

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v9i17.0337>

FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

AERIAL PHOTOGRAMMETRY FOR THE IDENTIFICATION OF FAULTS IN FLEXIBLE PAVEMENTS

Fiallos-Iglesias Julio Andrés ¹

¹ Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Correo: julio.fiallos@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-2145-5809>.

Resumen

La evaluación de la condición de los pavimentos es una actividad fundamental para la gestión de infraestructuras viales. Tradicionalmente, este proceso se realiza mediante inspecciones visuales en campo, lo que implica altos costos, tiempo considerable y riesgos para el personal técnico. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo identificar y clasificar fallas en pavimentos flexibles mediante técnicas de fotogrametría aérea utilizando vehículos aéreos no tripulados (VANT). La metodología empleada incluyó la captura de imágenes aéreas, generación de ortomosaicos, procesamiento digital de imágenes y clasificación supervisada para identificar diferentes tipos de deterioro superficial. Posteriormente, los resultados fueron comparados con el método tradicional de inspección visual basado en el índice PCI (Pavement Condition Index). Los resultados permitieron identificar fallas como fisuras, parches, baches y meteorización, alcanzando un índice de concordancia kappa de 0,81. Sin embargo, la comparación entre la inspección visual y la clasificación fotogramétrica mostró una coincidencia global del 58 %. Las fisuras y parches presentaron mayores niveles de precisión, mientras que otras fallas se confundieron debido a similitudes espectrales y condiciones de iluminación. Se concluye que la fotogrametría aérea constituye una alternativa viable para el monitoreo de pavimentos, especialmente en procesos de evaluación preliminar y levantamientos de grandes extensiones de vías. No obstante, el método tradicional basado en inspección visual sigue siendo el más completo para la identificación detallada de fallas.

Palabras clave: fotogrametría aérea, pavimentos flexibles, VANT, teledetección, clasificación de imágenes, PCI.

Abstract

Pavement condition assessment is a fundamental task for road infrastructure management. Traditionally, this process is carried out through field visual inspections, which involve high costs, significant time requirements, and safety risks for technical personnel. In this context, this study aims to identify and classify failures in flexible pavements using aerial photogrammetry techniques based on unmanned aerial vehicles (UAVs). The methodology included aerial image acquisition, orthomosaic generation, digital image processing, and supervised classification to detect different types of pavement distress. The results were compared with the traditional visual inspection method based on the Pavement Condition Index (PCI). The results allowed the identification of several types of pavement distress, including cracks, patches, potholes, and weathering, reaching a kappa index of 0.81. However, the comparison between visual inspection and photogrammetric classification showed an overall accuracy of 58%. Cracks and patches achieved the highest accuracy levels, while other failures were more difficult to distinguish due to spectral similarities and environmental factors. The study concludes that UAV-based photogrammetry represents a promising alternative for pavement monitoring, especially for preliminary assessments and large-scale surveys. Nevertheless.

Keywords: UAV photogrammetry, flexible pavements, pavement distress, remote sensing, image classification.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 13 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025.

Fecha de publicación: 12 de enero de 2026.



1. Introducción

Los pavimentos no fallan de manera inmediata, sino que su deterioro ocurre de forma gradual (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 1990) debido a factores como el tránsito vehicular, las condiciones climáticas y el envejecimiento de los materiales. Por esta razón, es necesario realizar evaluaciones periódicas que permitan determinar el estado de la superficie y planificar actividades de mantenimiento.

Tradicionalmente, la evaluación de pavimentos se realiza mediante inspecciones visuales en campo. Aunque este método permite identificar diferentes tipos de deterioro, presenta desventajas importantes, entre ellas el elevado tiempo de ejecución, los costos asociados al personal técnico y los riesgos que implica trabajar directamente sobre la vía. Además, pueden existir diferencias de criterio entre los evaluadores, lo que genera variabilidad en los resultados (Ramírez, 2019).

