



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i4.4093>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

Evaluation of flexible pavement using PCI method and aerial photogrammetry on the San Antonio – Chone road

Avaliação de pavimento flexível pelo método PCI e aerofotogrametria na estrada San Antonio – Chone

Rodríguez Triviño Melania Salomé^I
mrodriguez7496@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-7548-369X>

Solórzano López Eduardo André^{II}
esolorzano2165@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-7412-8962>

García Vinces Jimmy Jeffrey^{III}
jimmy.garcia@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6110-903X>

Correspondencia: mrodriguez7496@utm.edu.ec

***Recibido:** 27 de septiembre de 2024 ***Aceptado:** 24 de octubre de 2024 * **Publicado:** 12 de noviembre de 2024

- I. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Docente Principal del Departamento de Construcciones Civiles. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

Este estudio evalúa el estado del pavimento flexible en la vía San Antonio - Chone, en Manabí, Ecuador, utilizando el método del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y la fotogrametría aérea con drones. Los objetivos incluyen calcular el PCI mediante inspección manual y fotogrametría, comparando ambos métodos para validar sus resultados. La metodología comprende la segmentación de la carretera en unidades de muestra, la recolección de datos mediante inspección visual y drones, y el análisis con software como Pix4Dmapper y AutoCAD. Los resultados muestran que el valor más alto de PCI (77) corresponde a un estado "muy bueno", mientras que el valor más bajo (2) indica un pavimento "fallado". La comparación entre ambos métodos revela una alta precisión en los resultados obtenidos, demostrando la eficacia de la fotogrametría aérea para evaluar condiciones de pavimento. Esto sugiere que la fotogrametría es una alternativa viable y eficiente para la gestión de carreteras en zonas rurales.

Palabras Claves: pavimento flexible; PCI; fotogrametría aérea; drones.

Abstract

This study evaluates the condition of the flexible pavement on the San Antonio - Chone road, in Manabí, Ecuador, using the Pavement Condition Index (PCI) method and aerial photogrammetry with drones. The objectives include calculating the PCI by manual inspection and photogrammetry, comparing both methods to validate their results. The methodology includes segmentation of the road into sample units, data collection by visual inspection and drones, and analysis with software such as Pix4Dmapper and AutoCAD. The results show that the highest PCI value (77) corresponds to a "very good" condition, while the lowest value (2) indicates a "failed" pavement. The comparison between both methods reveals a high accuracy in the results obtained, demonstrating the effectiveness of aerial photogrammetry to evaluate pavement conditions. This suggests that photogrammetry is a viable and efficient alternative for road management in rural areas.

Keywords: flexible pavement; PCI; aerial photogrammetry; drones.

Resumo

Este estudo avalia o estado do pavimento flexível da estrada San Antonio - Chone, em Manabí, Equador, utilizando o método Pavement Condition Index (PCI) e aerofotogrametria com drones. Os

objetivos incluem o cálculo do ICP por inspeção manual e fotogrametria, comparando os dois métodos para validar os seus resultados. A metodologia inclui a segmentação das estradas em unidades de amostragem, a recolha de dados através de inspeção visual e drones e a análise com software como o Pix4Dmapper e o AutoCAD. Os resultados mostram que o valor mais elevado do PCI (77) corresponde a um estado “muito bom”, enquanto o valor mais baixo (2) indica um pavimento “reprovado”. A comparação entre os dois métodos revela uma elevada precisão nos resultados obtidos, demonstrando a eficácia da aerofotogrametria na avaliação das condições do pavimento. Isto sugere que a fotogrametria é uma alternativa viável e eficiente para a gestão rodoviária em zonas rurais.

Palavras-chave: pavimento flexível; ICP; fotogrametria aérea; drones.

Introducción

La red vial en zonas rurales del Ecuador presenta deficiencias y debilidades en su sistema de gestión y en las técnicas de mantenimiento de carreteras basadas en criterios científicos, de ahí radica la importancia de estos sistemas viales. Según Guzmán (2017) la infraestructura vial es fundamental para el desarrollo y crecimiento económico y social de un país, ya que representa el medio principal para el transporte y desplazamiento de personas, vehículos y mercancías. Por esta razón, una red vial deficiente puede ocasionar pérdidas significativas para el gobierno.

A medida que aumentan las necesidades del país, también lo hace la relevancia de las carreteras, especialmente cuando faltan otros medios de transporte, como los ferrocarriles y el transporte acuático, algo común en países en vías de desarrollo.

Todos los países siempre se preocupan de prolongar el tiempo que duran los pavimentos, realizan un enfoque de mantenimiento continuo y han aplicado metodologías de evaluación de vías de carácter superficial para realizar la intervención correcta. Entre las más utilizadas está la metodología PCI, por lo que tiene una calificación objetiva en base a un procedimiento estandarizado. (Paredes y Torres, 2022, p. 18)

Los daños en el pavimento pueden ser causados por uno o varios factores, como la falta de capacidad estructural, un diseño inadecuado, la baja calidad de los materiales, la falta de mantenimiento preventivo y/o técnicas de construcción deficientes, “un mantenimiento oportuno y continuo es necesario para preservar la inversión y mantener el pavimento en completo servicio al público” (Miranda, 2010, p. 75). Las fallas en la superficie se agrupan generalmente en varias categorías, tales

