

Evaluación del desgaste de pavimento flexible mediante el uso de fotogrametría de corto alcance

Evaluation of Flexible Pavement Wears through the Use of Short-Range Photogrammetry

Lauro Patricio Cango Mena¹, Belizario Amador Zárate Torres²

¹<https://orcid.org/0000-0002-8210-5935>. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, ipcango@utpl.edu.ec

²<https://orcid.org/0000-0002-3457-0381>. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, bazarate@utpl.edu.ec

Fecha de recepción: 15/08/2020 - Fecha de aceptación del artículo: 26/10/2020



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: [DOI 10.18041/1794-4953/avances.2.6629](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6629)

Cómo citar: Cango Mena, L., & Zárate Torres, B. (2020). Evaluación del desgaste de pavimento flexible mediante el uso de fotogrametría de corto alcance. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 17(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6629>

Resumen

Este artículo analiza una técnica nueva, denominada fotogrametría de corto alcance (FCA), para estimar el desgaste de la capa de rodadura de un pavimento flexible en la vía Loja-Catamayo, mediante una cámara portátil sobre una estructura metálica. La investigación evaluó los perfiles de los modelos digitales de elevación (MDE), de manera milimétrica; así, con la diferencia de los perfiles de los MDE y con el error cuadrático medio, se logró estimar el desgaste producido en un periodo no mayor a un mes. Los resultados fueron muy alentadores, ya que, numéricamente, se comprobó que el mayor desgaste se dio en el carril de mayor circulación de vehículos pesados, que fue de aproximadamente 1 mm. Por ello, el método de FCA es válido para una evaluación periódica del estado de la capa de rodadura de pavimento flexible.

Palabras clave: fotogrametría de corto alcance, deterioro vial, pavimento flexible.

Abstract

This research article analyzes a new technique called Short Range Photogrammetry (FCA), to estimate the wear of the tread layer of flexible pavement in the Loja Catamayo road, by using a portable camera on a metal structure. The investigation evaluated the profiles of the Digital Elevation Models, in a millimeter way. Hence, with the difference in the profiles of the MDE and RMSE, it was possible to estimate the wear produced in a period not exceeding one month. The results were very encouraging since numerically it was found that the greatest wear occurred in the lane where there is a greater circulation of heavy vehicles. That is why the FCA method is valid to perform a periodic assessment of the condition of the flexible pavement tread.

Keywords: short-range photogrammetry, pavement deterioration, flexible pavement.

Introducción

Los accidentes de tránsito ocasionados en los últimos años constituyen la primera causa de muerte en la población menor de 40 años [1], [2]. En Ecuador, el 70% de los accidentes de tránsito ocurren en lugares donde la densidad poblacional es elevada; a esto se incrementan los diversos factores de riesgo como: estado técnico del vehículo y los de tipo humano, ambiental y vial [2].

El factor de riesgo vial que constituye en mayor medida la génesis de los accidentes es el insuficiente mantenimiento de la estructura del pavimento [3]; pero un adecuado y constante mantenimiento de la capa de rodadura permiten mantener una rugosidad que garantice la seguridad y la comodidad del vehículo durante la conducción [4].

Existen diversas formas con las que se puede evidenciar el desgaste del pavimento en una vía: por ejemplo, el ahuellamiento, la deformación transversal, la pérdida de áridos (incluso ondulaciones), el desgaste por el excesivo uso o los cambios por temperatura [5], [6]. El problema de investigación radica en que un estudio continuo de las fallas descritas conlleva un elevado costo; además, los resultados se obtienen luego de un intervalo de tiempo muy extenso [7], [8]. Con el fin de evitar problemas mencionados, como accidentes de tránsito principalmente producto del desgaste superficial del pavimento, fallas por fatiga, costos en la evaluación de la capa de rodadura, entre otros, ahora se investiga con la utilización de la fotogrametría de corto alcance (FCA) [9], [10]. El empleo de la FCA se justifica, ya que solventa los inconvenientes dados en estudios de fallas sobre vías [11]; adicionalmente, se puede estimar el desgaste de la superficie de un pavimento flexible en una vía [12].

Con la FCA se obtiene información de una superficie a través de imágenes [7]. Sus resultados son útiles para controlar periódicamente la textura de la superficie de asfalto durante el ciclo de vida de las vías [13]. Con la metodología aplicada para el procesamiento de las imágenes, se logra una nube puntos en 3D [14]-[16].