En los últimos años, el desarrollo de tecnologías de teledetección y fotogrametría aérea ha permitido

explorar nuevas metodologías para la evaluación del estado de las carreteras. Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) permiten capturar imágenes de alta resolución a bajo costo (Tello et al., 2021), facilitando la generación de ortomosaicos y modelos tridimensionales que pueden utilizarse para detectar deterioros en la superficie del pavimento.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es identificar y clasificar fallas en pavimentos flexibles mediante técnicas de fotogrametría aérea y comparar los resultados obtenidos con los métodos tradicionales de inspección visual.

Marco teórico

Un pavimento está compuesto por varias capas superpuestas diseñadas para distribuir las cargas del tránsito hacia la subrasante (Montejo Fonseca, 1998). Existen diferentes tipos de pavimentos, entre los cuales se destacan los rígidos, flexibles, semiflexibles y articulados, siendo los pavimentos flexibles el objetivo de este artículo.

La evaluación de pavimentos puede clasificarse en evaluación funcional y evaluación estructural. La evaluación funcional se enfoca en la identificación de deterioros superficiales que afectan la comodidad y seguridad del usuario, mientras que la evaluación estructural analiza la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante (Morales, 2004) (Hoffman & Del Águila, 1985).

En el caso de los pavimentos flexibles, las fallas más comunes incluyen fisuras, baches, meteorización y parches. Estas manifestaciones pueden detectarse mediante inspección visual o mediante técnicas de análisis de imágenes obtenidas por sensores remotos.

La fotogrametría aérea basada en drones se ha convertido en una herramienta eficiente para la captura de imágenes de alta resolución. Estudios previos han demostrado que vuelos a alturas entre 30 y 100 metros permiten obtener resoluciones espaciales entre 1,8 y 3,5 cm por píxel, lo que facilita la identificación de deterioros en la superficie del pavimento (Vargas,

2018) (Vasconcelos et al., 2021) (Peña & Zárate, 2020).

Además, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) permite integrar los resultados del procesamiento de imágenes con análisis espaciales, mejorando la eficiencia en el monitoreo del estado de las carreteras.

2. Materiales y métodos

La metodología aplicada en esta investigación se desarrolló en varias etapas.

1. Adquisición de datos

Se realizó la captura de imágenes aéreas mediante un vehículo aéreo no tripulado, siguiendo un plan de vuelo con traslapes longitudinales y transversales adecuados para garantizar la correcta generación del ortomosaico.

2. Procesamiento fotogramétrico

Las imágenes capturadas fueron procesadas mediante software fotogramétrico para generar productos cartográficos como:

- Ortomosaico de alta resolución
- Modelo digital de superficie

- Nubes de puntos georreferenciadas

Estos productos permitieron analizar la superficie del pavimento con mayor precisión.

3. Clasificación de fallas

Posteriormente se aplicaron técnicas de clasificación de imágenes para identificar diferentes tipos de deterioro en el pavimento. Inicialmente se utilizó una clasificación no supervisada (Braun, 2020); sin embargo, esta no permitió diferenciar adecuadamente las fallas debido a la similitud espectral entre algunas superficies.

Por esta razón se empleó una clasificación supervisada (Falcon & Ramon, 2023) (Peng et al., 2020) (Pan et al., 2018) (Sylvester Inkoom & Niu, 2019) combinada con filtros morfológicos para mejorar la detección de patrones asociados a fisuras y parches (Ruiz, s. f.).

4. Validación

Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados con una inspección visual realizada en campo utilizando el método PCI, con

el fin de evaluar la precisión del método fotogramétrico.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos muestran que fue posible identificar diferentes tipos de fallas en el pavimento, entre ellas:

- fisuras
- baches
- meteorización
- parches

El análisis de clasificación alcanzó un índice de kappa de 0,81, lo que indica una buena concordancia entre las clases identificadas y los datos de referencia.