como baches, ondulaciones, cruces de ferrocarril, desplazamientos, hinchamientos, etc. En general, los especialistas en pavimentos han logrado clasificar alrededor de 19 tipos de fallas que pueden aparecer en pavimentos flexibles. Los propósitos de este estudio son determinar los valores del Índice de Condición del Pavimento (PCI) para pavimentos flexibles utilizando dos métodos, además de evaluar las condiciones de la carretera seleccionada en el área de estudio dentro de la provincia de Manabí. En este caso, la carretera es la vía que lleva a la parroquia San Antonio. El objetivo es comparar y validar los valores de PCI calculados aritméticamente con los valores PCI obtenidos a través de la herramienta de la fotogrametría aérea, se ha optado por usar esta técnica, puesto que, entre otras cosas autores como Carretero (2015) que manifiesta que en la actualidad el uso de drones o también conocidos como Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) está despuntando y evolucionando de manera constante, siendo muy interesantes las aplicaciones que tienen en diferentes campos de la ingeniería como en el caso de las vías, un claro ejemplo es la técnica fotogramétrica, la cual se va a utilizar en este proyecto. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. desarrolló el manual de fallas más reconocido e influyente a nivel mundial, con información detallada y precisa sobre cada tipo de falla en pavimentos flexibles (ASTM, 2004). Este manual fue adoptado posteriormente por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) bajo la norma ASTM D6433-03 para carreteras.

Descripción del área de estudio

San Antonio es una parroquia rural del cantón Chone, en la provincia de Manabí, posee varias comunidades dedicadas a la agricultura, ganadería, avicultura, pesca, comercio y otras labores más. San Antonio consta con una población con más o menos 6.000 habitantes teniendo como límites al norte por Boyacá, al Sur Bachillero, al Este Chone y Canuto al Oeste Tosagua y San Vicente. Así mismo, conecta con sitios importantes como: Barquero, La Margarita, La Segua, La Sabana, Badeal, La Playita, entre otros. Actualmente los dos principales accesos para la parroquia de San Antonio presentan fallas en el pavimento flexible, por lo cual los vehículos transitan de manera recurrente las vías alternas en donde los moradores se muestran molestos por la interrupción constante del sitio. El área de estudio enmarca la carretera E383A, entre el ingreso al sitio La Playita (A) hasta la Y de San Antonio (B), la que se considera más importante, puesto que, es la que lleva al cantón Chone, como se muestra en la Figura 1. Las coordenadas geográficas del área de estudio inicio: 595201, 9922227, fin: 593862, 9922446.

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

La longitud total del área de estudio es de 1386 m, se encontró una gran parte de áreas dañadas en esta muestra de la carretera.



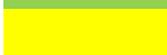
Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Fuente: Observación realizada por los autores.

Condición del Estado del Pavimento

El PCI es un índice que muestra el estado actual del pavimento según una evaluación sincrónica del tipo, densidad y gravedad del deterioro. El PCI estándar utiliza una escala de 7 divisiones diferente. Al mismo tiempo, el estado actual está asociado con la calidad del pavimento a través de descripciones caracterizadoras. Esto se muestra en la Tabla 1

Tabla 1. Escala estándar para la calificación del Índice de Condición del Pavimento

	100 - 85	Excelente		
	85 - 70	Muy Bueno		
	70 - 55	Bueno		
	55 - 40	Regular		
	40 - 25	Pobre		
Fuente:	Elaboración	25 - 10		propia a partir del manual
ASTM D6433-03.		10 - 0		

Metodología

Cálculo de PCI

Pasos requeridos para el cálculo manual de PCI

El método de cálculo manual depende del PCI para evaluar un pavimento. Su cálculo se basa en la evaluación de la condición superficial del pavimento definiendo el tipo de falla, la extensión y la severidad. El hecho de que el método de evaluación del pavimento dependa de diecinueve tipos de deterioro lo convierte en el más detallado para los sistemas de gestión de pavimentos. El proceso de evaluación comienza con la inspección de campo en el área de estudio, dividiendo la carretera en unidades de muestra con una distancia igual. La longitud de la carretera evaluada en este estudio es 1386 m y el ancho de calzada es de 7,3 m. Cada unidad de muestra debe ser evaluada mediante una inspección visual. El cálculo del PCI incluye los siguientes pasos:

- Segmentación de la sección o lado del pavimento en unidades de muestra de acuerdo a Vásquez (2020) en la Tabla 2.
- Determinación del tipo de deterioro, cantidad parcial y severidad.
 - Las definiciones y pautas para cuantificar fallas en la determinación del PCI se encuentran en el Apéndice X1 del manual ASTM D6433 para pavimentos de CA (cemento asfáltico).
- Determinación del Valor de Deducción (DV) para cada tipo de deterioro y cada nivel de severidad utilizando las curvas correspondientes al DV según (ASTM D6433).
- Cálculo del valor total de deducciones (TDV) como la suma de los DV de todos los tipos de deterioro.
- Encontrar el valor corregido del DV (CDV) teniendo en cuenta la interacción entre los tipos de deterioro, utilizando las curvas correspondientes del DV.
- Cálculo del PCI de la unidad de muestra a partir de $PCI = 100 - CDV$.
- El PCI del segmento o lado es luego el promedio de los valores de PCI obtenidos para las unidades de muestra del segmento o lado.
- Determinación de la calificación del pavimento.
- Si todas las unidades de muestra inspeccionadas se seleccionan aleatoriamente, el PCI de la sección de pavimento se calcula promediando el PCI de las unidades de muestra. Si se inspeccionan unidades de muestra adicionales, se debe usar un promedio ponderado.

- Uso de todas las ecuaciones, figuras y tablas para cada tipo de deterioro necesarias para obtener los valores de PCI, según (ASTM D6433).

Tabla 2. Longitudes de unidades de muestra asfálticas

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestra (m)
5,0	46,0
5,5	41,8
6,0	38,3
6,5	35,4
7,3 (máximo)	31,5

Fuente: Vásquez (2020)

Basado en aquello, cada unidad de muestra tiene una longitud de 31,5 m al ser el ancho de calzada promedio de 7,3 m, se obtiene un área de 229,95 m². Por lo tanto, en total se evalúan 44 unidades de muestra como se muestra en detalle en la Tabla 3.