El objetivo principal de la investigación fue aplicar la técnica de FCA sobre una microzona de una carretera de pavimento flexible; mientras que los objetivos específicos fueron: por un lado, establecer una microrred de referencias, cuyo propósito es orientar los modelos fotogramétricos que analizarán el comportamiento de desgaste en forma temporal, con el uso de los modelos digitales de elevación (MDE) generados a partir de imágenes con un software para el procesamiento, basado en algoritmos SfM (Structure from Motion). Por otro, establecer lineamientos preliminares para obtener una magnitud del desgaste sobre las vías de pavimento flexible, en nuestro medio.

En cuanto a la referenciación, se utilizó una escala métrica, cuyo fin es poder realizar mediciones sobre estos productos. Con el empleo de un sistema de información geográfica (SIG) y el uso de la herramienta de análisis de imágenes, se generó un modelo de diferencias de elevación que determina el desgaste del pavimento en el tiempo.

El artículo se divide en introducción (ya presentada), materiales y métodos, resultados y discusión, para cerrar, finalmente, con las conclusiones.

1. Materiales y métodos

Las microzonas de estudio se ubican en un tramo de la vía Loja-Catamayo, en la provincia de Loja, sur del Ecuador, como se detalla en la figura 1.

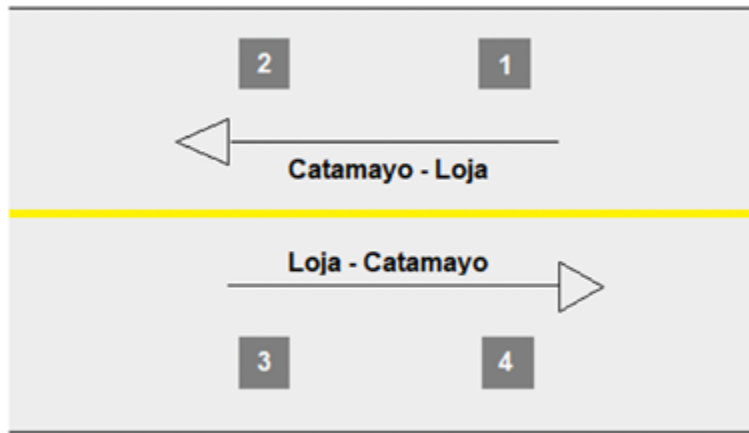


Figura 1. Esquema de las zonas de muestreo en la vía

Estas microzonas se seleccionaron de manera aleatoria en el tramo de estudio y consistieron en dos microzonas por cada carril de circulación y tienen un área efectiva de 0,25 m². Para la captura de las imágenes se utilizó una cámara GoPro Hero 3+, cuyas características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características de la cámara GoPro Hero 3+

| | |
|---|-----------------|
| Megapíxeles: | 12,4 Mpx |
| Disparo Continuo: | 30 ft |
| Sensor CMOS | Sí |
| Sensor de iluminación de fondo BSI | Sí |
| Apertura focal | f/2,8 |

Como elemento de soporte para montar la cámara se construyó una estructura metálica de 0,60 × 0,60 × 0,60 m y provista de dos regletas que permiten ajustar los traslapes longitudinales y transversales (figura 2).



Figura 2. Estructura metálica de soporte

Las imágenes se referenciaron implementando una microrred de 12 puntos de control y de apoyo a escala centimétrica, cuya geometría se muestra en la figura 3.

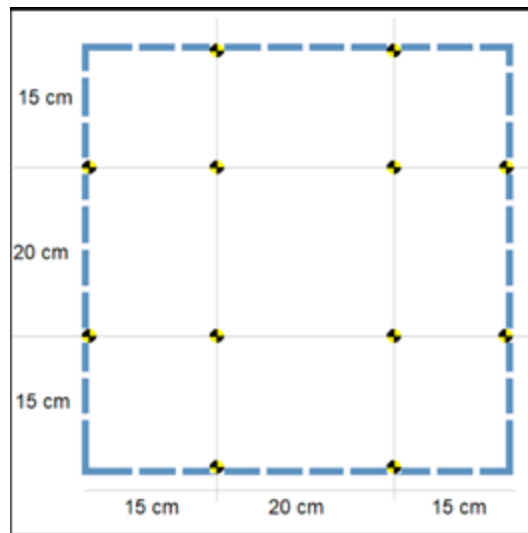


Figura 3. Esquema de la microrred de referencias para la orientación de los modelos

La cuadrícula consiste de hilos localizados sobre la superficie del pavimento en sentido horizontal y vertical, tomando como inicio uno de los soportes de la estructura metálica. En las intersecciones de los hilos se hicieron marcas circulares de color amarillo y negro fijadas al pavimento con adhesivo (figura 4). Para siguientes evaluaciones, dos clavos de acero sirvieron de guía para ubicar la estructura.