No obstante, al comparar los resultados con la inspección visual se obtuvo una coincidencia global del 58 %, lo que evidencia ciertas limitaciones en la detección automática de deterioros.

Las fisuras y parches fueron las fallas que presentaron mayor precisión de identificación, con porcentajes de acierto que alcanzaron hasta el 100 % en algunos tramos. Por el contrario, los baches y la meteorización mostraron

mayores niveles de confusión debido a similitudes espectrales con otras superficies del pavimento.

Además, se observó que factores externos como la presencia de vehículos, sombras o vegetación influyeron en la precisión de la clasificación.

Inspección Visual (PCI)

A lo largo de la zona de estudio se presentaron todas las fallas que

indica la metodología PCI a excepción de depresión, pulimiento de agregados y desplazamientos. El valor de PCI para toda la zona de estudio fue de 52, que corresponde a una calificación de Regular (Anexo 1). Así también se calculó el PCI para cada tramo como se presenta en la Figura 16 y Figura 17. El cálculo del PCI para cada tramo se presenta en el Anexo 2. Los rangos de calificación del PCI se presentan en la Tabla 1

Tabla 1. Rangos de calificación 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: (Vásquez, 2002).

Figura 1. PCI por Tramos

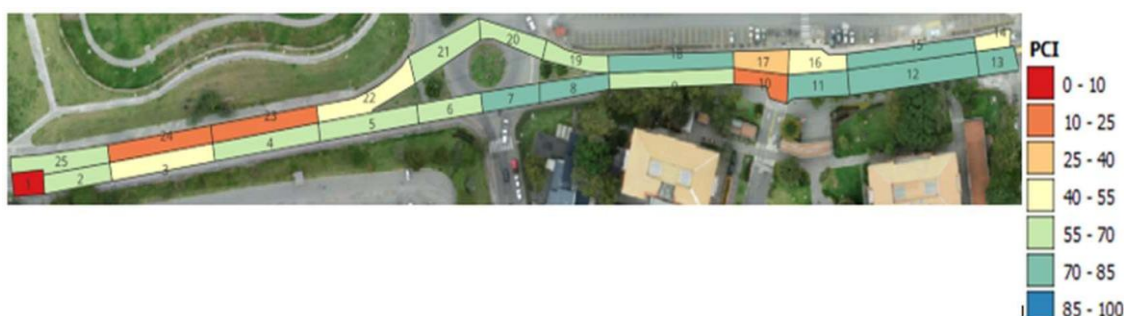
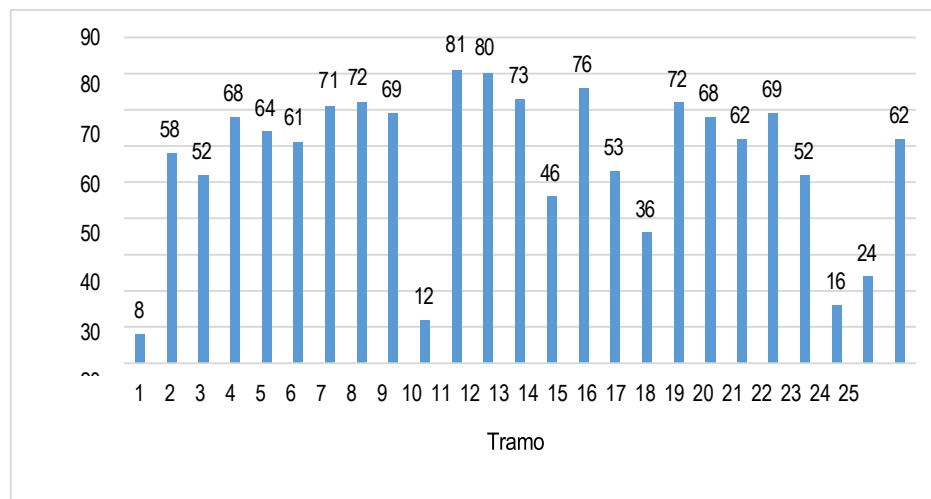


Figura 2. Mapa valores PCI

En base a lo anterior se considera que el estado del pavimento de forma general de la zona de estudio tiene una clasificación de Regular mientras que en la Tabla 2 se presenta la clasificación por tramos.

