

Evaluation of the condition of flexible pavement using automated inspection techniques: PCI and IRI mountain road study

Jan Ney de los Santos Avellaneda Rodas , Maria Y. Garcia-Alvarez 
u19221518@utp.edu.pe, c19447@utp.edu.pe,
Universidad Tecnológica del Perú

Abstract– Reliable assessment of the condition of flexible pavements is a fundamental aspect of road asset management, especially on mountain roads, where geometric, climatic, and operational conditions accelerate deterioration. Traditionally, this assessment has relied on visual inspections and the isolated use of indicators such as the Pavement Condition Index (PCI), which can lead to partial diagnoses and inefficient maintenance decisions. This study evaluates the condition of a toll road on a mountain highway through the integrated analysis of the PCI and the International Roughness Index (IRI), employing automated inspection techniques based on high-resolution, continuous-capture instrumented systems. The proposed approach allows for the simultaneous evaluation of surface deterioration and the functional performance of the pavement at the network scale. The results of the case study demonstrate a weak correlation between the two indicators, confirming that they represent distinct deterioration mechanisms and that their independent application is insufficient for comprehensive road management. As its main contribution, the research provides empirical evidence in a high mountain environment under real operation, demonstrating that the integration of traditional indicators with automated inspection technologies offers a more solid technical basis for decision-making in performance-oriented maintenance schemes and proposing a periodic conservation plan, aligning road management with safety, comfort and sustainability objectives.

Keywords– Flexible pavement, automated inspection, laser technology, PCI, IRI.

Evaluación de la condición del pavimento flexible mediante técnicas de inspección automatizada: Estudio en carretera de montaña PCI e IRI

Jan Ney de los Santos Avellaneda Rodas , Maria Y. Garcia-Alvarez 
u19221518@utp.edu.pe, c19447@utp.edu.pe,
Universidad Tecnológica del Perú

Resumen— La evaluación confiable del estado de los pavimentos flexibles constituye un aspecto fundamental de la gestión de activos viales, especialmente en carreteras de montaña, donde las condiciones geométricas, climáticas y operativas aceleran la curva de deterioro. Tradicionalmente, dicha evaluación se ha basado en inspecciones visuales y en el uso aislado de indicadores como el Índice de Condición del Pavimento (PCI), lo que puede derivar en diagnósticos parciales y decisiones de mantenimiento poco eficientes. El presente estudio evalúa el estado de una carretera de montaña concesionada mediante el análisis integrado del PCI y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), empleando técnicas de inspección automatizada basadas en sistemas instrumentados de captura continua y alta resolución. El enfoque propuesto permite evaluar de manera simultánea el deterioro superficial y el desempeño funcional del pavimento a escala de red. Los resultados del estudio de caso evidencian una débil correlación entre ambos indicadores, lo que confirma que representan mecanismos de deterioro distintos y que su aplicación independiente resulta insuficiente para una gestión vial integral. Como principal aporte, la investigación proporciona evidencia empírica en un entorno de alta montaña bajo operación real, demostrando que la integración de indicadores tradicionales con tecnologías de inspección automatizada ofrece una base técnica más sólida para la toma de decisiones en esquemas de mantenimiento orientados al desempeño y proponiendo un Plan de conservación periódico, alineando a la gestión vial con objetivos de seguridad, confort y sostenibilidad.

Palabras clave— Pavimento flexible, inspección automatizada, tecnología láser, PCI, IRI.

I. INTRODUCCIÓN

Las infraestructuras viales desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico y la integración territorial, por lo que garantizar su adecuado performance constituye una prioridad para los sistemas modernos de gestión de activos. En este contexto, los pavimentos flexibles son ampliamente utilizados debido a su adaptabilidad estructural y eficiencia económica; sin embargo, se encuentran expuestos a cargas repetitivas de tráfico, variabilidad climática y condiciones geométricas complejas que aceleran su deterioro superficial y funcional, incrementando los costos del ciclo de vida de la infraestructura.

El deterioro progresivo de los pavimentos constituye uno de los principales desafíos para la gestión de la infraestructura vial, debido a su impacto directo en la seguridad, los costos de operación vehicular y la sostenibilidad económica de los sistemas de transporte. Tradicionalmente, la evaluación del estado de los pavimentos se ha basado en inspecciones visuales y métodos manuales, los cuales, si bien son ampliamente aceptados, presentan limitaciones asociadas a la subjetividad

del evaluador, la alta demanda de tiempo y la exposición del personal a condiciones de riesgo en campo [1].

En los últimos años, el avance de las tecnologías de sensado, visión computacional y aprendizaje automático ha impulsado el desarrollo de sistemas automatizados para la inspección de pavimentos. Estudios recientes reportan que el uso de vehículos instrumentados con cámaras de alta resolución, sensores láser y sistemas inerciales permite identificar de forma objetiva fisuras, deformaciones y otros tipos de deterioro superficial, logrando niveles de precisión superiores a los métodos convencionales y reduciendo significativamente los costos operativos [2].

La gestión vial basada en la medición de niveles de servicio requiere indicadores confiables que permitan caracterizar el estado del pavimento y priorizar intervenciones de mantenimiento de manera costo-efectiva. Entre los más empleados se encuentran el Índice de Condición del Pavimento (PCI), que evalúa cuantitativamente el deterioro superficial conforme a la norma ASTM D6433, y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), derivado del perfil longitudinal de la vía según ASTM E950 y estrechamente vinculado con el confort del usuario y los costos operativos vehiculares [3]. Tradicionalmente, ambos indicadores han sido utilizados de forma complementaria para respaldar la toma de decisiones en la gestión de pavimentos.

El índice de condición del pavimento (PCI) es uno de los indicadores más utilizados a nivel internacional para evaluar el estado superficial de pavimentos, debido a su capacidad para integrar distintos tipos de deterioro en una escala normalizada de 0 a 100. No obstante, diversos autores señalan que la aplicación tradicional del PCI mediante inspecciones visuales está sujeta a variabilidad interevaluador, lo que puede generar inconsistencias en los resultados y afectar la priorización de intervenciones [1].