Tabla 3. Detalle de las unidades de muestra a evaluar

Unidad de muestra (UM)	Ancho de calzada (m)	Longitud (m)	Área de la unidad de muestra (m ²)	Abscisa inicial	Abscisa final
UM1	7,3	31,5	229,95	0 + 000,00	0 + 031,50
UM2	7,3	31,5	229,95	0 + 031,50	0 + 063,00
UM3	7,3	31,5	229,95	0 + 063,00	0 + 094,50
UM4	7,3	31,5	229,95	0 + 094,50	0 + 126,00
UM5	7,3	31,5	229,95	0 + 126,00	0 + 157,50
UM6	7,3	31,5	229,95	0 + 157,50	0 + 189,00
UM7	7,3	31,5	229,95	0 + 189,00	0 + 220,50
UM8	7,3	31,5	229,95	0 + 220,50	0 + 252,00
UM9	7,3	31,5	229,95	0 + 252,00	0 + 283,50
UM10	7,3	31,5	229,95	0 + 283,50	0 + 315,00
UM11	7,3	31,5	229,95	0 + 315,00	0 + 346,50
UM12	7,3	31,5	229,95	0 + 346,50	0 + 378,00
UM13	7,3	31,5	229,95	0 + 378,00	0 + 409,50

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

UM14	7,3	31,5	229,95	0 + 409,50	0 + 441,00
UM15	7,3	31,5	229,95	0 + 441,00	0 + 472,50
UM16	7,3	31,5	229,95	0 + 472,50	0 + 504,00
UM17	7,3	31,5	229,95	0 + 504,00	0 + 535,50
UM18	7,3	31,5	229,95	0 + 535,50	0 + 567,00
UM19	7,3	31,5	229,95	0 + 567,00	0 + 598,50
UM20	7,3	31,5	229,95	0 + 598,50	0 + 630,00
UM21	7,3	31,5	229,95	0 + 630,00	0 + 661,50
UM22	7,3	31,5	229,95	0 + 661,50	0 + 693,00
UM23	7,3	31,5	229,95	0 + 693,00	0 + 724,50
UM24	7,3	31,5	229,95	0 + 724,50	0 + 756,00
UM25	7,3	31,5	229,95	0 + 756,00	0 + 787,50
UM26	7,3	31,5	229,95	0 + 787,50	0 + 819,00
UM27	7,3	31,5	229,95	0 + 819,00	0 + 850,50
UM28	7,3	31,5	229,95	0 + 850,50	0 + 882,00
UM29	7,3	31,5	229,95	0 + 882,00	0 + 913,50
UM30	7,3	31,5	229,95	0 + 913,50	0 + 945,00
UM31	7,3	31,5	229,95	0 + 945,00	0 + 976,50
UM32	7,3	31,5	229,95	0 + 976,50	1 + 008,00
UM33	7,3	31,5	229,95	1 + 008,00	1 + 039,50
UM34	7,3	31,5	229,95	1 + 039,50	1 + 071,00
UM35	7,3	31,5	229,95	1 + 071,00	1 + 102,50
UM36	7,3	31,5	229,95	1 + 102,50	1 + 134,00
UM37	7,3	31,5	229,95	1 + 134,00	1 + 165,50
UM38	7,3	31,5	229,95	1 + 165,50	1 + 197,00
UM39	7,3	31,5	229,95	1 + 197,00	1 + 228,50
UM40	7,3	31,5	229,95	1 + 228,50	1 + 260,00
UM41	7,3	31,5	229,95	1 + 260,00	1 + 291,50
UM42	7,3	31,5	229,95	1 + 291,50	1 + 323,00
UM43	7,3	31,5	229,95	1 + 323,00	1 + 354,50

UM44	7,3	31,5	229,95	1 + 354,50	1 + 386,00
------	-----	------	--------	------------	------------

Fuente: Elaboración propia

Pasos requeridos para el cálculo del PCI mediante la fotogrametría aérea

El uso de la herramienta de la fotogrametría aérea como otra metodología consiste en cinco etapas fundamentales: planificación del vuelo, recolección de datos, procesamiento de imágenes, análisis de datos y cálculo del PCI de cada UM.

Recolección de datos

En este estudio, se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) como equipo para capturar las imágenes de la carretera. Un asistente de vuelo con experiencia operó el control remoto del VANT para recolectar los datos. La Figura 2 muestra el patrón de vuelo que llevó a cabo el equipo. Antes de comenzar la misión de vuelo, se debe determinar la altura de vuelo.

El VANT se voló a una altura de 50 metros sobre el nivel del suelo.

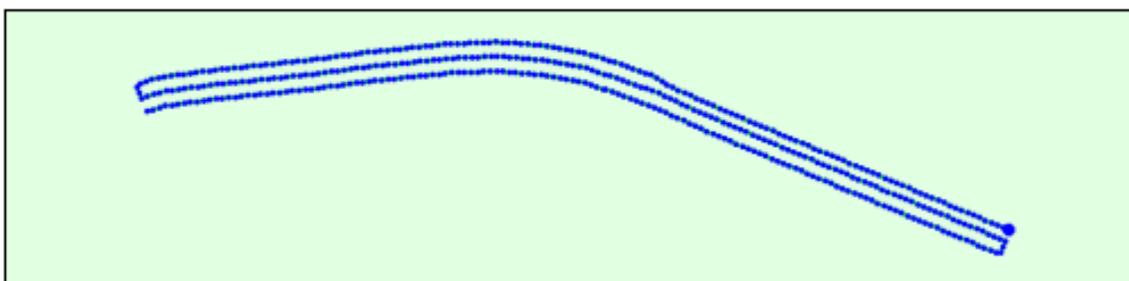


Figura 2. Vista superior de la posición inicial de la imagen. La línea azul sigue la posición de las imágenes en el tiempo, comenzando desde el punto azul grande.

