



ARTÍCULO DE REVISIÓN

Métodos para la detección de fallas superficiales en pavimentos flexibles: una revisión

Methods for detecting surface distresses in flexible pavements: a review

Norys H. Peña Ramírez ¹, Angie L. Hernández Bonilla ², Omar J. Jiménez Jiménez ³, Santiago Berdugo Pérez ⁴ y Diego A. Fonseca Santos ⁵

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2025

Fecha de Aceptación: 10 de junio de 2025

Cómo citar: N. H. Peña-Ramírez, A. L. Hernández-Bonilla, O. J. Jiménez-Jiménez, S. Berdugo-Pérez, y D. A. Fonseca-Alfonso, "Métodos para la detección de fallas superficiales en pavimentos flexibles: una revisión", *Tecnura*, 29(84), 109-136. <https://doi.org/10.14483/22487638.21926>

Resumen

Objetivo: analizar los componentes de la evaluación de pavimentos flexibles, con énfasis en la revisión de los métodos de recolección de fallas superficiales.

Metodología: se realizó una revisión sistemática de la literatura, en bases de datos como Science Direct, Web of Science, Scopus y Research Gate, además de repositorios institucionales. Se referenciaron 75 investigaciones relevantes en la auscultación de pavimentos.

Resultados: se reconocieron los beneficios y aplicaciones de los sistemas más comunes de detección de fallas, así como la importancia de los índices de evaluación y las fallas más investigadas en la literatura.

Conclusiones: los métodos de detección de fallas superficiales se deben adaptar al contexto, magnitud y tipo de vía a evaluar, y tener en cuenta el equilibrio entre precisión, costo y facilidad de aplicación. La revisión muestra

¹Ingeniera civil, especialista en Pavimentos Urbanos, magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte. Docente e investigadora del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG). Tunja, Colombia Correo electrónico: norys.pena@uptc.edu.co

²Ingeniera civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG). Tunja, Colombia Correo electrónico: angiehernandez.ing@gmail.com

³Ingeniero civil, especialista en Geotecnia Vial, magíster en Ingeniería con énfasis en Civil-Geotecnia. Docente e investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG) . Tunja, Colombia Correo electrónico: omar.jimenez@uptc.edu.co

⁴Ingeniero civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG). Tunja, Colombia Correo electrónico: santiago_bp0504@gmail.com

⁵Estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG). Tunja, Colombia Correo electrónico: diego.fonseca08@uptc.edu.co

que la combinación de técnicas tradicionales y tecnológicas mejora los alcances de los resultados, de este modo, se exhiben metodologías que optimizan el diagnóstico, mantenimiento y gestión de la infraestructura vial.

Palabras clave: pavimento, falla, VANT, dron, índices.

Abstract

Objective: Analyze the components of the evaluation of flexible pavements, focused on the review of surface distress collection methods.

Methodology: A systematic review of the literature was carried out in databases such as Science Direct, Web of Science, Scopus and Research Gate as well as institutional repositories. 75 relevant investigations in pavement auscultation were referenced.

Results: The benefits and applications of the most common distress detection systems were identified, as well as the importance of evaluation indexes and the most researched distresses in the literature.

Conclusions: Surface defect detection methods must be adapted to the context, magnitude, and type of road to be evaluated, considering the balance between accuracy, cost, and ease of application. The review shows that combining traditional and technological techniques improves the scope of results, thus demonstrating methodologies that optimize the diagnosis, maintenance, and management of road infrastructure.

Keywords: pavimento, distress, UAV, drone, Index

Introducción

Las carreteras, como elementos principales de la infraestructura vial, desempeñan un papel fundamental en la conectividad y el desarrollo económico de la sociedad (1). Por ello, de su condición y conservación depende en gran parte el funcionamiento integral de las ciudades (2). Al proporcionar movilidad a usuarios, bienes y servicios, la red vial debe cumplir estándares de calidad, seguridad y comodidad, que se garantizan con un mantenimiento óptimo (3). Para este fin, se requieren bases de datos confiables con información actualizada y precisa sobre el estado de las carreteras (4), que permita implementar estrategias correctas, y así, evitar sobrecostos y controlar el deterioro del pavimento.

Es imprescindible la evaluación del estado superficial del pavimento mediante mediciones fiables que permitan diagnosticar la funcionalidad, e indiquen la mejor alternativa de mantenimiento o restauración (5). Esta evaluación se puede efectuar mediante diversos métodos y herramientas. Uno de los más convencionales se basa en la inspección visual, cuyos resultados se ven influenciados por subjetividad de los inspectores, alta demanda de tiempo, costos elevados y, en ocasiones, riesgos que supone para la vida de los evaluadores (6).

Las nuevas técnicas de adquisición automatizadas, que utilizan cámaras o tecnología láser, permiten cubrir el problema de una manera eficiente y objetiva (7). Así, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) surgen como una alternativa de fácil manejo para abarcar grandes áreas en poco tiempo, sin interferir con los elementos de la vía (8). Además, recolectan imágenes de alta resolución en las que se puede identificar el tipo y la cantidad de fallas superficiales, además de conservar el registro de la evaluación, con el fin de contrastar los cambios a futuro.

La realidad de un país en desarrollo, como Colombia, en el que más del 50 % de la red vial pavimentada, según (9), se encuentra en estado de regular a muy malo; evidencia un déficit de infraestructura vial que vuelve prioritaria una evaluación eficaz que permita programar estrategias adecuadas que fomenten un buen estado de servicio de las carreteras del país.

La problemática nombrada plantea la necesidad de analizar metodologías y sistemas para la evaluación de pavimentos flexibles, tema que ha sido investigado en contextos internacionales y nacionales. El objetivo de este artículo es revisar estos aportes y evidenciar los enfoques de diversas investigaciones de detección de fallas superficiales en pavimento flexible. La metodología expone el proceso de revisión bibliográfica, luego se presentan los resultados de las investigaciones recopiladas enfocadas en los métodos de detección. Posteriormente, se encamina una discusión de los avances en distintos contextos territoriales.

Metodología

Para el estado del arte, se realizó una revisión sistemática de literatura, utilizando una metodología de análisis cualitativo basada en la propuesta de (10). Esta se orienta por el planteamiento de preguntas cómo: ¿qué métodos de evaluación de fallas superficiales en pavimentos flexibles se han usado en los últimos años en el ámbito internacional y nacional?; ¿cuáles son los índices de evaluación de pavimentos más usados en estos contextos?; ¿qué tipo de fallas superficiales son las más analizadas en las investigaciones en los últimos años?

Se realizó una recopilación de fuentes, entre artículos de revistas, libros y trabajos de grado, relacionados con el tema de evaluación superficial de pavimentos. Para investigaciones internacionales se utilizan bases de datos como Science Direct, Web of Science, Scopus y Research Gate, y en el contexto nacional, se usan principalmente repositorios institucionales.

Se emplearon los términos de búsqueda “PAVEMENT”, “DISTRESS”, “UAV”. Para la búsqueda de publicaciones de habla hispana, fueron empleados los términos “PAVIMENTO”, “FALLA”, “VANT”. De lo anterior, se obtuvo un total de 91 publicaciones, que fueron sometidas a los criterios establecidos en la tabla 1.

Con el fin de realizar un análisis más conciso, se implementó el programa *VOSviewer*, el cual por medio de palabras clave, permite construir una red de coincidencia. En este caso, se considera un enfoque de coocurrencia, para el que se estableció un mínimo de ocurrencias por palabra, lo que resulta en cuatro clústeres evidenciados en la red de la figura 1.

