Evaluación del estado superficial de pavimentos flexibles: nuevas perspectivas desde la geotecnología urbana



Juan José Alarcón • Norys Haiddy Peña Ramírez • Eliana Lizeth Bohórquez Quiroga

INVESTIGACIÓN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

JUAN JOSÉ ALARCÓN

Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), en la Escuela de Ingeniería Civil. Es Ingeniero Civil, Especialista y Magíster en Ingeniería. Su campo de estudio se sitúa en la intersección entre las tecnologías geoespaciales, la inteligencia artificial y el desarrollo urbano. A nivel profesional, centra su labor en el diseño y aplicación de métodos espaciales para comprender los procesos territoriales, el fortalecimiento de la planificación de procesos territoriales y la evaluación de infraestructuras.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

https://orcid.org/0000-0001-6534-8057

juan.alarcon12@uptc.edu.co

NORYS HAIDDY PEÑA RAMÍREZ

Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), en la Escuela de Ingeniería Civil. Es Ingeniera Civil de la UPTC, Especialista en Ingeniería de Pavimentos Urbanos de la Universidad Militar Nueva Granada, Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, estudiante de Doctorado en Ingeniería de la UPTC. Ha tenido a su cargo cursos de Geomática, Diseño Geométrico y Trazado de Vías, Topografía y Geografía del Transporte en programas de pregrado. Investigadora del GIISAG y Coordinadora de la línea de investigación en Geomática e Infraestructura.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

https://orcid.org/0000-0002-0584-0610

norys.pena@uptc.edu.co

ELIANA LIZETH BOHÓRQUEZ QUIROGA

Joven Investigadora en la Escuela de Ingenie ría Civil. Es Ingeniera Civil, certificada internacionalmente como PMP® del PMI. Con amplia experiencia en la formulación y ejecución de proyectos, especialmente en los campos de la infraestructura vial y la sostenibilidad. Investigadora y autora de obras académicas centradas en enfoques contemporáneos de la gerencia de proyectos, con especial énfasis en la sostenibilidad y en metodologías innovadoras.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

https://orcid.org/0009-0000-2635-8383

eliana.bohorquez@uptc.edu.co



EDITORIAL
UPTC

Evaluación del estado superficial de pavimentos flexibles: nuevas perspectivas desde la geotecnología urbana

Juan José Alarcón
Norys Haiddy Peña Ramírez
Eliana Lizeth Bohórquez Quiroga

Uptc
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
VIGILADA MINEDUCACIÓN

EDITORIAL UPTC

Evaluación del estado superficial de pavimentos flexibles: nuevas perspectivas desde la geotecnología urbana

Juan José Alarcón
Norys Haiddy Peña Ramírez
Eliana Lizeth Bohórquez Quiroga





ENFOQUE: INVESTIGACIÓN
ÁREA OCDE: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
Disciplina: Ingeniería Civil
Colección: N° 339

Evaluación del estado superficial de pavimentos flexibles: nuevas perspectivas desde la geotecnología urbana.
Evaluation of the surface condition of flexible pavements: new perspectives from urban geotechnology

Primera Edición, 2025
Versión digital (ePub)

© Juan José Alarcón, 2025
© Norys Haiddy Peña Ramirez, 2025
© Eliana Lizeth Bohórquez Quiroga, 2025
© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2025

ISBN (ePub) 978-628-7863-00-2

Proceso arbitraje doble ciego
Recepción: mayo de 2024
Aprobación: abril de 2025

Hecho en Colombia - Made in Colombia

Evaluación del estado superficial de pavimentos flexibles: nuevas perspectivas desde la geotecnología urbana / Evaluation of the surface condition of flexible pavements: new perspectives from urban geotechnology / Alarcón, Juan José; Peña Ramírez, Norys Haiddy; Bohórquez Quiroga, Eliana Lizeth. Tunja: Editorial UPTC, 2025, 135 p

ISBN (ePub) 978-628-7863-00-2

Incluye referencias bibliográficas

1. Pavimentos. 2. Ingeniería de Carretas. 3. Condición superficial. 4. Drones. 5. Geografía del transporte.

(Dewey 625/21) (TNH – Ingeniería de caminos, carreteras, autopistas y tráfico)

Rector, UPTC
Enrique Vera López

Comité Editorial
Carlos Mauricio Moreno Téllez
Vicerrector de Investigación y Extensión
Yolanda Torres Pérez
Directora de Investigaciones
Óscar Pulido Cortés
Delegado Vicerrectoría Académica
Martín Orlando Pulido Medellín
Representante Área Ciencias Agrícolas
Yolima Bolívar Suárez
Representante Área Ciencias Médicas y de la Salud
Nelsy Rocío González Gutiérrez
Representante Área Ciencias Naturales
Olga Yanet Acuña Rodríguez
Representante Área Ciencias Sociales
Juan Guillermo Díaz Bernal
Representante Área Humanidades
Pilar Jovanna Holguín Tovar
Representante Área Artes
Edgar Nelson López López
Representante Área Ingeniería y Tecnología
Juan Sebastián González Sanabria
Representante Grupos de Investigación

Editora
Bertha Ramos Holguín
Corrección de Estilo
Nelson Alberto Arango Mozzo
Diseño y diagramación
Aura Patricia Sarmiento Hernández

Libro resultado de proyecto de investigación "Propuesta metodológica para la determinación de índices de condición superficial en pavimentos a través de información capturada con drones" con SGI 3520

Citar este libro / Cite this book

Alarcón, J.J; Peña-Ramírez, N.H; Bohórquez-Quiroga, E.L. (2025). *Evaluación del estado superficial de pavimentos flexibles: nuevas perspectivas desde la geotecnología urbana*. Editorial UPTC.

https://doi.org/10.19053/uptc.9786287863002







Libro financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Editorial UPTC
La Colina, Bloque 7, Casa 5
Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja, Boyacá
comite.editorial@uptc.edu.co
www.uptc.edu.co
https://editorial.uptc.edu.co

Resumen

El presente libro expone la investigación en un flujo de trabajo para la inspección de pavimentos flexibles en zonas urbanas, obtenido a través de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV). El procesamiento de los datos recolectados a través de software especializado, permite la obtención de productos como la nube de puntos, el modelo digital de superficie (DSM) y la ortofoto, cuyo análisis permite extraer información de la infraestructura vial, en este caso, del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y la detección de daños tipo huecos o baches. Los resultados obtenidos denotan un nivel de aplicabilidad aceptable para el flujo y el equipo empleado, al otorgar información continua y precisa para la elaboración de estudios que den cuenta del estado superficial de las vías urbanas. A su vez, el método aplicado evidencia una alta practicidad de uso, ya que permite la recolección periódica de información por parte de las autoridades competentes, o bien, extraer nuevos datos de la misma información al realizar diferentes procesamientos. Toda esta información permite crear bases de datos, planes de seguimiento, mantenimiento y rehabilitación de vías urbanas, con el fin que los entes gubernamentales o privados prioricen las inversiones en el sector de la infraestructura vial, favoreciendo la gestión de la movilidad en cualquier territorio.

Palabras clave: UAV, Pavimentos, Infraestructura, Deterioro, Daños, IRI, ProVal, Vizir, PCI, Procesamiento, Rugosidad, Bache.

Abstract

This book presents the research in a workflow for the inspection of flexible pavements in urban areas, obtained through Unmanned Aerial Vehicles (UAV). The processing of the data collected through specialized software allows the obtaining of products such as the point cloud, the digital surface model (DSM), and the orthophoto, whose analysis allows extracting information from the road infrastructure, in this case, the International Roughness Index (IRI) and the detection of damage such as holes or potholes. The results obtained denote an acceptable level of applicability for the flow and the equipment used, providing continuous and precise information for the preparation of studies that account for the surface state of urban roads. At the same time, the applied method shows a high practicality of use, since it allows the periodic collection of information by the competent authorities, or the extraction of new data from the same information when carrying out different processing. All this information allows the creation of databases, monitoring plans, maintenance, and rehabilitation of urban roads, so that government or private entities prioritize investments in the road infrastructure sector, favoring the management of mobility in any territory.

Keywords: UAV, Pavements, Infrastructure, Deterioration, Damage, IRI, ProVal, Vizir, PCI, Processing, Roughness, Pothole

Contenido

1 Introducción.....17

2 Fundamentación teórica.....23

2.1. Sistema de transporte 23
2.2. Sistema de infraestructura 26
2.2.1. Rol agencias gubernamentales 27
2.2.2. Seguridad vial.....28
2.3. Auscultación de pavimento.....30
2.3.1. Métodos de auscultación de pavimentos.....30
2.3.2. Evaluación técnica.....34
2.3.3. Manuales de inspección.....46
2.4. Índice de Rugosidad Internacional (IRI) 51
2.4.1. Conceptualización y medición.....51
2.4.2. Tendencias internacionales.....58
2.5. Conceptualización UAV.....59
2.5.1. Normativa UAV.....60

3 Estado del arte.....77

3.1. Análisis bibliométrico.....77
3.1.1. Búsqueda de información.....77
3.1.2. Verificación de metadatos.....77
3.1.3. Cálculo de indicadores bibliométricos.....78
3.1.4. Construcción del código.....78
3.2. Comportamiento histórico.....78
3.3. Aplicación del método PRISMA.....79
3.4. Resultados.....80

4 Proceso metodológico.....85

4.1. Selección de zona de estudio 87
4.2. Materiales y métodos.....89
4.2.1. Misión de vuelo 89

4.2.2. Procesamiento de imágenes.....92
4.2.3. Automatización de procesos.....95

5 Resultados.....101

6 Análisis.....107

6.1.Generalidades 107
6.2. Zona A.....108
6.2.1. Variación del IRI en el ancho de la huella.....108
6.2.2. Identificación de deterioros superficiales.....111
6.3. Zona B.....111
6.3.1.Variación del IRI en el ancho de la huella.....111
6.3.2.Identificación de deterioros superficiales.....113

7 Conclusiones.....115

8 Recomendaciones.....119

Referencias.....121

índice de tablas

Tabla 1. Componentes del sistema de transporte de Manheim.....24
Tabla 2. Tipos de daños de superficie asfáltica en PCI.....35
Tabla 3. Rango de clasificación del PCI.....37
Tabla 4. Identificación de deterioros en la metodología VAZIR.....38
Tabla 5. Niveles de gravedad para deterioros Tipo A.....40
Tabla 6. Niveles de gravedad para deterioros Tipo B.....41
Tabla 7. Rango de clasificación IS.....44
Tabla 8. Rangos de clasificación del PSI.....45
Tabla 9. Daños en pavimentos flexibles según INVÍAS.....47
Tabla 10. Daños en pavimentos flexibles según DIM.....50
Tabla 11. Escala de valores del lRI para vías pavimentadas.....54
Tabla 12. Escala de valores del RI para vías no pavimentadas.....55
Tabla 13. Clasificación de métodos según el Banco Mundial.....56
Tabla 14. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos.....57
Tabla 15. Normativa colombiana de UAV.....60
Tabla 16. Clasificación de UAV en Colombia.....64
Tabla 17. Apartados generales del RAC 100.....65
Tabla 18. Normativa OACI de UAV.....67
Tabla 19. Clasificación de UAV en Europa.....68
Tabla 20. Normativa mexicana de UAV.....71
Tabla 21. Clasificación de UAV en México.....72
Tabla 22. Normativa argentina de UAV.....72
Tabla 23. Clasificación de UAV en Argentina.....73
Tabla 24. Clasificación de UAV de acuerdo a su tipo de sustentación.....75
Tabla 25. Resumen de los datos básicos en las ecuaciones de búsqueda del rango 1.....81
Tabla 26. Características del dron.....91

Tabla 27. Configuración de vuelo.....92
Tabla 28. Parámetros Software ProVal.....93
Tabla 29. Estadísticos de variación del IRI huella izquierda.....109
Tabla 30. Estadísticos de variación del IRI huella derecha.....110
Tabla 31. Estadísticos de variación del IRI huella izquierda.....112
Tabla 32. Estadísticos de variación del IRI huella derecha.....113

Índice de Figuras

Figura 1. Porcentaje de vías según superficie.....19
Figura 2. Distribución y longitud de la malla vial (Km) afectada..... 20
Figura 3. Relaciones entre sistemas de transporte, actividades y flujos.....25
Figura 4. Características de subsistemas de gestión de infraestructura.....27
Figura 5. Principios del sistema seguro para Colombia.....29
Figura 6. Áreas de acción de la estrategia del PNSV 2022-2031.....29
Figura 7. Modelo de cuarto de carro.....53
Figura 8. Rangos internacionales del IRI.....58
Figura 9. Cantidad de publicaciones por año.....79
Figura 10. Estructura del método PRISMA.....80
Figura 11. Comportamiento de palabras clave.....82
Figura 12. Relación entre palabra clave, año y revista.....83
Figura 13. Tendencias en infraestructura vial.....84
Figura 14. Propuesta metodológica.....87
Figura 15. Zona de estudio A.....88
Figura 16. Zona de estudio B.....88
Figura 17. Configuración de la misión de vuelo a través de la aplicación DroneDeploy. Zona A.....89
Figura 18. Configuración de la misión de vuelo a través de la aplicación DroneDeploy. Zona B.....90
Figura 19. Formato de vuelo.....91
Figura 20. Flujo de trabajo.....94
Figura 21. Esquematización de la extracción de perfiles.....95

Figura 22. Esquematización de la herramienta de identificación de irregularidades.....97
Figura 23. Esquema de curvatura.....100
Figura 24. DSM Zona A.....101
Figura 25. Ortofoto Zona A.....102
Figura 26. DSM Zona B.....102
Figura 27. Ortofoto Zona B.....103
Figura 28. Perfil topográfico Zona de estudio A.....104
Figura 29. Perfil topográfico Zona de estudio B.....104
Figura 30. Variación del IRI en función del rango de muestreo - Zona A.....105
Figura 31. Variación del IRI en función del rango de muestreo - Zona B.....105
Figura 32. Esquematización del IRI en el ancho de la huella...108
Figura 33. Variación del IRI en la huella izquierda.....109
Figura 34. Variación del IRI en la huella derecha.....110
Figura 35. Identificación de baches automatizada.....111
Figura 36. Variación del IRI en la huella izquierda.....112
Figura 37. Variación del IRI en la huella derecha.....113
Figura 38. Identificación de irregularidades en el modelo digital de superficie.....114

Introducción 1

La infraestructura vial puede definirse como el conjunto de elementos de ingeniería, instalaciones y servicios que apoya los sectores productivos de un país. En Colombia, la logística, el turismo y la agricultura son aspectos relevantes en el desarrollo social y económico, pues mediante estos se construyen escenarios que facilitan la interacción humana, el comercio y la cooperación económica interterritorial (Owens, 1971). De este modo, las carreteras son el activo vial más importante administrado por el Estado. Este tipo de infraestructura es fundamental en el desarrollo socioeconómico de la nación, pues su función es permitir el traslado de bienes, personas y la oferta de servicios

Para desarrollar dichas actividades, es importante que las carreteras sean funcionales, seguras y cómodas (Biçici & Zeybek, 2021), y contar con una infraestructura en condiciones óptimas que reduzca las externalidades medioambientales y vehiculares propias del funcionamiento del corredor vial (Kashiyama et al., 2020)

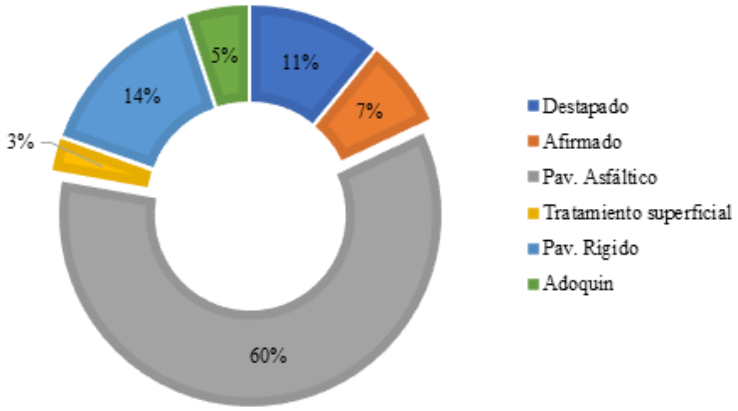
Recientemente, la inversión en el sector de infraestructura ha crecido, obligando a los gobiernos a disponer de sistemas de administración de activos viales. En el caso particular de Bogotá D.C, Colombia, el asunto de la infraestructura vial es crítico. Su acelerado crecimiento demográfico y la conurbación de municipios aledaños, representan fuertes tensiones en el ámbito social, el uso del suelo, la ocupación y la extensión e intervención del espacio

vial (Banco de Desarrollo de América Latina, 2011). Por lo anterior, la construcción y el mantenimiento de vías favorece la gestión de la movilidad, el ordenamiento territorial y los procesos de transformación urbana en esta ciudad, donde el 48% de la malla vial no se encuentra en buen estado, es decir, alrededor de 6.668 Km-carril (Secretaría Distrital de Planeación, 2020).

Por su parte, Tunja, la capital del departamento de Boyacá, ubicada en la cordillera oriental de los Andes, es un centro cultural, histórico, político y religioso que, junto con Duitama y Sogamoso, concentra la mayor parte de la actividad industrial y los procesos de modernización de la región. Por este motivo, la zona requiere una red vial que responda a las necesidades de su población, fortaleciendo la integración regional y el aumento productivo (Castro-Ricaurte, 2017).

Así, según lo presentado por la Administración Municipal de Tunja en su documento de diagnóstico titulado "Dimensión funcional", y desarrollado en el marco del Plan de Ordenamiento Territorial, se estima que la ciudad cuenta con una red vial total de 343,5 km (Alcaldía Mayor de Tunja, 2021) que puede ser clasificada en seis categorías según su superficie: destapado, afirmado, pavimento asfáltico, tratamiento superficial, pavimento rígido y adoquín, extendidos en 10 sectores cuyos valores porcentuales se presentan en la figura 1.

Figura 1. Porcentaje de vías según superficie



Fuente: Adaptado de (Alcaldía Mayor de Tunja, 2021).

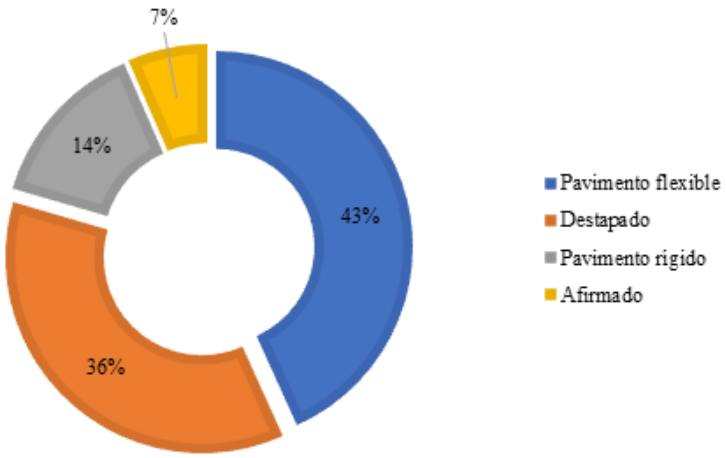
En la figura se identifica al pavimento asfáltico como superficie predominante, con 60 puntos porcentuales correspondientes a 205 Km, lo que evidencia una tendencia de desarrollo en vías, las cuales funcionan con este tipo de superficie y son las encargadas de recorrer y conectar la ciudad con vías de orden departamental y nacional. Seguido, se encuentran las vías de acceso a barrios, representadas con 14 puntos porcentuales de pavimento rígido.

Ahora bien, la identificación de la infraestructura vial no abarca solamente su extensión física sino también el nivel de servicio que proporciona según las condiciones que presenta. De este modo, la Alcaldía Mayor de Tunja (2021) expone en términos de longitud, categorías de vías por superficie y la sectorización definida, los kilómetros de carreteras afectadas por daños, es decir, en mal estado, y los kilómetros restantes en buen estado.

De acuerdo al diagnóstico realizado por la Administración Municipal de Tunja, el 30% de la red vial urbana presenta algún

tipo de daño (Alcaldía Mayor de Tunja, 2021). En la figura 2 se presenta la distribución de la malla vial urbana según la superficie de rodadura.

Figura 2. Distribución y longitud de la malla vial (Km) afectada



Fuente: Adaptado de (Alcaldía Mayor de Tunja, 2021).

Frente a este panorama es necesario reevaluar los métodos de inspección aplicados, con el fin de contar con información completa, detallada y veraz que ayude a identificar la gravedad de los daños y los tipos de deterioro del pavimento (Shtayat et al., 2020)y, por ende, permita optimizar los recursos destinados al mantenimiento de las mismas, mejorando así la calidad de la conducción, el confort y la seguridad de los usuarios.

Anteriormente, la inspección de carreteras era un proceso lento, costoso e impreciso, debido en parte a la escasez de tecnología disponible en los sistemas de vigilancia, pues se trataba de un procedimiento manual (Kaartinen et al., 2022), sin embargo, este proceso ha sido sustituido paulatinamente por técnicas

semiautomáticas/automáticas gracias a los avances en visión por computador y procesamiento de imágenes (Kheradmandi & Mehranfar, 2022). Apoyados en sistemas de inteligencia artificial, algoritmos y software, en conjunto con herramientas como computadores, sensores, cámaras y vehículos aéreos no tripulados, las tecnologías emergentes de inspección logran minimizar el factor de subjetividad presente en la metodología tradicional, mejorar la productividad y ampliar el nivel de detalle en la información recogida, aunque implican un coste superior al requerir una mayor inversión en la adquisición de sistemas y equipos correspondientes (Ragnoli et al., 2018)

Dentro de los avances tecnológicos evidenciados, se destacan los vehículos aéreos no tripulados (UAV) también conocidos como drones (Rodríguez Gonzalez et al., 2020). Estos, en el ámbito del transporte, tienen aplicabilidad en la supervisión y gestión de la infraestructura física de carreteras con dos enfoques principales: inspección y monitoreo de puentes, y el reconocimiento de desperfectos en el pavimento (Outay et al., 2020).

De acuerdo con esto, y según el segundo enfoque, varios autores han incluido el tema dentro de sus investigaciones y pruebas de campo. Silva et al. (2020) presentan el diseño de una plataforma que permite la detección de daños en vías mediante drones y proporcionan los resultados de los clasificadores más importantes; Atencio et al. (2022) identifican a través de matrices ortogonales de Taguchi los parámetros de vuelo óptimos en UAV para la recolección de datos que permitan la modelación 3D de baches en carreteras, y HemaMalini et al. (2022) presentan el proceso de detección de baches a través de datos recolectados con UAV por medio de un algoritmo de procesamiento de imágenes.

En ese contexto, este estudio busca exponer el proceso de inspección visual de pavimentos flexibles aplicado a diversas vías de la ciudad de Tunja, haciendo uso de tecnología de UAV. Así,

se presenta el flujo de trabajo, los parámetros y las herramientas involucradas para la obtención de la información y su consecuente procesamiento, haciendo énfasis en la estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y la detección de daños tipo hueco o baches a través de pruebas de campo y oficina.

2 Fundamentación teórica

La infraestructura vial puede definirse como el conjunto de elementos que permiten el desplazamiento vehicular de forma segura, cómoda y minimizando las externalidades asociadas. Esta definición incluye elementos físicos como pavimentos, puentes, túneles, señalización y elementos no tangibles como sistemas de administración vial. A lo largo de este apartado se presentan las definiciones, procesos de auscultación e introducción de los vehículos aéreos no tripulados y la normatividad asociada.

2.1. Sistema de transporte

El desarrollo de los sistemas de transporte de una nación se sustenta en el desarrollo económico de sí misma. Aunado a ello, factores como el crecimiento macroeconómico y demográfico demandan estructuras de transporte funcionales y económicamente sostenibles. Este concepto de sistema de transporte forma parte del modelo propuesto por Manheim (1979), en el cual se expone la dinámica a diferentes escalas, entre los sistemas de transporte, actividades y flujos. Esta definición soporta elementos de infraestructura vial, vehículos y operación. Por otro lado, es un sistema interconectado, toda vez que al intervenir o modificar alguna variable, el sistema se ajusta (Solminihac et al., 2019). En la tabla 1 se presentan las definiciones y componentes de cada variable.