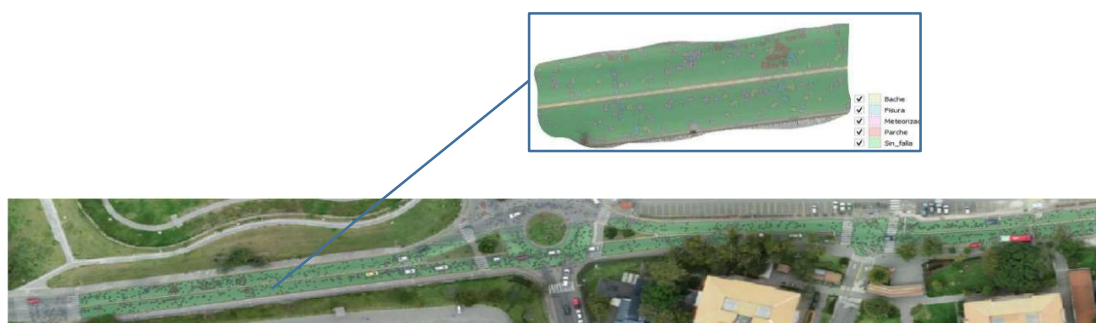
Tabla 2. Clasificación por tramos

Tramo	Clasificación
1	Fallado
2	Bueno
3	Regular
4	Bueno
5	Bueno
6	Bueno
7	Muy Bueno
8	Muy Bueno
9	Bueno
10	Muy Malo
11	Muy Bueno
12	Muy Bueno
13	Muy Bueno

14	Regular
15	Muy Bueno
16	Regular
17	Malo
18	Muy Bueno
19	Bueno
20	Bueno
21	Bueno
22	Regular
23	Muy Malo
24	Muy Malo
25	Bueno

Fotogrametría aérea y teledetección

Se puede observar que se identificaron las fallas correspondientes a baches, fisuras, meteorización y parches con un índice de kappa de 0,81 (Figura 19).

Figura 3. Mapa de fallas pavimento

En cuanto a las fallas que corresponden a baches y meteorización se comprobó mediante la inspección visual que las mismas se confunden con la falla de exudación, mientras que las fallas de fisuras y parches fueron identificadas de buena manera en la mayoría de los casos, esto se pudo constatar mediante comparación visual con la imagen del tramo de estudio.

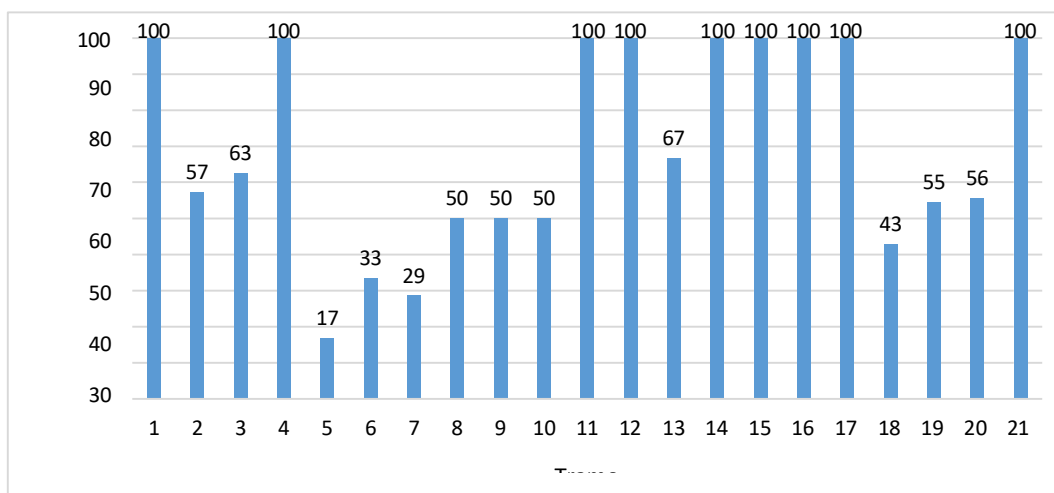
Comparación Inspección Visual con Fotogrametría y Teledetección