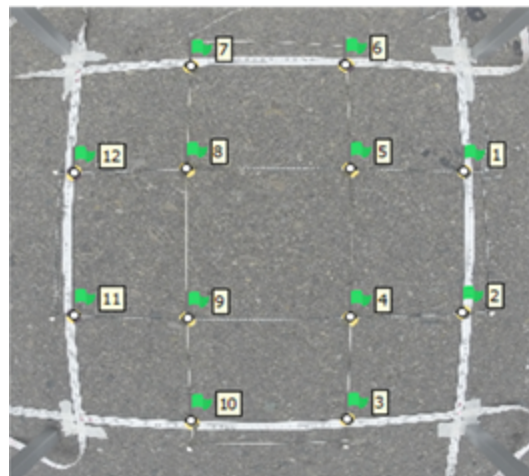


Figura 4. Microrred de referencias sobre el pavimento

La cámara se la ubicó en 9 puntos específicos sobre la estructura metálica, de los cuales se obtuvieron imágenes con un traslape superior al 80 % entre cada una. En total hubo 2 mediciones: la primera, el 14 de mayo, y la segunda, el 12 de junio, con un intervalo de tiempo de 29 días (figura 5).

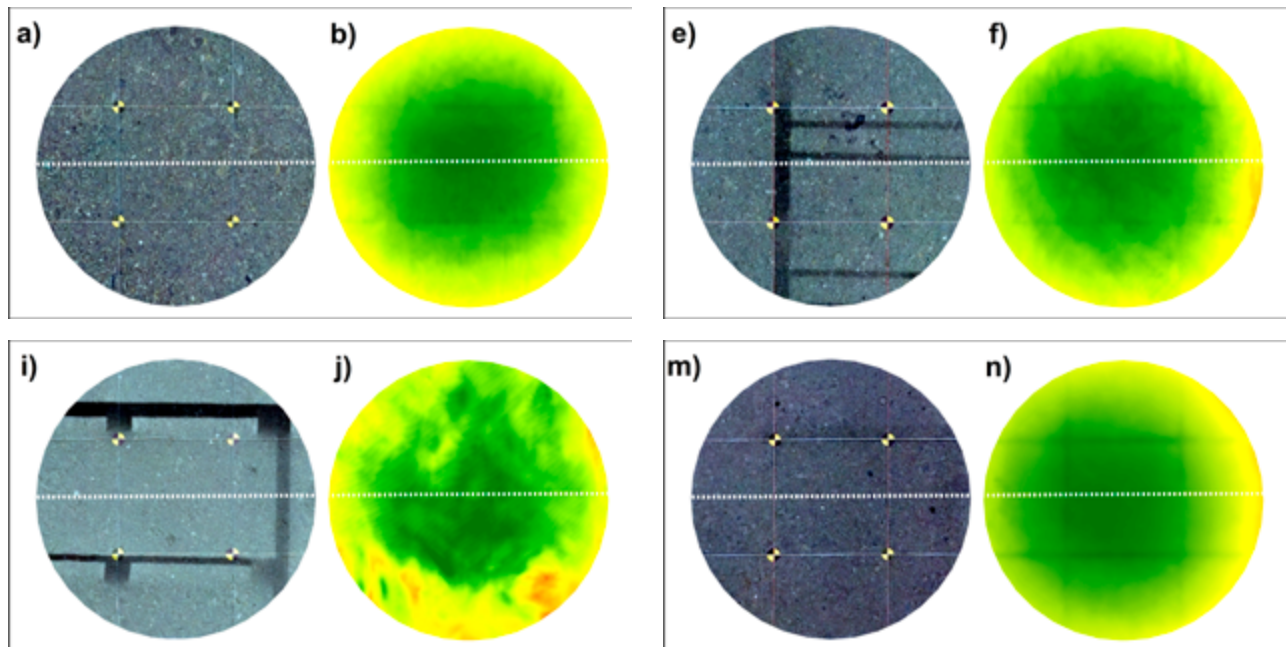


Figura 5. Toma de muestras en la zona de estudio

Las imágenes se procesaron con el software Agisoft Photoscan, versión 1.5.2, con el cual se llevó a cabo la generación de la nube de puntos, la referenciación, la creación de textura y la obtención de las ortofotos y modelos digitales de superficie. Para determinar el desgaste en las microzonas de estudio se tomó un perfil en la dirección de la circulación vehicular. De igual forma, se generaron un mapa de diferencias de elevación empleando la herramienta de análisis de imagen de ArcGIS, versión 10.3.