Con el fin de superar estas limitaciones, investigaciones recientes han incorporado técnicas de procesamiento digital de imágenes y redes neuronales convolucionales (CNN) para la detección automática de fisuras, desprendimientos y escalonamientos en pavimentos. La integración de algoritmos de aprendizaje profundo con procedimientos de cálculo estandarizados del PCI permite alcanzar precisiones del orden del 90–95 %, garantizando además la compatibilidad con normas internacionales como ASTM D6433 y AASHTO R85 [1]. De manera complementaria, otros estudios destacan que

estos sistemas automatizados facilitan la generación de bases de datos extensas y reproducibles, fundamentales para el desarrollo de modelos predictivos de deterioro [4].

Asimismo, el empleo de plataformas móviles y soluciones de bajo costo, como cámaras instaladas en vehículos o dispositivos móviles, ha ampliado el alcance de la inspección automatizada, permitiendo su aplicación en redes viales urbanas y rurales. Estas metodologías han mostrado resultados comparables e incluso superiores a los de inspecciones tradicionales, consolidándose como alternativas confiables para la evaluación objetiva del estado del pavimento. Estudios recientes reportan que los sistemas automatizados basados en sensores láser y visión computacional permiten identificar deterioros superficiales con alta precisión y consistencia, reduciendo la subjetividad inherente a la inspección visual y optimizando los procesos de gestión vial [1], [2], [4].

Los resultados obtenidos confirman que la evaluación del estado de pavimentos en carreteras de montaña no puede abordarse de manera confiable mediante un único indicador. La baja correlación observada entre el PCI y el IRI evidencia que ambos índices responden a mecanismos de deterioro distintos: mientras el PCI describe predominantemente el daño superficial visible, el IRI captura el efecto funcional acumulado de irregularidades longitudinales sobre la experiencia del usuario. Esta divergencia es particularmente relevante en entornos de montaña, donde la geometría vial, las pendientes pronunciadas y las condiciones climáticas aceleran procesos de deterioro funcional que no siempre se reflejan de forma inmediata en el estado superficial.

Desde una perspectiva de gestión vial, estos hallazgos cuestionan los enfoques tradicionales de mantenimiento basados en umbrales únicos o en la priorización exclusiva de indicadores visuales. En el contexto analizado, el uso aislado del PCI podría conducir a decisiones tardías o ineficientes, al no identificar oportunamente tramos con pérdida significativa de confort y seguridad operacional. En contraste, la incorporación simultánea del IRI permite anticipar intervenciones preventivas antes de que el deterioro superficial alcance estados críticos, optimizando así la asignación de recursos y reduciendo riesgos contractuales asociados a penalidades por incumplimiento de niveles de servicio.

La aplicación de técnicas de inspección automatizada desempeña un rol clave en este esquema híbrido de evaluación. La captura objetiva y repetible de datos mediante sistemas instrumentados no solo reduce la subjetividad inherente a las inspecciones visuales, sino que también facilita la integración consistente de indicadores superficiales y funcionales a escala de red. En el caso de estudio, esta integración permitió identificar patrones de deterioro que no habrían sido detectados mediante evaluaciones convencionales, reforzando la utilidad operativa de la tecnología como soporte a la toma de decisiones.

En términos de aporte, el estudio demuestra que la combinación de PCI, IRI e inspección automatizada constituye una herramienta eficaz para la gestión de pavimentos flexibles en carreteras de montaña, especialmente bajo esquemas contractuales orientados al desempeño. Más que sustituir los métodos tradicionales, el enfoque propuesto los complementa, proporcionando una base técnica más robusta para la priorización de intervenciones y la planificación del mantenimiento. En consecuencia, los resultados respaldan la necesidad de adoptar modelos de evaluación integrados que reflejen tanto el estado físico del pavimento como su desempeño funcional, alineando la medición técnica con los objetivos de seguridad, confort y sostenibilidad de la infraestructura vial.

A pesar de estos avances, persisten vacíos en la comprensión de la relación entre los indicadores superficiales y funcionales del pavimento, particularmente en carreteras de montaña donde la geometría vial, las pendientes pronunciadas y las condiciones ambientales pueden alterar el comportamiento esperado de estas métricas. Investigaciones recientes han analizado la correlación entre PCI e IRI, reportando distintos niveles de asociación según el contexto operativo de la vía [5], [6]. No obstante, la evidencia empírica en corredores de alta montaña sigue siendo limitada, especialmente cuando se emplean tecnologías de inspección automatizada de alta resolución.

En este marco, el presente estudio evalúa de manera integrada la condición superficial y funcional del pavimento flexible en el subtramo Cutervo–Cochabamba, ubicado en la sierra norte del Perú, utilizando tecnología de inspección láser y los indicadores PCI e IRI. La investigación busca determinar el comportamiento conjunto de estas métricas en un entorno orográfico exigente y generar evidencia que contribuya a mejorar los criterios técnicos para la gestión de pavimentos.

La principal contribución del estudio radica en proporcionar evidencia empírica sobre la relación entre la condición superficial y la rugosidad funcional en una carretera de alta montaña, así como en demostrar el potencial de las tecnologías de inspección no destructiva para apoyar estrategias de mantenimiento más informadas. Los resultados ofrecen un enfoque replicable para infraestructuras viales con características geométricas y climáticas similares, aportando al fortalecimiento de la gestión sostenible de activos viales.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en el subtramo Cutervo–Cochabamba, Región Cajamarca, ubicado en la sierra norte del Perú. Este subtramo forma parte de la Carretera Longitudinal de la Sierra, Tramo 02 concesionado a la empresa Concesionaria Vial Sierra Norte S.A. y adjudicado bajo el esquema de Asociación Público-Privada (APP) por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y ProInversión en el año 2014.

III. METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque cuantitativo basado en inspección no destructiva automatizada, integrando técnicas de escaneo láser de alta resolución, procesamiento digital de datos y análisis normativo para la evaluación simultánea de la condición superficial y funcional de un pavimento flexible. La metodología fue diseñada para garantizar objetividad, repetibilidad y trazabilidad de los resultados, siguiendo estándares internacionales ampliamente aceptados en la gestión de pavimentos. Este sistema de recolección de datos incluye dispositivos de hardware impulsados por Inteligencia artificial (IA) en vehículos para recopilar simultáneamente información multimedia sobre el pavimento, incluyendo cámaras de derecho de paso (ROW) y sistemas avanzados de imágenes láser [7]. Los parámetros asociados al PCI que se midieron son los deterioros superficiales (baches, piel de cocodrilo, fisuras, ahuellamiento, etc.) y para el indicador IRI los perfiles longitudinales. Estos parámetros se encuentran previstos en el Contrato de Concesión.

A. Diseño metodológico

La investigación se estructuró en cuatro etapas principales:

- i. Inventario Vial Básico. Etapa previa a la recolección de datos. Consiste en la determinación de las características geométricas, funcionales y técnicas del subtramo.
- ii. Relevamiento de datos. Se usa el sistema láser LCMS para el registro automático de los deterioros y de los perfiles longitudinales del pavimento.
- iii. Procesamiento de Información. La data de deterioros almacenada en el LCMS se exporta a través de imágenes y perfiles usando el software Road Inspect, mediante técnicas de segmentación, detección de bordes y reconocimiento de patrones geométricos para la evaluación de daños y para el caso de la evaluación funcional, se calcula el IRI a partir de perfiles longitudinales medidos con láser de alta precisión complementado con los datos de la velocidad y la vibración del vehículo sobre el que se monta el LCMS. Los valores PCI de las unidades muestrales se calculan mediante el software EVALPAV y el cálculo del IRI medio deslizante máximo en hojas de cálculo de excel, al amparo del marco normativo de la ASTM D-6433 y la ASTM E 950 respectivamente.
- iv. Plan de Conservación vial. Propuesta de intervención del pavimento a nivel de mantenimiento periódico, con la finalidad de preservar su vida útil, para garantizar el cumplimiento de los Niveles de servicio y la seguridad y confort de los usuarios.

B. Inventario Vial

La longitud total evaluada fue de 29.39 km, de los cuales se excluyeron sectores no asfaltados y zonas urbanas para evitar distorsiones en el análisis de los indicadores. El pavimento está compuesto por capas granulares de base y subbase, y una

carpeta asfáltica en caliente, representativa de carreteras flexibles en corredores interandinos. Estas características convierten al tramo en un caso de estudio adecuado para analizar el comportamiento conjunto de indicadores superficiales y funcionales en entornos geométricamente exigentes.

Las características geométricas de la vía corresponden a una carretera de segunda clase con velocidad directriz entre 40 y 60 km/h, radio mínimo de 30 m. Cuenta con 02 carriles de 3.5 m para el tránsito vehicular, sin separador central, con tráfico en sentido contrario, y con bermas de 0.4 m, haciendo un ancho total de plataforma (calzada más bermas) de 7.8 m.

El pavimento de este subtramo está constituido por una subbase y base granular de 0.20 m cada una y una carpeta asfáltica en caliente de 0.075 m.

Adicionalmente, existe un eficiente sistema de drenaje pluvial y subterráneo compuesto por alcantarillas TMC, cunetas, subdrenes, badenes y puentes. Sus dispositivos de tránsito lo conforman las señales reglamentarias, preventivas e informativas, barreras de seguridad, hitos kilométricos y señalización de tipo horizontal como marcas en el pavimento y tachas bidireccionales.

C. Índice de Condición del Pavimento (PCI)

La recolección de datos se realizó utilizando un sistema automatizado Laser Crack Measurement System (LCMS), montado sobre un vehículo de inspección móvil. El sistema integra escáneres láser de alta frecuencia, cámaras de alta resolución, acelerómetros, odómetro y sistema de posicionamiento global (GPS), permitiendo la captura simultánea de imágenes superficiales y perfiles longitudinales del pavimento en un solo recorrido.

El cálculo del PCI se realizó conforme a la norma ASTM D6433-07. Para ello, se definieron Unidades de Muestreo (UM) cada 50 metros de longitud y 195 m² de área, generando un total de 531 UM de pavimento flexible por carril, excluyendo sectores no asfaltados y la zona urbana de Cutervo que cuenta con pavimento rígido. Las mediciones se realizaron en condiciones climáticas favorables y a velocidades de operación controladas, garantizando la calidad y continuidad de los datos. Todos los registros fueron georreferenciados para asegurar la trazabilidad espacial de los resultados y facilitar análisis posteriores, utilizando el sistema LCMS del fabricante canadiense Pavemetrics, de acuerdo con el siguiente esquema:



Fig. 1 Esquema de medición.

El LCMS incorpora dos escáneres láser de alta frecuencia (28,000 perfiles por segundo), cámaras de alta velocidad y algoritmos de inteligencia artificial para obtener imágenes 2D y 3D de alta resolución, registrar perfiles transversales con una precisión de 1 mm en anchos de hasta 4 m, pudiendo operar a velocidades de hasta 100 km/h. Estas imágenes registradas son procesadas con el software Road Inspect, del mismo proveedor identificando automáticamente deterioros como fisuras, baches, desprendimientos, deformaciones y macrotexturas, asignando a cada deterioro una clasificación por tipo, grado de severidad y su densidad o tamaño.

El procesamiento de datos para obtener las puntuaciones PCI se realizó con el software EVALPAV, cuyo procedimiento esta normado en el Manual de Carreteras: Evaluación del Estado del Pavimento Flexible (DG-2018-MTC/14), emitido por el MTC en el que se establece el uso del método PCI del ASTM D6433 para la evaluación del estado superficial, así como en la Norma Técnica Peruana NTP 399.612-1:2017, basada en la ASTM D6433, la cual define la forma de calificar los pavimentos mediante el PCI, y es referenciada en proyectos públicos. Dado que el propietario de la infraestructura vial es el Estado peruano representado por el MTC que actúa como Concedente, se utiliza este software oficial para procesar el PCI.

D. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

Simultáneamente con el relevamiento de deterioros superficiales del pavimento, se ejecutó la medición de los perfiles longitudinales del pavimento utilizando el mismo equipo LCMS sin exceder la velocidad de operación de 80 Km/h. Este perfilómetro láser de Clase 1 cuenta con un odómetro de precisión, acelerómetro y sistema GPS, permitiendo la obtención del IRI en dos huellas (izquierda y derecha) mediante el modelo matemático del “Quarter Car”.

El equipo LCMS se calibró in situ por el operador antes de realizar las mediciones en campo para su aceptación o ajustes de acuerdo con las especificaciones del fabricante y utilizando el software provisto para dicho fin. Una vez realizado con éxito el procedimiento de calibración interno establecido por el fabricante, el equipo se consideró calibrado en cumplimiento con las especificaciones Clase 1 establecidas por el Banco Mundial y la norma ASTM E-950.

Los datos de IRI fueron calculados en tramos acumulados de 100 m y luego agregados en ventanas móviles de 1 km, tal como establece en el Manual de niveles de servicio del contrato de concesión. Este enfoque permite determinar el valor de IRI Medio Deslizante Máximo (IRI MD) y verificar su conformidad respecto a los umbrales contractuales.

Con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados, se aplicaron procedimientos de control de calidad durante la adquisición y procesamiento de los datos, incluyendo la calibración del sistema de inspección, la verificación de la continuidad de los registros y la exclusión de sectores con singularidades geométricas o constructivas.

Todos los datos fueron georreferenciados y auditados para garantizar trazabilidad y reproducibilidad. Es muy importante mencionar que los sectores con singularidades (intersecciones, zonas urbanas, sectores no asfaltados y obras temporales) fueron excluidos del análisis para evitar sesgos.

La metodología adoptada es reproducible y escalable, lo que permite su aplicación en otros corredores viales con características similares, fortaleciendo su utilidad como herramienta de apoyo a sistemas de gestión de pavimentos basados en datos objetivos y tecnologías de inspección avanzada.

IV. RESULTADOS

La evaluación superficial del subtramo Cutervo–Cochabamba permitió capturar y analizar una gran cantidad de datos de deterioros provenientes de 531 unidades muestrales (UM) por carril, para una longitud efectiva de 26.55 km de pavimento flexible, descontando los 2.84 km de los sectores no asfaltados y 1.75 km de la zona urbana de Cutervo.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos del procesamiento del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

A. Caracterización de fallas superficiales

Los deterioros más frecuentes identificados mediante el sistema LCMS fueron el desprendimiento de agregados, el pulimiento de agregados (peladuras), las grietas longitudinales y transversales, parcheo o baches y piel de cocodrilo en metros con poca incidencia considerando la longitud del subtramo evaluado. Estos resultados evidencian la capacidad de los sistemas de inspección automatizada para identificar y cuantificar deterioros superficiales de manera objetiva y reproducible. Investigaciones recientes destacan que la integración de sensores de alta resolución y algoritmos avanzados de procesamiento de datos permite una caracterización detallada de fisuras, deformaciones y otros daños del pavimento, fortaleciendo la confiabilidad de los indicadores empleados en la gestión vial [2], [5].:

TABLA I
RESUMEN DE DETERIOROS

Tipo de deterioro	Und. de medida	Metrado
Piel de cocodrilo	m2	1,309.48
Exudación	m2	34.60
Grietas de borde	m	944.80
Grietas longitudinales y transversales	m	1,918.70
Pulimiento de agregados	m2	38,504.44
Parcheo	m2	1,418.72
Ahuellamiento	m2	312.80
Desprendimiento de agregados	m2	86,721.80

Fuente: Elaboración Propia

Estos deterioros fueron clasificados por tipo y severidad, y con una cuantificación precisa del área o longitud afectada. En general, la distribución de deterioros presenta baja densidad y

se concentra en segmentos específicos del subtramo, lo cual es atribuible a las condiciones geométricas de la vía y al perfil longitudinal (pendiente) de la carretera, debido a que se encuentran en curvas cerradas cuando se trata de PCI bajos en ambos carriles, o en un solo carril cuando se ingresa en descenso a curvas de mayor radio, o en tangentes cuando están por cruzar alguna estructura de drenaje como un badén o una alcantarilla, o en una zona urbana como el ingreso a la ciudad de Cutervo, debido principalmente al derrape que genera el frenado de los vehículos o al arrastre de material granular que ocasiona mayor contacto entre los neumáticos y la superficie de rodadura generando deterioros.

Todos los deterioros superficiales superan los niveles contractuales permitidos porque su porcentaje de tolerancia es 0%, pero se pueden corregir porque al detectarse por el supervisor de la infraestructura vial (Regulador) se notifican otorgando unos plazos para subsanarlos antes de la aplicación de penalidades.

B. Índice de Condición del Pavimento (PCI)

Los valores promedio de PCI fueron los siguientes:

TABLA II
 RESULTADOS PCI POR CARRIL ST02 – RYM

Condición	UM Carril 1 - LD		UM Carril 2 - LI	
	Cant.	%	Cant.	%
Excelente	39	7.3%	170	32.0%
Muy Bueno	418	78.7%	277	52.2%
Bueno	60	11.3%	49	9.2%
Dañado	13	2.4%	33	6.2%
Muy dañado	1	0.2%	2	0.4%
Con daño severo	0	0.0%	0	0.0%
Colapsado	0	0.0%	0	0.0%
Total UM	531		531	
PCI	78	Muy Bueno	77	Muy Bueno

Fuente: Elaboración Propia

Los valores del PCI promedio en ambos carriles muestran que el pavimento se califica como Muy Bueno a pesar de la existencia de unidades muestrales (UM) con PCI menores a 50. Se detecta que el carril izquierdo presenta más deterioros que el carril derecho porque los PCI de las UM están más dispersos y existen hasta 35 UM con calificaciones desde Dañado a Muy dañado.