Las fallas que se pudieron comprobar entre ambas metodologías fueron las fisuras y parches, donde el porcentaje de aciertos para toda la zona de estudio fue del 58% como se indica en la Tabla 5. En la Figura 20 se presenta los 21 tramos en que se presentaron dichas fallas, así como el porcentaje de coincidencia entre ambas metodologías. Los tramos 5 y 7 son los que presentan menor porcentaje. Lo anterior debido a que son los tramos donde se presenta la mayor cantidad de autos y/o motos que produjeron errores en la clasificación.

Tabla 3. Porcentaje De Aciertos.

Inspección Visual					
Fotogrametría	Tipo de Falla	Fisura	Parche	Comisión	Total
	Fisura	41	0	27	68
	Parche	0	17	6	23
	Omisión	9	0	0	9
	Total	50	17	33	100
	Porcentaje de aciertos	82	100		58

Figura 4. Porcentaje de coincidencias.



La grafica de barras está sujeta a variabilidad en cuanto a la acertada detección de las fallas, para los 21 tramos obtenidos. Había tramos que llegaban hasta valores del 100 %, lo que significa que mostraban alta efectividad en la detección de fisuras y parches, forzando a contrastar a otros que mostraban porcentajes bajos (17 %–70 %), indicando la baja efectividad en la detección de baches y meteorización. Las diferencias observadas se ajustan a la realidad de los factores que influyen en la detección del estado general de los tramos, como son la iluminación, las sombras y la similitud espectral, lo cual también explicaría el nivel de coincidencia global del 58 % del método PCI.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la fotogrametría aérea es una herramienta útil para la identificación de deterioros superficiales en pavimentos. Sin embargo, la precisión de la clasificación depende en gran medida de la resolución espacial de las imágenes, las condiciones de iluminación y las características espectrales del pavimento.

Para mejorar la identificación de fallas de pavimentos flexibles, se empleó la banda roja, de acuerdo con las bibliotecas espectrales desarrolladas por (Pachón, 2016). Es importante destacar que dicha investigación se realizó en Colombia, donde el hormigón asfáltico presenta diferencias significativas en comparación con el utilizado en Ecuador, ello debido a la variación en la calidad del petróleo de ambos países.

Mediante el proceso de clasificación de imágenes, en este trabajo se logró identificar y categorizar diversas fallas en el pavimento, tales como baches, meteorización, fisuras y parches. Cabe destacar que, para las dos últimas, la fiabilidad fue mejor, similar a los resultados obtenidos en los estudios de (Cornejo & Valle, 2018) y (Tello et al., 2021), en los cuales adicionalmente se identificaron fisuras y la denominada falla "piel de cocodrilo".

Inicialmente, se aplicó una clasificación no supervisada, la cual no evidenció una diferenciación suficiente en la reflectancia de los píxeles correspondientes a las fallas, lo que dificultó su identificación.

La clasificación supervisada se realizó mediante el algoritmo Random Forest, el cual ha sido exitoso en varios estudios, como los de (Falcon & Ramon, 2023), (Peng et al., 2020), (Cui et al., 2015), (Pan et al., 2018) y (Sylvester Inkoom & Niu, 2019), entre otros. Sin embargo, en el presente trabajo no produjo los resultados esperados, ya que el porcentaje de aciertos en la identificación de fallas fue de apenas el 15 %.