2. Resultados y discusión

Luego de realizado el procesamiento de las imágenes con el software, se obtuvieron las ortofotos y los MDE por cada microzona y sentido de circulación, como se muestra en la figura 6.



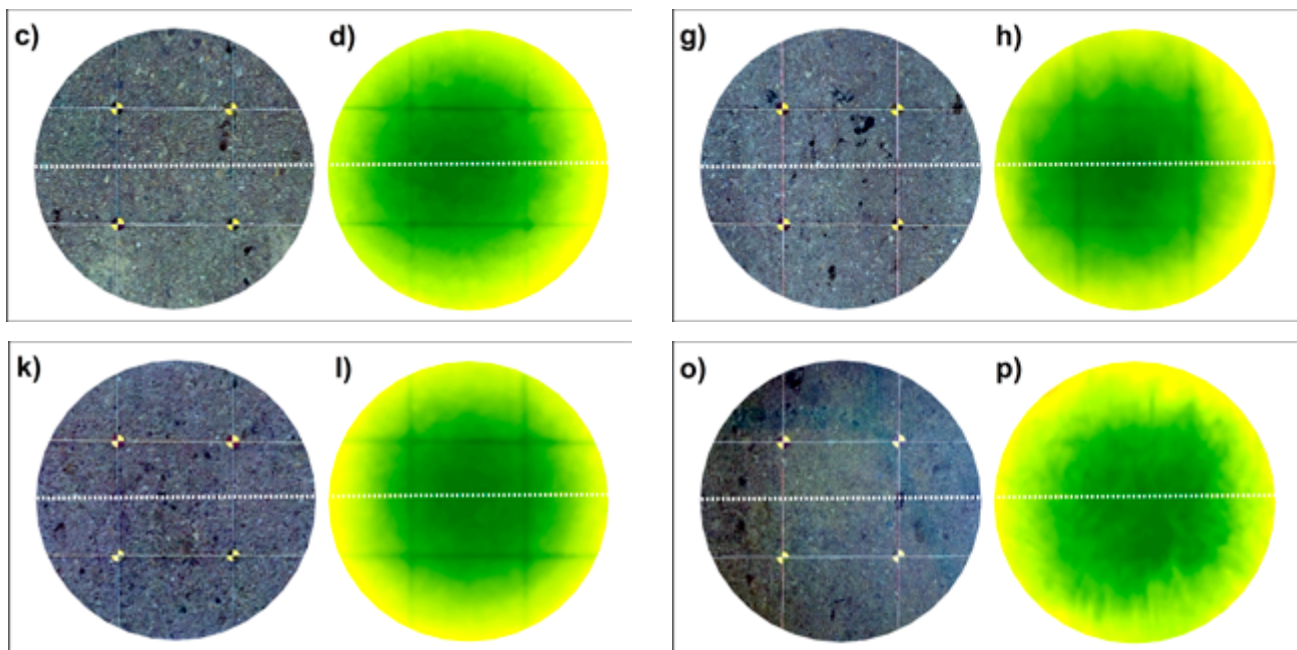


Figura 6. Ortofotos y MDE generados en las microzonas: a, b, c, d, e, f, g, h, sentido Catamayo-Loja. i, j, k, l, m, n, o, p, sentido Loja-Catamayo. Y línea de perfil

Para cada muestra se establecieron 8 puntos de apoyo y 4 puntos de control de coordenadas para la microrred establecida, a fin de mejorar la precisión de los modelos. Con el ajuste de los puntos de control y apoyo de la microrred se calcularon los errores en cada coordenada, así como el error medio cuadrático, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Errores obtenidos en los puntos de control y de apoyo en cada muestra y respectivo periodo de medición

| Muestra 1 | | | | |
|------------------|------------|---------|-------------|---------|
| | 14 de mayo | | 12 de junio | |
| Puntos de | Apoyo | Control | Apoyo | Control |
| Número | 8 | 4 | 8 | 4 |
| Error en X (mm) | 0,35 | 1,09 | 0,84 | 0,57 |
| Error en Y (mm) | 0,44 | 1,17 | 1,31 | 1,19 |
| Error en Z (mm) | 0,68 | 0,66 | 1,09 | 1,58 |
| Error en XY (mm) | 0,56 | 1,60 | 1,56 | 1,32 |
| Total (mm) | 0,88 | 1,73 | 1,90 | 2,06 |
| Muestra 2 | | | | |
| | 14 de mayo | | 12 de junio | |
| Puntos de | Apoyo | Control | Apoyo | Control |
| Número | 8 | 4 | 8 | 4 |
| Error en X (mm) | 0,32 | 0,89 | 0,94 | 0,86 |
| Error en Y (mm) | 0,22 | 0,53 | 1,07 | 1,13 |
| Error en Z (mm) | 0,53 | 0,84 | 1,03 | 1,11 |
| Error en XY (mm) | 0,38 | 1,03 | 1,43 | 1,42 |
| Total (mm) | 0,65 | 1,33 | 1,76 | 1,81 |