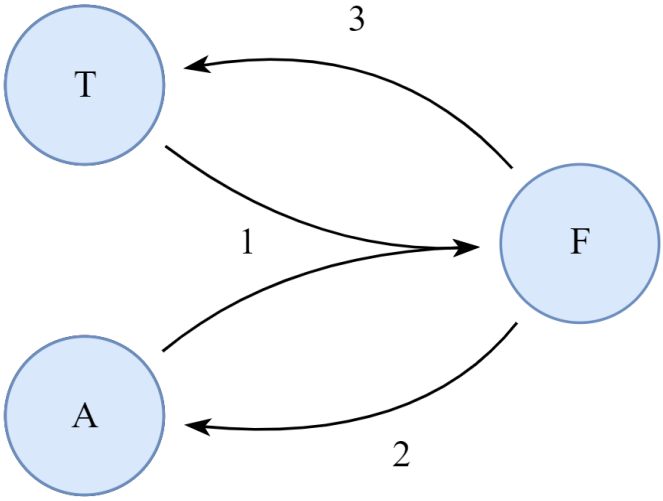
Tabla 1. Componentes del sistema de transporte de Manheim

Variable	Definición	Elementos
Infraestructura vial	Elementos utilizados como medio físico para el tránsito de vehículos	Vías urbanas, aeropuertos, puertos
Vehículos	Dispositivos o medios para el desplazamiento de personas o mercancías	Automóviles, buses, camiones, trenes, barcos y aviones
Operación	Medios para el ordenamiento de los vehículos sobre la infraestructura	Semáforos, señalización horizontal y vertical, sistemas de control aéreo

Fuente: Adaptado de (Solminihac et al., 2019).

Este sistema se compone de actividades que analizan las relaciones económicas y sociales. Incluye características como demografía, actividades económicas de la población, distribución y tipología de equipamientos urbanos, infraestructura y las relaciones de estos elementos con la potencial demanda de movilidad y variación en los viajes (Barreno Vereau et al., 2008). El sistema de flujos absorbe las características de los viajes; conceptos como matrices origen destino, modos, propósitos y rutas de viajes. El nivel de servicio es el concepto más importante en este sistema. El desarrollo conceptual del sistema tiene relaciones entre los subsistemas, las relaciones y sus características se exponen a en la figura 3.

Figura 3. Relaciones entre sistemas de transporte, actividades y flujos



Fuente: Adaptado de (Solminihac et al., 2019).

En las relaciones de tipo 1, la interacción entre el sistema de transporte y el sistema de actividades define una estructura de flujo específica que opera a un nivel de servicio determinado. Por ejemplo, la construcción de una nueva ruta en una red vial mejora el nivel de servicio al redistribuir los flujos, lo que, a su vez, modifica la estructura de estos. Del mismo modo, cambios en el uso del suelo pueden introducir nuevas actividades o intensificar las existentes (como proyectos inmobiliarios, instalación de industrias, servicios, áreas verdes, equipamiento o usos mixtos), lo que influye en la atracción y generación de viajes, así como en los orígenes y destinos dentro de una zona determinada.

En cuanto a la relación de tipo 2, esta se refiere a variaciones en la estructura de los flujos que pueden provocar cambios en el sistema de actividades, ya sea debido a modificaciones en el nivel

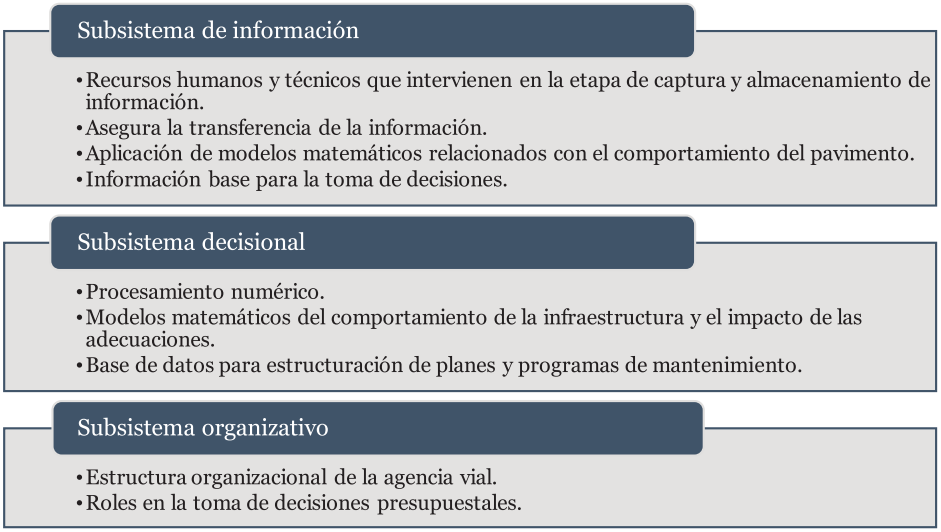
de servicio o en los recursos empleados para la prestación de estos. Por ejemplo, una reducción en los tiempos de viaje hacia cierta área puede estimular el desarrollo de viviendas.

Por último, la relación de tipo 3 señala que los cambios en la estructura de los flujos pueden impulsar transformaciones en el sistema de transporte. Esto se observa en la planificación vial llevada a cabo por el Estado o por agentes privados, quienes anticipan las necesidades de transporte que se prevé serán importantes en el futuro.

2.2. Sistema de infraestructura

La gestión de infraestructura comprende actividades enfocadas al desarrollo de planes y programas de mantenimiento integral de activos viales. De acuerdo con Solminihac et al (2019) el patrimonio nacional se compone del capital humano, patrimonio natural y activos físicos, como la infraestructura. La capacidad y conexión de la infraestructura de transporte es fundamental para el desarrollo económico de la nación, y el estado funcional de la misma influye en los costos para los usuarios. Según el rubro presupuestal destinado a la construcción y mantenimiento vial, es fundamental aplicar sistemas de gestión. En resumen, un sistema de gestión de infraestructura es el conjunto de actividades involucradas en la planificación, diseño, construcción, mantenimiento y seguimiento de activos viales. A su vez, estos sistemas se componen de subsistemas con entradas, procesamientos y salidas de información específica. Sus características se exponen en la Figura 4.

Figura 4. Características de subsistemas de gestión de infraestructura



Fuente: Adaptado de (AASTHO, 1993; Solminihac et al., 2019).

A continuación, se describen las agencias y planes de seguridad vial para Colombia.

2.2.1. Rol agencias gubernamentales

El Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) es la entidad encargada del desarrollo vial de Colombia. Algunas de las funciones misionales incluyen la ejecución de políticas y proyectos de infraestructura en procura de aumentar la conectividad, movilidad y economía del país. Del mismo modo, le corresponde la modernización de infraestructura de varios modos de transporte como carreteras, ferrocarriles, vías fluviales y marítimas. En contraposición, la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) tiene como fin la planificación, financiación, construcción y mantenimiento de proyectos de infraestructura de transporte a través de asociaciones o concesiones viales.

2.2.2. Seguridad vial

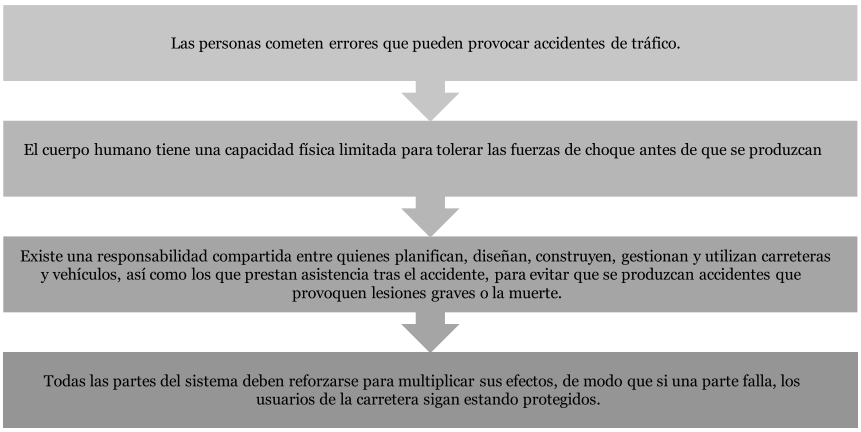
La seguridad vial es prioridad a nivel internacional. Desde un enfoque técnico, la asociación de agencias de transporte de Australia y Nueva Zelanda (*Austroads*, por sus siglas en inglés) es referente para el asesoramiento, creación de herramientas y servicios técnicos; entre ellos, documentos con recomendaciones para la mejora de la seguridad vial y cuyo principio es salvaguardar la vida mediante la incorporación de conceptos, principios y ejemplos clave de la seguridad vial, y que sean fácilmente accesibles para todos los involucrados en la planificación, diseño y gestión de la infraestructura vial. Como referente conceptual se tiene la guía de seguridad vial de *Austroads*, la cual ofrece a las organizaciones herramientas para abordar sus necesidades técnicas y de fomento a través de alianzas gubernamentales.

A nivel nacional, se aprobó el Plan Nacional de Seguridad Vial a través del Decreto 1430 de 2022. A continuación, se contextualizan los conceptos con mayor impacto.

2.2.2.1. Plan Nacional de Seguridad Vial (PNSV) 2022 – 2031.

El eje del plan es la protección de la vida en las vías, para ello se propone una aplicación integral del sistema seguro. El principio de este enfoque es que ningún ser humano debe perder su vida o sufrir lesiones graves a causa de un siniestro vial. Con el fin de cumplir la premisa anterior, se deben suplir los principios de la figura 5.

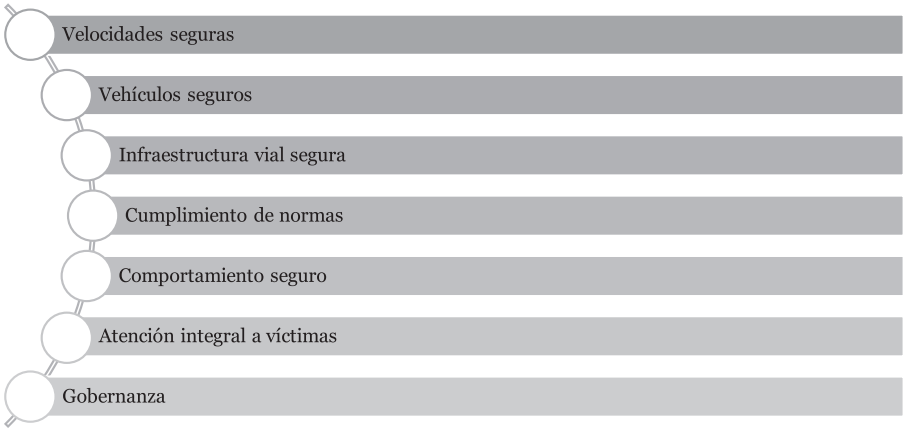
Figura 5. Principios del sistema seguro para Colombia



Fuente: Adaptado de Decreto 1430 de 2022.

Finalmente, el PNSV define un enfoque integral al abordar 8 áreas de acción y su articulación con medidas, requisitos, responsabilidad asistida y estrategias de seguimiento establecidas en el Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial. Las áreas se presentan en la figura 6.

Figura 6. Áreas de acción de la estrategia del PNSV 2022-2031



Fuente: Adaptado de Decreto 1430 de 2022.

2.3. Auscultación de pavimentos

2.3.1. Métodos de auscultación de pavimentos

Las técnicas de auscultación de pavimentos son los métodos utilizados para evaluar el estado superficial de una carretera, en particular su pavimento. El objetivo de estas técnicas es identificar cualquier defecto, daño o deterioro en el pavimento y así realizar el mantenimiento o la reparación adecuada; de esta manera se preserva la infraestructura viaria y se proporcionan instalaciones de transporte seguras (Chen & Wimsatt, 2010). Dentro de los procesos de evaluación ejecutados, se reconocen tres etapas: la toma de datos, la identificación de los problemas y la evaluación de los defectos. Recientemente, en la práctica común, la primera parte está en gran medida automatizada, mientras que las dos últimas se realizan principalmente de forma manual (Koch & Brilakis, 2011). Así, las técnicas usadas son:

2.3.1.1. Inspección visual

Se trata de un examen visual minucioso de la superficie del pavimento para identificar diversos daños a la estructura. Esta se puede realizar de dos maneras, manual o automatizada. En la primera de ellas, profesionales con conocimientos en el área recorren la zona a caracterizar y, guiados por manuales de inspección, recogen datos en formatos llenados a mano (Porras Díaz et al., 2014). Sin embargo, el uso de inspectores humanos lleva mucho tiempo, es costoso, representa un riesgo para la seguridad humana e implica generalmente el cierre de la vía, lo cual disminuye la practicidad que puede representar este método (Akagic et al., 2018)

Para el segundo caso, se aprovechan recursos tecnológicos mediante el uso de vehículos especializados que recogen datos gracias a sensores, perfiladores de carreteras, acelerómetros, cámaras de imagen y video, y sistemas de posicionamiento (Radopoulou &

Brilakis, 2015). Inicialmente el método fotográfico, a través de imágenes analógicas del pavimento, fue utilizado durante muchos años en las tareas de inspección y vigilancia, sin embargo, gracias a la madurez de la tecnología digital, este método ha sido reemplazado por las imágenes digitales (Porras et al., 2012).

El empleo de cámaras digitales para la obtención de imágenes de pavimento ofrece diversas ventajas frente a su método antecesor. La configuración del vehículo de inspección es relativamente sencilla al incorporar una o dos cámaras que capturan las imágenes requeridas, obteniendo así recursos de alta calidad que pueden ser utilizados en análisis automatizados de diversa índole de acuerdo con las necesidades del estudio, con disponibilidad aleatoria de los datos recogidos (National Cooperative Highway Research Program, 2004) y superando las limitaciones espaciales y temporales asociadas con la inspección humana (Yeum et al., 2017). Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos levantados, el procesamiento de imágenes irrelevantes puede generar una cantidad significativa de falsos positivos, razón por la cual se deben usar técnicas de inspección visual automatizadas apoyadas en algoritmos, como la detección de objetivos y la mejora de imágenes, para reducir el sesgo de la inspección en estas tecnologías automatizadas (Agnisarman et al., 2019)

2.3.1.2. Pruebas de deflexión de la superficie

Consiste en medir la deflexión o deformación de la superficie del pavimento cuando se aplica una carga, simulando las condiciones impuestas por el tránsito vehicular en pro de estimar parámetros relacionados con la capacidad estructural de pavimentos en servicio, útiles en etapas de evaluación y procesos de toma de decisión sobre mantenimiento y rehabilitación (Beltrán & Romo, 2012). Entre los distintos tipos de pruebas de deflexión, la prueba del deflectómetro de peso descendente (FWD) es la más utilizada (Roussel et al., 2019).

El FWD es uno de los métodos de prueba no destructivos más comunes para evaluar la capacidad de carga en las principales infraestructuras viales mediante el uso de datos de deflexión generados por un dispositivo de carga para cuantificar la respuesta de una estructura de pavimento según el principio de carga de impulso (Kara De Maeijer et al., 2019). Durante la operación, una carga variable, generalmente de 9.000 lb (40 kN), está obligada a caer verticalmente por gravedad sobre una placa cargada con un resorte de 30 cm (11,82 in) de diámetro que descansa sobre la superficie del pavimento. La respuesta del pavimento al impulso de carga normalmente se mide con un conjunto de siete transductores de velocidad (geófonos) colocados a diferentes distancias radiales del centro de la placa (Mehta & Roque, 2003). Las deflexiones de la superficie obtenidas de las pruebas de FWD se utilizan para retrocalcular las propiedades del material *in situ*, representativas de la respuesta del pavimento a una carga. Estas propiedades pueden ser utilizadas para evaluar las tensiones y deformaciones que son válidas para el análisis y diseño estructural y de fatiga del pavimento (Kara De Maeijer et al., 2019), sin embargo, la precisión de los resultados (esfuerzos y deformaciones en puntos críticos del pavimento) depende de las suposiciones utilizadas para el análisis (Chen & Scullion, 2008)

2.3.1.3. Radar de penetración en el suelo (GPR)

Es un método de ensayo no destructivo que utiliza ondas electromagnéticas para crear, principalmente, una imagen de las capas subsuperficiales del pavimento; sin embargo, también es aplicado en la detección de delaminación, la remoción de asfalto y la detección de huecos con resultados menos satisfactorios (Saarenketo & Scullion, 2000).

Para la aplicación del GPR, se coloca una antena encima o se arrastra sobre la superficie del lugar de evaluación deseado donde se envían pulsos cortos de energía electromagnética para

penetrar el material. Cuando los pulsos encuentran una interfaz entre dos materiales diferentes de diferente constante dieléctrica, una parte de la energía se refleja de regreso. La antena recibe la energía reflejada y genera una señal proporcional a la amplitud del campo electromagnético reflejado (Hammarström, 2019). En los pavimentos, esta señal se puede referir a la transición de una capa a la siguiente, la aparición de una discontinuidad dentro del decapado de una capa y el cambio de densidad o el contenido de humedad de las mismas, entre otras características (Chen & Scullion, 2008)

Las ventajas de la técnica en este caso son la velocidad, ya que permite montar el dispositivo de radar en un vehículo, la precisión que alcanza, el perfil continuo generado y la ausencia del control de tráfico, lo cual resulta importante para las áreas urbanas en particular, donde los cierres de carriles son difíciles y costosos (Hammarström, 2019).

2.3.1.4. Termografía infrarroja

Esta técnica consiste en utilizar cámaras de infrarrojos para controlar la calidad del pavimento al reconocer que los posibles defectos presentan una temperatura diferente a las zonas no afectadas, a partir de patrones de calor visualizados en un material de destino; así, entre más grande sea la diferencia de temperatura, más fácil será la identificación de zonas del pavimento propensas a agrietarse o a sufrir otros daños (Solla et al., 2014). Esta técnica se ha utilizado de manera eficiente en la detección de grietas, huecos y otras imperfecciones que aparecen debido al envejecimiento de los materiales. La evaluación de los pavimentos mediante termografía infrarroja es posible, ya que los defectos del subsuelo en un material modifican el flujo de calor a través de ese material, generando diferencias de temperatura superficial (Moropoulou et al., 2001). Sin embargo, también se deben considerar factores adicionales como las condiciones ambientales, los valores de emisividad y las

temperaturas de la superficie para obtener resultados confiables (Maser & Roddis, 1990).

Entre otros métodos no destructivos de auscultación, la termografía infrarroja se destaca por su tiempo de inspección relativamente corto, no requerir contacto o acoplamiento, fácil interpretación de datos ya que los resultados son en su mayoría imágenes o videos, y menos experiencia y tiempo de capacitación en la realización de proceso (Bang et al., 2020).

2.3.2. Evaluación técnica

La gestión adecuada de la información existente sobre el estado de las carreteras es esencial para las prácticas de mantenimiento. Al desconocer la situación real o realizar una evaluación a juicio personal, se pueden tomar decisiones erróneas como una programación imprevista de las correcciones de los deterioros, o sobrecostos en los mantenimientos, entre otros. Así, indicadores como el PCI, PSI, IRI o VIZIR, ofrecen metodologías útiles para los municipios y las agencias de transporte que evalúan el estado y la vida útil restante de sus carreteras, garantizando que los presupuestos de conservación se ejecuten de forma adecuada (Piryonesi & El-Diraby, 2020)

2.3.2.1. Metodología PCI

El Índice del estado del pavimento (PCI, por sus siglas en inglés), es un método no destructivo desarrollado inicialmente por la fuerza aérea norteamericana, hoy en día estandarizado en los documentos ASTM D6433 y ASTM D5340.5 (Federal Highway Administration, 2021). Este índice pretende determinar el estado superficial de carreteras de acuerdo al nivel de deterioro detectado y, consecuentemente, las necesidades de mantenimiento y rehabilitación asociadas (Karim et al., 2016).

El procedimiento general de este índice consiste en identificar la sección de pavimento a inspeccionar para luego establecer unidades de muestreo a partir del tipo de vía, de la capa de rodadura y nivel

de precisión esperado. De acuerdo a esto, se realiza la obtención de datos a partir de la inspección visual de la superficie del pavimento, donde evaluadores formados caminan o conducen a lo largo de la zona observando y calificando las alteraciones reconocidas, y establecen la clase, severidad y cantidad de cada una (Rodríguez Velásquez, 2009).

Tabla 2. Tipos de daños de superficie asfáltica en PCI

Ingles	Español
Alligator Cracking	Piel de cocodrilo
Bleeding	Exudación
Block Cracking	Agrietamiento en Bloque
Bumps and Sags	Abultamientos y Hundimientos
Corrugation	Corrugación
Depression	Depresión
Edge Cracking	Grieta de Borde
Joint Reflection Cracking	Grieta de Reflexión de Junta
Lane / Shoulder Drop Off	Desnivel Carril / Berma
Longitudinal & Transversal Cracking	Grietas Longitudinales y Transversales
Patching & Utility Patching	Parcheo y acometidas de servicios
Polished Aggregates	Pulimento de Agregados
Potholes	Huecos
Railroad Crossing	Cruce de Vía Férrea
Rutting	Ahuellamiento
Shoving	Desplazamiento
Slippage Cracking	Grietas Parabólicas o por deslizamiento
Swell	Hinchamiento
Weathering / Raveling	Meteorización / Desprendimiento de Agregados

Fuente: Adaptado de (Vásquez Varela, 2015)por su sigla en inglés.

Dada la gran cantidad de combinaciones posibles, el PCI asigna un indicador conocido como "Valor deducido" que puede ir entre el 100% y el 0%, donde el valor máximo corresponde a un pavimento nuevo o en perfecto estado, y va disminuyendo en la medida en que se detecta deterioro en la estructura, hasta llegar a la condición de falla asociada al valor mínimo (Vásquez Varela, 2015)por su sigla en inglés. El valor para cada lesión se obtiene a partir de curvas establecidas por el método, para luego calcular el Valor Deducido Total (VDT) como la suma del valor obtenido para cada lesión, en función del número de valores a deducir en una misma unidad a través de un proceso iterativo o un proceso apoyado en gráficas. Finalmente, se calcula el PCI de la unidad restando 100 del Valor Deducido Total Corregido (VDCT) previamente calculado, para luego repetir el proceso en cada una de las zonas seleccionadas y estimar el PCI promedio de la vía (Oviedo Haito, 2021).

En general, la expresión utilizada para calcular el valor del PCI es la siguiente:

$$PCI = C - \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{m_i} a\left(T_j, S_j, D_{ij}\right) F(t, q)$$

Donde,

PCI = Índice de estado del pavimento.

C = Valor máximo del índice de estado (puntuación perfecta, normalmente 100).

a (T, S, D) = Función de valor de deducción que varía con el tipo (T), la gravedad (S) y la densidad (D) de la lesión.

F(t, q) = Función de ajuste que varía con el valor de deducción total (t) y el número de deducciones (q).

i y j = contadores de tipos de dificultades y niveles de gravedad, respectivamente.

p = número total de tipos de dificultades observadas.

mi = número de niveles de gravedad del i-ésimo tipo de problema. (Normalmente, se utilizan tres niveles de gravedad: bajo, medio y alto)

El valor resultante se puede ubicar dentro de los rangos establecidos para obtener una calificación generalizada del estado de la vía estudiada en función de las alteraciones detectadas y reconocidas por la metodología, según se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Rango de clasificación del PCI

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

Fuente: Adaptado de (American Society for Testing and Materials, 2021).

Así, el método PCI es una herramienta importante y ampliamente utilizada por los profesionales de la gestión de pavimentos para evaluar el estado y el rendimiento de los mismos, al ofrecer una percepción clara y estandarizada de los daños existentes, sus

posibles causas y su relación con el ambiente (Piryonesi & El-Diraby, 2020)the long-term pavement performance (LTPP.

