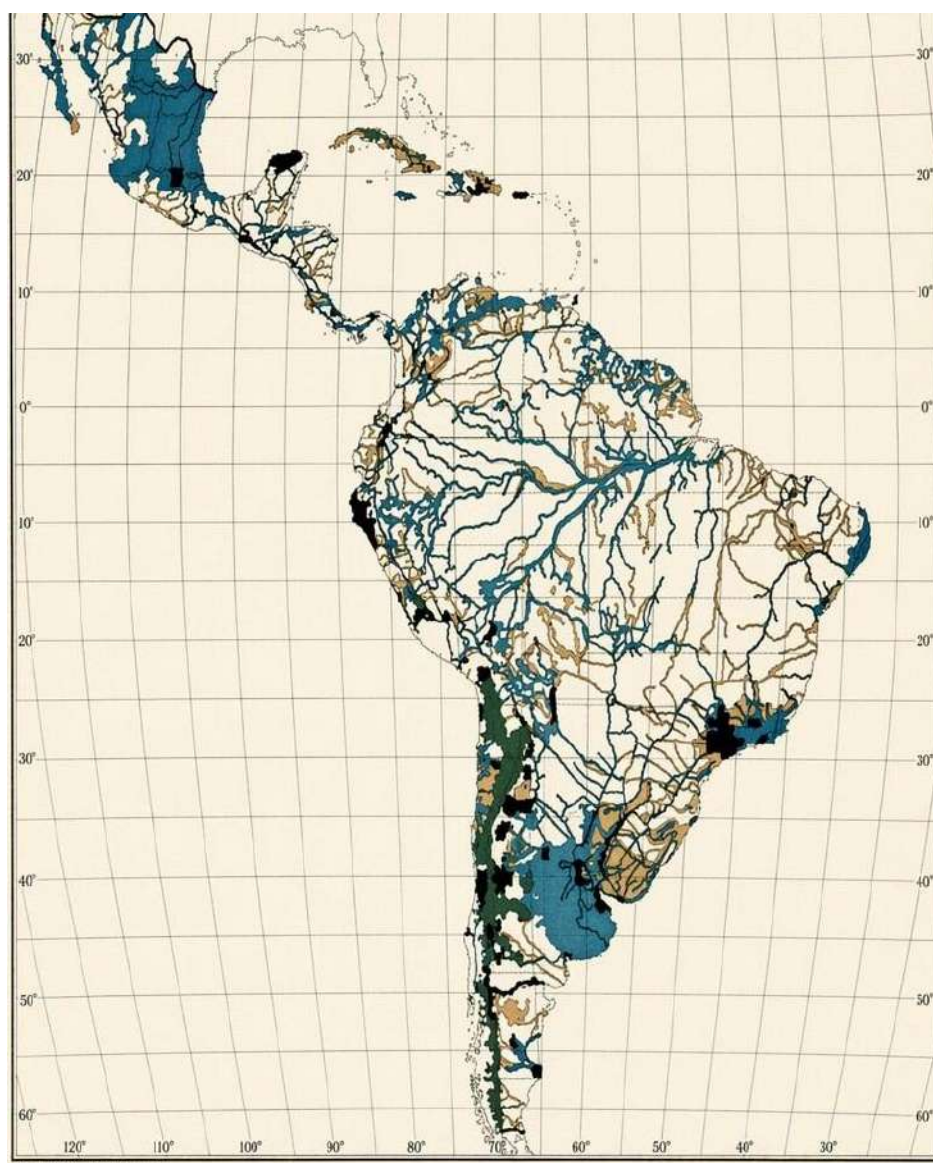


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos mediante visión artificial para la gestión del mantenimiento vial en la red vial fundamental del Altiplano boliviano

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21497032>

Manuel Quelca Tolino*

RESUMEN

El objetivo del presente artículo consiste en analizar el estado actual del conocimiento relacionado con la aplicación de visión artificial en la evaluación de pavimentos y proponer una estrategia metodológica para la modelación automatizada de la degradación superficial orientada a la gestión del mantenimiento vial en la Red Vial Fundamental del Altiplano boliviano. Se desarrolló una revisión teórica y documental de investigaciones recientes vinculadas con gestión de pavimentos, inspección automatizada, aprendizaje profundo y sistemas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones. Los resultados evidencian que los modelos basados en redes neuronales convolucionales, YOLO, Mask R-CNN y técnicas de inteligencia artificial presentan un elevado potencial para transformar los sistemas tradicionales de gestión vial, permitiendo evolucionar desde esquemas reactivos hacia enfoques predictivos fundamentados en datos objetivos.