| Muestra 3 | | | | |
|------------------|------------|---------|-------------|---------|
| | 14 de mayo | | 12 de junio | |
| Puntos de | Apoyo | Control | Apoyo | Control |
| Número | 8 | 4 | 8 | 4 |
| Error en X (mm) | 0,37 | 0,47 | 1,50 | 0,89 |
| Error en Y (mm) | 0,58 | 1,77 | 1,25 | 1,10 |
| Error en Z (mm) | 0,60 | 0,58 | 2,46 | 2,26 |
| Error en XY (mm) | 0,69 | 1,83 | 1,96 | 1,42 |
| Total (mm) | 0,91 | 1,92 | 3,14 | 2,67 |
| Muestra 4 | | | | |
| | 14 de mayo | | 12 de junio | |
| Puntos de | Apoyo | Control | Apoyo | Control |
| Número | 7 | 5 | 8 | 4 |
| Error en X (mm) | 1,20 | 0,99 | 1,61 | 1,94 |
| Error en Y (mm) | 1,11 | 0,98 | 0,82 | 0,93 |
| Error en Z (mm) | 1,76 | 2,46 | 1,00 | 1,14 |
| Error en XY (mm) | 1,64 | 1,39 | 1,81 | 2,16 |
| Total (mm) | 2,40 | 2,83 | 2,07 | 2,44 |

La desviación estándar para los puntos de apoyo es de 0,86 mm; mientras que para los puntos de control es de 0,51 mm. La variación de los errores en los puntos de control es menor, debido a que son pocos los puntos tomados para el cálculo. En la figura 7 se muestran los perfiles iniciales y finales en cada microzona.