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de imágenes

La imagen de la carretera capturada mediante el VANT fue procesada con el software Pix4Dmapper para producir un ortomosaico y un Modelo Digital de Superficie (DSM). Pix4Dmapper combinó todas las fotos tomadas por el VANT. Se capturaron 429 imágenes de la carretera.

Pix4Dmapper generó la ortofoto y un Modelo Digital de Superficie (DSM) a partir de los datos recolectados en el VANT. Los datos transferidos al ordenador se ingresaron en Pix4Dmapper para su procesamiento. Los datos fueron procesados en tres etapas por Pix4Dmapper: Nivel 1: Procesamiento Inicial, Nivel 2: Nube de Puntos y Malla, y Nivel 3: Modelo Digital de Superficie (DSM), Ortofoto e Índices. La Ortofoto y el Modelo Digital de Superficies (DSM) se aprecian en la Figura 3.

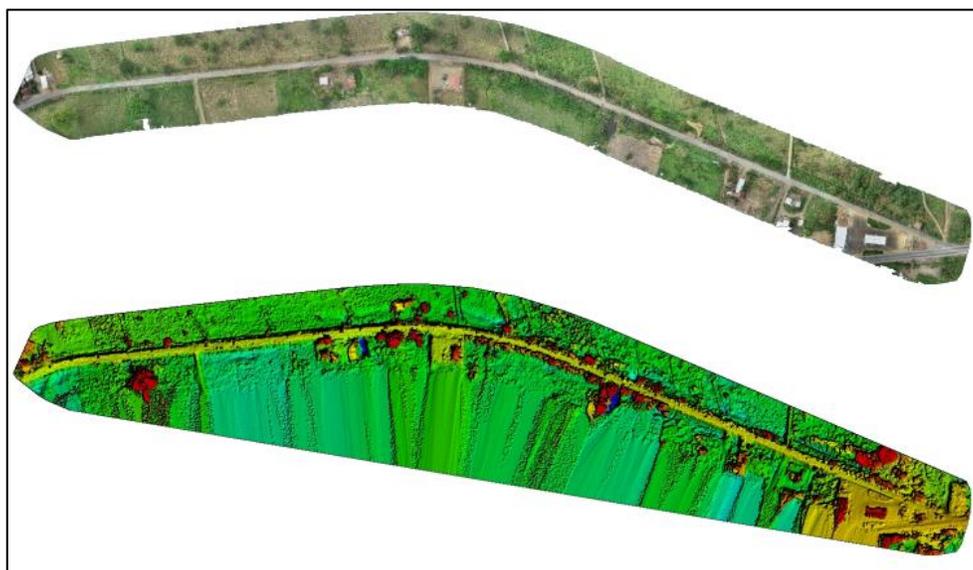


Figura 3. Ortofoto y el correspondiente Modelo Digital de Superficies (DSM) escaso antes de la densificación.

Fuente: Elaboración propia.

Identificación de fallas en el pavimento

Utilizando el software Autodesk AutoCAD, el usuario puede identificar y analizar el deterioro del pavimento en ortofotos y modelos digitales de superficie (DSM) para obtener la información necesaria. Para facilitar el proceso y localizar con precisión cada área de deterioro del pavimento, el área de estudio se dividió, así como en la identificación en campo, en 44 unidades de muestra, con una distancia de 31,5 m entre cada una.

Se requiere la siguiente información para determinar el deterioro del pavimento: ancho, longitud, área, profundidad, ubicación, nivel de severidad y tipos de deterioro del pavimento basados en las imágenes ortomosaicas y los DSM. Valores como el área, la longitud y el número de baches se identificaron en el software, valores que posteriormente pasaron a ser tabulados en una hoja de cálculo de Excel para facilidades de resolución. Para todas las secciones, se aplicó el mismo método para identificar el deterioro del pavimento. La Figura 4 muestra la información necesaria para determinar el deterioro del pavimento.

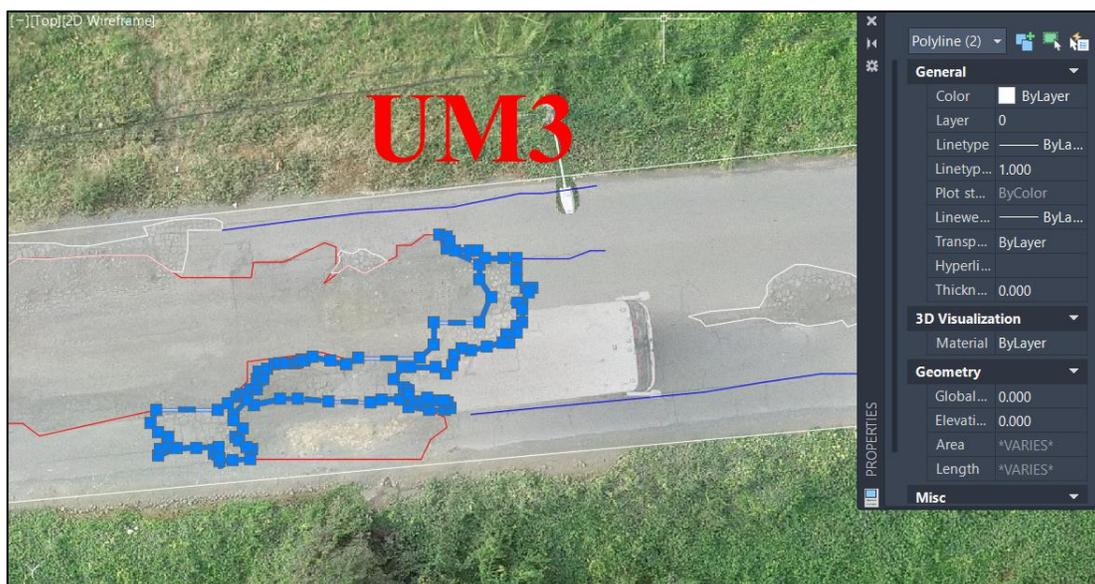


Figura 4. Identificación de áreas y longitudes de fallas por unidad de muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Cálculo Manual del PCI

Los valores de PCI se calcularon según la norma (ASTM D6433) basándose en los procedimientos descritos anteriormente, como se muestra en la Tabla 4.

