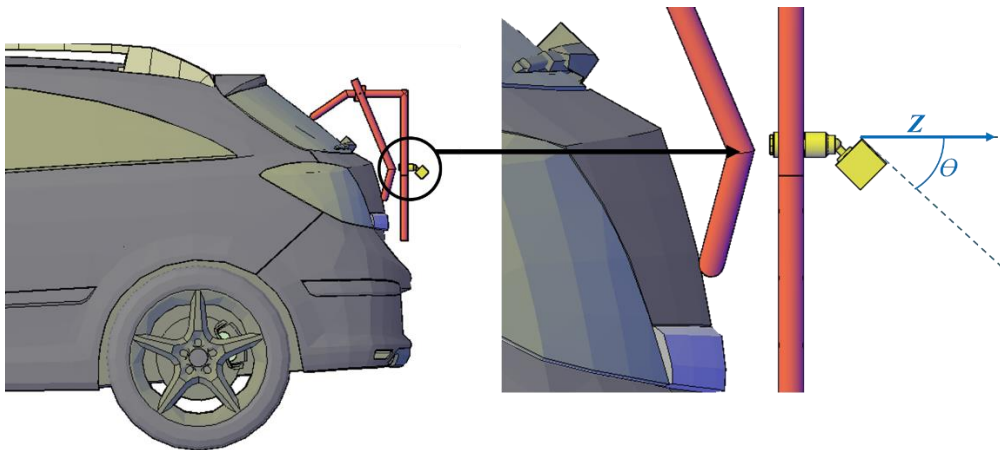


Acople de la rótula a la cámara

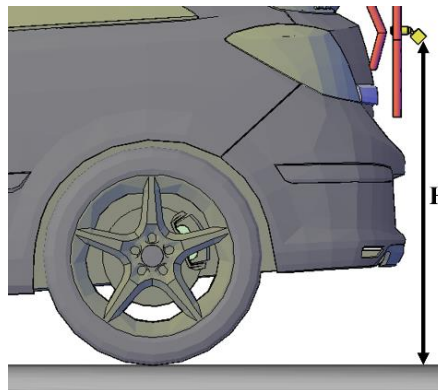


Acople de la rótula y cámara a la estructura de soporte

5. Ajuste la inclinación de la cámara (θ) utilizando un nivel digital, como el que se encuentra en la mayoría de los teléfonos móviles. La inclinación recomendada es de $\theta=45^\circ$.



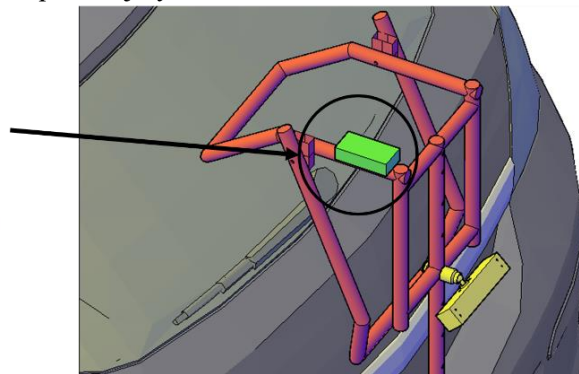
6. Después de asegurar la altura y la inclinación, mida nuevamente la distancia, esta vez desde el nivel del pavimento hasta el centro de la cámara, utilizando un flexómetro. Asegúrese de que la altura sea nuevamente de 1,28 m, ajustando con las correas del soporte si es necesario.



7. Instale el módulo GPS en la parte superior del prototipo, asegurándose de que la antena esté orientada hacia el exterior. Utilice bridas para sujetar el módulo firmemente a la estructura, asegurando que quede fijo y sin movimiento.