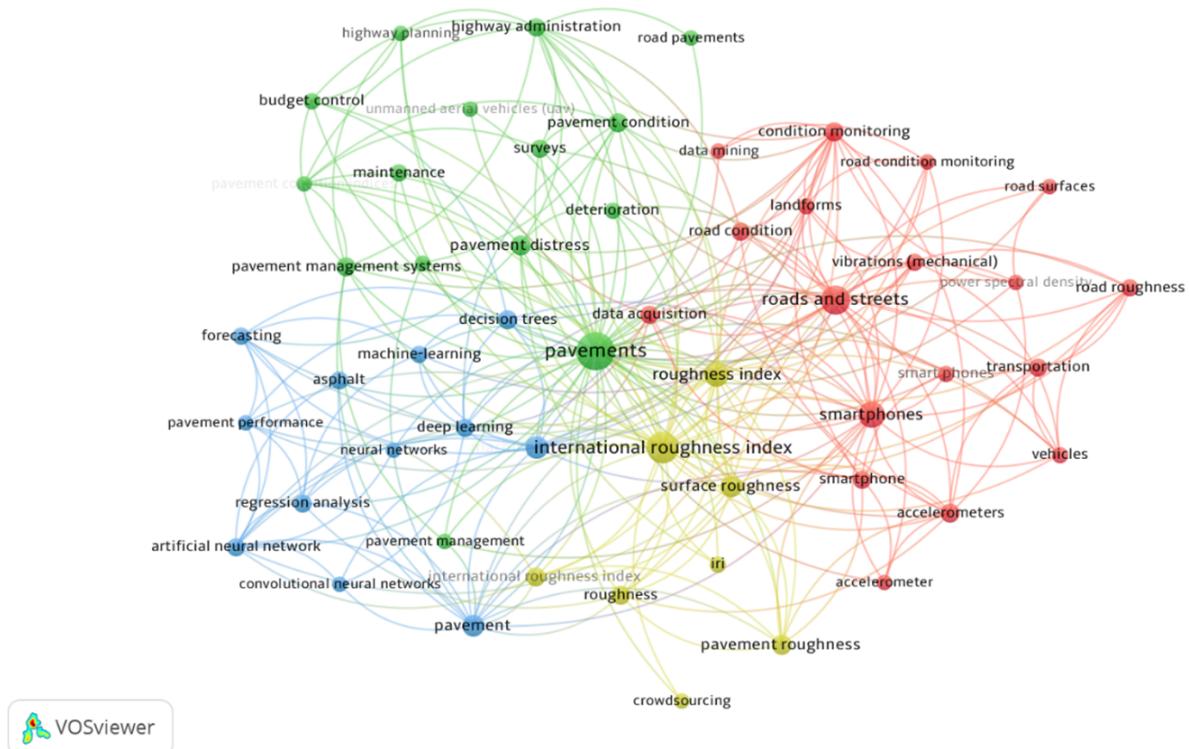


Figura 1. Red de coincidencia de palabras clave

Fuente: elaborada en programa *VOSViewer* versión 1.6.20.

Para dar respuesta a las preguntas orientadoras, se establecen temáticas relacionadas con la evaluación de pavimentos. Estas determinan la estructura de la presente revisión y se componen por las investigaciones resultantes de los filtros presentados en la tabla 1.

Evaluación de pavimentos

La evaluación técnica de la condición del pavimento, según (11), es “el paso fundamental para asignar las acciones de conservación más adecuadas que deben ser aplicadas en el pavimento a evaluar”. Este proceso comprende dos aspectos clave: la evaluación funcional y

Tabla 1. Secuencia de revisión de la literatura

Etapas	Actividades	Resultado
Estrategia de búsqueda y análisis bibliométrico	<p>Se realiza una búsqueda detallada en bases de datos como Science Direct, Scopus, Web of Science y Research Gate.</p> <p>Se realiza un filtro con los términos de búsqueda "PAVEMENT, DISTRESS, UAV" limitada al título y palabras clave.</p> <p>Los resultados de la búsqueda de las bases de datos se analizan mediante el software VOSviewer en su versión 1.6.20.</p> <p>El software filtra los artículos según la coocurrencia de palabras clave, lo cual arroja como resultado una red de nodos que muestra la relevancia de los temas.</p> <p>De este filtro se descartan los documentos cuyas palabras clave no se correlacionan en la red nodal.</p> <p>En una hoja de cálculo se tabulan los documentos relevantes, y se tiene en cuenta procedencia y año de publicación.</p>	<p>Se encuentran 91 artículos en inglés y español, de los que se descartan 9, de acuerdo con los términos de exclusión.</p> <p>Esto presenta 82 artículos viables, de los cuales el 80 % fueron publicados en los últimos seis años (2018-2023), lo que demuestra la relevancia y actualidad del tema.</p>
Criterios de selección y revisión	<p>El criterio de selección se establece en artículos de investigación teórica y experimental relevantes en título y palabras clave.</p> <p>Se establecen temáticas generales sobre evaluación de fallas: sistemas de adquisición de fallas, tipos de fallas y parámetros de evaluación.</p> <p>Se hace una revisión minuciosa de cada artículo para clasificarlo según contexto locativo. Como último filtro se descartan los que no son relevantes para ninguna temática.</p>	<p>De los 82 artículos, 48 son en inglés, 1 en portugués y 33 en español. Luego del filtro de selección, se establecen para el análisis 75 artículos.</p>
Extracción de datos	<p>Se realiza un análisis particular para los 75 documentos, con datos generales, objetivo, aplicación, sector, temática principal, resultados y conclusiones.</p> <p>Se analizan los artículos y se extraen los datos que prevalecen para un análisis general del tema.</p> <p>Se diligencian formularios para la clasificación global de la investigación.</p>	<p>Revisión completa de 75 documentos, para la evaluación conceptual del tema.</p> <p>Finalmente, se seleccionan 43 artículos en inglés, 1 en portugués y 31 en español.</p>
Análisis y discusión de información	<p>Se analiza cada uno de los aportes de los artículos a las temáticas seleccionadas.</p> <p>Se elaboran cuadros de resultados de evaluación de fallas superficiales en pavimentos flexibles.</p>	<p>Producción de artículo de revisión del tema de investigación.</p>

Fuente: elaborado a partir de (10).

la evaluación estructural. La primera tiene en cuenta los factores que afectan el servicio y la seguridad de la carretera, es decir, la evaluación de las irregularidades presentes en la capa superficial del pavimento (12), denominadas "fallas superficiales", las cuales son objeto de esta revisión enfocada en pavimentos flexibles.

El origen de estas fallas está dado principalmente por el debilitamiento de la estructura del pavimento, resultante de uno o varios factores: clima, humedad, altos niveles de tránsito o calidad constructiva (13). Al tratarse de un pavimento flexible, constituido por un conjunto superpuesto de capas, denominadas "capa asfáltica", "base" y "subbase" (14), está sujeto a una

Tabla 2. Evaluación de fallas en pavimentos

Categoría	Tipo de falla	Referencia
Fisuras y grietas	Piel de cocodrilo	(2, 8, 18–23)
	Agrietamiento en bloque	(1, 8, 19, 24, 25)
	Grieta de borde	(3, 5, 19)
	Grieta de reflexión de junta	(19)
	Grietas longitudinales y transversales	(3, 4, 8, 20–23, 26–28)
	Cruce de vía férrea	
	Grietas parabólicas	(19, 22)
Deformaciones superficiales	Abultamientos y hundimientos	(2, 5)
	Corrugación	(2)
	Depresión	(1–3, 19)
	Ahuellamiento	(3, 18, 29–32)
	Desplazamiento	(5)
	Hinchamiento	(2)
Desprendimientos	Huecos / Baches	(1, 12, 13, 19, 20, 22, 24, 25, 30, 33–35)
	Desprendimiento de agregados	(2, 19, 36)
Otras fallas	Exudación	(5, 18)
	Pulimiento de agregados	(2, 5)
	Desnivel carril/berma	(19)
	Parcheo y acometidas	(3–5, 8, 19, 22, 24, 36)

Fuente: autores.

gran cantidad de esfuerzos, los cuales pueden derivar en fallas (15), como grietas, baches, ahue-llamiento, entre otras, clasificadas según diferentes instituciones. En Colombia, según (16), en su convenio para el manual de inspección visual, se establecen 26 tipos de falla agrupados en 5 categorías. Internacionalmente, la metodología PCI (*pavement condition index*) define 19 fallas, clasificadas en 4 grupos (17), especificados en la tabla 2, en los que se incluyen referencias de investigaciones en las que se detectaron y analizaron estas distintas fallas.