Cálculo del PCI mediante la fotogrametría aérea

La Tabla 5 presenta los valores del Índice de Condición del Pavimento (PCI) para cada unidad de muestra utilizando la fotogrametría aérea.

La Figura 5 ilustran la tabulación en Excel, desde el ingreso de los datos de campo hasta la etapa final para obtener el índice de condición actual del pavimento (PCI).

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

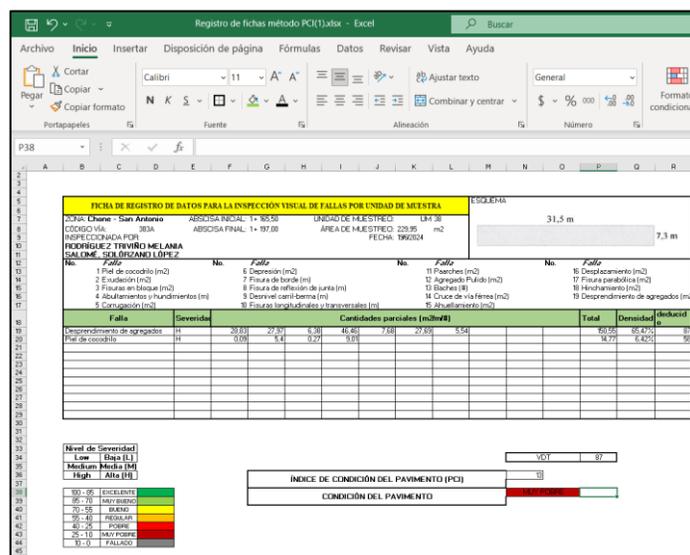


Figura 5. Cálculo del PCI para la UM38 de la Vía San Antonio-Chone.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Valores del PCI por cada unidad de muestra usando los cálculos manuales

Unidad De Muestra (UM)	De Abscisa Inicial	Abscisa Final	Índice De Condición Del Pavimento (PCI)	Condición Del Pavimento
UM1	0 + 000,00	0 + 031,50	41	Regular
UM2	0 + 031,50	0 + 063,00	16	Muy Pobre
UM3	0 + 063,00	0 + 094,50	17	Muy Pobre
UM4	0 + 094,50	0 + 126,00	4	Fallado
UM5	0 + 126,00	0 + 157,50	14	Muy Pobre
UM6	0 + 157,500	0 + 189,00	3	Fallado
UM7	0 + 189,00	0 + 220,50	12	Muy Pobre
UM8	0 + 220,50	0 + 252,00	20	Muy Pobre
UM9	0 + 252,00	0 + 283,50	8	Fallado
UM10	0 + 283,50	0 + 315,00	27	Pobre

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

UM11	0 + 315,00	0 + 346,50	77	Muy Bueno
UM12	0 + 346,50	0 + 378,00	3	Fallado
UM13	0 + 378,00	0 + 409,50	24	Muy Pobre
UM14	0 + 409,50	0 + 441,00	35	Pobre
UM15	0 + 441,00	0 + 472,50	69	Bueno
UM16	0 + 472,50	0 + 504,00	72	Muy Bueno
UM17	0 + 504,00	0 + 535,50	22	Muy Pobre
UM18	0 + 535,50	0 + 567,00	6	Fallado
UM19	0 + 567,00	0 + 598,50	41	Regular
UM20	0 + 598,50	0 + 630,00	4	Fallado
UM21	0 + 630,00	0 + 661,50	22	Muy Pobre
UM22	0 + 661,50	0 + 693,00	19	Muy Pobre
UM23	0 + 693,00	0 + 724,50	23	Muy Pobre
UM24	0 + 724,50	0 + 756,00	12	Muy Pobre
UM25	0 + 756,00	0 + 787,50	11	Muy Pobre
UM26	0 + 787,50	0 + 819,00	19	Muy Pobre
UM27	0 + 819,00	0 + 850,50	22	Muy Pobre
UM28	0 + 850,50	0 + 882,00	22	Muy Pobre
UM29	0 + 882,00	0 + 913,50	24	Muy Pobre
UM30	0 + 913,50	0 + 945,00	4	Fallado
UM31	0 + 945,00	0 + 976,50	3	Fallado
UM32	0 + 976,50	1 + 008,00	2	Fallado
UM33	1 + 008,00	1 + 039,50	8	Fallado
UM34	1 + 039,50	1 + 071,00	37	Pobre
UM35	1 + 071,00	1 + 102,50	4	Fallado
UM36	1 + 102,50	1 + 134,00	32	Pobre
UM37	1 + 134,00	1 + 165,50	35	Pobre
UM38	1 + 165,50	1 + 197,00	13	Muy Pobre
UM39	1 + 197,00	1 + 228,50	19	Muy Pobre
UM40	1 + 228,50	1 + 260,00	4	Fallado