Modulo GPS

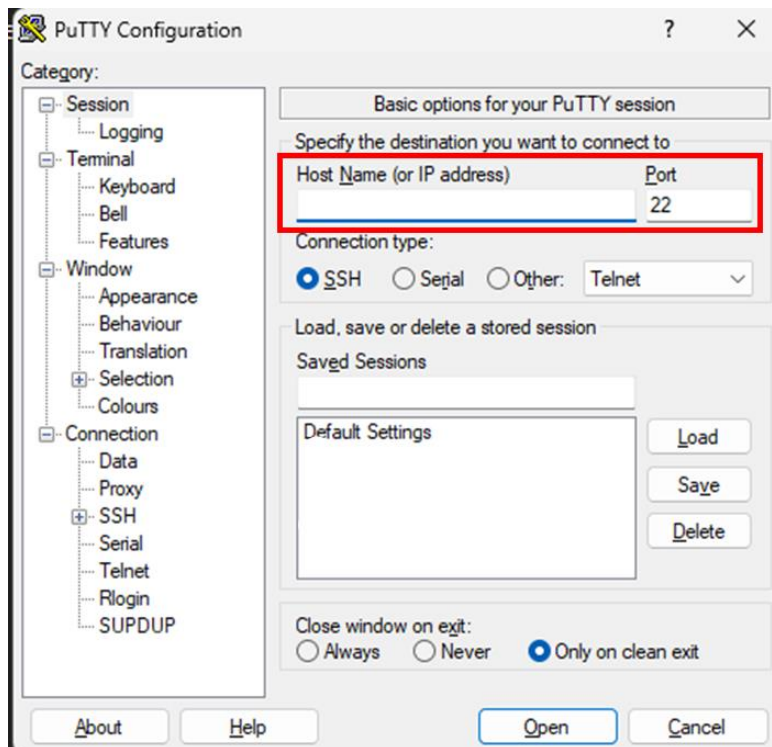


8. Finalmente, conecte los cables de forma adecuada. Conecte el cable USB 3.0 tipo C de la cámara al computador y el cable USB 3.0 del módulo GPS al computador.
9. Asegúrese de que los cables estén bien sujetos y no sobresalgan ni queden sueltos, evitando interferencias o daños. Los cables deben ingresar al vehículo a través de una ventana y conectarse al computador portátil que se utilizará para controlar y monitorear la captura de datos.

2. Inicie el sistema.

1. Asegúrese de que al conectar la cámara esta este encendida, lo pude notar al ver titilar una luz azul en medio de los lentes. De igual forma asegure que el GPS este encendido al ver que se enciende una luz led de color verde.

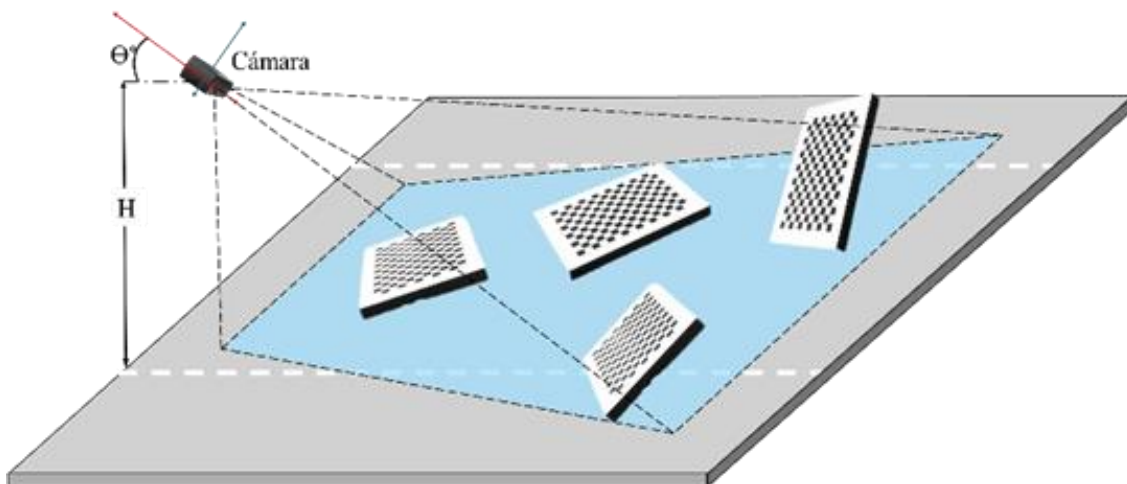
2. Conecte la Raspberry Pi y el computador portátil a la misma red Wifi generada por un teléfono móvil o dispositivo de red local para permitir la comunicación entre ambos.
3. Abra la aplicación Putty en el computador portátil y establezca una conexión SSH con la Raspberry Pi usando la dirección IP correspondiente y use el puerto 22.