2.3.2.2. Metodología VIZIR

La metodología de auscultación francesa VIZIR es un sistema que utiliza datos procedentes de estudios de comportamiento del pavimento para estimar su vida útil prevista. Este sistema se caracteriza por dar una clasificación inicial de dos tipos de daños: tipo A y tipo B. Los daños tipo A, de carácter estructural, son asociados generalmente a insuficiencia de la capacidad estructural y comprenden las deformaciones y los fusilamientos ligados a la fatiga del pavimento, entre otros deterioros relevantes; mientras que los daños tipo B, de carácter funcional, están asociados a aspectos constructivos y condiciones locales que el tránsito ayuda a poner en evidencia (Instituto Nacional de Vías, 2008).

El procedimiento a seguir según esta metodología considera inicialmente la disponibilidad de equipos como cinta métrica, cámara fotográfica o de video, y la experticia y capacidad del personal seleccionado, para establecer el tipo de auscultación a aplicar (en campo, o mediante equipo de grabación). En el primer caso, el personal debe estar en capacidad de reconocer los tipos de daños, A o B, y la identificación particular de cada lesión presente. Para ello, se tiene de referencia la tabla 4, la cual presenta un listado de los deterioros relevantes, códigos de identificación y unidad de medida (Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, 2012).

Tabla 4. Identificación de deterioros en la metodología VAZIR

Tipo	Nombre del deterioro	Código	Unidad
Tipo A	Ahuellamiento	AH	m
	Depresiones o hundimientos longitudinales	DL	m

Tipo	Nombre del deterioro	Código	Unidad
Tipo A	Depresiones o hundimientos transversales	DT	m
	Fisuras longitudinales por fatiga	FLF	m
	Fisuras piel de cocodrilo	FPC	m
	Bacheos y parcheos	B	m
Tipo B	Fisura longitudinal de junta de construcción	FLJ	m
	Fisura transversal de junta de construcción	FTJ	m
	Fisuras de contracción térmica	FCT	m
	Fisuras parabólicas	FP	m
	Fisura de borde	FB	m
	Ojos de pescado	OP	unidad
	Desplazamiento, abultamiento o ahuellamiento de la mezcla	DM	m
	Pérdida de la película de ligante	PL	m
	Pérdida de agregados	PA	m
	Descascaramiento	D	m2
	Pulimento de agregados	PU	m
	Exudación	EX	m
	Afloramiento de mortero	AM	m
	Afloramiento de agua	AA	m
	Desintegración de los bordes del pavimento	DB	m
	Escalonamiento entre calzada y berma	ECB	m
	Erosión de las bermas	EB	m
	Segregación	S	m

Fuente: Adaptado de (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Identificada la lesión, se establece la gravedad del daño según la tabla 5 y tabla 6, donde se consideran muestreos de 100 metros de longitud, y en el caso de doble calzada, se toman lecturas independientes.

Tabla 5. Niveles de gravedad para deterioros Tipo A

Deterioro	Nivel de gravedad		
	1	2	3
Ahuellamiento y otras deformaciones estructurales	Sensible al usuario, pero poco importante	Deformaciones importantes. Hundimientos localizados o ahuellamiento.	Deformaciones que afectan de manera importante la comodidad y la seguridad de los usuarios. Prof. >40mm
	Prof. <20mm	20 mm ≤ Prof. ≤40 mm	
Grietas longitudinales por fatiga	Grietas finas en la huella de rodamiento <6mm	Grietas abiertas y a menudo ramificadas	Grietas muy ramificadas y/o muy abiertas. Bordes de grietas ocasionalmente degradados.
Piel de cocodrilo	Piel de cocodrilo formada por mallas (>500mm) con grietas finas, 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

Deterioro	Nivel de gravedad		
	1	2	3
Bacheos y parcheos	Intervención de superficie ligada a deterioros tipo B	Intervenciones ligadas a deterioros tipo A	
		Comportamiento satisfactorio de la reparación	Ocurrencia de fallas en las zonas reparadas

Fuente: Adaptado de (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Tabla 6. Niveles de gravedad para deterioros Tipo B

Deterioro		Nivel de gravedad				
		1	2		3	
Grietas longitudinales de junta de construcción		Fina y única (< 10 mm)	Ancha (≥10mm) sin desprendimiento o fina ramificada		Ancha con desprendimientos o ramificada	
Grietas de contracción térmica.		Grietas finas	Anchas sin desprendimiento, o finas con desprendimientos o fisuras ramificadas		Anchas con desprendimientos	
Grietas parabólicas		Grietas finas	Anchas sin desprendimientos		Anchas con desprendimientos	
Grietas de borde		Grietas finas	Anchas sin desprendimientos		Anchas con desprendimientos	
Abultamientos		h < 20 mm	20mm ≤ h ≤ 40mm		h > 40 mm	
Ojos de pescado*(por cada 100 m)	Cantidad	<5	5 a 10	< 5	> 10	5 a 10
	Diámetro (mm)	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	≤ 300	≤ 1000

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">Deterioro</th><th colspan="4">Nivel de gravedad</th></tr>
<tr><th>1</th><th colspan="2">2</th><th>3</th></tr>
<tr><td colspan="2">Desprendimientos:</td><td rowspan="3">Pérdidas aisladas</td><td colspan="2" rowspan="3">Pérdidas continuas</td><td rowspan="3">Pérdidas generalizadas y muy marcadas</td></tr>
<tr><td colspan="2">- Pérdida de película de ligante.</td></tr>
<tr><td colspan="2">- Pérdida de agregado</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Descascaramiento</td><td>Prof.</td><td rowspan="2">≤ 25</td><td rowspan="2">≤ 25</td><td rowspan="2">> 25</td><td rowspan="2">> 25</td></tr>
<tr><td>(mm)</td></tr>
<tr><td>Área</td><td rowspan="2">≤ 0.8</td><td rowspan="2">> 0,8</td><td rowspan="2">≤ 0,8</td><td rowspan="2">> 0,8</td></tr>
<tr><td>(m2)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pulimento agregados</td><td colspan="4">No se definen niveles de gravedad</td></tr>
<tr><td colspan="2">Exudación</td><td>Puntual, área específica</td><td colspan="2">Continua sobre las trayectorias por donde circulan las ruedas del vehículo.</td><td>Continua y muy marcada, en diversas áreas.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Afloramientos:</td><td rowspan="3">Localizados y apenas perceptibles</td><td colspan="2" rowspan="3">Intensos</td><td rowspan="3">Muy intensos</td></tr>
<tr><td colspan="2">- De mortero</td></tr>
<tr><td colspan="2">- De agua</td></tr>
<tr><td colspan="2">Desintegración de los bordes del pavimento</td><td>Inicio de la desintegración, sectores localizados</td><td colspan="2">La calzada ha sido afectada en un ancho de 500 mm o más.</td><td>Erosión extrema que conduce a la desintegración del revestimiento asfáltico</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Escalonamiento entre calzada y berma
mm</td><td>Desnivel entre 10 y 50</td><td colspan="2">Desnivel entre 50 y 100</td><td rowspan="2">Desnivel superior a 100 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">mm</td><td></td></tr>
</table>

Deterioro	Nivel de gravedad		
	1	2	3
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**	No se definen niveles de gravedad		

* Cuando el número de ojos de pescado supere el número y el tamaño descritos en la tabla, se deberán enfrentar como deterioros tipo A.

** La segregación no está incluida como deterioro por el método VIZIR. Sin embargo, para los efectos de la aplicación de la norma E 813-4 se sugiere considerarla.

Fuente: Adaptado de (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Como resultado de esta evaluación, se determina el Índice de Deterioro Superficial (IS), un valor adimensional calculado a partir de la sectorización de los tramos de vía por áreas para analizar su estado en tres categorías, bueno, regular y deficiente, como se expone en la tabla 7. Para llegar a este índice, se requiere el cálculo de otros índices previos: El Índice de Fisuración (If), que involucra los deterioros de tipo fisuramientos estructurales y el Índice de Deformación (Id), que involucra los deterioros de tipo deformaciones estructurales, los cuales, a su vez, dependen del nivel de gravedad y de la extensión, también conocida como densidad (%). En ambos casos, al tener más de un mismo tipo de deterioro, se toma como representativo el mayor de los dos índices calculados.

Tabla 7. Rango de clasificación IS

Rango	Clasificación
1 y 2	Bueno
3 y 4	Regular
5, 6 y 7	Deficiente

Fuente: Adaptado de (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Así, el sistema VIZIR se caracteriza por su sencillo procedimiento de aplicación, con una clara distinción entre los deterioros estructurales y los funcionales, por lo cual ha sido probado con éxito en la evaluación de pavimentos asfálticos en países en vía de desarrollo (Instituto Nacional de Vías, 2008).

2.3.2.3. Metodología PSI

La guía de la AASHTO sobre diseño de pavimentos, adopta el concepto de Índice de Capacidad de Servicio Actual (PSI) para describir el estado funcional de las vías con respecto a la calidad de rodadura (Morova et al., 2007). Este índice, derivado por ecuación, busca determinar la transitabilidad de la vía en relación con los deterioros medibles y la rugosidad del pavimento en una escala de 0 a 5 (Chou & Wu, 1997). Los valores más altos indican que la superficie del pavimento está en mejores condiciones y se espera que proporcione una vida útil más larga, mientras que los valores inferiores pueden denotar condiciones de servicio deficiente (Terzi, 2006). Los rangos del PSI se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Rangos de clasificación del PSI

PSI	Calificación
5 - 4	Muy buena
4 - 3	Buena
3 - 2	Regular
2 - 1	Mala
1 - 0	Muy mala

Fuente: Adaptado de (De La Cruz Vega et al., 2022)en Puno, Perú. Los resultados determinan que, para el tramo indicado, se tiene un PSI (del inglés Pavement Serviceability Index.

El cálculo de este índice combina la inspección visual con datos de deterioro del pavimento: En el primer caso se hace una evaluación de la superficie del pavimento en busca de grietas, huecos, parches y otros tipos de deterioro, mientras que en el segundo caso se recopilan los datos a través de equipos especializados, como láseres y cámaras, para medir la gravedad y el alcance de los distintos tipos de deterioro del pavimento (Hall & Correa, 1999). Las ecuaciones matemáticas empleadas en el proceso son:

Pavimento rígido

$$p = 5.41 - 1.80\ log[1 + S_v] - 0.09\ [C_r + P]^{\frac{1}{2}}$$

Pavimento flexible

$$p = 5.03 - 1.91\ log[1 + S_v] - 0.01\ [C_f + P]^{\frac{1}{2}} - 1.38\ (RD)^2$$

Donde

Sv = Varianza de las inclinaciones de la rasante existente en sentido longitudinal respecto de la rasante inicial.

Cf = Suma de las áreas fisuradas con grietas longitudinales y transversales (pie²/1000pies²)

P = Área bacheada (pies²/1000pies²)

RD = Profundidad media del ahuellamiento (pulgadas)

Cr = Longitud de las grietas principales, selladas o abiertas (pies/1.000 pie²)

El PSI es comúnmente utilizado por las agencias de transporte y los ingenieros de pavimentos para evaluar el estado de una carretera o superficie de pavimento asociado a la rugosidad, y priorizar las actividades de mantenimiento y rehabilitación (Morova et al., 2007). Al medir el PSI de diferentes secciones de pavimento, los ingenieros pueden identificar las áreas que requieren mantenimiento o rehabilitación y priorizar esos proyectos en función de su impacto en la calidad de la conducción, la seguridad de los usuarios y la vida útil del pavimento.

2.3.3. Manuales de inspección

Los manuales de evaluación técnica de pavimentos son documentos que proporcionan orientación sobre cómo realizar una evaluación exhaustiva y precisa del estado y comportamiento de las superficies de los pavimentos. Estos manuales suelen proporcionar instrucciones detalladas sobre las diversas técnicas y métodos utilizados en la evaluación de pavimentos, así como las mejores prácticas para la recopilación y el análisis de datos. Diversas instituciones de carácter nacional e internacional, de acuerdo con las necesidades y condiciones observadas dentro de los contextos particulares, plantean manuales de inspección de pavimentos atendiendo a las técnicas de auscultación e indicadores existentes. Algunos ejemplos de manuales de evaluación técnica de pavimentos son:

2.3.3.1. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles

El Ministerio de Transporte y el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), junto con la Universidad Nacional de Colombia,

presenta a través de cuatro capítulos información relacionada con la inspección y reporte de patologías para este tipo de superficie, pasando por la definición de daños, formatos de registro para la inspección en campo y formas de presentación de datos tomados (Ministerio de Transporte et al., 2006).

De este modo, el manual reconoce los posibles daños detallados dentro de cinco categorías. Cada una de ellas presenta subdivisiones particulares asociadas a características propias de las lesiones, sus causas, los niveles de severidad posibles y casos de evolución probable, como se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Daños en pavimentos flexibles según INVÍAS

Categoría	Lesión	Sigla	Evolución probable
Fisuras	Fisuras longitudinales y transversales	FL	Piel de cocodrilo, desintegración, descascaramiento, asentamientos longitudinales o transversales, fisuras en bloque
		FT	
	Fisuras en juntas de construcción	FCL	Pérdida de agregado, descascaramiento, piel de cocodrilo, asentamientos longitudinales o transversales, desportillamientos
		FCT	
	Fisura por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto	FJT	Fisuras en bloque, descascaramiento, baches
	Fisuras en medialuna	FML	Aumento del área afectada, aumentos del hundimiento, pérdida de la banca

Categoría	Lesión	Sigla	Evolución probable
Fisuras	Fisuras de borde	FBD	Desprendimiento del borde o descascaramiento
	Fisuras en bloque	FBD	Piel de cocodrilo, descascaramiento
	Piel de cocodrilo	PC	Deformaciones, descascaramientos, baches
	Fisuración por deslizamiento de capas	FDC	Descascaramiento, baches, hundimientos, abultamientos
	Fisuración incipiente	FIN	Piel de cocodrilo de pequeños bloques, pérdida de agregados, fisuras en bloque
Deformaciones	Ondulación	OND	Exudación, ahuellamiento
	Abultamiento	AB	Fisuración, desprendimientos, exudación, ahuellamiento
	Hundimiento	HUN	Fisuración, desprendimientos, movimientos en masa
	Ahuellamiento	AHU	Piel de cocodrilo, desprendimientos
Pérdida de capas estructurales	Descascaramiento	DC	Piel de cocodrilo, bache
	Baches	BCH	Destrucción de la estructura
	Parche	PCH	De acuerdo con la naturaleza del daño
Daños superficiales	Desgaste superficial	DSU	Pérdida de agregado, descascaramiento, piel de cocodrilo, asentamientos longitudinales o transversales, desportillamientos
	Pérdida de agregado	PA	Descascaramientos, aumento de la permeabilidad, exudación

Categoría	Lesión	Sigla	Evolución probable
Daños superficiales	Pulimento del agregado	PU	-
	Cabezas duras	CD	-
	Exudación	EX	-
	Surcos	SU	Pérdida de agregado, descascaramientos, baches
Otros daños	Corrimiento vertical de la berma	CVB	-
	Separación de la berma	SB	Hundimientos y fisuras de borde
	Afloramiento de finos	AFI	Piel de cocodrilo, descascaramientos, baches
	Afloramiento de agua	AFA	Piel de cocodrilo, descascaramientos baches

Fuente: Adaptado de (Ministerio de Transporte et al., 2006).

En conjunto con esto, el Instituto Nacional de Vías dispone de una serie de guías para el levantamiento y registro de las lesiones de acuerdo con la nomenclatura antes establecida y demás datos asociados, como ubicación, dimensiones e ilustración. En última instancia, indica el manejo del reporte de la información final a partir del procesamiento y análisis de los datos levantados junto con las indicaciones requeridas dentro del informe de resultados.

2.3.3.2. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program

El Manual de Identificación de Lesiones (DIM) es el producto investigativo del Programa de Rendimiento de Pavimentos a Largo Plazo (LTPP), apoyado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), para recopilar y analizar datos sobre pavimentos en Estados Unidos y Canadá. Así, proporciona una guía para la

recopilación de datos sobre el deterioro de los pavimentos a través de nomenclatura, definiciones, niveles de gravedad y métodos de medición estandarizados para las lesiones en cuestión.

En el primer capítulo del manual se expone lo relacionado con lesiones en pavimento asfáltico identificando cinco categorías: grietas, parches y baches, deformaciones superficiales, defectos superficiales y defectos varios, con correspondientes subcategorías, como se presenta en la tabla 10. Para cada una de estas categorías se presenta además una breve descripción, niveles de severidad, formas de medición e ilustraciones y fotografías de guía

Tabla 10. Daños en pavimentos flexibles según DIM

Categoría	Lesión	Unidad
Fisuras	Fisuración por fatiga	m2
	Fisuración en bloque	m2
	Fisuración de bordes	m
	F. Longitudinal de la trayectoria de la rueda	m
	F. Longitudinal sin trayectoria de la rueda	m
	Fisuración por reflexión en las juntas	No medible
	Fisuración transversal	m
Parcheado y baches	Deterioro de parches	m2
	Baches	m2
Deformación de la superficie	Ahuellamiento	mm
	Desplazamiento	m2
Defectos superficiales	Exudación	m2
	Pulimento del agregado	m2
	Desprendimiento	m2
Disturbios Varios	Desnivel carril/berma	No medible
	Exudación y bombeo de agua	m

Fuente: Adaptado de (Federal Highway Administration, 2014).

En el segundo y tercer capítulo repite el mismo eje temático, esta vez para las afecciones asociadas a pavimentos con superficies de concreto de cemento portland articulado, y pavimentos con superficies de concreto armado continuo, respectivamente. En los tres apartados finales del documento se exponen las instrucciones y ejemplos para el llenado de hojas de datos y mapas de deterioro dispuestos para inspecciones visuales; un manual particular para la medición de fallas en juntas y el desnivel carril/berma, y una sección redirigida hacia los procedimientos operativos que deben seguirse al medir los perfiles longitudinales del pavimento para el programa LTPP.

Así, el Manual de Identificación de Lesiones puede desempeñar un papel importante en los programas nacionales o regionales de gestión de pavimentos, al eliminar inconsistencias y variaciones de los reportes generadas por la falta de una terminología normalizada que sea lo suficientemente detallada y precisa para cada caso de estudio (Nega et al., 2015).

2.4. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es un indicador utilizado para caracterizar la rugosidad longitudinal de las carreteras (Múčka, 2017). Este índice resulta útil en la cuantificación de la rugosidad superficial de la carretera, lo que influye directamente en la comodidad y seguridad de la conducción, así como el desgaste de los vehículos (Uechi & Uechi, 2018); es por ello que desde su introducción en 1986, se ha utilizado en todo el mundo para evaluar y gestionar los sistemas de carreteras, el mantenimiento y la reparación de las calzadas, con el fin de optimizar las condiciones de los pavimentos.

2.4.1. Conceptualización y medición

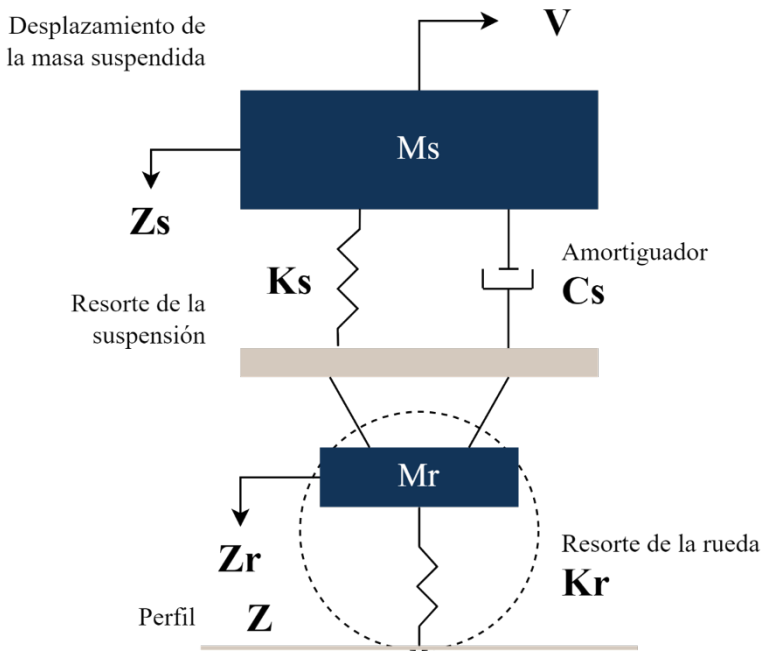
Numéricamente se trata de una medida con unidades (m/km) o (in/mi) que expresa el movimiento acumulativo de la suspensión en un

vehículo en movimiento a lo largo de la distancia recorrida (Uechi & Uechi, 2018). Así, describe las vibraciones del vehículo causadas por irregularidades verticales en la superficie de la carretera, donde valores inferiores de IRI representan un perfil pavimentado más plano mientras que valores superiores implican perfiles verticales altamente rugosos.

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km o millas) cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/h (Park et al., 2007)

El modelo de simulación consta de una masa “amortiguada o suspendida” (masa de un cuarto de carro) conectada a una masa “no amortiguada” (eje y neumático), a través de un resorte, un amortiguador lineal (suspensión), y un neumático representado por otro resorte lineal, como se presenta en la figura 7.

Figura 7. Modelo de cuarto de carro



Fuente: Adaptado de (G. A. Badilla Vargas, 2010).

En general, el rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km. (0 a 760 in/mi), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. Para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el valor de 24. En la tabla 11 y tabla 12, se presentan las escalas y características asociadas a los valores de IRI para vías pavimentadas y no pavimentadas.

Tabla 11. Escala de valores del lRI para vías pavimentadas

Rugosidad (m/km) IRI	Descripción
0-2	Conduce cómodamente a más de 120 km/h. Ondulación apenas perceptible a 80 km/h en el rango de 1,3 a 1,8. No se notan depresiones, baches ni ondulaciones; depresiones < 2 mm/3 m. Asfalto típico de alta calidad 1,4 a 2,3, tratamiento superficial de alta calidad 2,0 a 3,0.
2-4	Conduce cómodamente hasta 100-120 km/h. A 80 km/h se pueden sentir movimientos moderadamente perceptibles o grandes ondulaciones. Superficie defectuosa; depresiones, parches o baches ocasionales (por ejemplo, 5-15 mm/3 m o 10-20 mm/5 m con una frecuencia de 2-1 por 50 m), o muchos baches poco profundos (por ejemplo, en el tratamiento de la superficie que muestra un gran desmoronamiento). Superficie sin defectos; corrugaciones moderadas o grandes ondulaciones.
4-6	Conduce cómodamente hasta 70-90 km/h, movimientos y balanceos muy perceptibles, generalmente asociado con defectos; depresiones o parches frecuentes, moderados y desiguales (por ejemplo, 15-20 mm/3 m o 20-40 mm/5 m con una frecuencia de 5-3 por 50 m), o baches ocasionales (por ejemplo, 3-1 por 50 m). Superficie sin defectos: fuertes ondulaciones o corrugaciones.
6-8	Conduce cómodamente hasta 50-60 km/h, con frecuentes movimientos bruscos o balanceos. Asociado con defectos graves: frecuentes depresiones y parches profundos y desiguales (por ejemplo, 20-40 mm/3 m o 40-80 mm/5 m con una frecuencia de 5-3 por 5 m), o baches frecuentes (por ejemplo, 4-6 por 50 m).
8-10	Necesidad de reducir la velocidad por debajo de 50 km/h. Muchas depresiones profundas, baches y desintegración severa (por ejemplo, 40-80 mm de profundidad con una frecuencia de 8-16 por 50 m).

Fuente: Adaptado de ASTM.