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

UM41	1 + 260,00	1 + 291,50	17	Muy Pobre
UM42	1 + 291,50	1 + 323,00	25	Pobre
UM43	1 + 323,00	1 + 354,50	31	Pobre
UM44	1 + 354,50	1 + 386,00	32	Pobre

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Valores del PCI por cada unidad de muestra usando la fotogrametría aérea

Unidad Muestra (UM)	De Abscisa Inicial	Abscisa Final	Índice De Condición Del Pavimento (PCI)	Condición Del Pavimento
UM1	0 + 000,00	0 + 031,50	41	Regular
UM2	0 + 031,50	0 + 063,00	14	Muy Pobre
UM3	0 + 063,00	0 + 094,50	18	Muy Pobre
UM4	0 + 094,50	0 + 126,00	2	Fallado
UM5	0 + 126,00	0 + 157,50	14	Muy Pobre
UM6	0 + 157,500	0 + 189,00	3	Fallado
UM7	0 + 189,00	0 + 220,50	10	Muy Pobre
UM8	0 + 220,50	0 + 252,00	23	Muy Pobre
UM9	0 + 252,00	0 + 283,50	7	Fallado
UM10	0 + 283,50	0 + 315,00	26	Pobre
UM11	0 + 315,00	0 + 346,50	75	Muy Bueno
UM12	0 + 346,50	0 + 378,00	3	Fallado
UM13	0 + 378,00	0 + 409,50	21	Muy Pobre
UM14	0 + 409,50	0 + 441,00	34	Pobre
UM15	0 + 441,00	0 + 472,50	67	Bueno
UM16	0 + 472,50	0 + 504,00	70	Muy Bueno
UM17	0 + 504,00	0 + 535,50	25	Muy Pobre
UM18	0 + 535,50	0 + 567,00	6	Fallado

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

UM19	0 + 567,00	0 + 598,50	40	Regular
UM20	0 + 598,50	0 + 630,00	4	Fallado
UM21	0 + 630,00	0 + 661,50	22	Muy Pobre
UM22	0 + 661,50	0 + 693,00	17	Muy Pobre
UM23	0 + 693,00	0 + 724,50	23	Muy Pobre
UM24	0 + 724,50	0 + 756,00	12	Muy Pobre
UM25	0 + 756,00	0 + 787,50	12	Muy Pobre
UM26	0 + 787,50	0 + 819,00	18	Muy Pobre
UM27	0 + 819,00	0 + 850,50	22	Muy Pobre
UM28	0 + 850,50	0 + 882,00	21	Muy Pobre
UM29	0 + 882,00	0 + 913,50	24	Muy Pobre
UM30	0 + 913,50	0 + 945,00	5	Fallado
UM31	0 + 945,00	0 + 976,50	3	Fallado
UM32	0 + 976,50	1 + 008,00	2	Fallado
UM33	1 + 008,00	1 + 039,50	9	Fallado
UM34	1 + 039,50	1 + 071,00	35	Pobre
UM35	1 + 071,00	1 + 102,50	4	Fallado
UM36	1 + 102,50	1 + 134,00	33	Pobre
UM37	1 + 134,00	1 + 165,50	38	Pobre
UM38	1 + 165,50	1 + 197,00	12	Muy Pobre
UM39	1 + 197,00	1 + 228,50	20	Muy Pobre
UM40	1 + 228,50	1 + 260,00	4	Fallado
UM41	1 + 260,00	1 + 291,50	17	Muy Pobre
UM42	1 + 291,50	1 + 323,00	27	Pobre
UM43	1 + 323,00	1 + 354,50	33	Pobre
UM44	1 + 354,50	1 + 386,00	32	Pobre

Fuente: Elaboración propia.

Análisis y comparación entre los dos métodos

Esta vía está dividida en 44 unidades de muestra, empezando desde el Sector “La Playita” hasta la “Y” con Chone. El análisis de la carretera utilizando el método de cálculos manuales, arrojó que el

valor más alto de PCI (Índice de Condición del Pavimento) es de 77 en la unidad de muestra 11. La calificación para la UM11 se describe bajo la condición de "muy bueno", mientras que el valor más bajo de PCI es de 2 en la UM32, con una calificación de pavimento "fallado". Al usar el método de la fotogrametría aérea, se observa que el valor más alto de PCI es de 75 en la UM11, y la calificación es "muy bueno". El valor más bajo de PCI es de 2 en las UM4 y UM32, con una calificación de "fallado". La figura 6 y la tabla 6 ilustran la comparación de los valores de PCI entre el cálculo manual y el método de fotogrametría aérea para cada UM en la carretera. El valor de PCI de toda la sección se calcula promediando todos los valores del PCI de ambos métodos, entonces una vez calculado resulta que para cada lado el PCI es de 22, con una coincidente calificación de "muy pobre" en ambos lados.