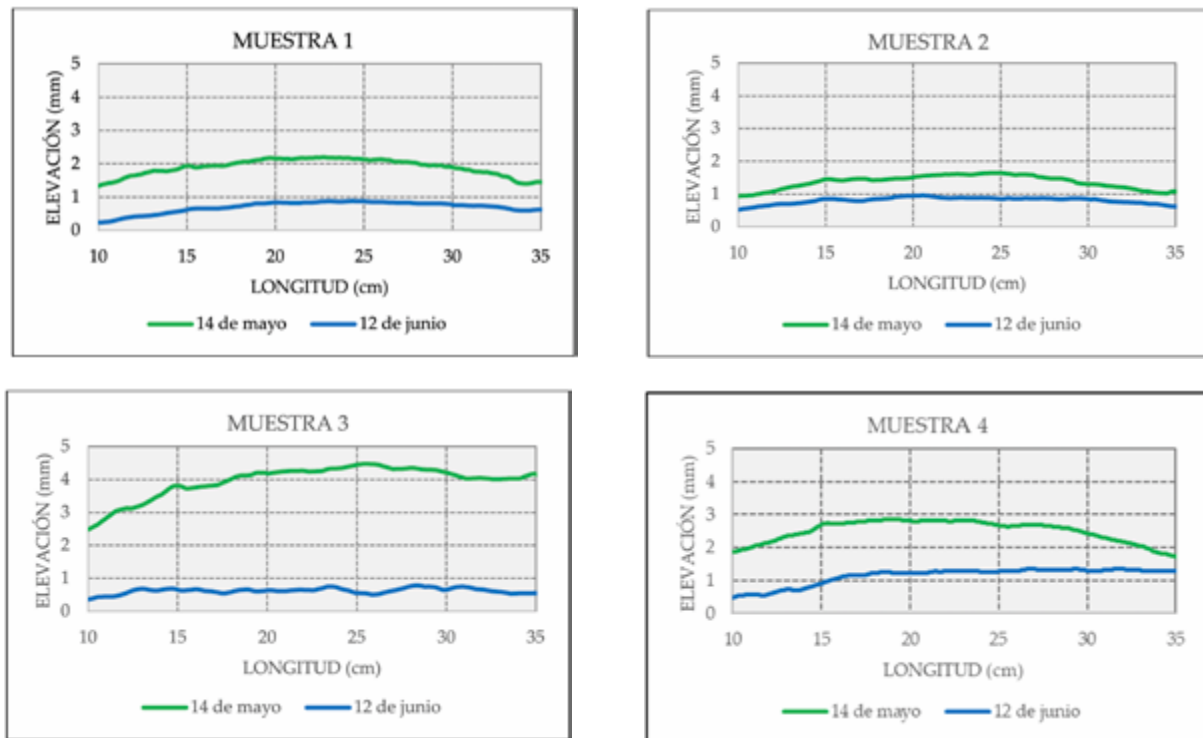


Figura 7. Perfiles de los MDE para las diferentes muestras

En los perfiles de las muestras 1, 2 y 4 se observa que en los puntos de control y apoyo existe un error total máximo de 2,06 mm, 1,81 mm y 2,44 mm, respectivamente; entre tanto, en la diferencia de MDE se observa que el desgaste es menor al valor del error total. Por lo tanto, el desgaste no se puede determinar con exactitud, porque es excedido al valor del error.

A diferencia de la muestra 3, donde el error total máximo es menor al valor del desgaste; por lo tanto, se estima que existe un desgaste efectivo en la microzona de 1 mm, como se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación del error total y desgaste de las muestras

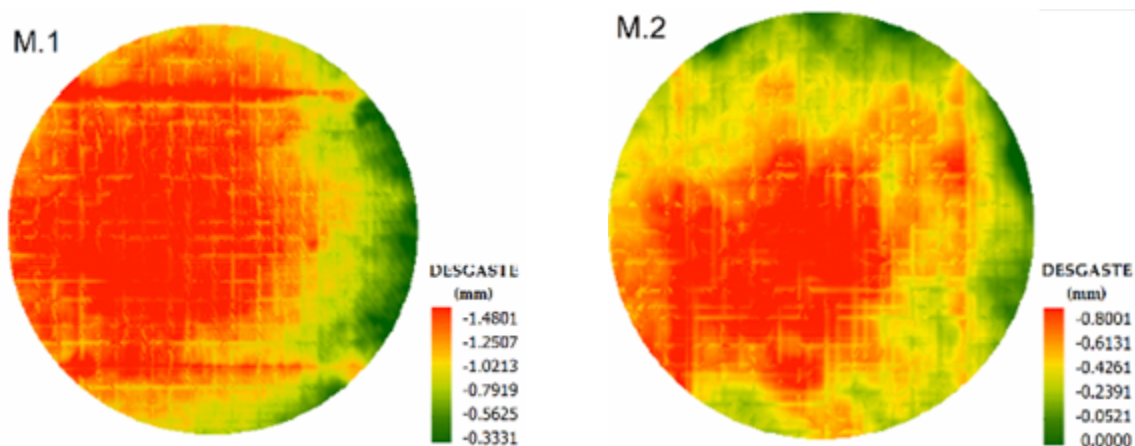
| Error total (mm) | Desgaste (mm) | Condición | |
|------------------|---------------|-----------|-----------------------------|
| Muestra 1 | 2,06 | 1,48 | Error |
| Muestra 2 | 1,81 | 0,80 | Error |
| Muestra 3 | 3,14 | 4,16 | Desgaste efectivo (1,02 mm) |
| Muestra 4 | 2,83 | 2,04 | Error |

El desgaste del pavimento de la microzona 3 es de aproximadamente 1 mm en la parte central. Por ello, se puede explicar que la microzona 3 se encuentra en el carril del tramo Loja a Catamayo y ha tenido un mayor desgaste en comparación al carril de Catamayo a Loja.

Además, en los perfiles se observa que existe una diferencia altitudinal entre los MDE, y principalmente se da en la parte central. Entonces, se deduce que ha existido una variación milimétrica de la superficie de rodadura pero, según los errores calculados, no se puede establecer con exactitud.

Con base en lo expuesto, existe una estrecha relación entre los puntos de control y el desgaste calculado, ya que los determinamos con mayor exactitud. Algunos autores manifiestan que 12 puntos entre control y apoyo son necesarios para georreferenciar el modelo [17]. Otros autores establecen que los puntos de control determinan valores más reales del desgaste de pavimento, siempre y cuando se los establezca en lugares fijos e inmovibles [13], [18].

Los modelos producto de la diferencia de los MDE de las muestras a diferentes fechas se presentan en la figura 8.