Tabla 12. Escala de valores del RI para vías no pavimentadas

Rugosidad (m/km) IRI	Descripción
0-2	Superficie recién labrada de grava fina, o superficie de suelo con excelente perfil longitudinal y transversal (normalmente se encuentra sólo en longitudes cortas).
0-6	Viaje cómodo hasta 80-100 km/h, atento a las suaves ondulaciones o balanceos. Depresiones insignificantes (por ejemplo < 5 mm/3 m) y sin baches.
6-10	Viaje cómodo hasta 70-80 km/h, atento a los movimientos bruscos y al ligero rebote de las ruedas. Frecuentes depresiones de velocidad en modo poco profundo o baches poco profundos (por ejemplo, 6-30 mm/3 m con una frecuencia de 5-10 por 50 m). Corrugaciones moderadas (por ejemplo, 6-20 mm/0,7-1,7 m).
10-14	Viaje cómodo a 50 km/h (o 40-70 km/h en tramos específicos). Frecuentes depresiones transversales moderadas (por ejemplo, 20-40 mm/3-5 m) u ocasionales depresiones profundas o baches (por ejemplo, 40-80 mm/3 m con una frecuencia inferior a 5 por 50 m). Corrugaciones fuertes (por ejemplo, 20 mm/0,7-1,5 m).
14-18	Viaje cómodo a 30-40 km/h. Frecuentes depresiones transversales profundas y/o baches (por ejemplo, 40-80 mm con una frecuencia de 5-10 por 50 m); u ocasionales depresiones muy profundas (por ejemplo, 80 mm/1-5 m con una frecuencia inferior a 5 por 50 m) con otras depresiones poco profundas. No es posible evitar todas las depresiones excepto las peores.
18-24	Viaje cómodo a 20-30 km/h. Las velocidades superiores a 40-50 km/h provocarían una incomodidad extrema y posibles daños al coche. De buen perfil general; frecuentes depresiones profundas y/o baches (por ejemplo, 40-80 mm/1-5 con una frecuencia de 10-15 por 50 m) y ocasionales depresiones muy profundas (por ejemplo, >80 mm/0,6-2 m). De mal perfil general; frecuentes defectos moderados y depresiones (por ejemplo, superficie de tierra pobre).

Fuente: Adaptado de ASTM.

Gracias a este modelo se obtienen las características propias del camino según los desplazamientos, velocidades y aceleraciones inducidos en las masas, que lleva a medir los movimientos verticales atribuibles a la irregularidad del camino. En general, la determinación del IRI depende únicamente de la calidad del perfil longitudinal, por ello existen diferentes equipos para determinar la regularidad superficial de los pavimentos. Con el tiempo, estos han evolucionado en cuanto a características como precisión y rapidez para la obtención de los resultados. En la tabla 14 se resumen los diferentes equipos utilizados en la determinación de la regularidad superficial, grado de precisión, aplicaciones, complejidad y observaciones. Del mismo modo, en la tabla 13 se presentan las recomendaciones del Banco Mundial.

Tabla 13. Clasificación de métodos según el Banco Mundial

Clasificación	Descripción
Clase 1 Perfiles de precisión	Esta clase representa la mayor precisión para la medición del IRI, donde la medición del perfil longitudinal se debe realizar en la huella de circulación del pavimento. La distancia o intervalo de medición de las cotas o elevaciones no debe ser superior a 250 mm y la precisión de las medidas de elevación debe ser de 0,5mm para pavimentos con valores de IRI entre 1 y 3 m/km; y de 1mm para pavimentos con valores de IRI entre 3 y 5 m/km. En este grupo se encuentran equipos como el Dipstick y el método topográfico de mira y nivel. También se encuentran los perfilómetros de alta velocidad; sin embargo, deben ser validados con alguno de los equipos de precisión anteriores para evaluar su precisión.
Clase 2 Otros métodos perfilométricos	Esta clase incluye todos los demás métodos en los que se mide el perfil longitudinal para el cálculo directo del IRI, pero que no tienen la precisión requerida para una medición de Clase 1. El intervalo de medición no debe superar a 0,5 m y requiere una precisión en las medidas de elevación de 1 mm para pavimentos con valores de IRI de 1 a 3 m/km; y de 1,5 mm para pavimentos con valores de IRI entre 3 y 5 m/km.

Clasificación	Descripción
Clase 3 Estimación del IRI a partir de ecuaciones de correlación	Esta clase incluye otros equipos de medición capaces de generar un valor numérico de regularidad razonablemente correlacionado con el IRI. Las medidas obtenidas pueden utilizarse para estimar el IRI mediante ecuaciones de regresión si se realiza un experimento de correlación. En esta clase se encuentran equipos tipo respuesta (RTRRMS) y el MERLIN (*Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*), el cual es un equipo manual de bajo rendimiento.
Clase 4 Calificaciones subjetivas y medidas no calibradas	En esos casos, se podría utilizar una evaluación subjetiva que implique la experiencia del usuario en la carretera o una auscultación visual. Otra posibilidad es utilizar las medidas de un instrumento no calibrado. La conversión de estas observaciones a la escala IRI se limita a una equivalencia aproximada, que se puede establecer mejor mediante la comparación con descripciones de los caminos identificados con sus valores IRI asociados

Fuente: Adaptado de (Cruz Toribio & Gutiérrez Lazares, 2019).

Tabla 14. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos

Equipo	Descripcion	Grado de precisión	Aplicaciones	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión graduada con unidades convenientes de elevación (tipicamente divisiones de cm o ft), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	El Dipstick consiste en un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300 mm o 250 mm (dependiendo de las unidades de análisis, los apoyos pueden separarse 12 pulgadas), los cuales registran la elevación de un apoyorelativo a la elevación del otro.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy Simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera. Miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie.	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo
Perfilómetro inercial	Son equipos de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino. Determina el movimiento vertical del eje de referencia y mide desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento.	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy Compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de redes viales grandes

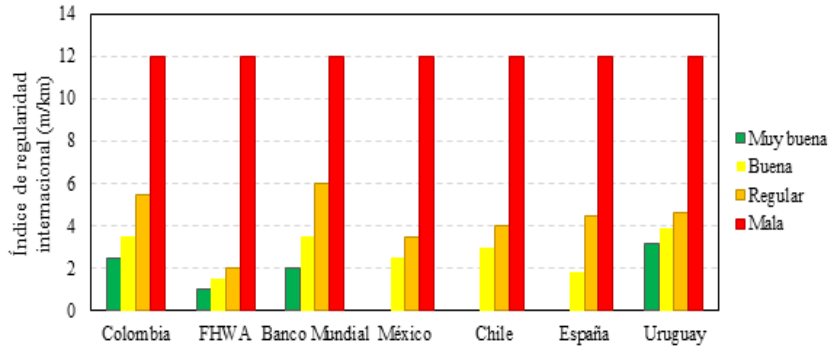
Fuente: Adaptado de (Ventura Espinel & Alvarenga, 2008).

Actualmente, la estimación del IRI está normalizado por la ASTM International a partir de mediciones del perfil longitudinal, en el documento ASTM E1926-08 titulado *Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*.

2.4.2. Tendencias internacionales

Dada su importancia, el IRI es empleado por la mayoría de las agencias encargadas de los sistemas de gestión de pavimentos, siendo un índice altamente estudiado y adaptado a los diferentes contextos en cada país. A continuación, se expone la síntesis de los rangos de IRI utilizados en diferentes países para la definición de umbrales de intervención.

Figura 8. Rangos internacionales del IRI



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que para el caso de Colombia se tiende a subestimar el estado de la rugosidad, dando valores de "regular" a valores inaceptables para otros países. En otras palabras, los estándares de exigencia son menores en Colombia; no obstante, se observa igualmente que son valores muy similares a los del Banco Mundial, es posible inferir que Colombia adoptó los valores originales de la

definición del IRI mientras que otros países han tomado la decisión específica para sus programas de gestión de reducir los umbrales de aceptación o mantenimiento.

2.5. Conceptualización UAV

Dentro de los equipos desarrollados en el avance tecnológico para la recolección de imágenes digitales, se encuentran los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés). Estos se presentan como una solución rápida y sencilla, ya que se tratan de pequeñas plataformas aéreas equipadas con cámaras y/o sensores de alta tecnología que no requieren un piloto a bordo para su funcionamiento y pueden adquirir datos de forma rápida, segura y sencilla, por lo cual han tenido aplicabilidad en campos como la cartografía, topografía, agricultura, vigilancia del tráfico e inspección de carreteras (Pan et al., 2018).

La aplicación de estos dispositivos en el levantamiento de información sobre deterioros viales inicia con la llegada de un UAV equipado con una cámara de alta resolución. Siguiendo una ruta de vuelo diseñada a priori, el equipo vuela automáticamente la ruta designada para recopilar y registrar imágenes de toda la estructura desde diversas orientaciones, según se requiera. Hecho esto, el equipo transmite las imágenes recopiladas a una estación base, o bien las guarda en equipos de almacenaje insertados. En la estación base, o en la oficina de trabajo, se procesa el volumen de imágenes obtenido para detectar, localizar y cuantificar automáticamente el daño presente en la estructura, sin requerir la participación de inspectores humanos (Yeum et al., 2017). Dicho análisis pondría a disposición de los inspectores visuales la información necesaria sobre la condición de una estructura para tomar decisiones sobre si requiere una inspección adicional o un mantenimiento inmediato (Pan et al., 2018).

Así, dentro de la inspección vial, los UAV pueden obtener información sobre el estado de las grietas y los daños de la carretera con una reducción significativa de los costes de mantenimiento, la mano de obra y el tiempo destinado. Del mismo modo, estos equipos permiten su utilización de manera remota, lo que facilita su implementación en diversos lugares y ambientes con diferentes valores de resolución según las características requeridas (Saad & Tahar, 2019).

2.5.1. Normativa UAV

En vista de la creciente adquisición de drones con diferentes propósitos de uso en América Latina y el mundo, los gobiernos han evidenciado la necesidad de impartir poder y orden sobre el espacio aéreo correspondiente, a través de normas y marcos legales que regulen el funcionamiento de los drones (Arteaga Botello, 2016).

2.5.1.1. Colombia

La Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, conocida como Aerocivil es el organismo encargado de normalizar y regular los métodos y los procedimientos asociados a las actividades aeronáuticas del país. Así, en respuesta a la aparición de drones en el espacio aéreo, el gobierno colombiano presenta diversos documentos asociados a la regulación de los Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS, por sus siglas en inglés), condensados en la tabla 15.

Tabla 15. Normativa colombiana de UAV

Tipo	Documento	Año	Propósito
Circular regulatoria	No. 002	2015	Ampliar información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de aeronavegabilidad y operaciones de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, diferentes a las de recreación y deporte.

Tipo	Documento	Año	Propósito
Resolución	No. 04201	2018	Ampliar información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de aeronavegabilidad y operaciones necesarios para la inscripción de explotadores, operadores y equipos, así como solicitar permiso para realizar vuelos de UAS.
Reglamento	RAC 91. Reglas generales de vuelo y operación	2018	Definir el ámbito de aplicación y reglamentación para el uso de los drones: su clasificación de acuerdo al peso y uso, y un régimen sancionatorio para personas naturales y jurídicas que vulneren las disposiciones previstas en esta normativa.
Circular regulatoria	CR-006-19. Instrucciones generales para la elaboración de protocolo de actuación ante la presencia de UAS en áreas militares o policiales.	2019	Presentar un modelo para la elaboración, implementación y ejecución de un protocolo de actuación ante la presencia de drones en áreas militares y/o policiales.
Circular informativa	CI-003-19. Generalidades sistema aéreo no tripulado	2019	Informar el funcionamiento y generalidades de UAS. Incluye glosario relacionado, problemática actual, antecedentes, definición, clasificación, funcionamiento, entre otros.
Circular regulatoria	CR-003-2021. Operación Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS) de la Aviación de Estado	2021	Exponer requisitos para la operación de UAS asignados en inventarios y con placa de identificación de un ente de Aviación de Estado colombiano.

Tipo	Documento	Año	Propósito
Guía	Guía Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) y Sistemas Contra UAS (C-UAS)	2022	Afianzar los conocimientos sobre generalidades y funcionamiento de los Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS: *Unmanned Aerial Systems*, por sus siglas en inglés) en la Aviación de Estado (AE), advertir sobre los riesgos y amenazas inherentes al desarrollo tecnológico de la aviación no tripulada en el mundo, así como propender por el alcance de los más altos niveles de seguridad operacional para la AE.
Circular	No. 4000-09-11	2022	Proporcionar información y orientación relacionada con la aceptación por parte de la UAEAC, de pólizas de responsabilidad civil extracontractual RCE para la operación de aviación no tripulada.
Reglamento	RACAE 94. Reglamento Aeronáutico Colombiano de la Aviación de Estado	2022	Reglas de vuelo y operación para sistemas aéreos no tripulados y sistemas de aeronaves remotamente pilotadas - RPAS CLASE IC-ID. Incluye aspectos como reglas generales, operación de vuelos, gestión del espacio aéreo, requisitos de navegabilidad, seguridad, entre otros.
Reglamento	RAC 100. Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS	2023	Regulación de drones en Colombia. Requisitos de operación para los drones en Colombia. Definición de nuevas categorías de operación de drones.

Fuente: Adaptado de (Aeronáutica Civil de Colombia, 2022, 2023).

Así, a través del tiempo, la Aerocivil ha modificado los documentos regulatorios del uso de drones de manera sucesiva hasta llegar al Reglamento Aeronáutico Colombiano de la Aviación de Estado, RAC 100. Este reemplaza y condensa los oficios anteriores relacionados con reglas de vuelo y operación para sistemas aéreos no tripulados

y sistemas de aeronaves remotamente pilotadas, posicionándose como la principal guía de uso para este tipo de sistemas.

Dentro del campo, los UAS pueden clasificarse de acuerdo con diferentes características como: especificaciones técnicas del equipo, tipo de misión a ejecutar, nivel de prestación de servicio, entre otros, según se defina por el ente vigilante o regulador de cada país. En el caso de Colombia, y de acuerdo con la normativa antes expuesta, los drones se dividen en dos clases de acuerdo con características propias del vehículo y las condiciones de vuelo que alcanza, según se presenta en la tabla 16.

Tabla 16. Clasificación de UAV en Colombia

Clase	Peso máximo de despegue	Taxo-nomía	Empleo	Altitud máxima de operación	Radio de misión	Velocidad máxima	Requisitos de aeronavegabilidad
I - A	200 gr a < 7 kg	Micro	Unidad de nivel táctico o equivalen-tes en cada Ente de Aviación de Estado.	Hasta 400 ft (121 m)	Hasta 15 km	Hasta 40 Kts (74 km/h)	Sistema de enlace para control remoto
I - B	7 kg a < 15 kg	Mini	Unidad de nivel táctico o equivalen-tes en cada Ente de Aviación de Estado.	Hasta 400 ft (121 m)	Hasta 25 km	Hasta 50 Kts (98,6 km/h)	Sistema de enlace para control remoto

Fuente: Adaptado de (Reglas de Vuelo y Operación Para Sistemas Aéreos No Tripulados y Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas, 2022).

A continuación, se presenta el resumen de la Resolución 01983 del 27 de septiembre de 2023, por medio de la cual se incorpora la norma RAC 100 'Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS' a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia, se modifica una sección de la norma RAC 91, se deroga el Apéndice 13 de la Norma RAC 91 y se fijan normas de transición.

Tabla 17. Apartados generales del RAC 100

Apartado	Concepto
Capítulo A: Generalidades y definiciones	Establece las bases y conceptos fundamentales de la normativa de operación de UAS en Colombia. Define los términos clave utilizados en la norma y proporciona una introducción general-
Capítulo B: Registro de sistema de aeronave no tripulada UAS y equipos tecnológicos asociados	Requiere el registro de UAS de 200 gr o más en la UAEAC. Se emite un certificado de registro y se exige una etiqueta de identificación obligatoria.
Capítulo C: Reglas generales de operación para la aviación no tripulada	Establece reglas generales para la operación de UAS en Colombia. Incluye categorías de operación, responsabilidades de operadores y pilotos, restricciones de vuelos especiales, entre otros.
Capítulo D: Reglas de operación para la categoría abierta	Define reglas específicas para la categoría abierta de UAS en Colombia. Aplica a operaciones de bajo riesgo y establece limitaciones de peso, altitudes máximas, distancias mínimas, y otros requisitos específicos. **La altura máxima de vuelo es 122 metros.** **La aeronave no debe estar a menos de 30 metros de distancia de cualquier persona que no esté asociada a la operación.**

Apartado	Concepto
Capítulo E: Reglas de operación para la categoría específica	Establece las reglas específicas de operación para la categoría específica de la aviación no tripulada, que incluye requisitos de vuelo visual y por instrumentos, requisitos de aeronavegabilidad, y requisitos de notificación y autorización.
CAPÍTULO F: Certificación de un explotador UAS en la categoría específica	Establece los requisitos para la certificación de un explotador de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) en la categoría específica, incluyendo requisitos de organización, capacitación del personal, sistemas de gestión de seguridad operacional y documentación.
CAPÍTULO G: Certificado de idoneidad para pilotos UAS	Establece los requisitos para la obtención del certificado de idoneidad para pilotos de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), incluyendo requisitos de formación teórica y práctica, horas de vuelo en diferentes tipos de operaciones y requisitos específicos para instructores de vuelo.
CAPÍTULO H: Marco para el sistema de gestión de seguridad operacional (SMS) para un explotador UAS	Establece los requisitos para el establecimiento de un sistema de gestión de seguridad operacional (SMS) para un explotador de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), incluyendo componentes y elementos del SMS, gestión de riesgos, aseguramiento de la seguridad operacional y promoción de la seguridad operacional.

Fuente: (Aeronáutica Civil de Colombia, 2023).

En lo que respecta al contexto global, organismos internacionales y gobiernos públicos se han encargado de formular la normativa aérea correspondiente a la implementación de UAS, de acuerdo con el contexto particular que se esté tratando.

2.5.1.2. OACI

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) es un organismo especializado de las Naciones Unidas, para promover

el desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil internacional en todo el mundo. Así, presenta normas, auditorias, asistencia y crea capacidad aeronáutica con la cooperación de los estados miembros y las partes interesadas (Organizacion de Aviación Civil Internacional, 2018). Dentro de los documentos oficiales emitidos por esta organización, se destacan cinco circulares consultivas complementarias y una circular principal que reúne todo lo relacionado con vehículos aéreos no tripulados.

Tabla 18. Normativa OACI de UAV

Tipo	Documento	Fecha	Propósito
Circular	Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)	2011	Proporcionar el marco normativo internacional fundamental mediante normas y métodos recomendados, con el apoyo de procedimientos para los servicios de navegación aérea y textos de orientación.
Circulares consultivas complementarias	AC 101-1	2020	Proporcionar orientación asociada a las operaciones de sistemas aéreos no tripulados (UAS) en la categoría abierta.
	AC 102-1	2020	Proporcionar orientación asociada a las autorizaciones UAS o un certificado de operador UAS. También aborda los requisitos para los fabricantes.
	AC 102-23	2020	Proporcionar orientación para el transporte de mercancías peligrosas por UAS, así como riesgos y responsabilidades asociadas.

Tipo	Documento	Fecha	Propósito
Circulares consultivas comple-mentarias	AC 102-37	2020	Proporcionar orientación para el transporte de mercancías peligrosas transportadas por vehículos aéreos y comprender los riesgos y las responsabilida-des del transporte seguro.
	AC 922-001	2021	Especificar las normas que debe cumplir el fabricante para las operaciones en espacio aéreo controlado, sobre personas o cerca de personas.

Fuente: Adaptado de (International Civil Aviator Organization - ICAO, 2020c, 2020b, 2020a; Organización de Aviación Civil Internacional - OACI, 2011).

Así, la OACI, apoyada en la normativa dispuesta por la Unión Europea, presenta siete clases diferentes para discriminar los drones existentes de acuerdo con características particulares de cada uno, como se indica en la tabla 19.

Tabla 19. Clasificación de UAV en Europa

Clase	Requisitos
C0	• MTOW < 250 g. • Tener una velocidad máxima de 19 m/s. • Altitud máxima alcanzable de 120 metros desde el punto de despegue. • Estar alimentada exclusivamente por una fuente eléctrica y tener una tensión nominal que no supere los 24V de corriente continua (CC) o la tensión de corriente alterna equivalente (CA).

Clase	Requisitos
C1	• MTOW < 900 g. • Velocidad horizontal que no supere los 19 m/s. • Altitud máxima de 120 metros desde el punto de despegue. • Tener la resistencia mecánica exigida y la estabilidad para resistir toda la tensión a la que está sometido. • Fuente eléctrica de alimentación y tener una tensión nominal que no supere los 24V de corriente continua (CC) o la tensión de corriente alterna (CA) equivalente.
C2	• MTOW < 4000 g. • Altura de despegue con un máximo de 120 metros. • Tener la resistencia mecánica exigida y la estabilidad necesaria para resistir a la tensión sometida. • Contar con una fuente de energía eléctrica. • Disponer de un modo de baja velocidad (Max 3 m/s), excepto si se trata de drones de ala fija.
C3	• MTOW < 25 kg. • Envergadura máxima de la aeronave de 3 metros. • Altura máxima desde el punto de despegue en 120 metros. • Disponer de luces para el control de actitud y de vuelo nocturno. • Estar equipado con una función de geoconsciencia que proporcione una interfaz para cargar y actualizar datos que contienen información sobre los límites del espacio aéreo
C4	• MTOW < 25 kg, teniendo en cuenta cualquier carga útil que pudiesen portar. • No disponer de modo de control automático, pero sí disponen de sistemas como el *return to home* o de estabilización de vuelo. • Disponer de un manual de usuario en el que figure el funcionamiento del dron.

Clase	Requisitos
C5	• MTOW < 25 kg. • La aeronave no puede ser de ala fija, a excepción de los drones cautivos. • Disponga de un modo de baja velocidad (5 m/s). Cuenta con sistemas de identificación a distancia directa, de geoconsciencia y aviso de batería baja. • Disponga de luces para el control de actitud y vuelo nocturno.
C6	• MTOW < 25 kg. • Velocidad máxima horizontal de 50 m/s. • Método return to home en caso de error en la conexión. • Protección frente a accesos no autorizados en el control del dron. • Sistema de geoconsciencia, identificación a distancia directa y batería baja. • Luces adecuadas para el vuelo nocturno y el control de actitud. • Sistema de limitación a entradas a volúmenes del espacio aéreo.

Fuente: Adaptado de (Reglamento UE 2019/945, 2019)de 4 de julio de 2018, sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea una Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea y por el que se modifican los Reglamentos (CE.

2.5.1.3. México

En el caso mexicano, la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) ha expuesto el tema a través de cinco Circulares Obligatorias y una Norma Oficial, para regular y vigilar el uso de drones en su espacio aéreo.

Tabla 20. Normativa mexicana de UAV

Tipo	Documento	Fecha	Propósito
Circular obligatoria	AV-23/10	2010	Establecer los requerimientos para obtener la certificación del sistema aéreo no tripulado (UAS).
	AV-23/10 R1	2013	Establecer los requerimientos para obtener la aprobación de tipo y/o la autorización para el sistema de aeronave no tripulada (UAS)
	AV-23/10 R2	2015	Establecer los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)
	AV-23/10 R3	2016	Establecer los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)
	AV-23/10 R4	2017	Establecer los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano
Norma	Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019	2019	Establecer los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano

Fuente: Elaboración propia a partir de (Secretaría de Transporte de México, 2019)

Dentro de esta última norma, la AFAC propone una clasificación de vehículos aéreos no tripulados basada en el peso máximo de despegue y el uso del dron, como se presenta en la tabla 21.

Tabla 21. Clasificación de UAV en México

Peso máximo de despegue		Uso
Igual o menor a 2 kg	Dron micro	Recreativo, privado, no comercial y comercial
Mayor a 2 kg y hasta 25 kg	Dron pequeño	
Mayor a 25 kg	Dron grande	

Fuente: Adaptado de (Secretaría de Transporte de México, 2019)

2.5.1.4. Argentina

La Administración Nacional de Aviación Civil Argentina retrata diversos aspectos del uso de UAV a través de circulares y disposiciones particulares, junto con un reglamento principal titulado Reglamento de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y de Sistemas de Vehículos Aéreos No Tripulados (SVANT), como se presenta en la tabla 22.