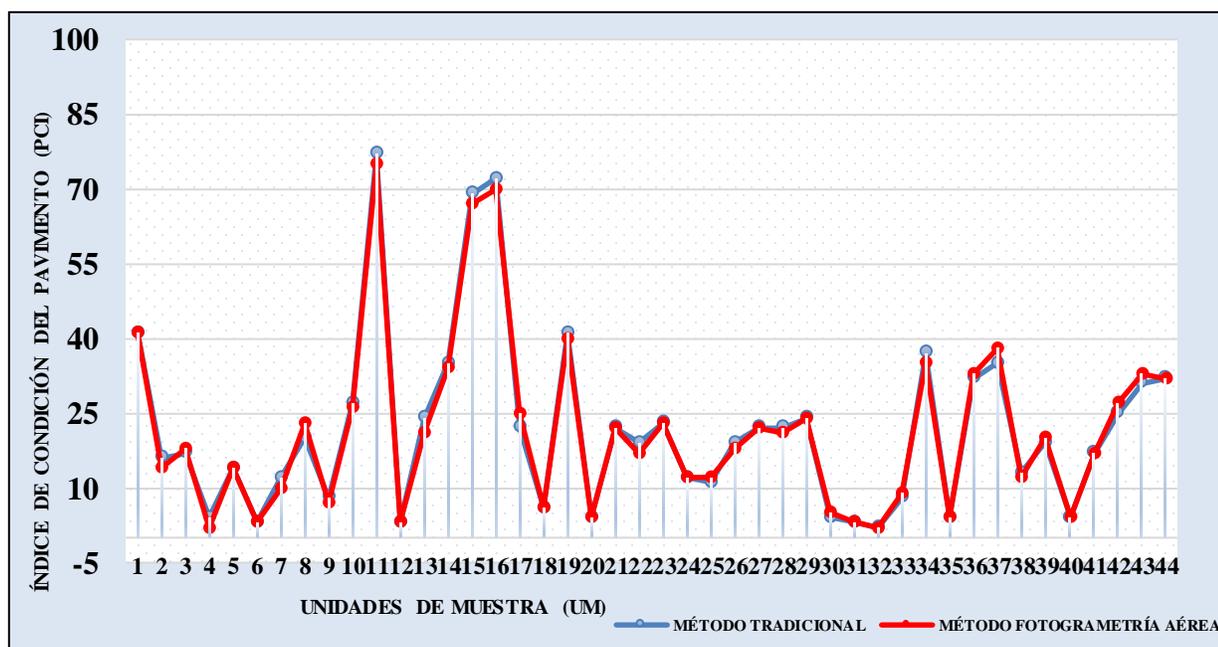


Figura 6. Comparación de los valores del PCI por UM entre los dos métodos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Comparación y diferencia entre valores del PCI de ambos métodos

Unidad Muestra (UM)	Condición De Del Pavimento Tradicional	PCI - Método Tradicional	- Diferencia	PCI - Método Aéreo	Condición Del Pavimento Método Fotogrametría Aérea
	UM1	Regular	41	0	41
UM2	Muy Pobre	16	2	14	Muy Pobre
UM3	Muy Pobre	17	1	18	Muy Pobre
UM4	Fallado	4	2	2	Fallado
UM5	Muy Pobre	14	0	14	Muy Pobre
UM6	Fallado	3	0	3	Fallado
UM7	Muy Pobre	12	2	10	Muy Pobre
UM8	Muy Pobre	20	3	23	Muy Pobre
UM9	Fallado	8	1	7	Fallado
UM10	Pobre	27	1	26	Pobre
UM11	Muy Bueno	77	2	75	Muy Bueno
UM12	Fallado	3	0	3	Fallado
UM13	Muy Pobre	24	3	21	Muy Pobre
UM14	Pobre	35	1	34	Pobre
UM15	Bueno	69	2	67	Bueno
UM16	Muy Bueno	72	2	70	Muy Bueno
UM17	Muy Pobre	22	3	25	Muy Pobre
UM18	Fallado	6	0	6	Fallado
UM19	Regular	41	1	40	Regular
UM20	Fallado	4	0	4	Fallado
UM21	Muy Pobre	22	0	22	Muy Pobre
UM22	Muy Pobre	19	2	17	Muy Pobre
UM23	Muy Pobre	23	0	23	Muy Pobre
UM24	Muy Pobre	12	0	12	Muy Pobre

Evaluación del pavimento flexible mediante método PCI y fotogrametría aérea en la vía San Antonio – Chone

UM25	Muy Pobre	11	1	12	Muy Pobre
UM26	Muy Pobre	19	1	18	Muy Pobre
UM27	Muy Pobre	22	0	22	Muy Pobre
UM28	Muy Pobre	22	1	21	Muy Pobre
UM29	Muy Pobre	24	0	24	Muy Pobre
UM30	Fallado	4	1	5	Fallado
UM31	Fallado	3	0	3	Fallado
UM32	Fallado	2	0	2	Fallado
UM33	Fallado	8	1	9	Fallado
UM34	Pobre	37	2	35	Pobre
UM35	Fallado	4	0	4	Fallado
UM36	Pobre	32	1	33	Pobre
UM37	Pobre	35	3	38	Pobre
UM38	Muy Pobre	13	1	12	Muy Pobre
UM39	Muy Pobre	19	1	20	Muy Pobre
UM40	Fallado	4	0	4	Fallado
UM41	Muy Pobre	17	0	17	Muy Pobre
UM42	Pobre	25	2	27	Pobre
UM43	Pobre	31	2	33	Pobre
UM44	Pobre	32	0	32	Pobre

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El análisis detallado de los valores de PCI obtenidos por ambos métodos revela patrones importantes en la evaluación de pavimentos y la eficacia de la fotogrametría aérea en el diagnóstico de su estado. La correlación observada entre los métodos indica que, aunque la tecnología basada en fotogrametría aérea no reemplaza completamente la precisión del método tradicional manual, sí puede ofrecer resultados altamente consistentes en términos de categorización de la condición del pavimento. Esto se traduce en una herramienta valiosa para el mantenimiento vial, donde la precisión y la eficiencia son esenciales.

En cuanto a la precisión, los resultados muestran que las diferencias en PCI entre ambos métodos son mínimas en la mayoría de las UM, y en los casos donde existe una disparidad, esta no altera significativamente la clasificación final del pavimento. Por ejemplo, en UM8, UM13, UM17 y UM37, la diferencia en PCI alcanza hasta 3 puntos, pero esto no cambia la categoría de "Muy Pobre" o "Pobre" en UM37 a otra clasificación, lo que subraya la solidez del método de fotogrametría aérea para obtener resultados comparables.