PALABRAS CLAVE: Visión artificial, Pavimentos flexibles, Inteligencia artificial, Mantenimiento vial, Gestión de pavimentos, Aprendizaje profundo.

*Investigador. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0998-6578>. E-mail: ingmanuelqt@gmail.com

Automated Modeling of Pavement Surface Deterioration Through Computer Vision for Road Maintenance Management in the Fundamental Road Network of the Bolivian Altiplano

ABSTRACT

The objective of this article is to analyze the current state of knowledge regarding the application of machine vision in pavement evaluation and to propose a methodological strategy for the automated modeling of surface degradation for road maintenance management on the Fundamental Road Network of the Bolivian Altiplano. A theoretical and documentary review of recent research related to pavement management, automated inspection, deep learning, and intelligent decision support systems was conducted. The results demonstrate that models based on convolutional neural networks, YOLO, Mask R-CNN, and artificial intelligence techniques have significant potential to transform traditional road management systems, enabling a shift from reactive approaches to predictive ones based on objective data.

KEYWORDS: Machine vision, Flexible pavements, Artificial intelligence, Road maintenance, Pavement management, Deep learning.

Introducción

La infraestructura vial constituye uno de los componentes fundamentales para el desarrollo económico y social de los países debido a su influencia sobre la movilidad, la conectividad territorial y la competitividad de los sistemas productivos. Las carreteras facilitan el intercambio comercial, promueven la integración regional y contribuyen al acceso de la población a servicios esenciales como salud, educación y empleo. En consecuencia, la preservación de las condiciones funcionales y estructurales de los pavimentos representa una prioridad estratégica para las entidades responsables de la gestión vial (Haas et al., 1994).

En Bolivia, la Red Vial Fundamental constituye la columna vertebral del sistema de transporte terrestre nacional. Su importancia radica en la articulación de los principales centros urbanos, productivos y logísticos del país, así como en la conexión con corredores internacionales que facilitan el comercio exterior. Sin embargo, una proporción significativa de esta infraestructura se encuentra localizada en regiones altiplánicas sometidas a condiciones ambientales particularmente agresivas.

Las condiciones climáticas predominantes en el Altiplano boliviano incluyen altitudes superiores a los 3.500 metros sobre el nivel del mar, elevadas amplitudes térmicas diarias, intensa radiación ultravioleta, bajas precipitaciones y frecuentes ciclos

M. Quelca T.// Modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos...361-379
de congelamiento y deshielo. Según Hernández Ortiz (2024), estos factores influyen significativamente sobre el comportamiento de los pavimentos, acelerando procesos de envejecimiento, fisuración y pérdida de capacidad funcional.

Como resultado de estas condiciones, los pavimentos experimentan diversos mecanismos de deterioro que se manifiestan mediante fisuras longitudinales, fisuras transversales, agrietamiento por fatiga, baches, deformaciones permanentes y desprendimientos superficiales. La identificación temprana de estos deterioros resulta fundamental para implementar estrategias de mantenimiento oportunas que permitan reducir costos de conservación y maximizar la vida útil de la infraestructura.

Tradicionalmente, la evaluación de la condición superficial de los pavimentos ha sido realizada mediante inspecciones visuales sistemáticas. Estas metodologías permiten identificar, clasificar y cuantificar los deterioros observados sobre la superficie de rodadura, generando indicadores que apoyan la toma de decisiones relacionadas con mantenimiento y rehabilitación.