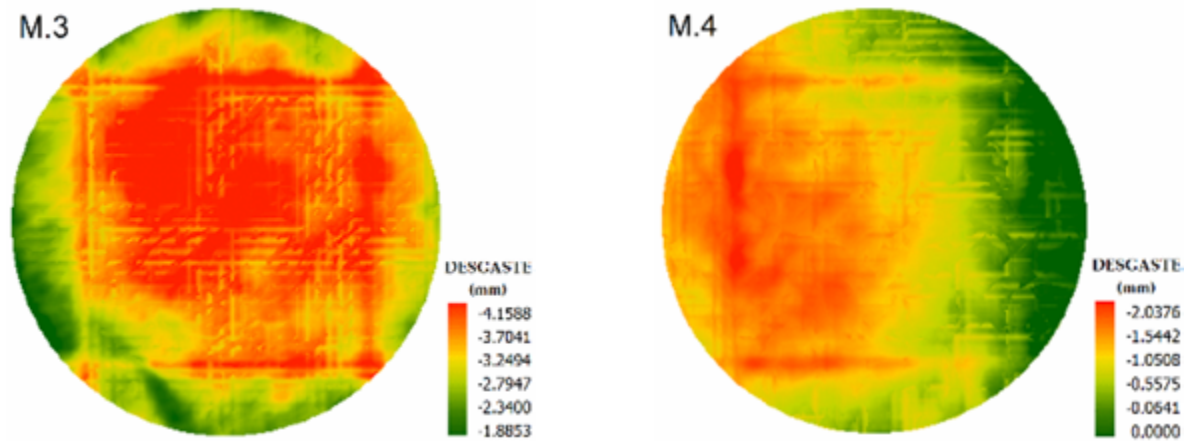


Figura 8. Diferencia de los MDE para las muestras

Con los modelos observados anteriormente, la variación altimétrica en la muestra 3 presenta una mayor variación de elevación, por lo que se ratifica y deduce que existe un mayor desgaste del pavimento flexible ubicado en el tramo de la vía Loja-Catamayo.

Conclusiones

Existen diversas maneras de estimar el deterioro de una vía de pavimento flexible que, de acuerdo con los últimos avances de la tecnología, nos permiten determinar el desgaste de manera rápida, precisa y económica a través de la FCA, a fin de establecer a tiempo medidas de mejoramiento de la capa de rodadura. Se recalca que la metodología aplicada aún está en estudios preliminares, ya que se requieren más pruebas en campo, así como un análisis detallado en intervalos de tiempo de toma de muestras mayores, que fueron limitaciones en el estudio realizado. Los problemas generados en campo se dieron, porque se debían considerar pruebas de ensayo y error, a efectos de establecer una separación adecuada de la microrred para un traslape adecuado de las imágenes. Con base en los objetivos planteados, se tiene que:

Una microrred de referencias con coordenadas locales es la base principal para determinar y orientar los modelos fotogramétricos, con el fin de obtener MDE de alta precisión.

Con el sistema de FCA se puede obtener un modelo 3D de la textura superficial de un pavimento flexible a través de la utilización de cámaras portátiles.

La diferencia entre MDE en un intervalo de tiempo permite generar modelos que permiten estimar el desgaste que ha sufrido un pavimento en cualquier tramo de una vía. El estudio determinó que el desgaste de pavimento flexible fue mayor en un carril, resultado que concuerda con el paso de vehículos pesados en una sola dirección durante el tiempo de estudio (ello comprobó la validez de la metodología empleada). Finalmente, se estimó que en una de las muestras de la vía, luego de 29 días, hubo un desgaste de alrededor de 1 mm.

Además, según el trabajo en campo y el posterior análisis de los datos, se propone que para la obtención de las imágenes con la cámara portátil sea de por lo menos 3 fotos por cada punto de observación en cada muestra. Y que los puntos de control también se los ubique en las esquinas

de la zona de muestreo; es decir, junto a los apoyos de la estructura metálica, esto con el fin de tener mayores referencias en el momento de orientar las imágenes.

Recomendaciones

Para las futuros líneas de investigación que tomen como referencia el presente trabajo, se recomienda que la superficie de pavimento esté completamente limpia, libre de impurezas, que la altura de los soportes de la estructura metálica tenga las mismas medidas, que el número de muestras sea mayor e incluso el intervalo entre la toma de muestras sea mayor tiempo, con la finalidad de obtener resultados con un sustento estadístico de repetitividad y reproducibilidad de la metodología. Además, para el proceso de los datos, procurar que la calidad de generación de puntos sea alta para obtener información con más detalle de la superficie. La validación del método también se la debería realizar en comparación con métodos o ensayos debidamente normados.

Agradecimientos

A Dios, por darme la oportunidad de concluir otra etapa de mi formación profesional. Además, dejo constancia de mi gratitud a la UTP y su planta docente de la Maestría, en especial al PhD Yasmany García y al Mg. Belizario Zárate, quienes me han orientado con sus acertadas correcciones y sugerencias en el desarrollo del trabajo.