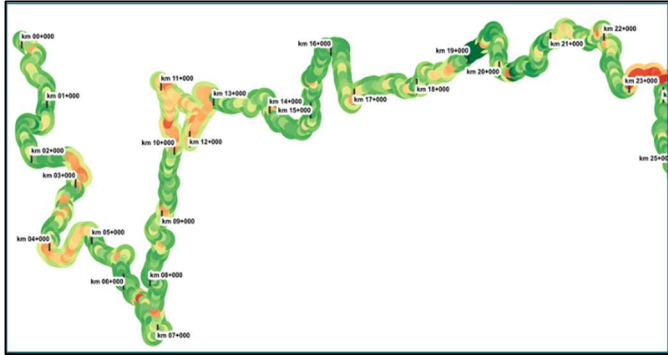


Fig. 2 Mapa de Calor del PCI – UM @ 50 m.

El análisis visual del mapa de calor del PCI en la vía determinó que su geometría y el perfil longitudinal (pendiente) obtenido en estos sectores se relacionan con la ubicación de las UM con calificaciones Dañado y Muy dañado en los sectores de curvas, zonas urbanas o incluso en tangentes con 5% de pendiente en cruce con estructuras de drenaje como badenes y alcantarillas.

Así mismo, se analizaron los resultados del PCI por kilómetro, y en la que se ratifica la condición superficial de pavimento (PCI) Muy bueno como promedio en toda la plataforma.

La variación de los resultados PCI en el carril izquierdo es mayor que en el carril derecho por lo que se infiere que dada la mayor variabilidad o desviación estándar de los PCI de las UM es el carril que requiere mayor atención para las actividades de conservación. En la tabla e imagen siguiente se muestra esta condición.

TABLA III
 RESULTADOS PCI POR KM - CARRIL Y KM – PROMEDIO

PK Inicial	PK Final	PCI - LD	PCI - LI	PCI Prom	Condición
00+000	01+000	80	79	79.5	Muy Bueno
01+000	02+000	80	83	81.5	Muy Bueno
02+000	03+000	81	69	75	Muy Bueno
03+000	04+000	80	71	75.5	Muy Bueno
04+000	05+000	69	71	70	Muy Bueno
05+000	06+000	75	84	79.5	Muy Bueno
06+000	07+000	79	82	80.5	Muy Bueno
07+000	08+000	76	83	79.5	Muy Bueno
08+000	09+000	80	82	81	Muy Bueno
09+000	10+000	77	83	80	Muy Bueno
10+000	11+000	65	71	68	Bueno
11+000	12+000	68	71	69.5	Bueno
12+000	13+000	69	69	69	Bueno
13+000	14+000	79	83	81	Muy Bueno
14+000	15+000	82	77	79.5	Muy Bueno
15+000	16+000	81	83	82	Muy Bueno
16+000	17+000	82	79	80.5	Muy Bueno
17+000	18+000	80	77	78.5	Muy Bueno
18+000	19+000	77	76	76.5	Muy Bueno
19+000	20+000	90	74	82	Muy Bueno
20+000	21+000	88	75	81.5	Muy Bueno
21+000	22+000	69	84	76.5	Muy Bueno
22+000	23+000	78	81	79.5	Muy Bueno
23+000	24+000	83	58	70.5	Muy Bueno
24+000	25+000	82	83	82.5	Muy Bueno
25+000	26+000	75	77	76	Muy Bueno
26+000	27+000	79	79	79	Muy Bueno
27+000	28+000	80	78	79	Muy Bueno
28+000	29+000	67	65	66	Bueno
29+000	29+390	83	74	78.5	Muy Bueno

Fuente: Elaboración Propia

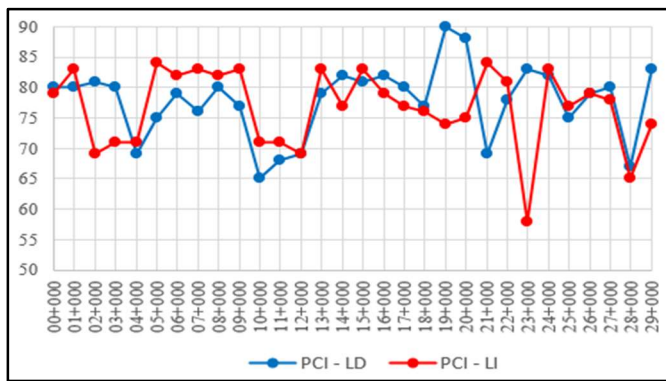


Fig. 3 PCI por km - carril.

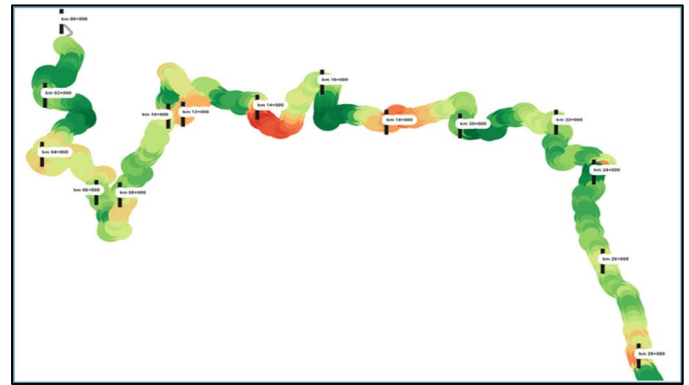


Fig. 5 Mapa de Calor del IRI MD @100 m.

C. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

El IRI es un indicador de la condición funcional y resulta fundamental para la toma de decisiones en la gestión de los activos viales y la programación del mantenimiento vial a fin de garantizar el confort y la seguridad en la conducción[8]. El proceso de evaluación de los perfiles longitudinales se realizó simultáneamente con la recolección de imágenes de los deterioros, cumpliendo los estándares de la norma ASTM E950 y los procedimientos definidos en el contrato de concesión.

En las figuras siguiente se muestra el IRI Promedio y permite visualizar los sectores en los que las métricas exceden el umbral de los 3.5 m/km, apreciándose que en el carril izquierdo (línea en rojo) existen más desviaciones. Se aprecian que los valores IRI del carril izquierdo superan el límite de 3.5 entre los km 3 y Km 4, Km 7 y km 8, Km 10 y km 11, Km 14 y km 15, km 17 y km 18, km 19 y km 20 y km 27 y km 28, mientras que los valores IRI del carril derecho (línea azul) sólo tienen picos que apenas superan este umbral entre el Km 9 y km 11, Km 17 y km 18 y km 27 y Km 28.

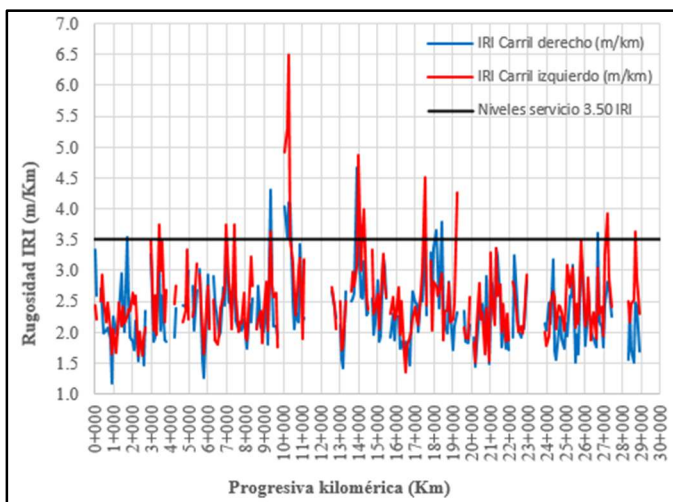


Fig. 4 Rugosidad IRI Promedio intervalo @ 100 m.

De acuerdo con el Contrato de Concesión los resultados del IRI promedio no aplican para la medición de los niveles de servicio, sino se utiliza como métrica contractual el IRI Medio deslizante máximo aplicado a intervalos de 1 km que permite mostrar una lectura más equilibrada porque suaviza la presencia de datos extremos mostrando valores promedio móviles más homogéneos en cada kilómetro evaluado.

El IRI Medio deslizante máximo (IRI MD) se calcula en base a los valores del IRI promedio por carril cada 100 m, que se muestra en la figura 5, excluyendo las singularidades permitidas como sectores en afirmado, gibas, badenes, etc., para finalmente obtener un IRI MD promedio por kilómetro acotado a la progresiva kilométrica.

En la tabla y gráfico siguiente se muestran los resultados de este indicador según el Contrato de Concesión:

TABLA IV
RESULTADOS IRI MEDIO DESLIZANTE MÁXIMO

IRI MD Máx. contractual 3.5 m/km	IRI MD máximo @ 1km (m/km)		
	IRI C1_LD	IRI C2_LI	IRI MD Máx. Promedio
Promedio	2.51	2.70	2.60
Mínimo	2.20	2.30	2.30
Máximo	3.10	3.40	3.20
IRI MD < NS	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración Propia

Según la información de la tabla precedente, los valores del IRI Medio Deslizante Máximo (IRI MD) se encuentran por debajo del umbral contractual de 3.5 m/km para pavimentos con mezcla asfáltica en caliente.

En la imagen siguiente se aprecia que los sectores entre los Km 14 a km 15 y Km 18 a Km 19 requieren especial atención porque presentan mayor concentración de perfiles longitudinales que individualmente exceden el umbral y pueden ser corregidos con intervenciones localizadas.

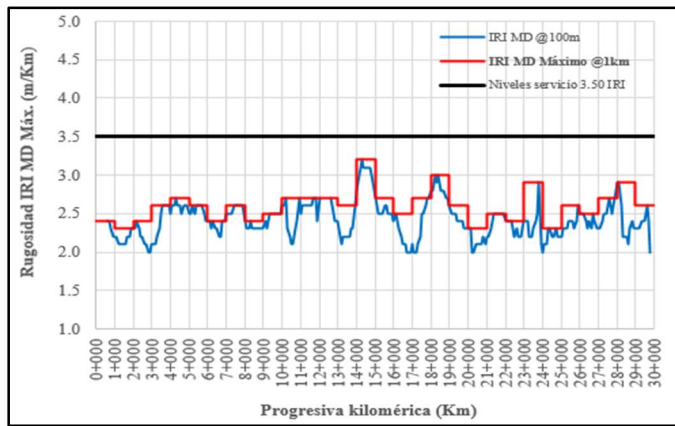


Fig. 6 Rugosidad IRI Medio Deslizante Máximo intervalo @ 1 Km.

Es sabido que la gestión de la evaluación funcional se orienta a mantener los niveles del IRI dentro de los límites contractuales para evitar penalidades, en tanto que se afecta la seguridad y el confort de los usuarios, aumentando los costos operativos por incrementos de los costos de viaje, mantenimiento vehicular y mayor consumo de combustible.

D. Relación PCI – IRI MD máximo

Se observa una tendencia inversa entre los valores de PCI e IRI, reflejado por el coeficiente de determinación R^2 de 0.228 que muestra una relación débil entre el PCI y el IRI MD máximo de esta carretera en montaña, distinta a los resultados de otras investigaciones en carreteras de distinto contexto en la que se nota influencia significativa [9],[10].