La detección de fisuras y grietas ha sido un enfoque destacado en la mayoría de las investigaciones, como se evidencia en la tabla 2, en contraste con los demás grupos de deterioros. Esto sugiere que se debe profundizar en la investigación de todos los tipos de fallas y sus métodos de detección (20), ya que la falta de mantenimiento de cualquier falla genera consecuencias progresivas, que evolucionan en mayor severidad y daño para la estructura del pavimento, y por consiguiente para la seguridad de los usuarios y sus vehículos (37).

Evitar el daño permanente y proponer la mejor estrategia de mantenimiento, es el objeto de la evaluación funcional del pavimento, para la que se emplean diversas metodologías e instrumentos. Las metodologías más destacadas son el PCI (36), índice de regularidad internacional (IRI) (33), índice de servicio de pavimento (PSI, por su sigla en inglés) (38) y visión e inspección de zonas e itinerarios en riesgo (VIZIR) (21), detalladas en la tabla 3. El propósito de estas consiste en registrar las fallas existentes en un tramo de carretera y evaluar la condición del pavimento, según diversos parámetros como el daño, la irregularidad y la falla superficial (4). El uso de estos índices facilita la propuesta de soluciones adecuadas según el estado y severidad de los deterioros.

Tabla 3. Índices para la evaluación de la superficie de pavimentos

Índice	Información	Medición	Método de recolección
PCI	Superficie del pavimento	Tipo, gravedad y cantidad de deterioro	Inspección visual
IRI	Calidad de movilidad	Rugosidad	Perfil de la carretera
VIZIR	Superficie del pavimento	Condición y funcionalidad	Inspección visual
PSI	Calidad de movilidad	Rendimiento funcional	Inspección visual

Fuente: elaborado a partir de (39).

Los instrumentos utilizados para llevar a cabo esta evaluación se definen como sistemas de recolección de datos

Sistemas de recolección de datos

Actualmente, existen diversos sistemas para evaluar la condición de pavimentos flexibles, los cuales recopilan información del estado real de la superficie (5). Entre los dispositivos implementados, se encuentran los métodos manuales, VANT, sistemas láser, cámaras fotográficas, sensores multiespectrales, entre otros (20). A continuación, se discuten estos métodos.

Métodos manuales

Este método comprende la inspección visual y el levantamiento de fallas en campo, mediante hojas de inspección, catálogos de fallas, equipo de medición (cinta métrica, reglas), señales preventivas (cinta, chalecos y conos) y principalmente, el personal capacitado que realiza la evaluación del deterioro (4). El método de inspección visual, utilizado tradicionalmente y aún vigente por su simplicidad y bajo costo, presenta limitaciones en su ejecución. La subjetividad del criterio del inspector incrementa el riesgo de sesgo en la evaluación de fallas, según (24), quienes, al comparar este método con la fotogrametría de corto alcance (FCA) para el análisis

de baches, evidenciaron que la forma irregular de este tipo de fallas exige múltiples mediciones en campo, lo cual aumenta la posibilidad de errores sistemáticos y variabilidad, la cual se controló con el uso de equipos automatizados.

Adicionalmente, (4) demuestran que este método demanda un mayor tiempo de ejecución luego de comparar la detección de grietas y baches, en una carretera en Ecuador, de manera tradicional y con método VANT. La inspección abarcó un total de 15 horas con dos evaluadores, lo que significó un rendimiento promedio de 5 minutos por falla; contrario a los 40 minutos que demoró el VANT en obtener 950 imágenes de las que se detectaron 290 daños.

Cruz-Toribio y Gutiérrez-Lazares (8) concuerdan con lo concluido por Pucha-Aguinsaca y Zárate-Torres (4), tras comparar un resultado de inspección visual de 7 muestras evaluadas en 6 horas por 3 inspectores, contra un método VANT que en solo 7 minutos evaluó el doble de muestras con un solo evaluador, sin contar el procesamiento.

Esto evidencia que el método convencional destaca por su sencillez y facilidad; sin embargo, requiere personal experto y mayor cantidad de inspectores, si se busca eficiencia y rapidez en la recolección de fallas. Priorizar de manera exclusiva la metodología tradicional lleva a bajos niveles de productividad, a altos grados de incertidumbre e, incluso, a la inseguridad para los usuarios de carreteras (31), por ello los autores recomiendan complementar métodos manuales con métodos automatizados, para obtener un mejor rendimiento.

Vehículos aéreos no tripulados (VANT) (unmanned aerial vehicle [UAV])

Los VANT son plataformas aéreas que pueden volar sin presencia de piloto (34). Tienen la capacidad de mantener una altura de vuelo constante de manera autónoma (40), y la utilidad de ser operados a distancia por personal certificado.

Estos vehículos, también conocidos como “drones”, recientemente se han implementado como herramientas en la inspección, monitoreo y recolección de datos en obras civiles, infraestructura y carreteras (25). Su relevancia radica en el procesamiento digital de la información capturada (12), el cual permite convertir imágenes y videos en ortofotos, nubes de puntos, modelo digital de elevación (DEM, por su sigla en inglés) y modelos 3D, mediante coordenadas de las imágenes, puntos de control establecidos en el terreno y demás información integrada para el vuelo (41).

Tabla 4. Investigaciones realizadas con VANT

Referencia	Objetivo	Características de vuelo	Índice de evaluación	Dispositivo de recolección	Software de procesamiento
(47) - España	Se analizó la influencia de parámetros VANT para la precisión fotogramétrica en un terreno de 18 000 ha con el software MikroKopter-Tool.	Se consideraron altitudes de (50, 80, 100 y 120 m) con GSD entre 1,2 y 2,9 cm/px y tres GCP (3, 5 y 10) procesando con superposiciones frontales 90 % y laterales 80 %.	-	VANT ala giratoria - 8 rotores con motor MikroKopter	Agisoft PhotoScan Professional
(5) - Brasil	Se identificaron erosiones, parches y depresiones superficiales en una carretera asfáltica.	Se usó el software eMotion 2, el cual determina automáticamente el tiempo de vuelo, la altitud y la velocidad para registrar 10 GPC con 75 % de superposición de imágenes.	-	VANT ala giratoria - 8 rotores con motor MikroKopter	Agisoft PhotoScan Professional
(48) - Colombia	Se auscultó un tramo de 0,912 km por medio de VANT y se compararon los resultados entre las metodologías PCI y VIZIR.	Altura máxima de vuelo 152 m sobre el terreno, distancia máxima del operar 750 m, velocidad 72 km/h y resolución de video 4K 60 fps.	Pavement Condition Index (PCI) VIZIR	VANT ala fija - eBee con cámaras S110 NSR y RGB	Terra 3D

(8) – Perú	Se evaluaron 520 m de pavimento flexible por medio de imágenes georreferenciadas con VANT.	Tiempo de vuelo de 7 minutos. El plan de vuelo se realizó en DJI GS Pro, para una altura de vuelo 20 m. Luego de 5 horas de procesamiento, se obtuvieron 145 imágenes georreferenciadas, las cuales evaluaron las fallas de 13 muestras.	Pavement Condition Index (PCI) VIZIR	VANT ala giratoria - DJI Phantom 4 Pro	Agisoft Photoscan
(30) - Malasia	Se evaluaron los baches y ahueamientos en una carretera de la universidad UiTM, mediante el software Map Pilot.	Se voló con altitudes de 10 y 40 m con GSD respectivos de 0,4 y 1,7 cm/px. El VANT viajó a 4 m/s adquiriendo entre 22 y 34 imágenes por vuelo, con 70 % de superposición.	Pavement Condition Index (PCI)	VANT ala giratoria - DJI Phantom 4 Pro	Pix4D Mapper