Posterior a la clasificación supervisada, se observó que los píxeles del pavimento con fallas estaban muy dispersos. En respuesta a esto, se aplicaron tres filtros de erosión a la imagen clasificada, lo que permitió mejorar significativamente el porcentaje de aciertos.

En relación con las fallas de tipo fisuras y parches, se alcanzó una fiabilidad global del 58 % en la zona de estudio, resultado comparable con el 56,6 % obtenido por (Zhu et al., 2022).

Asimismo, es importante indicar que la imagen utilizada en este trabajo tiene una diferencia temporal de aproximadamente un año con

respecto a la inspección visual. Esta disparidad temporal pudo haber afectado en cierta medida la fiabilidad de los resultados y se debió a la falta de tiempo para realizar un levantamiento de datos actualizado.

Ya que se eliminaron manualmente los polígonos que no son pavimento, se podría realizar una clasificación previa de pavimento/ no pavimento en posteriores trabajos. También es importante destacar que la imagen de este trabajo presenta con respecto a la inspección visual una diferencia temporal de alrededor de un año. Esta diferencia temporal puede haber influido de forma leve en la fiabilidad de los resultados y debió a la falta de tiempo para realizar un levantamiento de datos más actual. Al eliminar manualmente los polígonos que no son pavimento se podría hacer una clasificación previa de pavimento/no pavimento en posteriores trabajos.

En este sentido se ha podido comprobar en diferentes estudios recientes que la incorporación de etapas previas mejora considerablemente la precisión de la identificación de los deterioros superficiales; por ejemplo, Zhang et al. (2021) observaron que la

segmentación de la superficie vial permitía reducir los errores de clasificación por los efectos de elementos ajenos como vegetación, sombras o vehículos incrementando la exactitud general de la clasificación en más de un 20 %. Este enfoque muestra la concordancia de los resultados obtenidos en esta investigación, ya que la aparición de objetos externos oscurece la detección de fallos.

Por un lado, estudios como los de Maeda et al., (2018) subrayan que en los procedimientos de detección de fisuras mediante deep learning en comparación aquellos tradicionales de aprendizaje supervisado como la técnica Random Forest; en media, la técnica de aprendizaje profundo supera al del aprendizaje supervisado en un 90%. Por el contrario, en el presente trabajo, el uso de Random Forest no produjo los resultados iniciales que se esperaban en una primera fase, lo que provoca la experiencia de que en futuras líneas de trabajo se deban incluir técnicas que a su vez continúen las etapas del aprendizaje de la inteligencia artificial, para así poder conseguir la discriminación en patrones complejos como los

existentes en los mismos pavimentos.

Por otra parte, Zhu et al. (2022) revisan que la precisión de imágenes aéreas para detectar fallas, igualmente, estrechamente dependiente de la resolución espacial y las condiciones de iluminación, en concordancia con lo revisado en este trabajo. En este caso, estos autores obtienen un porcentaje de un 56,6 %, muy próximo al de un 58 % que se ha obtenido en este trabajo y que además da cuenta de la consistencia de todos los resultados que se han ido obteniendo, e incluso de las limitaciones que presentan la utilización de imágenes RGB en entornos reales.

De acuerdo con Tello et al. (2021), en el ámbito latinoamericano, la combinación de fotogrametría y técnicas de IA mejora de forma notable la identificación de fisuras y otros deterioros, aun cuando se combinaran con modelos de aprendizaje automático generados tomando como ejemplos bases de datos de la zona. Esto da soporte a la propuesta que se defiende en este trabajo, sobre la necesidad de desarrollar bibliotecas espectrales

del asfalto para el Ecuador, dado que los rasgos del asfalto son condicionados por el tipo de material y las condiciones climáticas.