Tabla 22. Normativa argentina de UAV

Tipo	Documento	Fecha	Propósito
Reglamento	Reglamento de Vehículos y Sistemas Aéreos No Tripulados (VANT) y (SVANT)	2020	Requisitos de operación de los VANT y SVANT, responsabilidad y seguros, requisitos operativos, entre otros.
Resolución	336/2020	2020	Arbitrar las medidas necesarias para la emisión de una Disposición Técnico-Registral que establezca las normas de funcionamiento del Registro VANTS

Tipo	Documento	Fecha	Propósito
Resolución	ANAC N° 11/2021	2021	Licencias, Certificados de Competencia y Habilitaciones para Piloto.
	ANAC N° 13/2021	2021	Incorporación de Certificado Médico Aeronáutico (CMA), para los Pilotos a Distancia e Instructor de Vuelo de VANT y SVANT
Disposición	DNSO N° 24/2021	2021	Aprobación de los Programas de Instrucción de Piloto a Distancia e Instructor de Vuelo de VANT/ SVANT.

Fuente: (Administración Nacional de Aviación Civil, 2020, 2021).

De acuerdo a estos documentos, el reglamento argentino clasifica estos vehículos en cuatro categorías según diferentes características: carácter, naturaleza de uso, peso máximo certificado de despegue (MCTW) y rasgos técnicos.

Tabla 23. Clasificación de UAV en Argentina

Clasificación	Tipo	Características
Según el carácter	Públicos	Están destinados al servicio del poder público, incluyendo los militares y de fuerzas de seguridad
	Privados	No están destinados al servicio del poder público, aunque pertenezcan al Estado
Según la naturaleza de su uso	Recreativo	Tienen fines de esparcimiento, placer, pasatiempo o afines
	Comercial	Son usados a cambio de una contraprestación o con algún fin de lucro

Clasificación	Tipo	Características
Según la naturaleza de su uso	Científico	Tienen fines de investigación, la realización de ensayos, corroboración de las capacidades técnicas del vehículo, prueba de nuevos motores o equipamientos, u otras actividades con propósitos meramente científicos o experimentales.
	Seguridad	Tienen fines de prevención de delitos o detener hechos ilícitos en ejecución.
	Deportivo	Su uso se enmarca en eventos organizados por una persona humana o jurídica con el objeto de exhibir las capacidades de dichos dispositivos, de demostrar las habilidades de los participantes o en un ámbito en donde los participantes compiten entre sí, medie o no fin de lucro mediato o inmediato.
Según el peso	Clase A	Hasta 500 g de MCTW
	Clase B	Entre 501 g y hasta 5 kg de MCTW
	Clase C	Entre 5 kg y hasta 25 kg de MCTW
	Clase D	Entre 25 kg y hasta 150 kg de MCTW
	Clase E	De más de 150 kg de MCTW
Según características técnicas	Ala fija	-
	Ala rotatoria	-
	Aeróstatos	-
	Cautivos	-

Fuente: Adaptado de (Reglamento de Vehículos Aéreos No Tripulados - VANT y de Sistemas de Vehículos Aéreos No Tripulados - SVANT, 2020).

Aunque el reglamento argentino no ahonda en las especificaciones de los drones ubicados en la última categoría, algunos autores han abordado el tema como lo expone la tabla 24, donde se clasifican los vehículos según su tipo de sustentación: ala fija, ala rotatoria, híbrido.

Tabla 24. Clasificación de UAV de acuerdo a su tipo de sustentación

Clasificación	Características	Uso	Subclase
Ala fija	Cubre mayores distancias de vuelo gracias a su ligereza, autonomía y poco ruido.	Vigilancia Monitorización de contaminación atmosférica	De acuerdo a la ubicación de sus alas: ala alta, ala media, ala baja y ala volante.
Ala rotatoria	Despegan verticalmente con posibilidad de realizar vuelos estáticos	Sistemas de vigilancia y seguridad Intervenciones de emergencia Grabaciones aéreas para cine y televisión	De acuerdo con su número de rotores se clasifican en: Aeronaves con un rotor principal y un rotor de cola, drones con
Ala rotatoria	Despegan verticalmente con posibilidad de realizar vuelos estáticos	Sistemas de vigilancia y seguridad Intervenciones de emergencia Grabaciones aéreas para cine y televisión	un único rotor o *singlecopter*, drones con dos rotores en configuración coaxial, drones con dos rotores en configuración tándem y multirrotores.

Clasificación	Características	Uso	Subclase
Híbridos	Implican mayor tecnología y costo con capacidad de vuelo de hasta 4 horas. Despegan verticalmente, alcanzan altas velocidades y llevan carga útil de hasta 10 km	Intervenciones de emergencia o rescate Seguimiento campos de cultivo Carga de elementos	NA

Fuente: Adaptado de (Villalobos et al., 2019).

Como se observa, la normativa actual relacionada con UAV de carácter nacional o internacional, no presenta un consenso general. Así, predomina la diversidad de posturas frente al tema en lo que respecta a lineamientos, requisitos, operación, fundamentación teórica, entre otros. En esta región, las leyes relativas al uso de drones oscilan desde la prohibición total, como es el caso de Nicaragua y Cuba, hasta la ausencia de restricciones, como sucede en Panamá, Venezuela y Argentina. Así, queda a disposición de los organismos encargados suplir la necesidad de una normativa consistente y adecuada con el crecimiento de esta tecnología, de modo tal que se atiendan las diversas preocupaciones asociadas al tema como seguridad aeronáutica, privacidad y protección de datos (Vargas-Ramírez & Paneque-Gálvez, 2020)compared to other sources of remote sensing. This has motivated the civil and community use of drones around the world, both for audiovisual and cartographic purposes. Therefore, governments have had to legislate its use and address various concerns such as aviation security, privacy and data protection. In Mexico, five Mandatory Circulars were issued (2010-2017.

3 Estado del arte

Con el fin de conocer las tendencias relacionadas con herramientas, métodos y sistemas para la identificación de fallas superficiales, se implementó un análisis bibliométrico. Este estudio se centró en la búsqueda, verificación de metadatos, la construcción del código y el cálculo de indicadores bibliométricos.

3.1. Análisis bibliométrico

3.1.1. Búsqueda de información

Se realizó una búsqueda sistemática de información con el método cuantitativo-bibliométrico. Se consultaron artículos en bases de datos especializadas como *Scopus, Web of Science y Access Engineering*. El proceso inició con la estructuración de ecuaciones de búsqueda a partir de palabras clave como *pavimentos*, *drones*, *sistema de información geográfica*. Igualmente, se utilizaron operadores booleanos como *and* y *o*. La escala temporal fue definida entre 2017 y 2023. En relación con el idioma, se limitó a español e inglés. Los resultados de las ecuaciones se presentan en la tabla 25.

3.1.2. Verificación de metadatos

Este proceso se realizó mediante la revisión y edición de los archivos Bibtex. Este proceso se realizó debido a que el 23% de

metadatos no existían. El programa utilizado para la edición fue *Visual Studio Code*.

3.1.3. Cálculo de indicadores bibliométricos

Con los metadatos completos, se calcularon los análisis bibliométricos. Lo anterior, mediante la programación de líneas de código de la librería *Biblioshany* (Aria & Cuccurullo, 2017) dentro de la interface de R Studio. Como resultado, se obtuvo el impacto de los investigadores, revistas científicas, instituciones y países.

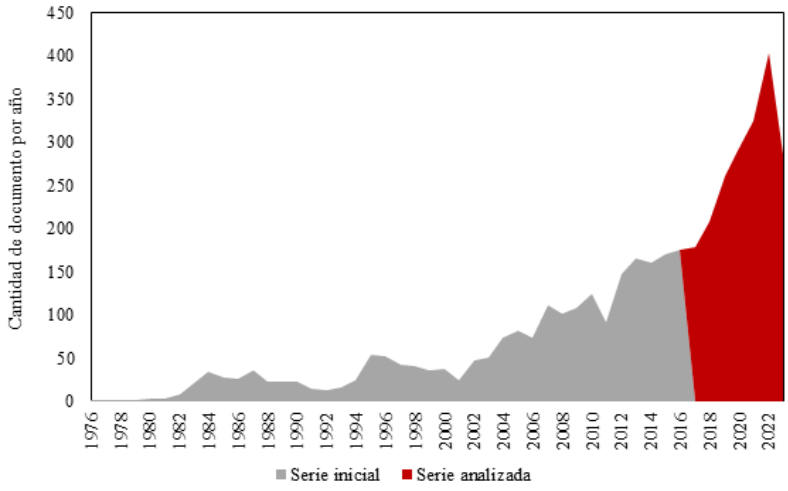
3.1.4. Construcción del código

El código se estructuró de forma secuencial. El primer bloque corresponde a la verificación de metadatos. El segundo, determina y representa la evolución de autores, palabras clave, países y producción científica en intervalos de tiempo establecidos. El tercero, calcula, a través de análisis matriciales, los esquemas de colaboración y citación entre autores, países e instituciones. Por último, el cuarto bloque representa, mediante mapas temáticos, la relevancia de los temas de acuerdo a lo postulado por Cobo et al. (2011).

3.2. Comportamiento histórico

En la figura 9 se expone la tendencia del comportamiento histórico de publicaciones en el tema; con base en los hallazgos evidenciados se decidió elegir el rango 2017-2023 como el rango representativo.

Figura 9. Cantidad de publicaciones por año

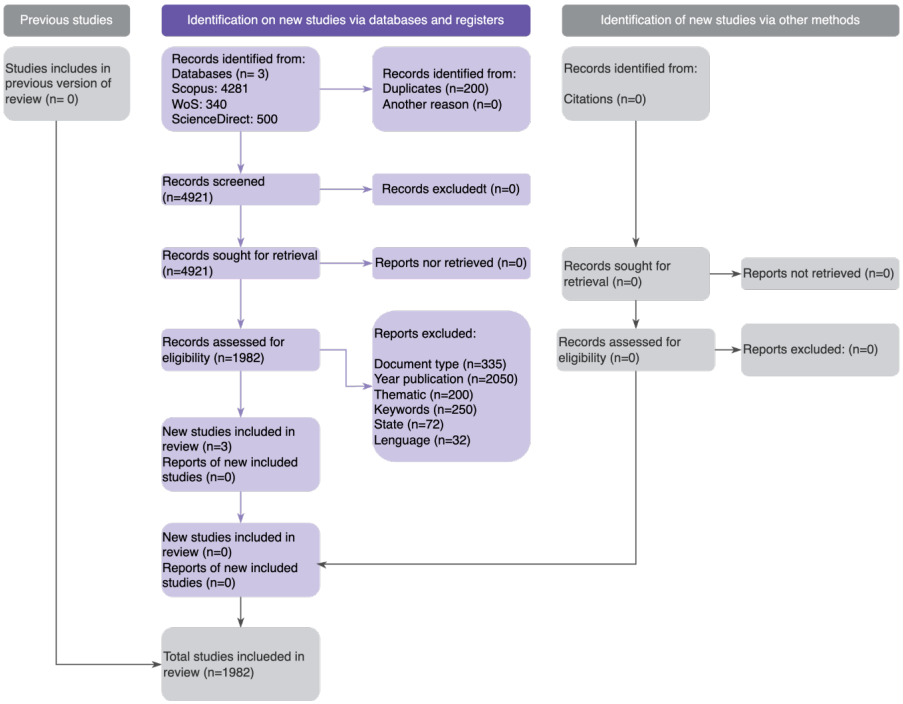


Fuente: Elaboración propia.

3.3. Aplicación del método PRISMA

Seguidamente, se utilizó la guía PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta Analyses*). En la figura 10 se presenta la estructura del método PRISMA. Este método presenta la cantidad de documentos seleccionados para la revisión. Con los documentos seleccionados, se aplicaron técnicas bibliométricas mediante la librería *bibliometrix* (Aria & Cuccurullo, 2017) a través del entorno de desarrollo integrado RStudio y VosViewer. Como complemento para los análisis, se utilizaron librerías como Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017), ggplot2 (Wickham, 2016) y dplyr (Wickham et al., 2018).

Figura 10. Estructura del método PRISMA



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resultados

Como resultado de la aplicación del método PRISMA, se obtuvo un total de 584 artículos y libros. Por otro lado, la cantidad de publicaciones demuestra un creciente interés por abordar esta área, que presenta crecimiento creciente, con un comportamiento exponencial hasta la fecha. En la tabla 25 se presenta el resumen de datos básicos.

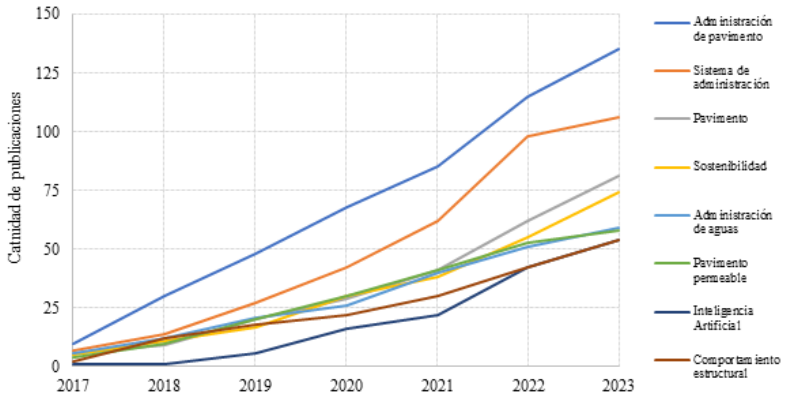
Tabla 25. Resumen de los datos básicos en las ecuaciones de búsqueda del rango 1

Variable	Valor
Rango	2017-2023
Número de revistas y libros	584
Número de documentos	1955
Citación promedio por documento	12
Autores	5.269
Cooperación internacional	25,8

Fuente: Elaboración propia.

La figura 11 presenta la evolución del número de publicaciones científicas entre 2017 y 2023 en torno a conceptos clave relacionados con la gestión de pavimentos. Se observa un crecimiento sostenido y significativo en las publicaciones sobre administración de pavimento y sistemas de administración, que lideran la tendencia con más de 125 y 100 publicaciones anuales, respectivamente, al cierre de 2023. Otros términos como *sostenibilidad*, *pavimento permeable* e *inteligencia artificial* también muestran un incremento progresivo, reflejando la integración de enfoques ambientales y tecnológicos en la gestión vial. Este comportamiento evidencia un interés creciente de la comunidad científica e institucional por fortalecer la planificación, mantenimiento y evaluación de los sistemas de pavimento, mediante herramientas innovadoras y multidisciplinarias.

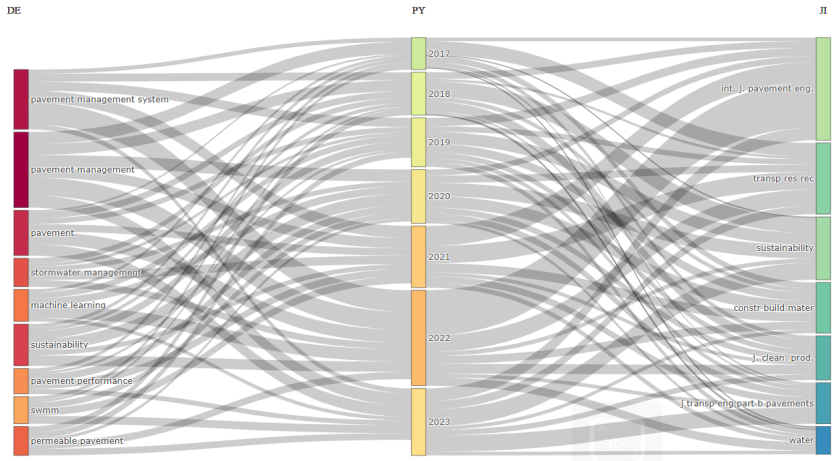
Figura 11. Comportamiento de palabras clave



Fuente: Elaboración propia.

La interacción entre palabras clave, autores y revistas se expone en la figura 12. La revista ingeniería de pavimentos y sostenibilidad es la que recibe el mayor número de documentos. Aunque la participación de las revisas consideradas es diferente entre ellas, aún se evidencia una presencia constante al estar vigente con publicaciones en los siete años estudiados. Así, en relación con el año, y en concordancia con la cantidad de palabras clave en la producción científica, se evidencia una tendencia creciente constante a partir del 2017 hasta el 2023, donde los años 2020 y 2022 contemplan la mayoría de los documentos del estudio. En general, se puede decir que la participación científica de la temática a través de los años en diferentes revistas es importante, al presentar diversas relaciones entre columnas y grosores destacables de los mismos, los cuales representan el nivel de publicaciones realizadas en ese contexto particular de interconexiones.

Figura 12. Relación entre palabra clave, año y revista



Fuente: Elaboración propia.

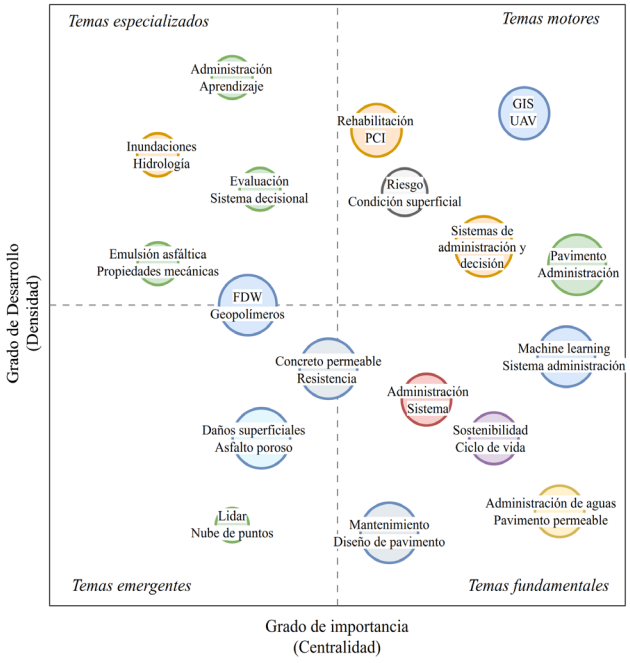
El concepto de *infraestructura vial* tiene una amplia gama de aplicaciones, ensayos y técnicas en la captura, edición, administración y seguimiento del estado de infraestructura. Debido a la amplitud del desarrollo conceptual en algunos temas, existe un amplio desarrollo estructural de la temática, evidenciado a través de análisis bibliométrico. Así, en la figura 13 se expone la clasificación temática de los conceptos clave, donde el tamaño de los círculos representa la cantidad de documentos que contienen dicha palabra, y su posición en los cuadrantes, la categoría temática asociada.

En el caso del primer cuadrante, el superior derecho, se ubican los temas desarrollados e importantes para la construcción y que impulsan el desarrollo científico del área. Allí se encuentran los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV), los Sistemas de administración de decisión, condición superficial, entre otros. En concordancia, en el cuadrante inferior derecho, se presentan los temas importantes para el desarrollo del campo científico como diseño de pavimentos, sostenibilidad, mantenimiento y administración de aguas, sin embargo, por su ubicación inferior,

el grado de densidad es bajo, y por ende muestran que cuentan con poco desarrollo.

En el sector superior izquierdo se encuentran aquellos temas con un papel marginal en el desarrollo del campo científico debido a su carácter especializado. Así, se aíslan del resto de temas, aunque cuenten con un importante grado de desarrollo. Temas como emulsión asfáltica, inundaciones y propiedades mecánicas hacen parte de este sector. Finalmente, el sector inferior izquierdo representa los temas emergentes con un bajo nivel de desarrollo dentro del campo investigativo como LIDAR, FDW, asfalto poroso, y concreto permeable. Como conclusión, el sistema estructural tiene varios conceptos claramente definidos. Las temáticas de la investigación se ubican en los temas motores y emergentes, lo cual reafirma su importancia para el aporte al desarrollo de nuevo conocimiento.

Figura 13. Tendencias en infraestructura vial



Fuente: Elaboración propia.

Proceso metodológico

4

La metodología utilizada en esta investigación es de carácter mixto, involucra aspectos cualitativos y cuantitativos en su objeto de estudio y utiliza un enfoque descriptivo al presentar las condiciones y procesos involucrados en la obtención de datos asociados al estudio superficial del pavimento flexible en vías urbanas.

- **Descriptivo**

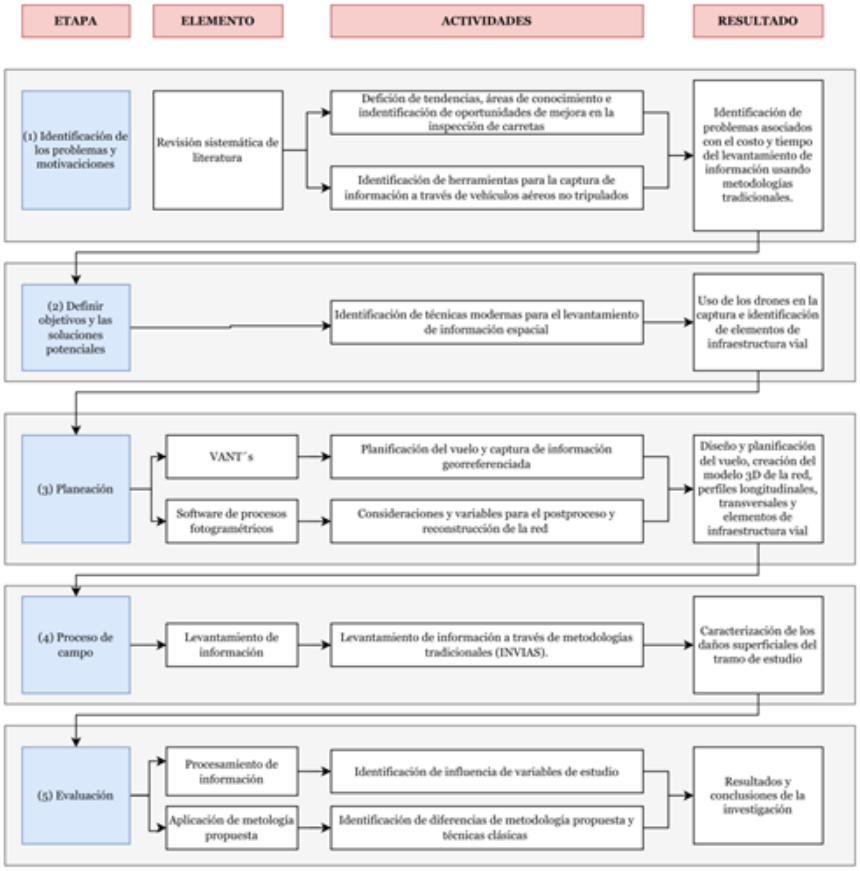
Debido a que la presente investigación expone el procedimiento llevado a cabo para capturar información del pavimento flexible a través de VANT, y su posterior procesamiento informático, se requiere un enfoque descriptivo para presentar de manera coherente, secuencial y concisa el proceso llevado a lo largo de su desarrollo. Lo anterior involucra la presentación de un marco conceptual que exponga las bases teóricas del tema en cuestión, así como el panorama general existente en cuanto al estado del arte. Del mismo modo, presenta el paso a paso seguido para la selección de zonas de estudio, realización de vuelos, captura de la información y procesamiento de datos, así como los instrumentos involucrados en cada etapa. Según lo plantean Hernandez Sampieri et al. (2014), esta descripción de contextos, sucesos, fenómenos y situaciones, caracteriza los estudios de alcance descriptivo donde se especifican características y propiedades relevantes del objeto de estudio.

- **Mixto**

Por su parte, el carácter mixto de la investigación tiene dos ramas: La cualitativa y la cuantitativa. La primera de ellas se ve representada con el diseño narrativo expuesto, donde se muestra un contexto general de la teoría involucrada y desarrollada alrededor del eje de la investigación. Particularmente, la concepción del estado del arte como revisión documental es una de las técnicas usadas en el desarrollo cualitativo donde, de acuerdo con Guzmán (2021), la investigación de fuentes de información primarias y secundarias permite profundizar en conceptos fundamentales.