(46) - España	Se analizó la importancia de puntos de control en la evaluación con drones en cuatro tramos de carretera.	Se usó una combinación de velocidad de 3 m/s, imágenes cada 3 s, superposición de 80 %, altura de vuelo de 65 m, para un GSD de 1,75 cm/px. Se obtuvo 746 imágenes, y una recomendación de 9 u 11 puntos de control, dependiendo la separación, a ambos lados de la carretera.	-	VANT ala giratoria - DJI Phantom 3 Professional	Agisoft PhotScan - Global Mapper
(3) - Ecuador	Se evaluaron las grietas y baches de un pavimento flexible de un tramo de 500 m	Bajo una configuración 6 GPC, una altura de vuelo de 40 m, intervalo de captura cada 2 segundos, y velocidad horizontal de 2 m/s; se obtuvo una precisión de 2,29 cm.	-	VANT ala giratoria - 4 motores. DJI Phantom 4 Pro.	Pix4D Mapper
(49) - Chile	Se obtuvieron 733 imágenes de un procesamiento de 25 min, se creó el modelo 3D y se calculó el IRI mediante varios métodos.	Para la evaluación se fijaron parámetros de altura de vuelo de 10 m, velocidad de 1,5 m/s, superposición de 80 %, GSD de 1,93 mm/px, y fotografías cada 2 seg.	-	VANT ala giratoria - DJI Mavic Pro 1	Agisoft PhotoScan

(3) - Italia	Se evaluaron fallas como grietas, depresiones y surcos en un tramo de carretera de 1 km. El software de detección usado fue Cloud Compare.	Se establecieron 8 GPC por cada 200 m, una altura de vuelo de 10 m, y una toma de imágenes automáticas cada 2 segundos.	International Roughness Index (IRI)	VANT ala giratoria - DJI Phantom 4 pro	Context Capture (Bentley)
(25) - España	Se diseñó una plataforma que permite detectar baches y grietas mostrado en una carretera en España.	Para ello se consideraron parámetros de altitud de 60 m, vuelos de 34 minutos, velocidad entre 4 y 7 m/s y 568 imágenes con una precisión del 95 %.	-	VANT ala giratoria - DJI Mavic Pro 2	Agisoft Metashape
(50) - Colombia	El proyecto realizó una serie de fotografías para evidenciar la evolución de las edificaciones de la universidad UPTC.	Para esto utilizaron parámetros de vuelo con altura promedio de 60 m y un GSD de 2 cm/px.	-	VANT ala giratoria - DJI Mavic Air 2	You Only Look Once (YOLO v.4)
(19) - Indonesia	Se evaluó la condición de 1,5 km de pavimento flexible con parámetros SDI y PCI.	Se establecieron 7 puntos de control, y se planeó la ruta de vuelo con Pix 4D capture, con una altura entre 13 y 20 m.	-	VANT ala giratoria - DJI Phantom 4	Pix4D Mapper

Fuente: autores.

Los programas diseñados para procesar estos datos se destacan por un elevado nivel de automatización en cada fase del vuelo, ya que abarcan desde la autocalibración de las cámaras hasta la aerotriangulación ajustada de manera automática, entre otras funciones (42). Entre los *softwares* más utilizados para realizar este procesamiento se incluyen *Agisoft Metashape/PhotoScan*, *Pix4D Mapper*, *Context Capture*; los cuales han sido implementados en investigaciones experimentales, como se observa en la tabla 4.

Existen actualmente diferentes tipos de drones, entre ellos, de ala giratoria (multirrotor y rotor único), de ala fija e híbridos (43). La elección del VANT depende del objeto del proyecto; los modelos de ala fija poseen más autonomía de vuelo, menor consumo de energía y vuelos a mayor velocidad (44). Sin embargo, requieren una zona amplia para su despegue y aterrizaje. Contrario a esto, el modelo de ala giratoria permite un despegue vertical y posee mayor capacidad de maniobra, lo que garantiza una toma de fotografía más estable. Sin embargo, el gran consumo de energía limita el tiempo de vuelo de este modelo (41).

Considerando lo anterior, los estudios registrados en la tabla 4 confirman que el modelo de VANT multirrotor o de ala giratoria es el tipo más utilizado para la metodología experimental, ya que el 92 % de las investigaciones referidas implementaron este tipo de dron.

Es importante resaltar que la calidad de los datos obtenidos mediante VANT se ve influenciada por los siguientes parámetros:

- *Superposición*. Se refiere al traslapo de imágenes adyacentes tomadas en orientación longitudinal y transversal mediante puntos característicos comunes. Cuanto mayor es la superposición, más sencillo es para el *software* crear un mapa uniforme. Este valor debe estar entre 60 % y 80 % según (35).
- *Altura de vuelo*. Se determina en función de los obstáculos de las rutas inspeccionadas, con el fin de evitar colisiones. Se tiene que, a mayor altura de vuelo, mayor superficie cubierta, pero menor nivel de detalle. Según (22), con una altura mínima de 12 m se evita la interferencia de la mayoría de los obstáculos terrestres. De acuerdo con las investigaciones de la tabla 4, no se presenta unanimidad en las alturas establecidas; en síntesis, este parámetro depende del proyecto.
- *Distancia de muestreo en tierra (ground sampling distance [GSD])*. Se entiende como la distancia entre dos pixeles consecutivos, respecto a mediciones reales del suelo; por ello representa los detalles más pequeños que se observan en una imagen (45). De este modo, a menor valor de GSD, mejor resolución espacial de la imagen y, con ello, mejor visualización de los detalles presentes (1). En las investigaciones detalladas en la tabla 4, se

muestran valores de GSD promedio de 1 a 2 cm/px, y alturas de vuelo entre 10 m y 120 m; sin embargo, no se observa una correlación definida entre estas dos variables, debido a la influencia de las características de la cámara en el valor de GSD.

- *Puntos de control terrestre (ground control points [GCP]).* Hace referencia a puntos físicos que sirven como guía en el proceso de georreferenciación indirecta de las imágenes tomadas por el VANT. La cantidad y la distribución de los GCP garantizan una relación entre el sistema de coordenadas terrestres y de las imágenes para generar una precisión absoluta del modelo (19). De acuerdo con (46), es necesario un mínimo de tres GCP, sin embargo, estima que a mayor número de GCP se obtiene mejor precisión de los productos. La literatura establece investigaciones que implementan de 5 a 10 GCP en promedio, según la magnitud del proyecto.

Sistemas de escáner láser (terrestrial laser scanning [TLS])

El escáner láser representa una de las soluciones tecnológicas más recientes en el desarrollo y el procedimiento de detección de fallas superficiales en pavimentos (32). Este sistema también se conoce como LiDAR (*Light Detection And Ranging*) terrestre, y se destaca por la adquisición de coordenadas topográficas de una gran cantidad de puntos en tierra, por medio de la proyección de pulsos láser hacia estos, que miden la distancia del dispositivo hasta el objeto (51, 52).

Para ello, considera distintos métodos de captación de modelos 3D, ya sea triangulación, cambios de fase y tiempo de vuelo, utilizados para medir el alcance y la intensidad de los objetos que son visibles desde el escáner láser (28).

La técnica de triangulación examina el punto objetivo del brillo del láser mediante una cámara, el cual incide en diversos sitios del campo visual para determinar la posición del objetivo. Cook (53) implementó este principio, mediante un Riegl VZ-6000, y con objetivos reflectantes determinó la topografía de un desfiladero en Taiwán. Asimismo, (23) diseñaron un sistema de recolección de perfilado láser 3D basado en el principio de triangulación, para detectar simultáneamente fallas como grietas y deformaciones en el pavimento, con una precisión de detección mayor al 98 %.