Por último, Pan et al. (2018) defienden que la inclusión de sensores multiespectrales en drones mejora la capacidad de diferenciar entre los tipos de fallos, reduciendo de esa manera la confusión espectral apreciada en imágenes RGB, representando por tanto una vía de mejora conveniente para futuras investigaciones, ya que podría ayudar a superar una de las principales limitaciones que se reflejan en el presente estudio, la cual está relacionada con la similitud visual que pueda existir entre baches, meteorización y exudación.

4. Conclusiones

La fotogrametría aérea mediante drones permite identificar y clasificar fallas en pavimentos flexibles de manera eficiente, constituyendo una alternativa tecnológica para la evaluación del estado de las carreteras.

Los principales resultados de la investigación indican que:

- Fue posible identificar fallas como fisuras, baches, meteorización y parches mediante procesamiento de imágenes.
- La clasificación alcanzó un índice de concordancia kappa de 0,81.
- La comparación con la inspección visual mostró una coincidencia global del 58 %.

A pesar de estos resultados, el método tradicional basado en el índice PCI continúa siendo el más completo para la identificación detallada de fallas, aunque presenta mayores costos y riesgos operativos.

Se recomienda que futuras investigaciones desarrollen bibliotecas espectrales específicas para pavimentos en Ecuador y utilicen sensores multiespectrales que permitan mejorar la precisión de la clasificación automática.

Pero no solo esto, sino también que la forma de aplicar la fotogrametría aérea a los sistemas de gestión de carreteras no significa simplemente un avance tecnológico, sino que más bien también esto constituye la posibilidad práctica para reforzar junto con la planificación como con la

ejecución de la toma de decisiones en el ámbito de la ingeniería de transporte. En este sentido la fotogrametría no es antitética sino la optimización de los métodos tradicionales de las prácticas de evaluación puesto que, gracias a ello se permite la existencia de diagnósticos previos que son más rápidos más expeditos, objetivos o con una mayor cobertura territorial. Su integración en la delimitación de programas de mantenimiento de carreteras, por ejemplo, puede conseguir priorizar intervenciones más eficaces en términos de la explotación de los recursos públicos, así como también en el propio retorno de la seguridad de las carreteras. Por lo tanto, se propone que las entidades responsables de la infraestructura vial en Ecuador introduzcan progresivamente esta tecnología en sus normas o en la forma de operar su propia normativa o su propia forma de operar, mediante el cual se puede introducir así una gestión más contemporánea o más sostenible e incluso basada en datos para monitorizar si se produce el mantenimiento de las carreteras en los estados de circulación.

Bibliografía

- Braun, A. (2020, octubre). SAR-based landcover classification with Sentinel-1 GRD products. <https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Landcover%20classification%20with%20Sentinel-1%20GRD.pdf>
- CORDILLERA LA VIUDA – [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/35622/TESIS%20-NILO-FIORELLA_PDF_TOTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cornejo, E., & Valle, A. (2018). Metodología para el uso de imágenes de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) para la evaluación de la condición del pavimento en la carretera tramo Huancayo—Izcuchaca km 162+000 al km 163+000 [Tesis de grado, Ricardo Palma]. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3411>
- Cui, L., Qi, Z., Chen, Z., Meng, F., & Shi, Y. (2015). Pavement Distress Detection Using Random Decision Forests. En C. Zhang, W. Huang, Y. Shi, P. S. Yu, Y. Zhu, Y. Tian,
- Falcon, K., & Ramon, N. (2023). APLICACIÓN DE LA FOTOGAMETRÍA CON RPA, PARA ANALIZAR LA CALIDAD DEL PAVIMENTO