Es importante destacar que la fotogrametría aérea ofrece una ventaja considerable en términos de velocidad y alcance geográfico, especialmente en tramos viales de gran extensión o en aquellos donde el acceso terrestre es difícil o representa riesgos para el personal de campo. La captura de imágenes aéreas permite recopilar datos de manera rápida, lo que a su vez facilita una evaluación expedita del estado del pavimento, permitiendo a los equipos de mantenimiento priorizar las áreas que requieren intervención sin demoras significativas. En la vía San Antonio – Chone, caracterizada por sus extensos tramos y áreas rurales, esta metodología permite optimizar recursos al minimizar la necesidad de inspecciones físicas.

Otro aspecto a considerar es la potencial repetibilidad y estandarización que ofrece la fotogrametría aérea. A diferencia del método manual, que puede estar sujeto a variaciones en los criterios de evaluación de los inspectores, la fotogrametría proporciona un registro visual constante que facilita el seguimiento en el tiempo y permite comparar condiciones del pavimento a intervalos regulares con un menor margen de error humano.

Aun así, hay limitaciones en el uso de la fotogrametría aérea, especialmente cuando se requiere un análisis detallado de fisuras finas o deterioros menores que pueden no ser capturados con precisión en imágenes aéreas de alta escala. En UM donde la condición del pavimento es "Fallado" o "Muy Pobre", algunos defectos como pequeñas grietas, ondulaciones leves o desgastes superficiales pueden no detectarse de manera tan precisa como en la inspección manual. Por ello, la integración de ambos métodos es recomendable para obtener un diagnóstico integral, sobre todo en proyectos donde la rehabilitación del pavimento es prioritaria y se requiere un detalle fino de los defectos estructurales.

Conclusiones

La fotogrametría aérea ha demostrado ser un método confiable y eficiente para la evaluación del pavimento flexible en la vía San Antonio – Chone, obteniendo resultados comparables con el método tradicional respaldado por el manual ASTM D6433. La diferencia de valores de PCI entre ambos

métodos es generalmente menor a 3 puntos, y en la mayoría de las Unidades de Muestra (UM), los valores de PCI son idénticos o presentan una variación mínima, lo cual confirma la precisión y consistencia del método de fotogrametría aérea. Esta herramienta permite una evaluación más rápida y menos dependiente de intervención manual, lo que resulta particularmente beneficioso en proyectos de gran escala o en áreas de difícil acceso, reduciendo significativamente el tiempo y los costos de inspección, en este caso el tiempo de vuelo que se tomó el VANT para obtener la ortofoto completa de la vía fue de 21 minutos, esto sin contar el posterior procesamiento de los datos que fue un tiempo corto comparado a que la evaluación en campo mediante el método tradicional tardó tres días (en las tardes). Esto contribuye a optimizar recursos, facilitando el monitoreo de tramos largos de pavimento y permitiendo una cobertura más amplia con menos recursos humanos.

El análisis global de la carretera dio como resultado una calificación de PCI de 22 para ambos métodos, clasificando la condición del pavimento de toda la sección como "muy pobre". Este valor tan bajo se debe a la presencia de diversas fallas significativas, tales como grietas extensas, deformaciones, baches, y desintegración del pavimento, que impactan negativamente en la integridad estructural y funcionalidad de la vía. Estas fallas reducen considerablemente el índice de PCI y requieren intervenciones de mantenimiento urgente para evitar un deterioro mayor que afecte la seguridad y el confort de los usuarios.

La fotogrametría aérea demostró ser especialmente útil en la detección de estas fallas, lo que permite a las agencias de infraestructura obtener una visión precisa del estado de la vía y priorizar adecuadamente las intervenciones de mantenimiento. La combinación de ambas metodologías podría ser útil para aumentar la precisión de los datos en futuros proyectos, especialmente en carreteras de alta relevancia. Además, este estudio resalta el potencial de la fotogrametría aérea para aplicarse en otros tipos de pavimentos y en diferentes condiciones climáticas, extendiendo su utilidad a una variedad de escenarios de infraestructura vial. La fotogrametría aérea no solo optimiza el tiempo y recursos en el corto plazo, sino que también permite planificar inspecciones más frecuentes y detalladas, anticipando el deterioro antes de que se convierta en un problema crítico, lo cual reduce costos de mantenimiento a largo plazo. En conclusión, la fotogrametría aérea representa una metodología práctica, segura y precisa para el monitoreo de pavimentos, siendo una opción altamente viable para la gestión del mantenimiento vial presente y futura.

Referencias

1. American Society for Testing and Materials (ASTM), (2004), Procedimiento Estándar para la Inspección del Índice de Condición del Pavimento en Caminos y Estacionamientos, D6433 – 03
2. Carretero Segarra, S. (2015). Modelos digitales del terreno mediante fotogrametría aérea realizada con un Vehículo Aéreo No Tripulado. [Tesis para Título Profesional, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/37590/1/PFC_Soledad_Carretero_Segarra.pdf
3. Guzmán, A. (2017). La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento económico de un sector. Universidad de Piura, 1-5.
4. Miranda Rebolledo, R. J. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. [Tesis para Título Profesional, Universidad Austral de Chile]. <https://acortar.link/8DcXoO>
5. Paredes Asalde, C. R., Torres Alcántara, Y. S. (2022). Evaluación del pavimento-flexible-mediante-métodos-del PCI-y-VIZIR con dron en-un-tramo-de la-carretera-Reposo – Saramiriza, Bagua, Amazonas, para una propuesta de mejora - 2022. [Tesis para Título Profesional, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/LWVJls>
6. Vásquez Varela, L. (2020). Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. ingepav, p.12. Recuperado el 14 de 06 de 2022, de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf>.