El aspecto cuantitativo se evidencia con la verificación del proceso involucrado a través de los resultados numéricos obtenidos, gráficas de representación y funciones implementadas. En general, el manejo de datos junto con la revisión literaria logra una perspectiva más amplia y profunda del estudio, mientras robustece y expande el entendimiento de la misma (Hernández Sampieri et al., 2014). En la figura 14 se presenta el procedimiento propuesto para el desarrollo de la investigación.

Figura 14. Propuesta metodológica



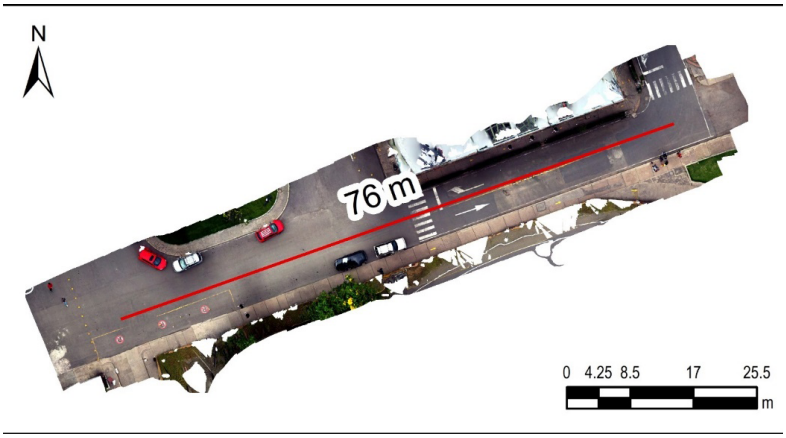
Fuente: Elaboración propia.

4.1. Selección de zona de estudio

La zona de estudio corresponde a dos vías urbanas ubicadas en la ciudad de Tunja, Boyacá, al interior de las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. La primera de ellas tiene 87 metros de longitud, pavimento asfáltico y conecta importantes edificaciones de la institución educativa, según se muestra en la figura 15. La segunda vía de estudio está ubicada

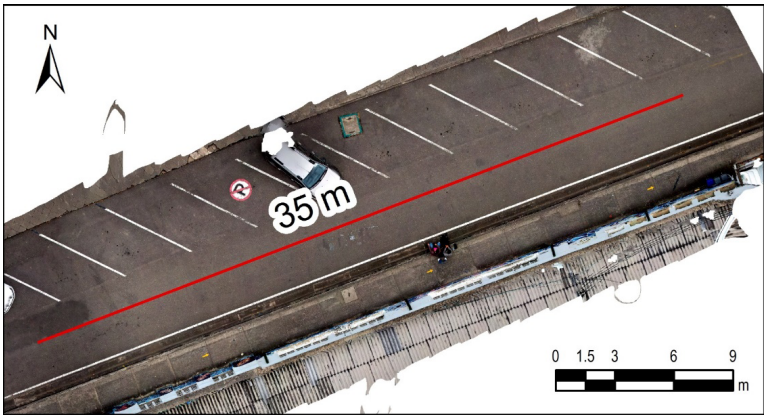
frente a la zona administrativa de Bienestar Universitario y Registro Académico de la misma universidad, tiene 96 m de longitud, superficie de pavimento asfáltico como se evidencia en la figura 16.

Figura 15. Zona de estudio A



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Zona de estudio B



Fuente: Elaboración propia.

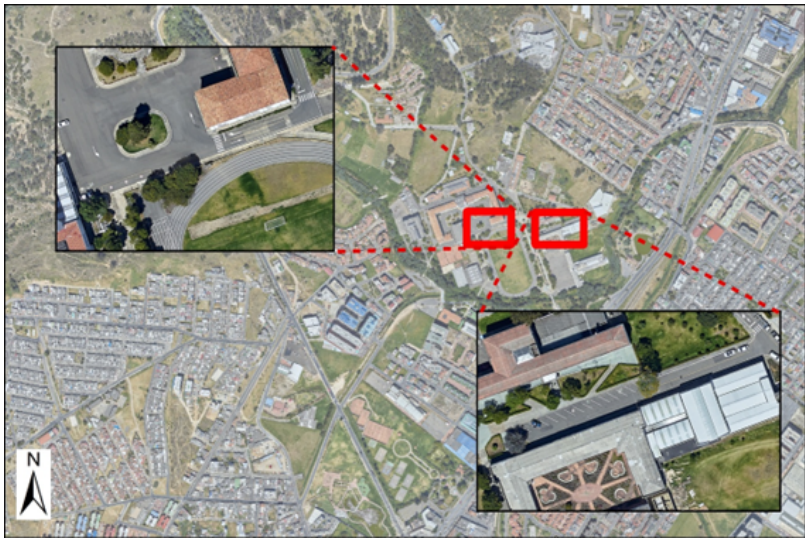
4.2. Materiales y métodos

El desarrollo de la investigación contempla cinco etapas que abarcan la adquisición y procesamiento de imágenes de la siguiente manera.

4.2.1. Misión de vuelo

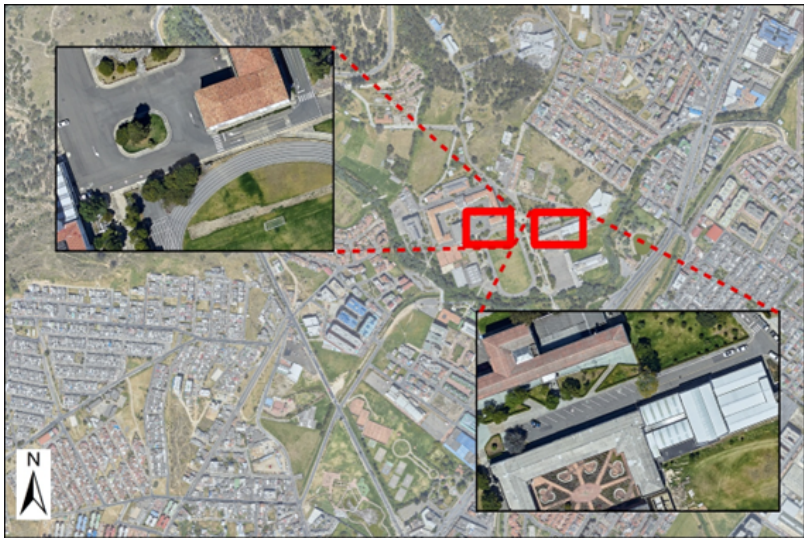
Esta etapa comprende actividades de planificación de vuelo y la determinación de las condiciones óptimas para la captura de información. En el primer caso, la misión de vuelo se realizó mediante DroneDeploy, aplicación que permite delimitar el área de estudio y seleccionar parámetros de vuelo de forma manual; del mismo modo, establece automáticamente las líneas de vuelo, número de imágenes, distancia de muestreo del suelo (GSD) y tiempo aproximado de vuelo, como se muestra en la figura 17 y figura 18. Este ejercicio se realizó independientemente para la zona A y B.

Figura 17. Configuración de la misión de vuelo a través de la aplicación DroneDeploy. Zona A



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Configuración de la misión de vuelo a través de la aplicación DroneDeploy. Zona B

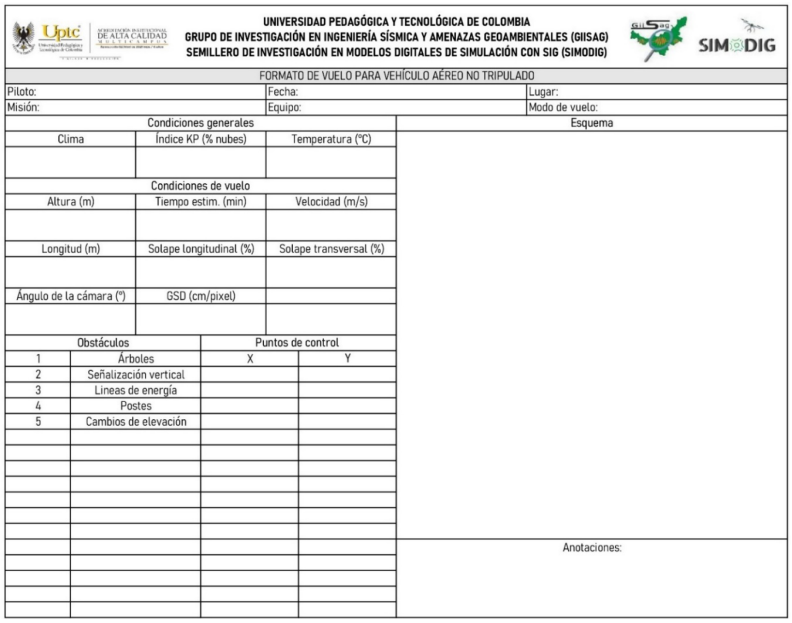


Fuente: Elaboración propia.

A la par de esta actividad, se establecieron puntos de control terrestre (GPC) distribuidos de forma homogénea dentro del área circundante a las vías de estudio, como elementos que aumentan la precisión de los productos finales (Ferrer-González et al., 2020) such as orthoimages or digital surface models. This is mainly due to its ability to provide these topographic products in a fast and economical way. In order to guarantee a certain degree of accuracy, it is important to know how many ground control points (GCPs.

En cuanto a la determinación de parámetros óptimos de vuelo, se tuvieron en cuenta las recomendaciones establecidas en estudios similares (Atencio et al., 2022; Romero-Chambi et al., 2020)it is necessary to know the condition of the pavement by inspection, a crucial step in deciding on the repair to be carried out. In this sense, unmanned aerial vehicles (UAVs. Posteriormente, se elaboró un formato de vuelo que permite condensar de manera práctica, ordenada y concisa, estos y otros datos convenientes a la hora de realizar un vuelo, según se muestra en la figura 19.

Figura 19. Formato de vuelo



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA SÍSMICA Y AMENAZAS GEOAMBIENTALES (GIISAG)
SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN EN MODELOS DIGITALES DE SIMULACIÓN CON SIG (SIMODIG)

FORMATO DE VUELO PARA VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

Piloto:	Fecha:	Lugar:
Misión:	Equipo:	Modo de vuelo:

Condiciones generales			Esquema
Clima	Índice KP (% nubes)	Temperatura (°C)	
Condiciones de vuelo			
Altura (m)	Tiempo estim. (min)	Velocidad (m/s)	
Longitud (m)	Solape longitudinal (%)	Solape transversal (%)	
Ángulo de la cámara (°)	GSD (cm/pixel)		

Obstáculos		Puntos de control	
1	Árboles	X	Y
2	Señalización vertical		
3	Lineas de energía		
4	Postes		
5	Cambios de elevación		

Anotaciones:

Fuente: Elaboración propia.

La segunda etapa comprende la realización del vuelo, donde se recolectan múltiples imágenes aéreas de las vías estudiadas. El equipo utilizado corresponde a un dron marca DJI, modelo Air S2 equipado con cámara, batería y gimbal, cuyas características se presentan en la tabla 26.

Tabla 26. Características del dron

Equipo	Parámetro	Valor
Cámara	Tamaño del sensor	1" CMOS
	Pixeles efectivos totales	20 megapixeles
	Tamaño de imagen	5472×3648 (3:2) y 5472×3078 (16:9)
	Apertura	f/2,8

Equipo	Parámetro	Valor
Cámara	Distancia focal	35 mm
	Rango ISO fotografía	100-3200 (Auto) y 100-12800 (Manual)
Batería	Capacidad	3750 mAh / 3500 mAh
	Voltaje	11,04 V / 11,55 V
	Duración	6 horas
Gimbal	Estabilización	3 ejes (inclinación, balanceo, panorámica)

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a requerimientos del estudio, se optó por la realización de vuelos automáticos donde el dron sigue la ruta previamente establecida en la misión de vuelo y captura las imágenes, de acuerdo con los parámetros presentados en la tabla 27.

Tabla 27. Configuración de vuelo

Parámetro	Valor
Superposición frontal	75%
Superposición lateral	65%
Velocidad de captura de vuelo	7 m/s

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Procesamiento de imágenes

En esta etapa se realizó el procesamiento con el software fotogramétrico Agisoft Metashape, un equipo de cómputo con procesador Intel5 de 2,4 GHz y 8 GB de memoria RAM y dos conjuntos de imágenes. Al ingresar y procesar las fotos en el

software mencionado, se obtuvieron nubes de puntos, modelos digitales de superficie (DSM) y ortofotos para cada zona.

Hecho lo anterior, y haciendo uso del DSM, se realizó la extracción de datos a través del desarrollo secuencial de herramientas que automatizan el proceso en el software ArcMap, para la obtención gráfica y numérica de los perfiles de irregularidad para cada vía estudiada.

Finalmente, de acuerdo a las características presentadas en los perfiles donde se evidencian datos congruentes con lo esperado en el estudio, se realizó el cálculo del IRI de acuerdo al rango de muestreo (G. Badilla Vargas, 2011; Sayers, 1995) y módulos del software ProVaL. En este programa fue necesario definir el tipo de análisis e índices a implementar, segmentación de datos y límites de evaluación, como se evidencia en la tabla 28.

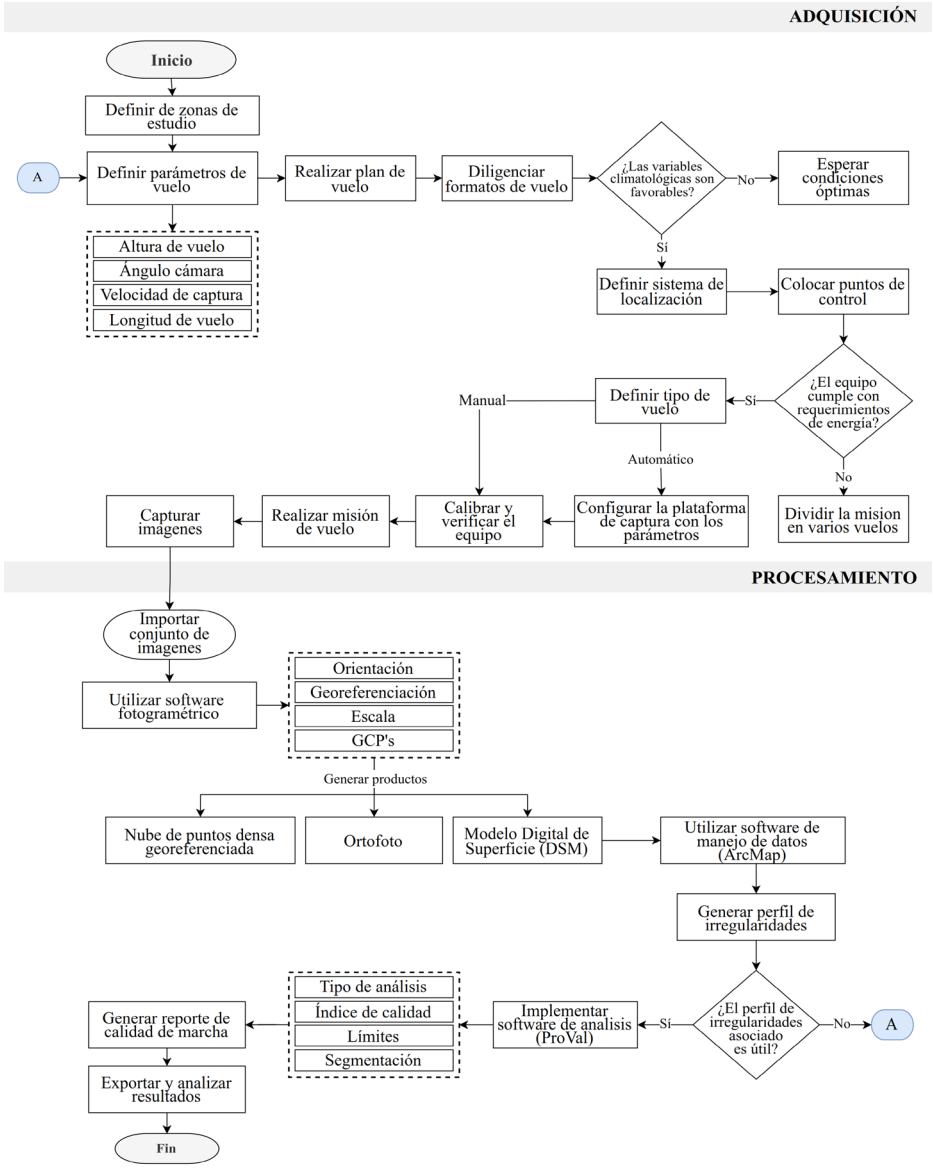
Tabla 28. Parámetros Software ProVal

Parámetro	Valor
Tipo de análisis	Intervalo fijo
Índice de calidad de la conducción	IRI
Límite de evaluación (m/km)	4,7
Longitud del segmento (m)	2,0

Fuente: Elaboración propia.

El límite de evaluación utilizado se basa en las consideraciones presentadas por National Research Council (1994), donde se expone que valores de 4,7 m/Km (300 in/mil) o más, son considerados como rugosos y no confortables. Así, se obtuvieron los reportes y resultados definitivos para la consecuente evaluación. En general, el flujo de trabajo desarrollado en la metodología se presenta en la figura 20.

Figura 20. Flujo de trabajo



Fuente: Elaboración propia.

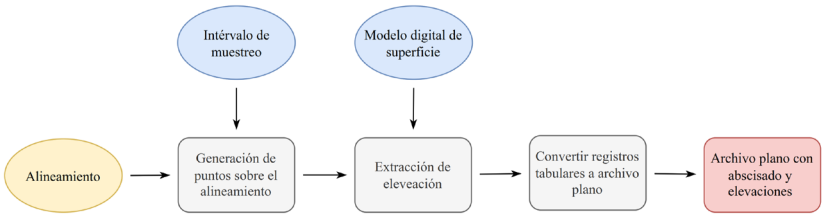
4.2.3. Automatización de procesos

Como parte de las herramientas, se desarrollaron algunas herramientas de automatización mediante el módulo de creación de modelos de ArcMap. Este módulo es una aplicación que se utiliza para crear, editar y administrar modelos geográficos, definiendo flujos de trabajo que realizan secuencias de herramientas de geoprocesamiento y proporcionan la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada (Alarcón et al., 2025). Este proceso, puede considerarse como un lenguaje de programación visual para crear flujos de trabajo. El flujo creado tiene como objetivo la extracción del listado de elevaciones, para un determinado intervalo de muestreo, definido por el usuario. La estructura de los flujos y su código en lenguaje Python se detallan a continuación.

4.2.3.1. Herramienta extracción de perfiles

Una vez se define el alineamiento de análisis, es importante conocer la elevación de cada punto. Esta herramienta permite, de forma automatizada, la creación de puntos sobre el alineamiento, con un intervalo definido y su posterior extracción y exportación de la elevación a una hoja de cálculo. El esquema de la secuencia se presenta en la figura 21.

Figura 21. Esquematización de la extracción de perfiles



Fuente: Elaboración propia.

Las líneas de código de la herramienta se describen a continuación. La importación de los paquetes de procesamiento de información

se realiza mediante la importación del módulo *arcpy*; la función del módulo es realizar análisis con información geográfica, manejo de datos tabulares y procesos de mapas con Python.

```
# Import arcpy module
import arcpy
```

Los argumentos de la herramienta se asignan a través de la función de importación de parámetros. La herramienta tiene 4 argumentos, el primero corresponde a la geometría del alineamiento. El segundo, al valor numérico del intervalo de muestreo o distancia entre los puntos. El tercero comprende el modelo digital de superficie para la extracción de las elevaciones. Por último, el cuarto es el archivo de salida.

```
# Script arguments
Alineamiento = arcpy.GetParameterAsText(0)
Intervalo_de_muestreo = arcpy.GetParameterAsText(1)
Modelo_de_superficie = arcpy.GetParameterAsText(2)
Archivo_de_salida = arcpy.GetParameterAsText(3)
```

Como parte de los procesos, se definen las geometrías utilizadas. En este caso, el alineamiento corresponde a una línea, y a partir de los intervalos de muestreo se definen una serie de puntos.

```
# Local variables:
Output_Feature_Class = ""
Output_point_features = ""
```

La primera herramienta geográfica es la generación de puntos sobre el alineamiento, la distancia entre los mismos corresponde a la variable "intervalo de muestreo".

```
# Process: Generate Points Along Lines

arcpy.GeneratePointsAlongLines_
management(Alineamiento, Output_Feature_Class,
"DISTANCE", Intervalo_de_muestreo, "", "")
```

Seguidamente, la segunda herramienta utilizada es la extracción de la elevación a partir del modelo digital de superficie.

```
# Process: Extract Values to Points

arcpy.gp.ExtractValuesToPoints_sa(Output_Feature_Class,
Modelo_de_superficie, Output_point_features, "NONE",
"VALUE_ONLY")
```

Por último, la tercera herramienta es la exportación del archivo con las abscisas y elevación de los puntos. Este paso facilita la importación de los resultados en el software ProVal.

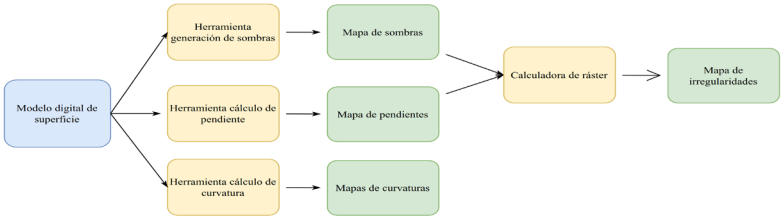
```
# Process: Table To Excel

arcpy.TableToExcel_conversion(Output_point_features,
Archivo_de_salida, "NAME", "CODE")
```

4.2.3.2. Herramienta de identificación de irregularidades

Mediante esta herramienta se identifican las irregularidades o elementos complementario asociados al sistema vial. El esquema de la secuencia se presenta en la figura 22.

Figura 22. Esquematización de la herramienta de identificación de irregularidades



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que la herramienta anterior, la importación de los paquetes de procesamiento de información se realiza mediante la importación del módulo *arcpy*.

```
# Import arcpy module
import arcpy
```

La información base para los procesos comprende el modelo digital de superficie. A partir de ellos, se produce el modelo de irregularidades y la curvatura.

```
# Script arguments
Modelo_digital_de_superficie = arcpy.
GetParameterAsText(0)
if Modelo_digital_de_superficie == '#' or not
Modelo_digital_de_superficie:
    Modelo_digital_de_superficie = "Superficie" # provide a
default value if unspecified
rastercalc = arcpy.GetParameterAsText(1)
Curvatura_perfil = arcpy.GetParameterAsText(2)
if Curvatura_perfil == '#' or not Curvatura_perfil:
    Curvatura_perfil = "C:\\Users\\juanjo\\OneDrive\\
Escritorio\\ArcGIS\\Maestría.gdb\\Curvatura_perfil"#
provide a default value if unspecified
```

Con el fin de procesar la información, se define una serie de variables y capas salida. En este caso, se define la pendiente, sombra y curvaturas del terreno; cada una es un archivo independiente almacenado en una base de datos geográfica.

```
# Local variables:
```

```
Pendiente = "C:\\Users\\juanjo\\OneDrive\\Documentos\\
ArcGIS\\Maestría.gdb\\Pendiente"

Sombras = "C:\\Users\\juanjo\\OneDrive\\Documentos\\
ArcGIS\\ Maestría.gdb\\Sombras"

Curvatura = "C:\\Users\\juanjo\\OneDrive\\Documentos\\
ArcGIS\\ Maestría.gdb\\Curvatura"

Curvatura_plano ="C:\\Users\\juanjo\\OneDrive\\
Escritorio\\ArcGIS\\ Maestría.gdb\\Curvatura_plano"
```

Finalmente, se realizan 4 procesos, los cuales son herramientas de procesamiento geográfico. La primera herramienta corresponde al cálculo de pendientes. Este método identifica la inclinación en cada celda del elemento ráster. Existen dos métodos, el planar y geodésico. El primero se utiliza en extensiones bajas y el segundo, cuando se tiene en cuenta la curvatura terrestre. El valor de la pendiente se calcula por el método de promedio máximo propuesto por Burrough & McDonell, (1998).

```
# Process: Slope

arcpy.Slope_3d(Modelo_digital_de_superficie, Pendiente,
"PERCENT_RISE", "1", "PLANAR", "METER")
```

La herramienta de sombreado permite obtener la iluminación de una superficie. Lo anterior, mediante la posición de una fuente de luz artificial.