Entre los métodos más difundidos destaca el Pavement Condition Index (PCI), ampliamente utilizado a nivel internacional para evaluar el estado superficial de pavimentos flexibles y rígidos. Cavani Rodríguez (2025) señala que el PCI continúa siendo una de las herramientas más empleadas para la gestión vial debido a su capacidad para sintetizar la condición del pavimento mediante un índice numérico comprendido entre 0 y 100.

Sin embargo, diversos estudios han identificado limitaciones importantes asociadas a los procedimientos tradicionales de inspección visual. Choquehuayta Gutierrez (2025) destaca que la evaluación manual presenta elevados niveles de subjetividad debido a la dependencia del criterio técnico de los inspectores. Asimismo, Sánchez Tamay (2018) señala que las campañas de inspección demandan importantes recursos humanos, tiempo y costos operativos, especialmente cuando se trata de evaluar extensas redes viales.

Ante estas limitaciones, durante los últimos años se ha observado un creciente interés por incorporar tecnologías digitales e inteligencia artificial en los procesos de gestión vial. El desarrollo de sistemas de visión artificial ha permitido automatizar progresivamente la detección y clasificación de deterioros superficiales mediante el análisis de imágenes capturadas por cámaras terrestres, drones y vehículos instrumentados.

La visión artificial puede definirse como una disciplina interdisciplinaria que combina técnicas de procesamiento digital de imágenes, reconocimiento de patrones, aprendizaje automático e inteligencia artificial con el propósito de permitir que los sistemas computacionales interpreten información visual de manera similar a la percepción humana. Su aplicación en infraestructura vial ha experimentado un notable crecimiento gracias al desarrollo de algoritmos de aprendizaje profundo capaces de identificar patrones complejos presentes en imágenes de pavimentos.

Torres Gastelu (2025) desarrolló un método basado en visión artificial para la evaluación del estado de conservación superficial de pavimentos flexibles, demostrando la viabilidad de automatizar la identificación de deterioros mediante técnicas de inteligencia artificial. De manera similar, Vergara Roa (2025) propuso un modelo de visión por computadora para la detección de patologías superficiales tanto en pavimentos rígidos como flexibles, obteniendo resultados prometedores para aplicaciones de gestión vial.

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados también ha generado avances significativos en este campo. González Arismendi (2025) empleó imágenes capturadas mediante VANT e inteligencia artificial para detectar patologías en pavimentos flexibles, mientras que González et al. (2025) desarrollaron una metodología basada en inspección aérea no tripulada para evaluar el deterioro de pavimentos urbanos.

Paralelamente, los avances en aprendizaje profundo han impulsado el desarrollo de arquitecturas especializadas para detección de objetos y segmentación de imágenes. Henao Alzate (2025) evaluó técnicas de procesamiento digital de imágenes y aprendizaje automático para detectar imperfecciones en pavimentos, mientras que Roman Garay et al. (2025) desarrollaron un sistema inteligente capaz de detectar baches y estimar su profundidad mediante aprendizaje profundo.

Estas investigaciones evidencian una transformación progresiva de los enfoques tradicionales de evaluación vial hacia sistemas automatizados fundamentados en inteligencia artificial. No obstante, la mayoría de los estudios disponibles han sido desarrollados en contextos geográficos distintos al Altiplano boliviano, donde las condiciones ambientales presentan características particulares que pueden influir significativamente en los mecanismos de deterioro.

En consecuencia, existe la necesidad de desarrollar modelos metodológicos adaptados a las condiciones específicas de la Red Vial Fundamental del Altiplano boliviano, integrando tecnologías de visión artificial, aprendizaje profundo y gestión de

M. Quelca T.// Modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos...361-379
pavimentos para optimizar la toma de decisiones relacionadas con mantenimiento y conservación vial.

1. Degradación superficial de pavimentos y su importancia en la gestión vial

La degradación superficial constituye una de las manifestaciones más visibles del deterioro progresivo de los pavimentos. Desde una perspectiva ingenieril, estos deterioros representan indicadores fundamentales del comportamiento funcional de la estructura vial y proporcionan información relevante para la programación de actividades de mantenimiento.