4. Una vez conectado, ejecute el comando específico para iniciar la captura de datos GPS en la Raspberry Pi. Esto activará el módulo GPS para que comience a registrar información de ubicación en tiempo real.
5. Ahora, en el computador portatil, abra la consola de Python y ejecute el script diseñado para la captura de imágenes.
En este Script puede configurar parametros como: Frecuencia de fotogramas (FPS), Resolución de imagen, Formato de archivo (JPEG, PNG, etc) y captruar en color o escala de grises. Ajuste estos parametros según las necesidades del estudio antes de iniciar la captura.

3. Realice la Calibración.

1. Ahora abra la consola de Python y ejecute el script de captura para la calibración. Este script muestra en pantalla la captura en tiempo real para verificar la calidad de las imágenes. La tasa de captura se limita a 1 FPS para evitar guardar demasiadas imágenes redundantes.
2. Tome el patrón de calibración y desplácelo en diversas posiciones y orientaciones relativas a la cámara en toda la escena de captura. Asegúrese de generar una representación lo más completa posible del área de la imagen. Se recomienda capturar al menos 30 imágenes validas para asegurar una calibración precisa.



3. Las imágenes se almacenan en una carpeta para su uso posterior en el proceso de calibración.
4. Ejecute el script de calibración e indique la carpeta destino de las imágenes de calibración, así como la salida del archivo de calibración. El script de calibración descartará las imágenes que no contengan patrones útiles o esquinas detectables, conservando solo aquellas válidas para la calibración.

Nota: El Script realizará la calibración individual de cada cámara para obtener parámetros intrínsecos, coeficientes de distorsión y vectores de rotación y traslación. Calcula el error de reproyección para evaluar la calidad de la calibración, además, muestra una gráfica con los errores de reproyección por imagen y guarda los resultados para uso futuro en formato npz.

4. Ajuste la Configuración de Captura.

1. Cargue el archivo .npz de calibración generado previamente.
2. Ingrese los parámetros de la configuración de captura iniciales: Altura de la cámara (H) e inclinación (Θ).
3. Ejecute el script para calcular automáticamente el área de cobertura y el campo de visión.
4. Revise los resultados impresos: área cubierta, distancias de visión y porcentajes de solapamiento entre cámaras.
5. Si el área de cobertura no es suficiente, ajuste la altura e inclinación según sea necesario.
6. Repita los pasos 3 a 5 hasta obtener la configuración óptima para cubrir la zona requerida.