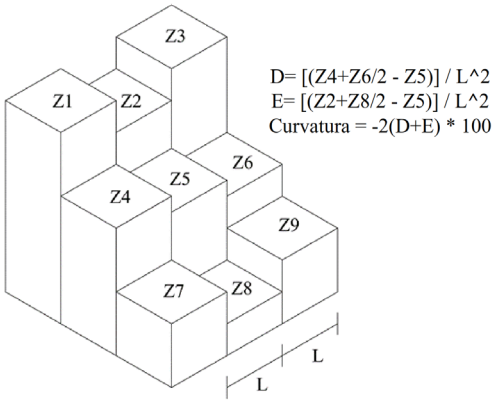
```
# Process: Hillshade

arcpy.gp.HillShade_sa(Modelo_digital_de_superficie,
Sombras, "315", "45", "NO_SHADOWS", "1")
```

La herramienta de curvatura permite calcular si una superficie es cóncava o convexa a través del cálculo de la segunda derivada de

la superficie. Este cálculo se realiza mediante la transformación polinómica. El cálculo de la curvatura se presenta en la figura 23.

Figura 23. Esquema de curvatura



Fuente: Elaboración propia.

```
# Process: Curvature

arcpy.Curvature_3d(Modelo_digital_de_superficie,
Curvatura, "1", Curvatura_perfil, Curvatura_plano)
```

Por último, la calculadora de ráster es una herrmienta que permite la ejecución de operaciones matemáticas con los mapas anteriormente generados.

```
# Process: Raster Calculator

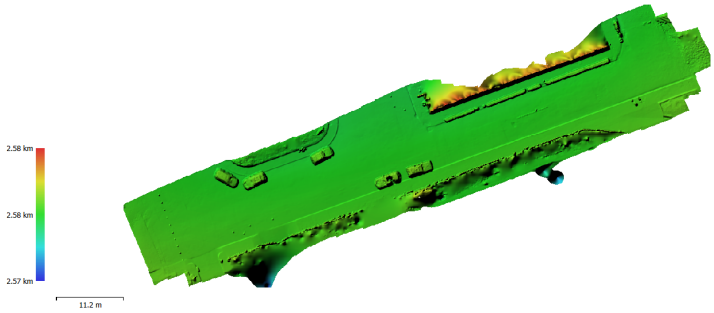
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Ln(\"%Pendiente%\" *
\"%Sombras%\")", rastercalc)
```

Resultados

5

A partir de las imágenes capturadas en la etapa 2, y el procesamiento realizado en la etapa 3, resultaron tres productos finales: una nube de puntos, un modelo digital de elevación, y un ortomosaico para cada vía estudiada. En el primer caso, de acuerdo con 76 imágenes captadas de la zona A, se obtuvo una nube compuesta por más de 15 millones de puntos densificados de calidad media, a partir de la cual se creó un DSM de 9216x4430 con resolución espacial de 1,05 cm/pixel (figura 24) y una ortofoto de 36864x17720 con resolución espacial de 2,62 mm/pixel (figura 25).

Figura 24. DSM Zona A



Fuente: Elaboración propia.

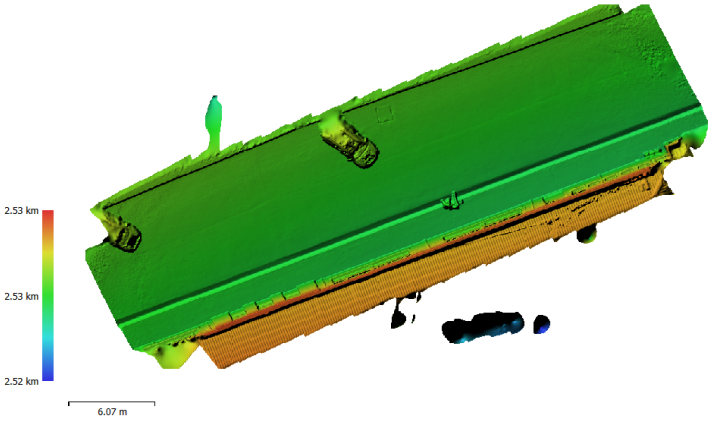
Figura 25. Ortofoto Zona A



Fuente: Elaboración propia.

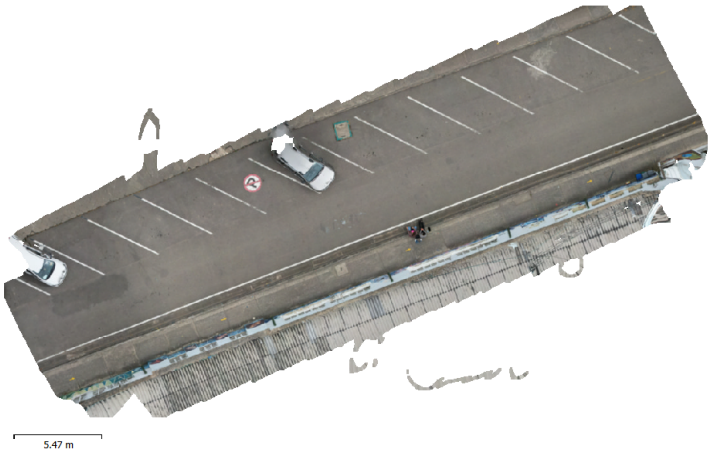
En cuanto a la vía B, estudiada a través de 40 fotografías aéreas, se creó una nube con más de 17 millones de puntos, un DSM de 4342x2537, resolución de 9,96 mm/pixel (figura 26) y una ortofoto de 17380x10172 con 2,49 mm/pixel de resolución expuesta en la figura 27.

Figura 26. DSM Zona B



Fuente: Elaboración propia.

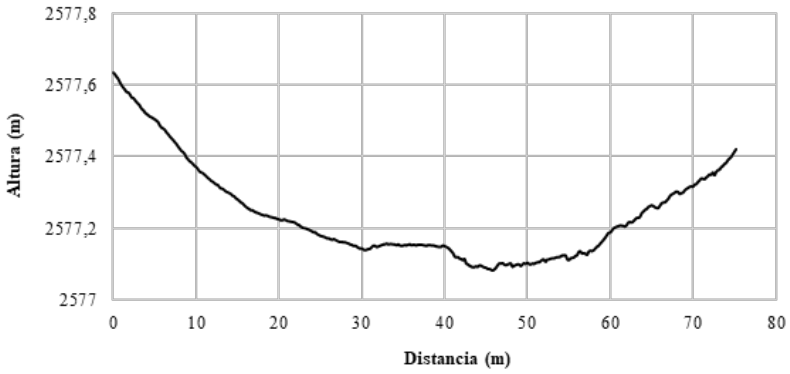
Figura 27. Ortofoto Zona B



Fuente: Elaboración propia.

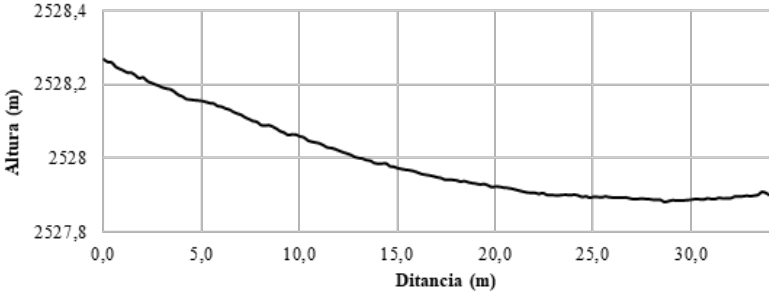
A través de estos productos es posible identificar diferentes características. En ambos casos se trata de vías de una calzada con dos carriles de circulación, para la vía A expuesta en la figura 28, y un único carril para la vía B en la figura 29; a su vez, cuentan con zonas de tránsito peatonal y señalización vial sobre el pavimento. Además del análisis visual, es posible extraer información esencial sobre la topografía del terreno, particularmente las elevaciones y pendientes, a partir de los perfiles de elevación. Así, en la topografía de las dos zonas se observa una tendencia plana al contar con una diferencia de elevación mínima que no supera un metro de altura.

Figura 28. Perfil topográfico Zona de estudio A



Fuente: Elaboración propia.

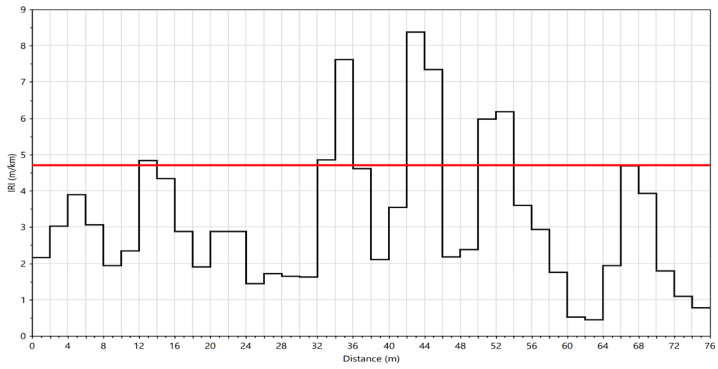
Figura 29. Perfil topográfico Zona de estudio B



Fuente: Elaboración propia.

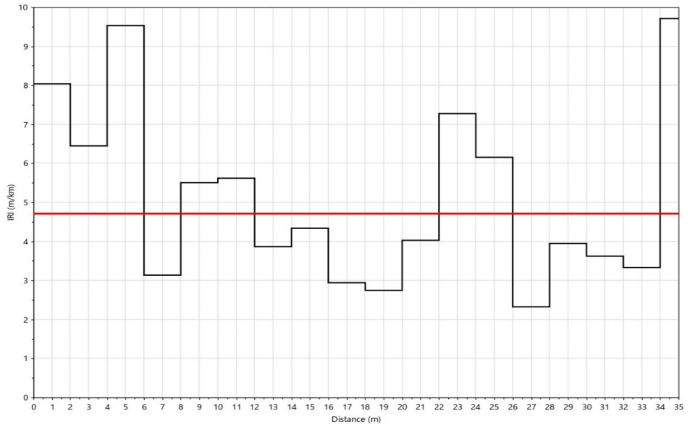
Para poder analizar el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), fue necesario apoyarse en el software ProVal, el cual, a partir de los perfiles expuestos en la figura 28 y Figura 29, y los parámetros mencionados en la tabla 28, genera perfiles de rugosidad. En Las figuras 30 y 31 se representa el comportamiento del IRI en el perfil analizado.

Figura 30. Variación del IRI en función del rango de muestreo - Zona A



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Variación del IRI en función del rango de muestreo - Zona B



Fuente: Elaboración propia.

En estas figuras se expresa gráficamente el comportamiento del IRI en toda la longitud de la vía, estableciendo un valor promedio cada dos metros y resaltando el límite aceptable de 4,7 m/km, como se enunció anteriormente.

Análisis 6

6.1.Generalidades

A partir de la información obtenida, es posible afirmar que los parámetros de vuelo y procesamiento son convenientes para este tipo de investigación, ya que su implementación permite obtener productos con características aceptables en cuanto a resolución y precisión para la extracción de información del estado de la infraestructura vial.

Sin embargo, es necesario analizar puntualmente los parámetros de vuelo como los recubrimientos frontales y laterales, pues, aunque se consideraron valores de 75 y 65% respectivamente, siguiendo las recomendaciones de Romero-Chambi et al. (2020), aumentar su valor representa la obtención de un mayor número de puntos homólogos y una mejor correlación de los mismos. Así, en el caso de presentarse obstáculos como peatones, vehículos, u otros, será posible realizar modificaciones a la nube de puntos a partir de las diversas imágenes captadas de la región gracias a los recubrimientos considerados, obteniendo entonces una vía parcial o totalmente despejada (Cruz Toribio & Gutiérrez Lazares, 2019).

Por otra parte, pese a alcanzar un error bajo que no supera los 0,5 m, es posible obtener información adicional útil para la localización y el escalado utilizando puntos de control terrestre (GCPs). Estos mejoran la precisión al servir como puntos de amarre que aumentan

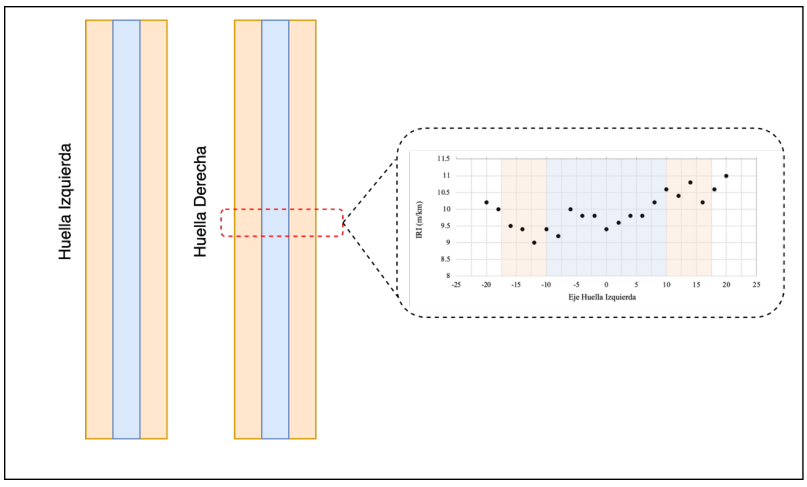
los niveles de precisión relativa y la posición absoluta del modelo (Atencio et al., 2022). La altura de vuelo del UAV se basa en las características de la cámara y en la representación predefinida de pixeles en el suelo, o distancia de muestreo del suelo (GSD) (Prosser-Contreras et al., 2020), donde algunos autores como (Cruz Toribio & Gutiérrez Lazares, 2019) recomiendan realizar la captura de información relacionando variables como el GSD entre rangos de 0,30 a 0,35 cm/pixel.

6.2. Zona A

6.2.1. Variación del IRI en el ancho de la huella

Con el fin de conocer la influencia de la localización del alineamiento se determinaron perfiles adicionales. Mediante la herramienta de automatización se obtuvieron 10 perfiles más por cada huella. Lo anterior para considerar el efecto de la desviación de la llanta. En total, se obtuvieron 22 perfiles, 11 para cada huella de circulación. La esquematización de esto se presenta en la figura 32.

Figura 32. Esquematización del IRI en el ancho de la huella



Fuente: Elaboración propia.

A través del modelo de superficie se determinó el IRI para cada perfil. En la tabla 29 se presentan los parámetros estadísticos a lo largo del ancho de la huella de circulación de la huella izquierda.

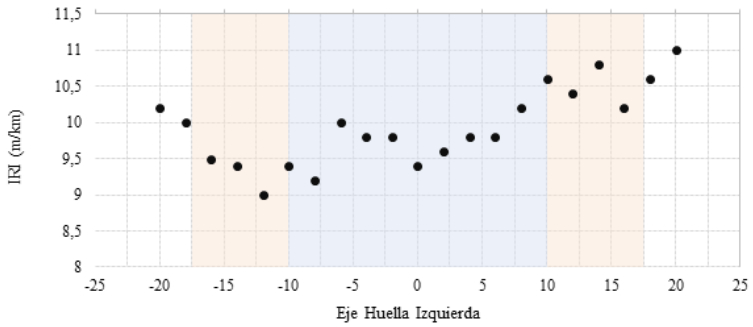
Tabla 29. Estadísticos de variación del IRI huella izquierda

Medidas	IRI (m/km)
Valor central	9,40
Valor máximo	11,0
Valor mínimo	9.0
Media	9,9
Desviación	0,5

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia una variación del IRI en toda la huella considerando el efecto de *wandering* con una desviación de 0,5 m/km, un valor máximo de 11,0 m/km y un valor mínimo de 9,0 m/km. Esta información se expone en la figura 33.

Figura 33. Variación del IRI en la huella izquierda



Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, se realizó la determinación de los estadísticos de la huella derecha. Estos valores se presentan en la Tabla 30.

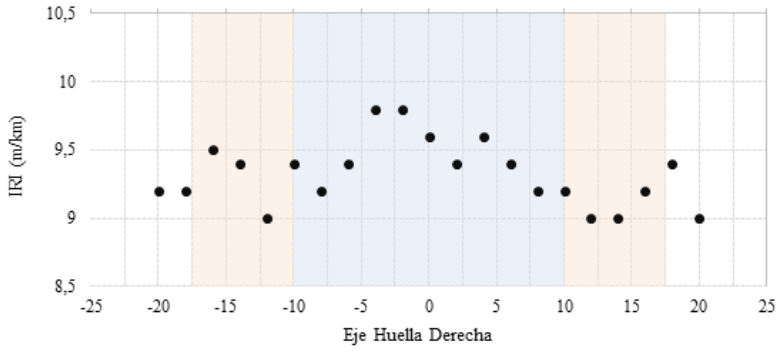
Tabla 30. Estadísticos de variación del IRI huella derecha

Medidas	IRI (m/km)
Valor central	9,6
Valor máximo	9,8
Valor mínimo	9,0
Media	9,3
Desviación	0,3

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia una variación del IRI en toda la huella considerando el efecto de *wandering* con una desviación de 0,3 m/km, un valor máximo de 9,8 m/km y un valor mínimo de 9,0 m/km. El comportamiento de la sección se expone en la figura 34.

Figura 34. Variación del IRI en la huella derecha

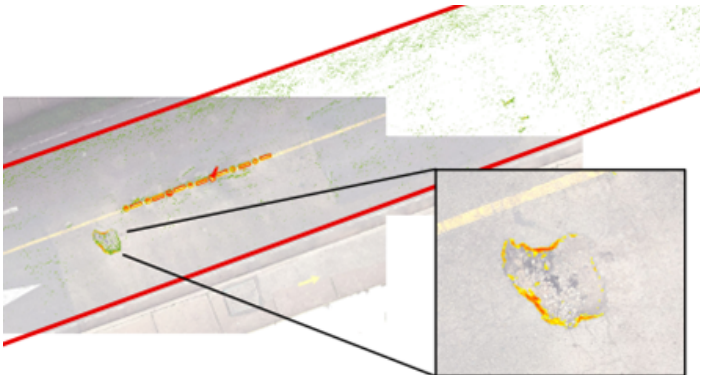


Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Identificación de deterioros superficiales

La figura 30 muestra la variación del IRI en el alineamiento central. A partir de esta es posible identificar picos entre las abscisas K0+032 y K0+052, estas variaciones se deben a la presencia de una serie de irregularidades por baches y un proceso de cambio de carpeta asfáltica. Se realizó la ejecución de la herramienta para la identificación automática de los baches, en la Figura 35 se presenta el resultado de la herramienta.

Figura 35. Identificación de baches automatizada



Fuente: Elaboración propia.

6.3. Zona B

6.3.1. Variación del IRI en el ancho de la huella

Igual que en la zona anterior, con el fin de conocer la influencia de la posición del alineamiento se determinaron perfiles adicionales. Mediante la herramienta de automatización se lograron obtener 10 perfiles adicionales por cada huella. Lo anterior para considerar el efecto de la desviación de la llanta. En total, se obtuvieron 22 perfiles, 11 para cada huella de circulación igual que en la zona anterior.

A través del modelo de superficie se determinó el IRI para cada perfil. En la tabla 31 se presentan los parámetros estadísticos a lo largo del ancho de la huella de circulación de la huella izquierda.

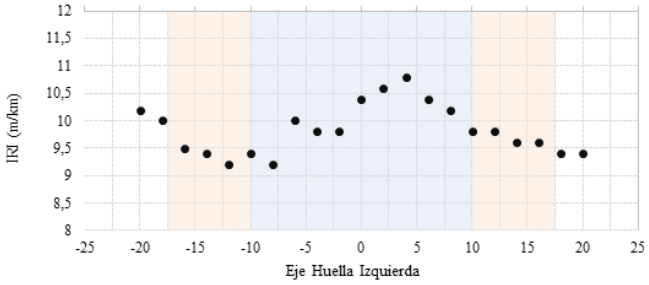
Tabla 31. Estadísticos de variación del IRI huella izquierda

Medidas	IRI (m/km)
Valor central	10,4
Valor máximo	10,8
Valor mínimo	9,2
Media	9,8
Desviación	0,5

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia una variación del IRI en toda la huella considerando el efecto de *wandering* con una desviación de 0,5 m/km, un valor máximo de 10,8 m/km y un valor mínimo de 9,2 m/km. Tal como se observa en la figura 36.

Figura 36. Variación del IRI en la huella izquierda



Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, se realizó la determinación de los estadísticos de la huella derecha. Estos valores se presentan en la tabla 32.

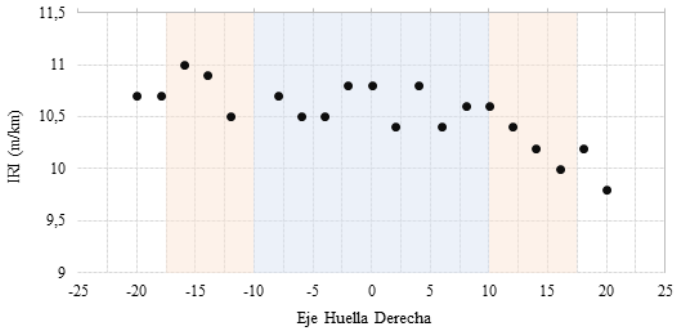
Tabla 32. Estadísticos de variación del IRI huella derecha

Medidas	IRI (m/km)
Valor central	9,6
Valor máximo	9,8
Valor mínimo	9,0
Media	9,3
Desviación	0,3

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia una variación del IRI en toda la huella considerando el efecto de *wandering* con una desviación de 0,3 m/km, un valor máximo de 9,8 m/km y un valor mínimo de 9,0 m/km, tal como se observa en la figura 37.

Figura 37. Variación del IRI en la huella derecha



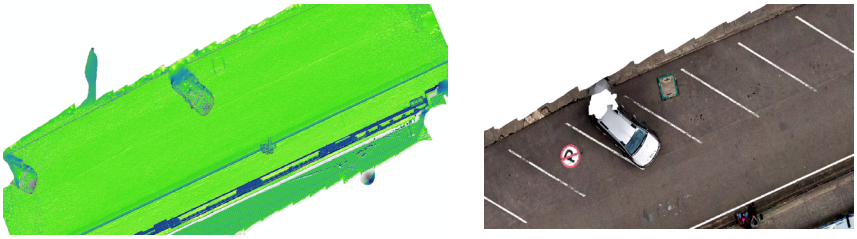
Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Identificación de deterioros superficiales

Esta zona tiene la particularidad de poseer elementos de infraestructura adicionales. La aplicación del algoritmo de

identificación de irregularidades permitió identificarlas, y por otro lado, definir los límites de los alineamientos para no extraer información de zonas extrapoladas. Los resultados se presentan en la figura 38.

Figura 38. Identificación de irregularidades en el modelo digital de superficie



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones 7

El método propuesto presenta ventajas sustanciales frente a los enfoques tradicionales de evaluación de pavimentos, especialmente en términos de seguridad operatividad, eficiencia y cobertura espacial. A diferencia de los métodos convencionales que requieren cierres parciales de vía y exposición directa del personal técnico al flujo vehicular, esta alternativa posibilita la captura de información sin interrumpir la circulación, disminuyendo significativamente los riesgos laborales y mejorando la eficiencia del levantamiento (Hernández & Pardo, 2022; Silva et al., 2020). Adicionalmente, la incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en el proceso de recolección de datos permite una adquisición rápida, continua y repetible, incluso en zonas de difícil acceso o con restricciones físicas (García et al., 2021). En el caso de estudio presentado, este método facilitó el análisis detallado de los perfiles transversales y el comportamiento del IRI a lo largo del ancho de circulación, permitiendo tanto una lectura por secciones como una evaluación continua del trazado completo. Esta capacidad de discriminación espacial concuerda con lo planteado por Mendoza & Cárdenas (2021), quienes señalan que el uso de imágenes y modelos tridimensionales derivados de UAV ofrece ventajas clave para la planificación del mantenimiento vial y la gestión de redes urbanas.