Álvarez Rivas (2008) sostiene que la evaluación sistemática de la condición superficial constituye uno de los pilares fundamentales de los Sistemas de Gestión de Pavimentos debido a que permite identificar oportunamente necesidades de intervención y optimizar la asignación de recursos.

Los deterioros superficiales pueden clasificarse en diferentes categorías según su mecanismo de formación y características geométricas. Entre los más frecuentes se encuentran las fisuras longitudinales, fisuras transversales, fisuras por fatiga, fisuración en bloque, baches, ahuellamientos, exudaciones y pérdida de agregados.

Según Vásquez Cabrera (2023), la identificación adecuada de estos deterioros resulta indispensable para determinar estrategias de intervención técnicamente apropiadas y económicamente eficientes.

2. Métodos tradicionales de evaluación de pavimentos

La evaluación de pavimentos constituye una actividad esencial dentro de los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS), debido a que proporciona información objetiva para determinar el estado de conservación de la infraestructura vial y establecer estrategias adecuadas de mantenimiento. Desde mediados del siglo XX, diversos organismos internacionales han desarrollado metodologías orientadas a cuantificar la condición funcional y estructural de los pavimentos mediante procedimientos estandarizados de inspección.

La filosofía fundamental de estos métodos se basa en la identificación de deterioros visibles, la cuantificación de su severidad y extensión, y la posterior transformación de esta información en indicadores que faciliten la toma de decisiones relacionadas con mantenimiento y rehabilitación.

De acuerdo con Álvarez Rivas (2008), los sistemas modernos de gestión vial requieren mecanismos de evaluación periódica que permitan monitorear la evolución del deterioro y optimizar la utilización de recursos financieros destinados a conservación.

2.1. Pavement Condition Index (PCI)

Uno de los métodos más ampliamente utilizados a nivel internacional es el Pavement Condition Index (PCI), desarrollado inicialmente por el U.S. Army Corps of Engineers y posteriormente adoptado por numerosas agencias de transporte alrededor del mundo.

El PCI establece una escala numérica comprendida entre 0 y 100, donde los valores más altos representan pavimentos en excelente condición y los valores bajos corresponden a pavimentos severamente deteriorados. La metodología se fundamenta en la identificación visual de distintos tipos de deterioro, considerando tanto su extensión como su nivel de severidad.

Cavani Rodríguez (2025) destaca que el PCI continúa siendo una de las herramientas más utilizadas debido a su facilidad de aplicación y capacidad para resumir el estado general del pavimento mediante un único indicador cuantitativo.

Asimismo, Vásquez Cabrera (2023) aplicó el método PCI para evaluar la condición superficial de la vía Mira–El Hato en Ecuador, concluyendo que esta metodología constituye una herramienta eficaz para diagnosticar el estado funcional de los pavimentos y establecer prioridades de intervención.

No obstante, la principal limitación del PCI radica en la dependencia del criterio humano para identificar y clasificar los deterioros observados. Esta situación puede generar diferencias significativas entre evaluadores y afectar la consistencia de los resultados obtenidos.

2.2. Método VIZIR

El método VIZIR fue desarrollado en Francia como una alternativa para la evaluación funcional de pavimentos mediante inspecciones visuales sistemáticas. Su aplicación se basa en la clasificación detallada de deterioros superficiales y en la determinación de índices que reflejan la condición global de la infraestructura vial.

A diferencia del PCI, VIZIR incorpora criterios específicos para relacionar determinados deterioros con posibles problemas estructurales, permitiendo una interpretación más amplia del comportamiento del pavimento.

Sin embargo, al igual que otros procedimientos basados en inspección visual, su aplicación requiere personal altamente capacitado y extensos periodos de trabajo de campo.

2.3. Evaluación de carreteras no pavimentadas

En el caso de carreteras no pavimentadas, Sánchez Tamay (2018) desarrolló una evaluación comparativa utilizando metodologías específicas para caminos de bajo volumen de tránsito, demostrando que los sistemas convencionales de gestión vial pueden adaptarse a diferentes tipologías de infraestructura.

Los resultados obtenidos evidencian la importancia de disponer de procedimientos estandarizados que permitan cuantificar objetivamente el estado de conservación de las vías y establecer estrategias racionales de mantenimiento.