- FLEXIBLE EN LA CARRETERA LIMACANTA - HUALLAY, TRAMO LAGUNA 7 COLORES - FANTASMA CORDILLERA LA VIUDA – [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/35622/2/tesis%20-NILO-FIORELLA_PDF_TOTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hoffman, M., & Del Águila, P. (1985, octubre). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos). https://www.academia.edu/6082128/ESTUDIOS_DE_EVALUACION_ESTRUCTURAL_DE_PAVIMENTOS_BASADOS_EN_LA_INTERPRETACION_DE_CURVAS_DE_DEFLEXIONES_ENSAYOS_NO_DESTRUCTIVOS
- Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T., & Omata, H. (2018). Road damage detection using deep neural networks with images captured through a smartphone. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.09454>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (1990). IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS Y TÉCNICAS DE REPARACIÓN (p. 212) [Catálogo]. Departamento de administración y evaluación de pavimentos. <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>
- Montejo Fonseca, A. (1998). Ingeniería de pavimentos para carreteras (2a ed). Universidad Católica de Colombia.
- Morales, J. (2004). Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo [Tesis de grado, Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/939ab42a-fd28-41f9-b6a2-5aaad4e3a5d6/content>
- P. Zhang, & J. He (Eds.), Data Science (pp. 95-102). Springer International Publishing.
- Pachón, I. (2016). Evaluación de la condición de envejecimiento en pavimentos flexibles mediante técnicas de Espectroradiometría y clasificación en imágenes multiespectrales [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/2776/Pach%C3%B3nCendalesIndiraPaola2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Pan, Y., Zhang, X., Cervone, G., & Yang, L. (2018). Detection of asphalt pavement potholes and cracks based on UAV 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>
- Peng, C., Yang, M., Zheng, Q., Zhang, J., Wang, D., Yan, R., Wang, J., & Li, B. (2020). A triple-thresholds pavement crack detection method leveraging random structured forest. *Construction and Building Materials*, 263, 120080.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120080>
- Peña, M., & Zárate, B. (2020). Empleo de VANT para determinar fallas superficiales en pavimentos flexibles. 17(2).
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/6626>
- Ramírez, L. (2019). Sistema de clasificación de severidad de daños en pavimentos flexibles para determinar posibles intervenciones [Grado, EIA].
<https://core.ac.uk/download/pdf/232126784.pdf>
- Ruiz, L. (s. f.). Aplicación de filtros morfológicos en imágenes (p. 11). Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado 24 de mayo de 2024, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/145903/Ruiz%20-%20Aplicaci%C3%B3n%20de%20filtros%20morfol%C3%B3gicos%20en%20im%C3%A1genes.pdf?sequence=1>
- Sylvester Inkoom, A. B., John Sobanjo, & Niu, X. (2019). Prediction of the crack condition of highway pavements using machine learning models. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(7), 940-953.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1581230>
- Tello, L., Aguirre, M., Díaz, J. P., & Hernández, F. (2021). Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales. *Tecnológicas*, 24(50).
<https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/1686/1811>
- Vargas, C. (2018). 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 Cajica Cundinamarca [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada].
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/20509>

- Vasconcelos, R., Fonseca, A., Batista, G., Vinícius, V., Azevedo, B., & Sousa, A. (2021). Mapeamento de manifestações patológicas em pavimento asfáltico por meio de uso de drones. 61-72. <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/521>
- Zhang, L., Xu, W., Zhu, L., Yuan, X., & Zhang, C. (2019). Study on Pavement Defect Detection Based on Image Processing Utilizing UAV. *Journal of Physics: Conference Series*, 1168, 042011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/4/042011>
- Zhang, L., Yang, F., Zhang, Y. D., & Zhu, Y. J. (2021). Road crack detection using deep convolutional neural network. *IEEE Access*, 9, 11382–11394. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051324>
- Zhu, J., Zhong, J., Ma, T., Huang, X., Zhang, W., & Zhou, Y. (2022). Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. *Automation in Construction*, 133, 103991. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991>
- Zhu, Z., German, S., & Brilakis, I. (2022). Visual inspection of asphalt pavement using UAV images: A deep learning approach. *Automation in Construction*, 135, 104111. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104111>