Sin embargo, existen limitaciones asociadas a la variabilidad de parámetros óptimos para la obtención de las fotografías aéreas. Las diferentes combinaciones posibles de elección del tipo de cámara,

la altura, velocidad y tiempo de vuelo, el traslapo considerado, GSD y GCP, entre otros, puede afectar la calidad del modelo creado y, por tanto, la calidad del perfil longitudinal extraído, fundamental para el cálculo de IRI y demás índices de condición del pavimento. Así, como referente en futuras investigaciones, el objetivo de estas debe ser buscar combinaciones óptimas de variables y de distribución de puntos de control en tierra, de modo tal que se aseguren resultados y productos aceptables en diferentes situaciones de vuelo y estudio. Este proceso se debe realizar a través de procesos iterativos. Los diseños experimentales desarrollados para tal fin se realizan mediante la aplicación de técnicas como los factores de Taguchi para conservar la suficiencia estadística (Gisbert et al., 2020)these parameters are selected by a trial and error process that cannot guarantee the quality of the results obtained because not all the potential combinations of parameters are checked. To fill this gap, this paper proposes the application of Taguchi's orthogonal arrays to calibrate the parameters of a heuristic optimization algorithm (the descent local search algorithm.

Del mismo modo, otra fuente de investigación corresponde a la implementación de técnicas de inteligencia artificial para la extracción y procesamiento de información a partir de nubes de puntos densas. Uno de los principales temas a tratar consiste en la segmentación de información, de modo tal que sea posible identificar falsos positivos o falsos negativos, según convenga en cada investigación realizada. Esto, al reconocer que cada fotografía puede involucrar elementos ajenos al objeto de estudio, que pueden afectar su correcto desarrollo.

En lo que respecta a los productos finales, estos se respaldan con los valores alcanzados de precisión, en comparación con los datos presentes en la literatura científica del tema. A su vez, pueden realizarse pruebas de campo donde se validen los datos obtenidos a través de metodologías tradicionales como PCI para el levantamiento e identificación de lesiones, estimación de IRI

con perfilómetro, topografía clásica, entre otros, pues una vez se adquiere la información con el UAV, puede ser analizada cuantas veces sea necesaria sin necesidad de realizar vuelos adicionales. De acuerdo con lo anterior, el equipo utilizado, que se ubica dentro de las categorías inferiores de clasificación, es adecuado para trabajos de escala pequeña e intermedia entre las técnicas terrestres como topografía y fotogrametría. Implementar equipos más sofisticados implica ampliar su campo de uso, y permitir análisis más complejos o de mayor dimensión.

Las investigaciones desarrolladas hasta el momento han permitido validar metodologías basadas en geotecnologías —particularmente mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados— para la captura y análisis del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en entornos urbanos. Este enfoque ha demostrado ser efectivo para caracterizar el estado funcional de las vías, generar diagnósticos precisos y fortalecer la toma de decisiones en la planificación y gestión del mantenimiento vial. No obstante, se identifican múltiples líneas futuras de investigación, entre las cuales destacan la integración de modelos predictivos basados en inteligencia artificial para anticipar el deterioro vial, el uso de análisis multitemporal para evaluar la evolución del IRI en función del tráfico y las condiciones climáticas, así como el desarrollo de plataformas interactivas de visualización territorial para apoyar la gestión pública de la infraestructura urbana. Asimismo, se plantea la necesidad de escalar estas metodologías a contextos rurales y periurbanos, considerando variables topográficas, geotécnicas y de accesibilidad.

Recomendaciones

8

Las recomendaciones del presente estudio se enfocan en la realización de los vuelos con UAV. En primera instancia se recomienda incluir formatos de verificación de vuelo que permitan comprobar la viabilidad de este al repasar aspectos como el ensamblaje del dispositivo, estado de las baterías, satélites disponibles, condiciones climáticas, entre otros.

Del mismo modo, resulta conveniente involucrar un operador o piloto acreditado que esté en condiciones de realizar un vuelo seguro, siguiendo la normativa vigente del espacio aéreo correspondiente.

Para ejecutar el vuelo se sugiere delimitar una zona de despegue cercana a la zona de estudio, donde no exista obstáculo alguno o tránsito constante de peatones y el UAV pueda elevarse y aterrizar sin inconvenientes. Así mismo, es recomendable seleccionar horas del día donde las condiciones climáticas no intervengan negativamente en el desarrollo de los vuelos, priorizando las horas con menos sombra, es decir, entre 11:00 am y 01:00 pm.

Referencias

AASTHO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*.

Administración Nacional de Aviación Civil. (2020). *Reglamento de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y de Sistemas de Vehículos Aéreos No Tripulados (SVANT)*.República Argentina.

Administración Nacional de Aviación Civil. (2021). *Resolución 13 del 2021 - Por la cual se deroga el Decreto 1770 de 2007 y la Resolución ANAC 880E de 2019*. República Argentina.

Aeronáutica Civil de Colombia. (2022). *RECAE 94 - Reglas de vuelo y operación para sistemas aéreos no tripulados y sistemas de aeronaves remotamente pilotadas*.

Aeronáutica Civil de Colombia. (2023). *Resolución 01983 de 2023, por medio de la cual se incorpora la norma "RAC 100 - Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS" a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia, se modifica una sección y se deroga el Apéndice 13 de la norma RAC 91 de dich*. Aeronáutica Civil de Colombia.

Agnisarman, S., Lopes, S., Chalil Madathil, K., Piratla, K., & Gramopadhye, A. (2019). A survey of automation-enabled human-in-the-loop systems for infrastructure visual inspection. *Automation in Construction*, *97*(April 2018), 52–76. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.019

Akagic, A., Buza, E., Omanovic, S., & Karabegovic, A. (2018). Pavement crack detection using Otsu thresholding for image segmentation. *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2018 - Proceedings*, 1092–1097. https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400199

Alarcón, J. J., Sarmiento-Rojas, J. A., & Bohorquez-Quiroga, E. (2025). *Información geográfica: Conceptos y aplicaciones prácticas en software de uso libre*. Editorial UPTC.

Alcaldía Mayor de Tunja. (2021). *Plan de ordenamiento territorial de Tunja: Dimensión Funcional*. http://pot-tunja.gov.co/wp-content/uploads/2023/03/Doc_Diagnostico_Funcional.pdf

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). *ASTM E1926-08 Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*.

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Infometrics*, *11*, 959–975. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j. joi.2017.08.007

Arteaga Botello, N. (2016). Política de la verticalidad: Drones, territorio y población en América Latina. *Región y Sociedad*, *XXVIII*(65), 263–292.

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

Badilla Vargas, G. (2011). Aspectos Y Consideraciones Importantes En El Cálculo Del Índice De Regularidad Internacional (Iri). *Revista Ingeniería*, *20*(1–2). https://doi.org/10.15517/ring.v20i1-2.7271

Badilla Vargas, G. A. (2010). Determinación de la Regularidad Superficial de Pavimentos mediante el cálculo del Indice Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes. *Universidad de Costa Rica*, 1–10.

Banco de Desarrollo de América Latina. (2011). *Desarrollo urbano y movilidad en América Latina* (CAF (ed.)).

Bang, H. T., Park, S., & Jeon, H. (2020). Defect identification in composite materials via thermography and deep learning techniques. *Composite Structures*, *246*(January), 112405. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112405

Barreno Vereau, E., Cabrera Gil Grados, E., & Millones Rivales, R. (2008). Metodología de modelamiento de un sistema de transporte urbano. *Ingeniería Industrial*, *26*(1), 11–44.

Beltrán, G., & Romo, M. (2012). Análisis de índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos Analysis of indices derived from impact deflection testing for pavement evaluation. *XXVI Reunión Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.

Biçici, S., & Zeybek, M. (2021). Automation in Construction An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud. *Automation in Construction*, *122*, e103475. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103475

Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems* (O. U. Press (ed.)). Oxford University Press.

Castro-Ricaurte, D. (2017). Aproximaciones al desarrollo territorial desde un análisis del periurbano en Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, *22*(1). https://doi.org/10.19053/01233769.5956

Chen, D. H., & Scullion, T. (2008). Forensic investigations of roadway pavement failures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *22*(1), 35–44. https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2008)22:1(35)

Chen, D. H., & Wimsatt, A. (2010). Inspection and condition assessment using Ground Penetrating Radar. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *136*(1), 207–214. https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000190

Chou, C. P., & Wu, C. L. (1997). Evaluation of panel characteristics and user-based pavement serviceability. *Transportation Research Record*, *1592*, 98–106. https://doi.org/10.3141/1592-12

Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *Journal of Informetrics*, *5*(1), 146–166. https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002

Cruz Toribio, J. O., & Gutiérrez Lazares, J. W. (2019). Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). *Métodos y Materiales*, *8*, 23–32. https://doi.org/10.15517/mym.v8i1.34113

De la Cruz Vega, S. A., Ibañez Ccoapaza, C. E., & Coaquira Cueva, D. Y. (2022). Determinación de índice de serviciabilidad y capacidad resistente. Caso práctico: Pavimentos en Azángaro, Puno, Perú. *Infraestructura Vial*, *24*(43), 1–8. https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.48563

Federal Highway Administration. (2014). *Distress identification manual for the long-term pavement performance program* (5th ed., Issue May).

Federal Highway Administration. (2021). *Present Serviceability Rating Computation from Reported Distresses* (Issue March). https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/21041/21041.pdf%0Ahttps://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/55915%0Ahttps://trid.trb.org/view/1852980

Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/RS12152447

García, M., López, J., & Ruiz, A. (2021). Aplicación de vehículos aéreos no tripulados en la evaluación funcional de pavimentos urbanos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Civil*, *18*(2), 45–60.

Gisbert, C. M., Lozano-Galant, J. A., Paya-Zaforteza, I., & Turmo, J. (2020). Calibration of the descent local search algorithm parameters using orthogonal arrays. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *35*, 997–1008. https://doi.org/10.1111/mice.12545

Guzmán, V. (2021). El método cualitativo y su aporte a la investigación en las ciencias sociales. *Gestionar: Revista de Empresa y Gobierno*, *1*(4), 19–31. https://doi.org/10.35622/j.rg.2021.04.002

Hall, K. T., & Correa, M. (1999). Estimation of resent Serviceability Index from International Roughness Index. *Transportation Research Record*, *99*, 93–99.

Hammarström, E. (2019). *Non-Destructive testing of concrete with ground penetrating radar* [Luleå University of Technology]. http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-72621

HemaMalini, B. H., Padesur, A., Kumar, V. M., & Shet, A. (2022). Detection of potholes on roads using a drone. *EAI Endorsed Transactions*, *9*(38), 1–6. https://doi.org/10.4108/eai.19-10-2021.171546

Hernández, D., & Pardo, F. (2022). Análisis comparativo entre métodos tradicionales y geotecnologías para el diagnóstico vial urbano. *Revista de Ingeniería y Territorio*, *10*(1), 77–92.

Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta. ed.). McGraw-Hill. https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf%0Ahttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25246403%0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC4249520

Herra Gómez, L. D. (2018). Conceptualización del procesamiento digital de imágenes para la evaluación de superficies de pavimento en Costa Rica. *Infraestructura Vial*, *20*(35), 20–26. https://doi.org/10.15517/iv.v20i35.34831

Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.*

Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2012). *INV E - 794 Cálculo del índice de rugosidad de pavimentos de carreteras.*

Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E 813 - Determinación del índice de deterioro superficial de un pavimento asfáltico mediante el método VIZIR.*

International Civil Aviator Organization (ICAO). (2020a). *Advisory Circular (AC) 102-37 - Dangerous Goods: Understanding the Risks and the Responsibilities.*

International Civil Aviator Organization (ICAO). (2020b). *Advisory Circular (AC) 102- 23 - Unmanned Aircraft Systems (UAS) Carrying Dangerous Goods.*

International Civil Aviator Organization (ICAO). (2020c). *Advisory Circular (AC) 102-1 - Unmanned Aircraft System Operations – Certification.*

Kaartinen, E., Dunphy, K., & Sadhu, A. (2022). LiDAR-based structural health monitoring: Applications in civil infrastructure systems. *Sensors*, *22*(12). https://doi.org/10.3390/s22124610

Kara De Maeijer, P., Luyckx, G., Vuye, C., Voet, E., Van Den Bergh, W., Vanlanduit, S., Braspenninckx, J., Stevens, N., & De Wolf, J. (2019). Fiber optics sensors in asphalt pavement: State-of-the-art review. *Infrastructures*, *4*(2), 1–16. https://doi.org/10.3390/infrastructures4020036

Karim, F. M. A., Rubasi, K. A. H., & Saleh, A. A. (2016). The Road Pavement Condition Index (PCI) evaluation and maintenance: A case study of Yemen. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, *8*(1), 1446–1455. https://doi.org/10.1515/otmcj-2016-0008

Kashiyama, T., Sekimoto, Y., Seto, T., & Lwin, K. K. (2020). Analyzing road coverage of public vehicles according to number and time period for installation of road inspection systems. *International Journal of Geo-Information*, *9*(161), 1–14. https://doi.org/10.3390/ijgi9030161

Kheradmandi, N., & Mehranfar, V. (2022). A critical review and comparative study on image segmentation-based techniques

for pavement crack detection. *Construction and Building Materials*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126162

Koch, C., & Brilakis, I. (2011). Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, *25*(3), 507–515. https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.01.002

Manheim, M. (1979). *Fundamentals of Transportation Systems Analysis* (The MIT Press (ed.)). The MIT Press.

Maser, K. R., & Roddis, W. M. K. (1990). Principles of thermography and radar for bridge deck assessment. *Journal of Transportation Engineering*, *116*(5), 583–601. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(583)

Mehta, Y., & Roque, R. (2003). Evaluation of FWD data for determination of Layer Moduli of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *15*(1), 25–31. https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:1(25)

Mendoza, C., & Cárdenas, P. (2021). Modelado superficial con UAV para gestión del mantenimiento vial: estudio de caso en entorno urbano. *Revista Latinoamericana de Transporte y Territorio*, *14*(3), 95–112.

Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, & Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. http://www.invias.gov.co/index.php/historico-cartelera-virtual/doc_download/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles

Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Koui, M., & Kakaras, K. (2001). An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements. *NDT and E International*, *34*(5), 329–335. https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00047-5

Morova, N., Serin, S., Terzi, S., & Saltan, M. (2007). Prediction of the pavement serviceability ratio of rigid highway pavements by artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, *21*(3), 590–593. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.001

Múčka, P. (2017). International Roughness Index specifications around the world. *Road Materials and Pavement Design*, *18*(4), 929–965. https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1197144

National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Automated pavement distress collection techniques*. https://doi.org/10.17226/23348

National Research Council. (1994). *Manual for profile measurement: Operational field guidelines*.

Nega, A., Nikraz, H., Herath, S., & Ghadimi, B. (2015). Distress identification, cost analysis and pavement temperature prediction for the long-term pavement performance for Western Australia. *International Journal of Engineering and Technology*, *7*(4), 267–275. https://doi.org/10.7763/ijet.2015.v7.803

Organizacion de Aviación Civil Internacional. (2018). *Documento Plan mundial de navegación aérea 2016-2030*. https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/GANP_es.pdf.

Organización de Aviación Civil Internacional. (2011). *Circular 328 - Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*.

Outay, F., Mengash, H. A., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *141*(October), 116–129. https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018

Oviedo Haito, R. (2021). *Evaluación de pavimentos flexibles usando el PCI (Pavement Condition Index). February*.

Owens, W. (1971). Carreteras y vías para el desarrollo. *El Correo de La UNESCO: Una ventana abierta sobre el mundo, XXIV*(2), 17–21. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000052797_spa

Pan, Y., Zhang, X., Cervone, G., & Yang, L. (2018). Detection of asphalt pavement potholes and cracks based on the Unmanned Aerial Vehicle multispectral imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *11*(10), 3701–3712. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865528

Park, K., Thomas, N. E., & Lee, K. W. (2007). Applicability of the international roughness index as a predictor of asphalt pavement condition. *Journal of Transportation Engineering*, *133*(12), 706–709. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:12(706)

Piryonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2020). Data analytics in asset management: Cost-effective prediction of the Pavement Condition Index. *Journal of Infrastructure Systems*, *26*(1). https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000512

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. https://doi.org/10.18359/rcin.9

Porras, H., Castañeda, E., Sanabria, D., & Medina, G. (2012). Detección automática de grietas de pavimento asfáltico aplicando características geométricas y descriptores de forma. *Inge Cuc*, *8*(1), 261–280. http://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/ingecuc/article/view/265

Prosser-Contreras, M., Atencio, E., La Rivera, F. M., & Herrera, R. F. (2020). Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and photogrammetry to obtain the International Roughness Index (IRI) on roads. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(24), 1–22. https://doi.org/10.3390/app10248788

Radopoulou, S. C., & Brilakis, I. (2015). Patch detection for pavement assessment. *Automation in Construction*, *53*, 95–104. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.010

Ragnoli, A., De Blasiis, M. R., & Di Benedetto, A. (2018). Pavement distress detection methods: A review. *Infrastructures*. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058

Reglas de Vuelo y Operación Para Sistemas Aéreos No Tripulados y Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (2022). https://aaaes.fac.mil.co/sites/aaaes/files/racae_94_enmienda_2_reglas_de_vuelo_y_operacion_uasrpas.pdf

Rodríguez Gonzalez, J., Alarcón, J. J., & Espejo Torres, E. D. (2020). *Cartografía con drones (VANT´s)* (1st ed.). Editorial UPTC.

Rodríguez Velásquez, E. D. (2009). *Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la Av. Luis Montero, distrito de Castilla. Piura*. [Universidad de Piura]. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1350/ICI_180.pdf

Romero-Chambi, E., Villarroel-Quezada, S., Atencio, E., & Rivera, F. M. La. (2020). Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(12), 1–33. https://doi.org/10.3390/APP10124157

Roussel, J. M., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., & Broutin, M. (2019). Numerical simulation of falling/heavy weight deflectometer test considering linear viscoelastic behaviour in bituminous layers and inertia effects. *Road Materials and Pavement*

Design, *20*(sup1), S64–S78. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1587491

Saad, A. M., & Tahar, K. N. (2019). Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *137*, 647–654. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093

Saarenketo, T., & Scullion, T. (2000). Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, *43*(2–4), 119–138. https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X

Sayers, M. (1995). On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record*, *1501*, 1–12.

Secretaría de Transporte de México. (2019). *Norma NOM-107-SCT3-2019 Por la cual se establecen los requisitos para operar RPAS en el espacio aéreo mexicano.*

Secretaría Distrital de Planeación. (2020). *Plan de Ordenamiento Territorial.* http://www.sdp.gov.co/micrositios/pot/documentos

Shtayat, A., Moridpour, S., Best, B., Shroff, A., & Raol, D. (2020). A review of monitoring systems of pavement condition in paved and unpaved roads. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *7*(5), 629–638. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.004

Silva, L. A., Blas, H. S. S., García, D. P., Mendes, A. S., & González, G. V. (2020). An architectural multi-agent system for a pavement monitoring system with pothole recognition in uav images. *Sensors (Switzerland)*, *20*(21), 1–23. https://doi.org/10.3390/s20216205

Silva, R., Torres, M., & Díaz, E. (2020). Evaluación no intrusiva del estado superficial de pavimentos mediante sensores remotos. *Revista Internacional de Ingeniería de Infraestructura*, *25*(4), 32–48.

Solla, M., Lagüela, S., González-Jorge, H., & Arias, P. (2014). Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT and E International*, *62*, 55–65. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.11.006

Solminihac, H., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2019). *Gestión de infraestructura vial*. Alfaomega.

Terzi, S. (2006). Modeling the pavement present serviceability index of flexible highway pavements using data mining. *Journal of Applied Sciences*, *6*(1), 193–197. https://doi.org/10.3923/jas.2006.193.197

Uechi, S. T., & Uechi, H. (2018). The Profiling of International Roughness Index (IRI) Based on Lagrangian Method. *World Journal of Engineering and Technology*, *06*(04), 885–902. https://doi.org/10.4236/wjet.2018.64059

Unión Europea (2019). Reglamento (UE) 2019/945, *Diario Oficial de la Unión Europea*.

Vargas-Ramírez, N., & Paneque-Gálvez, J. (2020). Regulatory challenges for community use of drones in Mexico. *Investigaciones Geograficas*, *102*. https://doi.org/10.14350/rig.60007

Vásquez Varela, L. R. (2015). Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. *Ingepav*, 90. https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf

Ventura Espinel, J. A., & Alvarenga, E. R. (2008). *Determinación del Índice De Regularidad Internacional (IRI).*

Villalobos, J. L. C., Menchaca, A. E. J., Terrazas, A. L., & Vázquez, F. M. (2019). El mundo de los drones: Tipos de drones y sus principales usos. *Revista de Investigación Científica de La Facultad de Ingeniería de La Universidad Autónoma de Chihuahua*, *4*(14). https://vocero.uach.mx/index.php/finguach/article/view/332

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.

Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2018). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*.

Yeum, C. M., Choi, J., & Dyke, S. J. (2017). Autonomous image localization for visual inspection of civil infrastructure. *Smart Materials and Structures*, *26*(3). https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa510e



Este libro se terminó de editar en el mes
de noviembre de 2025, en la Editorial UPTC.
Tunja - Boyacá - Colombia.

El grupo de investigación impulsa el análisis y mitigación de riesgos asociados a fenómenos naturales y antropogénicos, desarrollando metodologías y modelos adaptados al contexto regional. Su misión es fortalecer la capacidad científica y técnica para la prevención y atención de desastres geoambientales. A corto plazo, prioriza la asesoría municipal y la implementación de metodologías alternativas; a mediano, la consolidación de laboratorios, la creación de una maestría y la articulación institucional; a largo, la transferencia de modelos y la proyección internacional. Integra líneas de sistemas de información geográfica, zonificación geotécnica, instrumentación sísmica y vulnerabilidad estructural. Entre sus retos destacan la microzonificación sísmica del corredor industrial de Boyacá, la implementación de un sistema geográfico regional y la consolidación de un laboratorio especializado. Su visión es consolidarse como referente nacional en gestión del riesgo y sostenibilidad territorial.

El semillero de investigación en modelos digitales de simulación con SIG de la Escuela de Ingeniería Civil tiene como misión implementar herramientas digitales para la generación de modelos de simulación en las áreas de geomática e infraestructura vial, promoviendo la innovación tecnológica en los procesos de análisis y gestión del territorio. Además, busca comunicar y transferir el conocimiento a la comunidad mediante el uso de plataformas y servicios web, fortaleciendo la integración entre la investigación académica, la sociedad y las necesidades del entorno regional y nacional.

EDITORIAL UPTC

En este libro se presentan los resultados de una investigación orientada al desarrollo de un flujo de trabajo para la inspección de pavimentos flexibles en zonas urbanas mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT's). En sus primeros capítulos se aborda el componente conceptual relacionado con la reglamentación nacional e internacional sobre estándares de pavimentos y de VANT's, reforzado con el análisis de tendencias y técnicas modernas en la línea de investigación. Posteriormente, se describe el proceso metodológico, la zona de análisis y los procedimientos para la captura y procesamiento de la información obtenida a través de los dispositivos aéreos y procesada en software especializado. Estos insumos facilitaron la extracción de información sobre la infraestructura vial, en particular la estimación del índice de rugosidad internacional (IRI) y la detección de daños como baches y ahuellamientos. Los resultados muestran la aplicabilidad y precisión del método, al ofrecer datos continuos y confiables que permiten a los tomadores de decisiones realizar evaluaciones periódicas y generar indicadores de seguimiento. Finalmente, el manuscrito presenta conclusiones y recomendaciones orientadas a la correcta aplicación del flujo de trabajo propuesto.

Uptc®
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
VIGILADA MINEDUCACIÓN

ISBN 978-628-7863-00-2