2.4. Limitaciones de los métodos tradicionales

A pesar de su amplia utilización, las metodologías convencionales presentan limitaciones significativas que han motivado el desarrollo de tecnologías automatizadas.

Entre las principales limitaciones identificadas en la literatura destacan:

- Dependencia del criterio subjetivo del inspector.
- Variabilidad entre evaluadores.
- Altos costos operativos.
- Largos tiempos de inspección.
- Riesgos asociados al trabajo en carretera.
- Baja frecuencia de actualización de información.
- Dificultades para monitorear redes extensas.

Choquehuayta Gutierrez (2025) señala que la evaluación visual tradicional puede generar diferencias importantes en la clasificación de deterioros debido a la experiencia y formación de los evaluadores.

Por su parte, Bustamante et al. (2026) destacan que los procesos de priorización basados exclusivamente en inspecciones manuales presentan limitaciones para responder oportunamente a las necesidades de conservación de redes viales extensas.

Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de soluciones tecnológicas capaces de automatizar los procesos de evaluación y proporcionar información más objetiva para la gestión vial.

Tabla 1. Comparación de métodos tradicionales de evaluación de pavimentos

Método	Tipo de evaluación	Ventajas	Limitaciones
PCI	Visual	Amplia aceptación internacional	Subjetividad
VIZIR	Visual	Evaluación detallada	Requiere especialistas
PASER	Visual	Simplicidad	Menor precisión
Evaluación convencional	Visual	Bajo costo inicial	Alta variabilidad
Inspección automatizada	Digital	Objetividad y rapidez	Requiere tecnología

3. Visión artificial aplicada a la evaluación de pavimentos

La visión artificial constituye una de las áreas de investigación con mayor crecimiento dentro de la ingeniería vial durante la última década. Su desarrollo ha sido impulsado por avances significativos en procesamiento digital de imágenes, aprendizaje automático e inteligencia artificial.

En términos generales, la visión artificial puede definirse como la capacidad de los sistemas computacionales para adquirir, procesar e interpretar información visual obtenida mediante cámaras digitales y otros sensores ópticos.

Su aplicación en infraestructura vial permite automatizar actividades tradicionalmente realizadas por especialistas humanos, incluyendo la detección, clasificación y cuantificación de deterioros superficiales.

Montúfar (2025) desarrolló una metodología basada en visión computacional para inventariar baches y apoyar estrategias de mantenimiento predictivo. Los resultados obtenidos demostraron que los algoritmos de reconocimiento visual pueden identificar deterioros con niveles de precisión adecuados para aplicaciones prácticas de gestión vial.

De manera similar, Torres Gastelu (2025) implementó un método de evaluación superficial basado en visión artificial para pavimentos flexibles, concluyendo que esta tecnología constituye una alternativa viable para automatizar procesos de inspección tradicionalmente ejecutados de manera manual.

3.1. Adquisición de imágenes

La primera etapa de cualquier sistema de visión artificial consiste en la adquisición de imágenes representativas de la superficie del pavimento.

Actualmente existen diversas plataformas tecnológicas para capturar información visual, entre las que destacan:

- Cámaras instaladas en vehículos.
- Teléfonos inteligentes.
- Vehículos aéreos no tripulados (VANT).
- Sistemas móviles de auscultación.
- Cámaras de profundidad.

La selección de la plataforma depende de factores relacionados con precisión requerida, costos operativos y características de la red vial evaluada.

3.2. Vehículos aéreos no tripulados

Uno de los avances más importantes observados durante los últimos años corresponde a la incorporación de drones para inspección vial.

González Arismendi (2025) desarrolló una metodología basada en imágenes obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados y algoritmos de inteligencia artificial para detectar patologías en pavimentos flexibles.

Los resultados mostraron importantes ventajas relacionadas con reducción de tiempos de inspección, cobertura espacial y seguridad operativa.

De forma complementaria, González et al. (2025) propusieron una metodología de evaluación de deterioro utilizando inspección aérea no tripulada en pavimentos urbanos, evidenciando el potencial de esta tecnología para apoyar programas de gestión vial.