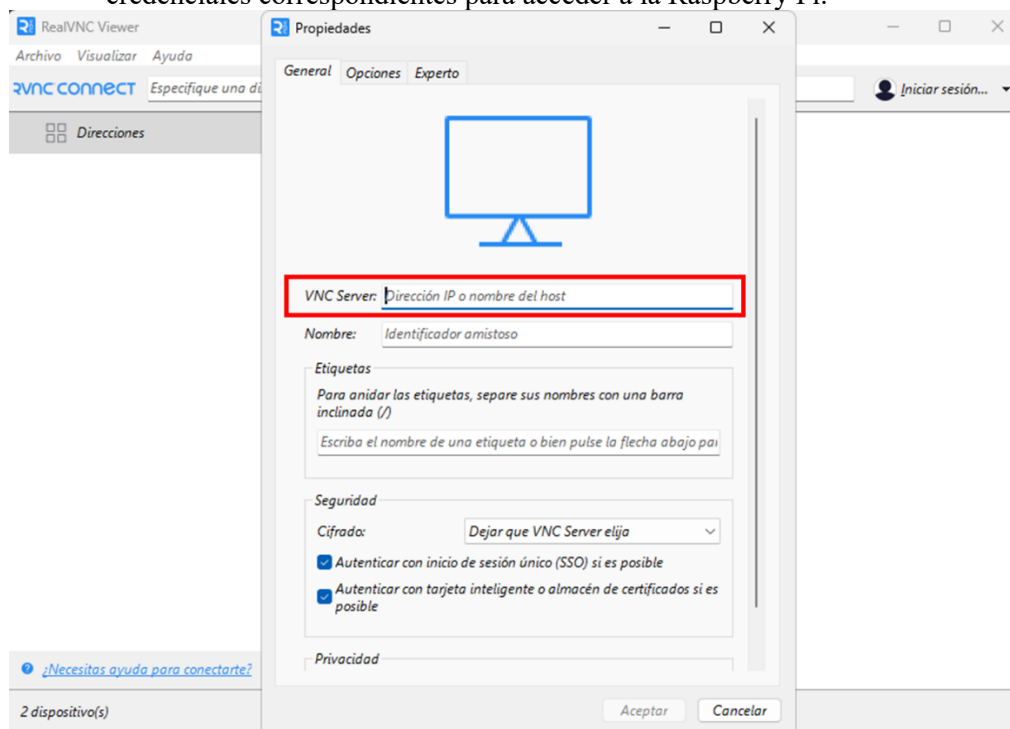
5. Inicie y Finalice de la Captura

1. Verifique que el sistema este calibrado y listo para operar.
2. Realice la salida en horarios ideales para la captura, preferiblemente entre las 11:00 a.m. y 1:00 p.m., o entre las 3:00 p.m. y 5:00 p.m., para minimizar sombras y optimizar la calidad de las imágenes.
3. Mantenga una velocidad máxima de circulación de 30km/hr para garantizar una captura estable y clara.
4. Durante el recorrido monitoree constantemente en pantalla:
 - El estado de la captura de imágenes (asegúrese de que las fotos se estén guardando correctamente).
 - La señal y recepción del módulo GPS.
 - El nivel de batería del computador.
5. En caso de detectar fallas o anomalías en cualquiera de estos elementos, detenga el recorrido para corregir antes de continuar.

6. Al finalizar el recorrido, detenga la ejecución del script de captura de imágenes para apagar correctamente la cámara y finalizar el almacenamiento de datos.
7. Acceda a la sesión de Putty conectada al módulo GPS y ejecute el comando para detener la captura y registro de datos GPS.
8. Apague de forma segura el módulo GPS para evitar daños en el equipo o pérdida de datos.
9. Verifique que todos los archivos de imágenes y datos GPS se hayan guardado correctamente en el dispositivo de almacenamiento antes de desconectar el sistema.

6. Extraiga los Datos.

1. Las imágenes capturadas se almacenan automáticamente en la carpeta de destino especificada al iniciar el sistema.
2. Para la extracción de los datos GPS desmonte cuidadosamente el módulo GPS de la estructura de soporte.
3. Conecte un dispositivo de almacenamiento USB a un adaptador USB a microUSB.
4. Conecte el adaptador y el USB a la Raspberry Pi para acceder al sistema de archivos.
5. En el computador portátil, abra la aplicación RealVNC e inicie sesión con las credenciales correspondientes para acceder a la Raspberry Pi.



6. Navegue hasta la carpeta donde se almacenan los archivos de datos GPS (normalmente archivos .csv).
7. Copie o mueva los archivos .csv a la memoria USB conectada para su extracción.
8. Confirme que los archivos han sido copiados correctamente a la memoria USB.
9. Desmonte de forma segura el dispositivo USB y desconéctelo de la Raspberry Pi.