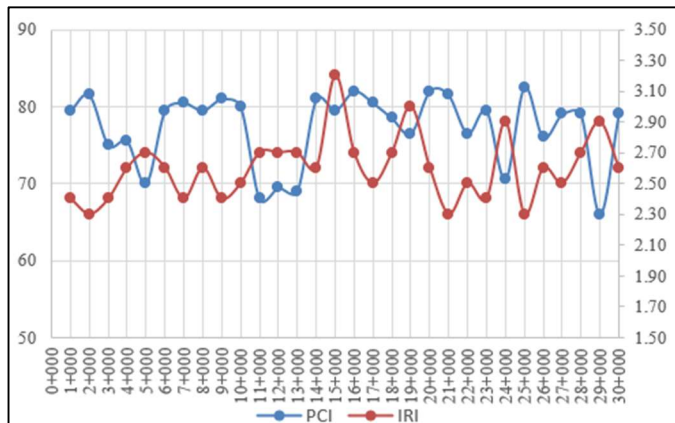


Fig. 7 Relación PCI – IRI MD máximo por Km.

En este sentido, los resultados obtenidos deben interpretarse como evidencia empírica contextual, más que como un modelo predictivo generalizable, reforzando la necesidad de enfoques integrados para la gestión de pavimentos en entornos de montaña [7], [11]. La tendencia de los valores de las métricas PCI e IRI medio deslizante máximo mostrada en la figura permite corroborar débilmente de que a menor condición superficial del pavimento, mayor rugosidad, y por tanto podría servir de punto de partida para elaborar modelos

predictivos de mayor complejidad o segmentar el análisis por sectores homogéneos considerando en el modelo la posibilidad de excluir aquellos sectores con mayor recurrencia de emergencias viales que distorsionan esta tendencia y poder finalmente obtener un modelamiento fiable para proyectar los valores IRI conociendo las puntuaciones del PCI siguiendo las metodologías de aprendizaje automático[12], o una posible tendencia exponencial entre indicadores como la determinada en [3].

Esta relación de tendencia lineal negativa permite proyectar el indicador IRI en función a los datos obtenidos en esta evaluación del pavimento mediante una tendencia no lineal y la ecuación que más se ajustan a esta tendencia es la polinómica (1) debido a que presentan el R^2 más alto:

$$IRI = -0011PCI^2 + 0.1416PCI - 1.8409 \quad (1)$$

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que, si bien los métodos tradicionales de evaluación del pavimento continúan siendo herramientas válidas para el diagnóstico del estado funcional, su efectividad puede verse limitada frente a escenarios de alta variabilidad espacial y temporal del deterioro. En este sentido, la literatura internacional resalta que la incorporación de tecnologías de inspección automatizada contribuye a reducir la subjetividad inherente a la evaluación visual y a mejorar la consistencia de los indicadores empleados en la gestión de pavimentos [2].

La comparación de los hallazgos con investigaciones previas sugiere que la integración de indicadores superficiales, como el PCI, con métricas funcionales y estructurales, puede fortalecer la capacidad de los sistemas de gestión vial para priorizar intervenciones de rehabilitación. Los modelos basados en sensores e inteligencia artificial no solo optimizan la detección del deterioro existente, sino que también permiten anticipar su evolución mediante análisis predictivos, favoreciendo estrategias de mantenimiento preventivo frente a enfoques correctivos [4].

E. Plan de conservación vial

Tal como se indica en las investigaciones [5] y [6] en la que los mantenimientos viales se planifican oportunamente a partir del análisis de aprendizaje profundo (deep learning) considerando grandes bases de datos y métricas como el PCI e IRI para clasificar los sectores del pavimento a intervenir según su propia necesidad, esta investigación enfatiza en la aplicación de una propuesta técnica de conservación vial en los sectores más críticos según la severidad y densidad de los deterioros y la regularidad media deslizante máxima mayor a 3 m/km respectivamente, incluyendo actividades según la Tabla de Intervenciones para Fallas en Pavimentos Flexibles (ASTM D6433) y sustentadas en el Manual de Conservación vial de carreteras vigente aprobado por el Ministerio de Transportes y

Comunicaciones mediante R.D. N° 08-2014-MTC/14 el 27 de marzo del 2014.

Los metrados se determinaron según la criticidad de los sectores con presencia de deterioros significativos masivos y en los que el IRI promedio supera los 3 m/km y se propone a ejecutar según cronograma de tres meses en el más breve plazo:

TABLA VI
METRADOS DEL PLAN DE CONSERVACIÓN PERIÓDICA

Ítem	Deterioro	U. M.	Cantidad
1	Sellado de fisuras con emulsión y arena	m	524.01
2	Sellado de grietas con elastomérico	m	2,339.50
3	Fresado y recapado asfáltico	m ²	2,002.64
4	Parchado superficial en calzada	m ²	1,072.96
5	Mortero asfáltico	m ²	125,226.24
6	Parcheo (Bacheos)	m ²	1,418.72

Fuente: Elaboración Propia

El Plan de conservación vial se desarrolla a partir de los metrados de la tabla precedente, y gestionando ante el Concedente (MTC) la aprobación del presupuesto y liberación de fondos del fideicomiso para mantenimiento periódico, previa opinión favorable del Regulador (OSITRAN) para alcanzar sostenidamente los niveles de servicio exigibles según el Contrato de Concesión.

Las actividades de mayor incidencia son el mortero asfáltico, aplicable a los sectores críticos con pulimiento y desprendimiento de agregados, el sellado de grietas con elastomérico para los distintos tipos de grietas identificadas en la calzada (fisuras con anchos mayores a 1 mm) y el fresado y recapado asfáltico para los sectores con presencia de piel de cocodrilo y algunos parchados que se pueden asociar a potenciales daños estructurales.

El presupuesto para ejecutar las actividades propuestas en el subtramo de 29.39 km se estimó en USD 1,840,856.40 a precios del año 2025, incluyendo impuestos, costos directos, gastos generales (32.57 %) y utilidad (10 %), el cual permitirá un ahorro significativo de costos de conservación rutinaria de la concesionaria y ahorro de tiempos y costos de viaje para los usuarios[13].