La metodología basada en técnica de cambio de fase utiliza la medición del desplazamiento angular de la señal emitida y la señal reflejada por el objeto de análisis (39), lo que permite una mayor resolución en la captura tridimensional. La investigación de (28) implementó esta metodología mediante una estrategia LiDAR, orientada a la generación y procesamiento de puntos tridimensionales. El estudio se aplicó a cuatro muestras agrietadas, por medio de un sistema de escáner Trimble TX5 de cambio de fase, en el cual se caracterizó la geometría de las

grietas con alta precisión.

La técnica de sensores de tiempo de vuelo considera el tiempo transcurrido entre la emisión y reflexión de la señal láser para calcular la distancia entre el objetivo y el centro del mecanismo. En (54) se efectuó un modelo de descomposición 3D-PCDM para analizar deterioros del pavimento para datos con escaneo láser. Para ello, se aplicó una técnica de tiempo de vuelo con un perfilador láser, de la que se obtuvo una precisión superior al 92,75 % verificada mediante grietas y marcas viales. De igual manera, (55) desarrollaron un sistema de mediciones de grietas por láser (LCMS, por su sigla en inglés) compuesto por dos perfiladores que adquieren datos 3D de alta resolución, para extraer automáticamente datos de grietas, baches y parches, en los cuales se determinó el tipo, la gravedad y su ubicación respectiva.

En definitiva, los sistemas TLS han demostrado una amplia aplicabilidad para la evaluación de carreteras y pavimentos, lo que representa una alternativa dominante frente a métodos manuales y técnicas de cámaras visuales (51). Esta tecnología ofrece ventajas significativas como la reducción de tiempo y esfuerzo en adquisición de datos; el uso de tecnología sin contacto, que reduce el riesgo de exposición de usuarios viales, y la generación de modelos 3D interactivos con gran nivel de detalle, que proporcionan mayor eficiencia en el análisis de las condiciones del pavimento (28,39).

Por el contrario, entre sus limitaciones están el costo elevado de adquisición de estos equipos, la necesidad de personal especializado para su operación, así como la afectación provocada por condiciones ambientales extremas, todas las cuales reducen la calidad de los escaneos y limitan el alcance cuando se trata de entornos muy amplios (56). Lo anterior se atribuye en ocasiones al uso preferencial de métodos más convencionales, como los establecidos anteriormente.

Cámaras

El uso de cámaras es muy frecuente en el ámbito de detección de fallas en pavimentos, puesto que se caracterizan por su facilidad de uso y, en la mayoría de casos, por sus precios accesibles (57).

El uso de tecnologías de imágenes 2D en la inspección de pavimentos se registra desde 1991 (58). Autores como (18) llevaron a cabo investigaciones que demostraron que el uso de fotogrametría digital por medio de cámaras digitales es una alternativa confiable y de bajo precio para la detección de fallas. Aunque se observa una tendencia al uso de estos dispositivos debido a su practicidad, (20) recomiendan complementar con un sistema para la recolección de datos de profundidad, para la evaluación de las fallas que lo requieran. Sin embargo, la

implementación de estos dispositivos aumenta el costo de este sistema.

A diferencia de las imágenes digitales que cuentan con características espectrales limitadas, las imágenes hiperespectrales (HSI, por su sigla en inglés) capturan datos en cientos de bandas de longitud de onda estrechas y contiguas, dentro y fuera del espectro visible, lo que les permite recolectar características espectrales más detalladas (57).

Este método ha permitido investigar la relación entre datos espectrales y el estado superficial del pavimento. En (27) se exploró la detección de grietas por medio de una cámara hiperespectral (HSC, por su sigla en inglés) instalada en drones con vuelos a baja altitud. Los resultados concluyen precisión en la detección de grietas, y demuestran una diferencia en la reflexión espectral entre la carretera antigua y la superficie de grietas recientes, esto a causa de la ausencia de escombros y polvo en estas últimas.

Aunque relativamente costoso, concluyen que la funcionalidad de este método radica en una detección temprana que favorece una reparación rápida, menor deterioro y menor costo, esto debido a que las grietas constituyen un foco de estudio importante al ser el origen de otros tipos de deterioro (20).

En su investigación en California, (59) combinaron métodos para mayor validación. El instrumento hiperespectral usado fue el HyperSpecTIR (HST), que recopila datos en 227 bandas espectrales que abarcan los rangos VNIR (*visible and near infrared*) y SWIR (*short-wave infrared*); para la fotografía aérea se utilizó una cámara de formato medio, ambos dispositivos montados en una aeronave Cessna 206 con un vuelo a 2500 pies de altura. El producto de este experimento demostró la afectación de factores como las sombras, puesto que las imágenes se vieron muy afectadas y algunas áreas parecían más deterioradas de lo que estaban en realidad.

En la investigación de (60), se detectaron parches, agujeros, grietas longitudinales y de cocodrilo, de 4 imágenes hiperespectrales capturadas por medio del sensor CASI 1500; sin embargo, por su variabilidad, los parches y las grietas no fueron reconocidos ni clasificados de manera consistente por los softwares utilizados. Debido a que una resolución espectral tan alta requiere capacidades computacionales elevadas, un procesamiento de datos complejo y conocimientos expertos para interpretar los resultados, los autores concluyen cierta dificultad para clasificar sistemáticamente las fallas detectadas por este tipo de sensores.

Otros métodos de recolección

Adicional a los métodos discutidos, otros autores han propuesto sistemas innovadores para el diagnóstico de fallas. Algunos de ellos han involucrado el uso de vehículos en sus investi-

gaciones. Por ejemplo, (61) propusieron un sistema dinámico de carros equipados con wifi que, al recolectar datos sobre la superficie de la carretera, transmitía la información a vehículos cercanos por medio de puntos de acceso wifi. Por medio de un sistema de sensores ultrasónicos adaptados a una motocicleta, (62) identificaron baches y abultamientos. En (63), también se aprovechó la tecnología ultrasónica por medio de un robot, para detectar baches y, a su vez, transmitir la información a vehículos cercanos mediante un módulo Zigbee. Empleando la funcionalidad de los acelerómetros, (64) y (65) detectaron fallas en el pavimento, y midieron sus ubicaciones por medio de GPS.

Los sistemas usados en estas investigaciones reflejan la variedad de métodos sencillos que pueden ser implementados en la evaluación de fallas en pavimentos. Se sugiere más investigación con este tipo de sistemas multisensoriales con el objetivo de analizar y mejorar su rango de acción y su precisión.

Discusión

En la detección de fallas superficiales, se han analizado diversos métodos, que ofrecen precisión y eficiencia en la evaluación de pavimentos, según las condiciones de cada proyecto. En esta revisión, se recopiló su información e implementación, y se identificaron sus beneficios y limitaciones (tabla 5).

En el contexto internacional, se ha comprobado la implementación de VANT como un método efectivo para la identificación de fallas, pues ofrece altas precisiones en países como España, Italia, China, Australia, Estados Unidos (25, 34, 35); además de países latinoamericanos, como Chile, Ecuador y Perú (8, 13, 49). Por otro lado, el sistema láser ha sido empleado en países como Italia, Estados Unidos, Eslovenia, República Checa y China (23, 56). El método fotogramétrico e hiperespectral se ha incluido según la revisión en países como Cuba, Malasia y Reino Unido (18, 24, 27). Esto destaca la implementación y análisis de métodos diversos para la auscultación de pavimentos a nivel mundial.

En Colombia, la investigación de detección de fallas en pavimentos se ha concentrado mayormente en el método de inspección visual (7). Sin embargo, en los últimos años, ha surgido un interés creciente en la aplicación de la tecnología de VANT. La mayoría de sus investigaciones han sido de tipo institucional y académico (48, 66–68), y emplearon la Circular Reglamentaria n.º 002 de la Aeronáutica Civil de Colombia (44), como regulación de uso de los drones.