Referencias

- [1] D. P. Garcés Velecela, "Evaluación vial y plan de rehabilitación y mantenimiento de la vía Azoguez-Cojitambo-Deleg-La Raya", tesos de maestría, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2017 [en línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28556>
- [2] D. M. Medina Dávalos, M. Medina Borja y C. Escobar Suárez, Accidentes de tránsito: rescate in situ. Quito: Edimec, 2017 [en línea]. Disponible: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14109>
- [3] P. Apostolidis, L. Xueyan, S. Erkens y A. Skarpas, "Characterization of epoxy-asphalt binders by differential scanning calorimetry", Constr. Build. Mater., vol. 249, p. 118800, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118800>
- [4] Y. Wang, X. Lai, F. Zhou y J. Xue, "Evaluation of pavement skid resistance using surface three-dimensional texture data", Coatings, vol. 10, n.º 2, 2020, <https://doi.org/10.3390/coatings10020162>
- [5] P. Loarte y H. Risco, "Evaluación superficial del pavimento flexible por el método pavement condition index (PCI) en las vías arteriales: Cincuentenario, Colón y Miguel Grau (Huacho-Huaura-Lima)", Univ. San Martín Porres, vol. 1, p. 174, 2016 [en línea]. Disponible: https://es.scribd.com/document/346965112/Evaluacion-Superficial-Del-Pavimento-Por-El-Metodo-Pci-Lima-2016#close_user_settings_menu
- [6] D. Walker y N. Haks, "The long-term pavement performance program", en Encyclopedia of Evaluation: Social Science and Policy. s. l.: Sage, 2017.
- [7] E. Schnebele, B. F. Tanyu, G. Cervone y N. Waters, "Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment", Eur. Transp. Res. Rev., vol. 7, n.º 2, 2015, <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0156-6>
- [8] I. Van Schalkwyk, E. A. Wemple y T. R. Neuman, Integrating the HSM into the Highway Project Development Process. Cambridge: FHWA, 2012 [en línea]. Disponible: https://safety.fhwa.dot.gov/hsm/hsm_integration/hsm_integration.pdf
- [9] A. Kreij, J. Scriffignano, D. Rosendahl, T. Nagel y S. Ulm, "Aboriginal stone-walled intertidal fishtrap morphology, function and chronology

- investigated with high-resolution close-range Unmanned Aerial Vehicle photogrammetry”, *J. Archaeol. Sci.*, vol. 96, pp. 148-161, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.05.012>
- [10] C. Jiaying, Z. Binshuang, C. Xi, Z. Runmin y H. Xiaoming, “Acquisition method of asphalt pavement texture information based on the CPR Technology”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 275. p. 04003, 2019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927504003>
- [11] M. Ahmed, C. T. Haas y R. Haas, “Toward low-cost 3D automatic pavement distress surveying: The close range photogrammetry approach”, *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 38, n.º 12, pp. 1301-1313, 2011. <https://doi.org/10.1139/L11-088>
- [12] P. Liq, Y. Tiong y M. R. Hainin, “Road surface assessment of pothole severity by close range digital photogrammetry method”, *World Appl. Sci. J.*, vol. 19, n.º 6, pp. 867-873, 2012. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.19.06.3353>
- [13] S. Gülci y S. Şireli, “The evaluation of SfM technique in the determination of surface deformation on skidding roads following timber harvesting”, *Eur. J. For. Eng.*, pp. 52-60, 2019. <https://doi.org/10.33904/ejfe.600860>
- [14] S. Mathavan, K. Kamal y M. Rahman, “A review of three-dimensional imaging technologies for pavement distress detection and measurements”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, n.º 5, pp. 2353-2362, 2015. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2428655>
- [15] H. T. Samboko et al., “Evaluation and improvement of remote sensing-based methods for river flow management”, *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, p. 102839, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102839>
- [16] J. Pakkanen, A. Brysbaert, D. Turner y Y. Boswinkel, “Efficient three-dimensional field documentation methods for labour cost studies: Case studies from archaeological and heritage contexts”, *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, vol. 17, p. e00141, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00141>
- [17] S. Fernández, “Influencia de los puntos de control sobre el terreno en la precisión de modelos digitales de superficie mediante fotogrametría aérea”, tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2019 [en línea]. Disponible: http://oa.upm.es/56668/1/TFC_Santiago_Fernandez_Movilla.pdf
- [18] S. I. Sarsam y A. M. Ali, “Assessing pavement surface macrotexture using sand patch test and close range photogrammetric approaches”, *Int. J. Mater. Chem. Physics, Public Sci. Fram. Am. Inst. Sci.*, vol. 1, n.º 2, pp. 124-131, 2015 [en línea]. Disponible: <http://www.aiscience.org/journal/ijmcp>