El tiempo de ejecución previsto es de 3 meses, y se recomienda su aplicación antes de la temporada de lluvias, para asegurar la calidad de los trabajos y minimizar el riesgo de deterioro acelerado.

V. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó de manera integrada la condición superficial y funcional de un pavimento flexible en una carretera de alta montaña mediante tecnología de escaneo láser y el análisis conjunto de los indicadores PCI e IRI. Los

resultados evidencian que, aunque la mayor parte del tramo presenta una condición superficial favorable, existen sectores con niveles de rugosidad que podrían comprometer, a futuro, el desempeño funcional de la vía.

Uno de los hallazgos más relevantes es la identificación de un desacople entre la condición superficial y la funcional del pavimento, lo que confirma que la dependencia exclusiva de un único indicador puede conducir a diagnósticos incompletos y, potencialmente, a decisiones subóptimas de mantenimiento. Esta evidencia resulta particularmente significativa en carreteras de geometría compleja, donde las solicitudes dinámicas y los procesos de deformación pueden manifestarse primero en la calidad de rodadura antes que en deterioros visibles.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio demuestra que la inspección automatizada mediante sistemas de escaneo láser permite obtener información objetiva, continua y espacialmente consistente, fortaleciendo la confiabilidad de los procesos de evaluación y la gestión de activos viales basada en datos. La captura simultánea de indicadores superficiales y funcionales facilita la priorización de intervenciones preventivas y optimiza la asignación de recursos en esquemas contractuales orientados al desempeño.

La principal contribución de esta investigación radica en proporcionar evidencia empírica sobre la utilidad de la evaluación integrada PCI-IRI en un entorno escasamente documentado en la literatura internacional como las carreteras de alta montaña bajo condiciones reales de operación. Si bien los resultados corresponden a un caso de estudio específico, la metodología propuesta es replicable y escalable, lo que abre oportunidades para su aplicación en redes viales con características topográficas similares y para el desarrollo futuro de modelos predictivos de deterioro más robustos.

Finalmente, el Plan de conservación propuesto —que incluye sellado de fisuras; mortero asfáltico, y fresado y recapado localizado— se sustenta en un análisis técnico riguroso para preservar las buenas condiciones de transitabilidad de la vía a un costo estimado de USD 1.84 millones, con una ejecución proyectada de tres meses. Este enfoque promueve una gestión vial proactiva, técnica y sostenible, en coherencia con los objetivos del contrato de concesión y los lineamientos de desarrollo sostenible

VI. RECOMENDACIONES

Si bien los hallazgos son contundentes, varias áreas requieren mayor investigación. Estudios futuros deberían incorporar modelos de correlación estadística y análisis predictivo del deterioro para cuantificar la interacción entre la superficie y los indicadores funcionales a lo largo del tiempo. Ampliar el conjunto de datos a diversos entornos climáticos y de tráfico también reforzaría la validez externa.

Complementar esta evaluación funcional con estudios estructurales, como la medición del cuenco de deflexión mediante equipos Falling Weight Deflectometer (FWD), que permitan caracterizar la capacidad portante del pavimento y anticipar futuras intervenciones de rehabilitación mayor.

VII. REFERENCIAS

- [1] E. Ibragimov, Y. Kim, J. H. Lee, J. Cho, and J. J. Lee, "Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis: An End-to-End Approach," *Sensors*, vol. 24, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/s24072333.
- [2] L. L. Huang, J. D. Lin, W. H. Huang, C. H. Kuo, and M. Y. Huang, "Application of Automated Pavement Inspection Technology in Provincial Highway Pavement Maintenance Decision-Making," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/app14156549.
- [3] R. P. Hasibuan and M. S. Surbakti, "Study of Pavement Condition Index (PCI) relationship with International Roughness Index (IRI) on Flexible Pavement", doi: 10.1051/mateconf/20192.
- [4] W. S. Qureshi *et al.*, "Deep learning framework for intelligent pavement condition rating: A direct classification approach for regional and local roads," *Autom. Constr.*, vol. 153, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104945.
- [5] L. L. Huang, J. D. Lin, W. H. Huang, C. H. Kuo, Y. S. Chiou, and M. Y. Huang, "Developing Pavement Maintenance Strategies and Implementing Management Systems," *Infrastructures (Basel)*, vol. 9, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/infrastructures9070101.
- [6] M. Latifi, F. G. Darvishvand, O. Khandel, and M. L. Nowsoud, "A Deep Reinforcement Learning Model for Predictive Maintenance Planning of Road Assets: Integrating LCA and LCCA 1 † 1 †."
- [7] A. A. Zhang *et al.*, "Intelligent pavement condition survey: Overview of current researches and practices," Sep. 01, 2024, *KeAi Publishing Communications Ltd.* doi: 10.1016/j.jreng.2024.04.003.
- [8] O. G. Dela Cruz, C. A. Mendoza, and K. D. Lopez, "International Roughness Index as Road Performance Indicator: A Literature Review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Aug. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/822/1/012016.
- [9] S. M. Pirayonesi and T. E. El-Diraby, "Examining the relationship between two road performance indicators: Pavement condition index and international roughness index," *Transportation Geotechnics*, vol. 26, p. 100441, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.TRGEO.2020.100441.
- [10] P. Kartika Novianti, A. Setyawan, and F. P. Pramesti, "Evaluation of Road Functional Performance Using Pavement Condition Index (PCI) and International Roughness Index (IRI) Methods Using Hawkeye (Case Study: Demak Ring Road, Central Java Province)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1381/1/012035.
- [11] M. Caridad *et al.*, "Detection of deterioration in flexible pavements from the processing of images and models of its surface." [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/>
- [12] J. Y. Qiao, M. Alinizzi, M. Alamaniotis, and S. Labi, "Estimating IRI based on pavement distress type, density, and severity: Insights from machine learning techniques."
- [13] I. Octavio Coronado Garcia, "LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL, HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO VIAL."