Tabla 5. Resumen comparativo de sistemas de recolección de datos

Criterio	Sistema de recolección		
	VANT	Láser	Cámara
Factores ambientales	Limitada por condiciones climáticas, velocidad de viento y obstáculos terrestres.	Supera perturbaciones de luz solar y sombras	Necesita condiciones de iluminación uniforme para buenos resultados.
Costo	Bajo costo de adquisición y de fácil obtención.	Alto costo del equipo.	Bajo costo.
Facilidad de uso	Permite inspecciones rápidas.	Necesita mayor planificación de posicionamiento para obtener un nivel de detalle necesario.	Fácil empleabilidad por su tamaño.
Instalación	Necesidad de un operador certificado.	Su procesamiento requiere de equipos potentes.	Instalación fácil a vehículos e instrumentos compuestos.
Movimiento/Velocidad	Cuenta con capacidad para desplazarse en diferentes direcciones, alturas y velocidades.	Miden diferentes deterioros a alta velocidad y total automatización con margen de error de +/- 2 mm.	Afecta la recolección de imágenes por velocidad o movimiento de la cámara.
Peso/Portabilidad	En general, buena portabilidad, dependiendo del tamaño y peso del equipo.	Son dispositivos livianos y portátiles.	Sensores ligeros.
Resolución	Amplio campo de visión. Ofrece una representación gráfica del terreno.	Tiene una alta resolución de escaneo por una nube de puntos densa (más de 1000 pts./m ²)	Limitado por la resolución de imágenes de acuerdo con el modelo.

Resolución espacial	Cuanto mayor altura de vuelo menor resolución espacial de la imagen.	Logran una alta resolución espacial	La resolución espacial se limita por la distancia (altura) de medición.
Velocidad de adquisición	Velocidad de lectura menor que la de cámaras lineales.	Rapidez en la captura y el procesamiento.	Adquisición inmediata de datos.
Otros	Seguridad para inspectores y conductores. No es recomendable para vías de tráfico denso. Esfuerzo de trabajo mayor en oficina o postproducción.	Se requiere mayor tiempo de inversión en formación y manejo.	

Fuente: autores.

Algunas de estas evaluaron el nivel y tipo de deterioro en tramos cortos de carretera (48,66), empleando los índices PCI y VIZIR; otros autores implementaron metodología IRI (69). Otros estudios calcularon el IRI por medio geométrico y mediante rugosímetro (70, 71), mientras que (21) evaluaron metodología VIZIR por medio de sistemas de información geográfica (SIG).

En el país se encuentran trabajos sobre la detección con métodos tradicionales, así como con metodología VANT. La elección del método más adecuado para cada proyecto dependerá del contexto y magnitud de este, así como la tipología de la vía que requiera ser evaluada. También es posible concluir que las investigaciones que incluyeron una combinación de métodos presentaron mejores resultados de precisión y alcance.

Por último, en el contexto de la región boyacense, se encontraron dos inventarios de condición de pavimentos en Tunja. En (72) se trabajó, con la metodología VIZIR, un registro del estado del pavimento y se estableció un SIG para la administración de la red vial de la ciudad (73).

Por otra parte, en un proyecto conjunto con la alcaldía municipal, (74) realizó un inventario de vías urbanas de seis de los diez sectores establecidos en el Plan de Ordenamiento Territorial. Se detectaron distintos tipos de fallas, y se resaltaron las grietas por piel de cocodrilo.

Al revisar las investigaciones del departamento, no se registran sistemas de detección de pavimentos aparte del método visual, lo que demuestra una escasez de investigaciones en la detección de fallas superficiales de carreteras.

Conclusiones

La evaluación funcional de la condición del pavimento es primordial para establecer una gestión apropiada y garantizar eficiencia en las intervenciones. En ausencia de una política de mantenimiento adecuado, las irregularidades de las carreteras pueden ocasionar graves deterioros en la superficie del pavimento, lo que compromete la seguridad y el servicio óptimo de la infraestructura vial.

La detección temprana de fallas superficiales en pavimentos flexibles previene este deterioro. Con este fin, el uso de sistemas como VANT, láser y cámaras, ha demostrado su efectividad en diferentes circunstancias según el rendimiento de cada uno. Estas herramientas permiten una identificación precisa de las fallas, y proporcionan un diagnóstico de puntos críticos que facilita la gestión de un mantenimiento adecuado.

Entre los sistemas estudiados, los VANT, también conocidos como “drones”, se destacan por obtener datos de información de manera rápida, efectiva y segura, además de considerarse un método de bajo costo. Su implementación permite realizar inspecciones confiables que, en un contexto como el de Colombia, es indispensable para optimizar los recursos de la red de carreteras. Es relevante complementar estos métodos, junto con los índices de evaluación, para formar una metodología completa y eficaz de auscultación, que favorezca el aumento de los niveles de funcionalidad en las carreteras.

En conclusión, se resalta la implementación de distintos métodos de detección como una solución eficaz y rentable en la evaluación de fallas superficiales de pavimentos. La facilidad de adquirir y procesar la información de manera eficiente en estos sistemas, la convierten en una herramienta valiosa para mejorar el análisis de la calidad de las carreteras. En países en desarrollo, donde la conservación de vías es fundamental para lograr un objetivo de calidad y crecimiento, la implementación de estas metodologías y sistemas puede contribuir significativamente a garantizar una seguridad y eficiencia en la infraestructura vial.

Financiamiento

La presente investigación se inscribe en el desarrollo del proyecto “Propuesta metodológica para la determinación de índices de condición superficial en pavimentos a través de información capturada con drones. Código SGI 3520”, avalado y financiado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Agradecimientos

A los integrantes del semillero SIMODIG, y demás integrantes del grupo de investigación GIISAG de la UPTC.

Referencias

- [1] R. Roberts, L. Inzerillo, y G. Di Mino, “Exploiting low-cost 3D imagery for the purposes of detecting and analyzing pavement distresses”, *Infrastructures*, vol. 5, n.º 1, ene. 2020. DOI: 10.3390/infrastructures5010006
- [2] B. S. Baque-Solis, “Evaluación del estado del pavimento flexible mediante el método del PCI de la carretera puerto-aeropuerto (Tramo II), Manta. Provincia de Manabí”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, pp. 203–228, 2020. DOI: 10.23857/dc.v6i2.1163

- [3] R. Roberts, L. Inzerillo, y G. Di Mino, "Using uav based 3d modelling to provide smart monitoring of road pavement conditions", *Information*, vol. 11, n.º 12, pp. 1-24, 2020. DOI: 10.3390/info11120568
- [4] P. A. Pucha Aguinsaca, y B. A. Zárate Torres, "Evaluación superficial de pavimentos rígidos en carreteras mediante ortoimágenes obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado", *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 17, n.º 2, ene. 2020. DOI: 10.18041/1794-4953/avances.2.6599
- [5] D. Cardoso Parente, N. Carvalho Felix, y A. Pessoa Picanço, "Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de patologia superficial em pavimento asfáltico", *Revista ALCONPAT*, vol. 7, n.º 2, pp. 160-171, 2017. DOI: 10.21041/ra.v7i1.161
- [6] E. Ranyal, A. Sadhu, y K. Jain, "Road condition monitoring using smart sensing and artificial intelligence: a review", *Sensors*, vol. 22, n.º 8, art. 3044. DOI: 10.3390/s22083044
- [7] C. H. Higuera Sandoval, *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos*, Bogotá: Editorial UPTC, 2012. DOI: 10.19053/9789586602259
- [8] J. O. Cruz Toribio, y J. W. Gutiérrez Lazares, "Evaluación superficial de vías urbanas empleando vehículo aéreo no tripulado (VANT)", *Métodos y Materiales*, vol. 8, pp. 23–32, 2019. DOI: 10.15517/mym.v8i1.34113
- [9] Instituto Nacional de Vías (Invías), "Estado de la red vial". [En línea]. 13 ene., 2013. Consultado el 14 de enero de 2024. Disponible en <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>
- [10] D. L. Rincón Ballesteros, J. E. Fonseca Ramírez, y J. A. Orjuela-Castro, "Hacia un marco conceptual común sobre trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos", *Ingeniería*, vol. 22, n.º 2, p. 161, my. 2017. DOI: 10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a01
- [11] G. Thenoux, y R. Gaete, "Evaluación técnica del pavimento y comparación de métodos de diseño de capas de refuerzo asfáltico", *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 14, pp. 56-72, 1995.
- [12] E. Romero-Chambi, S. Villarroel-Quezada, E. Atencio *et al.*, "Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements", *Applied Sciences*, vol. 10, n.º 12, pp. 1-33, jun. 2020. DOI: 10.3390/APP10124157
- [13] M. P. Peña Sotomayor, y B. A. Zárate Torres, "Empleo de VANT para determinar fallas superficiales en pavimentos flexibles", *Avances Investigación En Ingeniería*, vol. 17, n.º 2, pp. 1-9, 2020. DOI: 10.18041/1794-4953/avances.2.6626

- [14] B. Oblitas-Gastelo, I. Medina-Cardozo, y R. Paredes-Asalde, “Índice de regularidad internacional e índice de condición de pavimento para definir niveles de serviciabilidad de pavimentos”, *Revista ITECKNE-Universidad*, vol. 18, n.º 2, 2021. DOI: 10.15332/iteckne
- [15] J. D. Portillo Rodríguez, “Análisis del comportamiento de estructuras de pavimento flexible utilizando diferentes programas de diseño”, Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, 2020.
- [16] Instituto Nacional de Vías (Invías), “Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras”, Bogotá, 2006. Consultado: el 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>
- [17] INGEPAV, “Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras”, Manizales, 2002. Consultado: el 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf>
- [18] M. C. Sánchez, T. E. Martínez, y E. Tejeda, “Medición de la regularidad superficial en pavimentos a partir de método fotogramétrico digital de corto alcance”, en Segunda Convención Científica Internacional de la Universidad Técnica de Manabí, Manabí, oct. 2018.
- [19] Y. Astor, Y. Nabesima, R. Utami, A. V. R. Sihombing, M. Adli, y M. R. Firdaus, “Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey”, *Transportation Engineering*, vol. 12, en. 2023. DOI: 10.1016/j.treng.2023.100168
- [20] L. Tello-Cifuentes, M. Aguirre-Sánchez, J. P. Díaz-Paz *et al.*, “Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales”, *TecnoLógicas*, vol. 24, n.º 50, art. e1686, en. 2021. DOI: 10.22430/22565337.1686
- [21] D. F. Gualdrón Alfonso, y A. L. Silva Balaguera, “Gestión de pavimentos flexibles basado en sistema de información geográfica para la red vial de Boyacá, Colombia”, en *Aplicaciones SIG para la ingeniería - Tunja*, D. F. Gualdrón-Alfonso, y J. J. Villate-Corredor, coords., Tunja: Editorial UPTC, 2020, pp. 41-88.
- [22] J. Zhu, J. Zhong, T. Ma *et al.*, “Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV”, *Automation in Construction*, vol. 133, en. 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103991
- [23] D. Zhang, Q. Zou, H. Lin *et al.*, “Automatic pavement defect detection using 3D laser profiling technology”, *Automation in Construction*, vol. 96, pp. 350–365, dic. 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.09.019

- [24] P. L. Y. Tiong, M. Mustaffar, y M. R. Hainin, "Road surface assessment of pothole severity by close range digital photogrammetry method", *World Applied Sciences Journal*, vol. 19, n.^o 6, pp. 867–873, 2012. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.06.3353
- [25] L. A. Silva, H. S. S. Blas, D. P. García, A. S. Mendes, y G. V. González, "An architectural multi-agent system for a pavement monitoring system with pothole recognition in uav images", *Sensors*, vol. 20, n.^o 21, pp. 1-23, nov. 2020. DOI: 10.3390/s20216205.
- [26] P. J. Chun, T. Yamane, y Y. Tsuzuki, "Automatic detection of cracks in asphalt pavement using deep learning to overcome weaknesses in images and GIS visualization", *Applied Sciences*, vol. 11, n.^o 3, pp. 1–15, 2021. DOI: 10.3390/app11030892
- [27] M. Abdellatif, H. Peel, A. G. Cohn *et al.*, "Pavement crack detection from hyperspectral images using a novel asphalt crack index", *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, n.^o 18, en. 2020. DOI: 10.3390/RS12183084
- [28] Y. Turkany, J. Hong, S. Laflamme *et al.*, "Adaptive wavelet neural network for terrestrial laser scanner-based crack detection", *Automation in Construction*, vol. 94, pp. 191–202, oct. 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.06.017
- [29] M. T. Obaidat, N. Shatnawi, y A. Al-Sharideah, "Geomatics techniques for evaluation of road pavement rutting", *Applied Geomatics*, vol. 13, n.^o 2, pp. 217–225, jun. 2021. DOI: 10.1007/s12518-020-00337-0
- [30] A. M. Saad y K. N. Tahar, "Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV)", *Measurement*, vol. 137, pp. 647–654, abr. 2019. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.093
- [31] M.-T. Cao, K.-T. Chang, N.-M. Nguyen, V.-D. Tran *et al.*, "Image processing based automatic detection of asphalt pavement rutting using a novel metaheuristic optimized machine learning approach title page" [Preprint], *Research Square*, 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-334982/v1
- [32] B. Li, K. C. P. Wang, A. Zhang, Y. Fei *et al.*, "Automatic segmentation and enhancement of pavement cracks based on 3D pavement images", *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, en. 2019. DOI: 10.1155/2019/1813763
- [33] B. R. Pantha, R. Yatabe, y N. P. Bhandary, "GIS-based highway maintenance prioritization model: an integrated approach for highway maintenance in Nepal mountains", *J Transp Geogr*, vol. 18, n.^o 3, pp. 426–433, my. 2010. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016
- [34] G. Leonardi, V. Barrile, R. Palamara *et al.*, "3D mapping of pavement distresses using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system", en *New Metropolitan Perspectives*, vol. 101,

- F. Calabró *et al.*, eds., Springer International Publishing AG, 2019, pp. 164–171. DOI: 10.1007/978-3-319-92102-0_18.
- [35] Y. Tan, y Y. Li, “UAV photogrammetry-based 3D road distress detection”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, n.º 9, sep. 2019. DOI: 10.3390/ijgi8090409
- [36] H. González-Fernández, P. Ruiz-Caballero, y D. Guerrero-Valverde, “Propuesta de metodología para la evaluación de pavimentos mediante el índice de condición del pavimento (PCI)”, *Ciencia en su PC*, vol. 1, pp. 58–71, 2019.
- [37] L. F. Macea-Mercado, L. Morales, y L. G. Márquez-Díaz, “Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, n.º 2, pp. 223-236, ene. 2016. DOI: 10.1016/j.riit.2016.06.007
- [38] L. Fuentes, R. Camargo, J. Arellana *et al.*, “Modelling pavement serviceability of urban roads using deterministic and probabilistic approaches”, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, n.º 1, pp. 77-86, 2021. DOI: 10.1080/10298436.2019.1577422
- [39] A. Ragnoli, M. R. De Blasiis, y A. Di Benedetto, “Pavement distress detection methods: A review”, *Infrastructures (Basel)*, vol. 3, n.º 4, dic. 2018. DOI: 10.3390/infrastructures3040058.
- [40] H. Bendea, P. Boccardo, S. Dequal *et al.*, “Low cost UAV for post-disaster assessment”. [En línea], 2008. Consultado el 25 de enero de 2024. Disponible en <https://www.semanticscholar.org/paper/Low-cost-UAV-for-post-disaster-assessment-Bendea-Boccardo/cfb9cd19dca207dff0bfc6c1105638271425854a>
- [41] P. Martínez, D. Ojeda, E. Pérez *et al*, “Vehículos aéreos no tripulados (VANT) en Cuba, aplicados a la geomática. Estado actual, perspectivas y desarrollo” [En línea], 2009. Consultado el 26 de enero de 2024. Disponible en <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastecnologias/Teledeteccion/10.pdf>
- [42] O. Küng *et al.*, “The accuracy of automatic photogrammetric techniques on Ultra-light UAV imagery”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-1/C22, pp. 125–130, sept. 2012. DOI: 10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-125-2011
- [43] Y. Li, y C. Liu, “Applications of multirotor drone technologies in construction management”, *International Journal of Construction Management*, vol. 19, n.º 5, pp. 401-412, en. 2019. DOI: 10.1080/15623599.2018.1452101
- [44] J. L. Rodríguez González, J. J. Alarcón, y E. D. Espejo Torres, *Cartografía con drones (VANT´s)*, Tunja: Editorial UPTC, 2020. DOI: 10.19053/9789586604185

- [45] F. Remondino, E. Nocerino, I. Toschi *et al.*, “A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets”, en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ag. 2017, pp. 591–599. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017
- [46] E. Ferrer-González, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez *et al.*, “UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points”, *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 15, 2020. DOI: 10.3390/RS12152447
- [47] F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, y P. Martínez-Carricando, “Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry”, *Journal of Surveying Engineering*, vol. 143, n.º 2, my. 2017. DOI: 10.1061/(asce)su.1943-5428.0000206
- [48] D. Cárdenas, O. Holguin, S. Zabala *et al.*, “Auscultación visual realizada mediante el Drone DJI Phantom 4 pro, con implementación de metodologías Vizir y PCI para pavimentos flexibles en la carrera 69b sur entre la avenida Primera de Mayo y calle 9 a Sur - barrio Villa Claudia - ciudad Bogotá”, Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, 2019.
- [49] M. Prosser-Contreras, E. Atencio, F. M. La Rivera *et al.*, “Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetry to obtain the international roughness index (iri) on roads”, *Applied Sciences*, vol. 10, n.º 24, pp. 1–22, dic. 2020. DOI: 10.3390/app10248788
- [50] J. J. Alarcón, O. J. J. Jiménez, N. H. P. Ramírez *et al.* *Historia del desarrollo urbano de Tunja mediante un SIG*, Tunja: Editorial UPTC, dic. 2021. DOI: 10.19053/9789586604970
- [51] A. Bar Hillel, R. Lerner, D. Levi, y G. Raz, “Recent progress in road and lane detection: A survey”, *Machine Vision and Application*, vol. 25, n.º 3, pp. 727–745, feb. 2012. DOI: 10.1007/s00138-011-0404-2
- [52] G. Vosselman, y H.-G. Maas. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. [En línea]. Consultado el 7 de octubre de 2025. Disponible en <https://research.utwente.nl/en/publications/airborne-and-terrestrial-laser-scanning-2>
- [53] K. L. Cook, “An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection”, *Geomorphology*, vol. 278, pp. 195–208, febr. 2017. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.11.009
- [54] R. Gui, X. Xu, D. Zhang *et al.*, “A component decomposition model for 3D laser scanning pavement data based on high-pass filtering and sparse analysis”, *Sensors*, vol. 18, n.º 7, jul. 2018. DOI: 10.3390/s18072294

- [55] J. Laurent, D. Lefebvre, y E. Samson, "Development of a new 3D transverse laser profiling system for the automatic measurement of road cracks", en *6th Symposium on Pavement Surface Characteristics*, B. Leben y M. Grondin, eds., Portoroz: National Committee PIARC, oct. 2008.
- [56] J. Landa, y D. Prochazka, "Automatic road inventory using LiDAR", *Procedia Economics and Finance*, vol. 12, pp. 363–370, 2014. DOI: 10.1016/s2212-5671(14)00356-6
- [57] N. X. Ríos Cotazo, B. Bacca Cortés, E. Caicedo Bravo *et al.*, "Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 30, n.º 2, pp. 109-127, en. 2020. DOI: 10.18359/rcin.4385
- [58] D. S. Mahler, Z. B. Kharoufa, E. K. Wong *et al.*, "Pavement distress analysis using image processing techniques", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 6, n.º 1, pp. 1–14, 1991. DOI: 10.1111/J.1467-8667.1991.TB00393.X
- [59] C. M. Jengo, D. Hughes, J. D. Laveigne *et al.*, "Pothole detection and road condition assessment using hyperspectral imagery", en *ASPRS 2005 Annual Conference "Geospatial Goes Global: From Your Neighborhood to the Whole Planet"*, Baltimore, mar. 2005.
- [60] M. R. Resende, L. L. Bariani, y J. A. Quintanilha, "Monitoring the condition of roads pavement surfaces: proposal of methodology using hyperspectral images", *Journal of Transport Literature*, vol. 8, n.º 2, pp. 201–220, abr. 2014. DOI: 10.1590/s2238-10312014000200009
- [61] S. S. Rode, S. Vijay, P. Goyal *et al.*, "Pothole detection and warning system: infrastructure support and system design", en *Proceedings - 2009 International Conference on Electronic Computer Technology, ICECT 2009*, 2009, pp. 286–290. DOI: 10.1109/ICECT.2009.152
- [62] R. Madli, S. Hebbar, P. Pattar *et al.*, "Automatic detection and notification of potholes and humps on roads to aid drivers", *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, n.º 8, pp. 4313–4318, ag. 2015. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2417579
- [63] S. Hedge, H. V Mekali, y Varaprasad. Golla, "Pothole Detection and Inter Vehicular Communication", en *International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, Hyderabad, dic. 2014, pp. 84–87.
- [64] M. Strutu, G. Stamatescu, y D. Popescu, "A Mobile Sensor Network Based Road Surface Monitoring System", en *International Conference on System Theory, Control, and Computing (ICSTCC)*, Sinaia: IEEE, oct. 2013, pp. 630–634. DOI: 10.1109/ICSTCC.2013.6689030.
- [65] M. Tan, S. Liang, y X. Li, "Design of a low-cost detecting and locating system for pavement distresses based on vibration acceleration signal", *ICIC Express Letters*, vol. 10, n.º 7, pp. 1763–1770, 2016.

- [66] M. Flórez Mesa, "Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de patologías superficiales en el pavimento", Tesis de Maestría, Facultad de ingeniería, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2021.
- [67] C. B. García Casierra, C. G. Calle Sánchez, J. Castillo García *et al.*, "Methodology for infrastructure site monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs)", *IJACSA: International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, n.º 3, 2022. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130342.
- [68] C. Vargas Buitrago, "Análisis comparativo de la inspección visual de un pavimento flexible, por los métodos tradicional y por sensores remotos en un kilómetro de la calle séptima en el municipio de Cajicá, Cundinamarca", Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2018.
- [69] L. F. Angarita y J. C. Sánchez, "Comparación del índice de rugosidad internacional (IRI) a partir de información obtenida por métodos fotogramétricos", Tesis de grado, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2017.
- [70] J. R. Marcabal, R. Diaz, W. Márquez *et al.*, "Evaluación de la rugosidad (IRI) en caminos pavimentados de geometría restringida: Cálculo del IRI geométrico-caso de aplicación", en *Congreso Ibero-latinoamericano del asfalto*, Medellín, nov. 2017.
- [71] J. C. Hernández, "Determinar el índice de rugosidad IRI y desarrollar un manual para el equipo Merlín", Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2018.
- [72] C. P. Medrano Espinosa, J. M. Uribe Serrano, y C. Y. Acero Alvarez, "Inventario de infraestructura vial del casco urbano de Tunja en base de datos espaciales", Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2010.
- [73] A. Silva-Balaguera, O. D. Leguizamón, y L. L. Valiente, "Gestión de pavimentos basado en Sistemas de Información geográfica (SIG): una revisión", *Ingeniería Solidaria*, vol. 14, n.º 26, sept. 2018. DOI: 10.16925/in.v14i26.2417
- [74] J. S. Pinzón Marrero, "Actualización de la información vial utilizando sistemas de información geográfica en sectores de Tunja", Tesis de grado, Facultad de ingeniería, Universidad Santo Tomás, Tunja, 2019.