3.3. Procesamiento digital de imágenes

Una vez capturadas las imágenes, estas son sometidas a procesos de mejora y preparación orientados a maximizar la capacidad de detección de deterioros.

Las principales etapas incluyen:

- Corrección geométrica.
- Filtrado de ruido.
- Normalización.
- Segmentación.
- Extracción de características.

Estos procedimientos permiten mejorar significativamente la calidad de la información utilizada por los modelos de inteligencia artificial.

4. Inteligencia artificial y aprendizaje profundo para detección de deterioros

La incorporación de inteligencia artificial ha transformado radicalmente las capacidades de los sistemas modernos de visión artificial.

A diferencia de los enfoques tradicionales basados en reglas predefinidas, los algoritmos de aprendizaje profundo son capaces de aprender automáticamente patrones complejos a partir de grandes conjuntos de datos.

Según Hernández Ortiz (2024), la inteligencia artificial representa una herramienta particularmente prometedora para la evaluación de infraestructura vial debido a su capacidad para analizar grandes volúmenes de información y generar predicciones confiables sobre el comportamiento futuro de los pavimentos.

Las redes neuronales convolucionales (CNN) constituyen actualmente la arquitectura predominante para aplicaciones relacionadas con procesamiento de imágenes. Estas redes permiten identificar automáticamente características asociadas a fisuras, baches, desprendimientos y otros deterioros superficiales.

Vergara Roa (2025) desarrolló un modelo de visión por computadora para detectar patologías en pavimentos rígidos y flexibles utilizando técnicas de aprendizaje profundo, obteniendo resultados que demuestran la efectividad de estas herramientas en contextos reales de evaluación vial.

Asimismo, Henao Alzate (2025) aplicó técnicas de procesamiento digital de imágenes y aprendizaje automático para detectar imperfecciones superficiales, concluyendo que los modelos basados en inteligencia artificial superan significativamente a diversos procedimientos convencionales de inspección.

5. Hacia la transformación digital de la gestión vial

La evidencia científica revisada demuestra que la gestión vial está experimentando una transformación tecnológica sin precedentes.

La convergencia entre visión artificial, aprendizaje profundo, sensores inteligentes y sistemas de información geográfica está permitiendo evolucionar desde esquemas tradicionales de inspección hacia plataformas inteligentes capaces de detectar deterioros, predecir su evolución y apoyar decisiones de mantenimiento de manera automatizada.

Esta tendencia resulta particularmente relevante para países como Bolivia, donde las extensas redes carreteras y las limitaciones presupuestarias hacen indispensable optimizar los procesos de conservación mediante tecnologías innovadoras.

Tabla 2. Investigaciones recientes sobre visión artificial en pavimentos

Autor	Año	Tecnología	Aplicación
Torres Gastelu	2025	Visión artificial	Evaluación superficial
Vergara Roa	2025	Computer Vision	Patologías superficiales
González Arismendi	2025	Drones + IA	Pavimentos flexibles
Henao Alzate	2025	Deep Learning	Imperfecciones
Montúfar	2025	Visión computacional	Inventario de baches
Roman Garay et al.	2025	Deep Learning	Detección y profundidad de baches
Correa Sandoval y Acosta	2026	IA georreferenciada	Inspección urbana

6. Discusión crítica de las investigaciones recientes

La revisión de la literatura científica identificada en el corpus bibliográfico evidencia una evolución significativa de los enfoques tradicionales de evaluación de pavimentos hacia sistemas automatizados basados en inteligencia artificial. Este proceso de transformación tecnológica responde principalmente a las limitaciones inherentes de las metodologías convencionales de inspección visual y a la necesidad de disponer de información más objetiva, frecuente y precisa para la gestión de infraestructura vial.

Uno de los trabajos más relevantes corresponde a Torres Gastelu (2025), quien desarrolló un método de evaluación superficial basado en visión artificial para pavimentos flexibles. El principal aporte de esta investigación radica en demostrar la factibilidad de automatizar la identificación de deterioros superficiales mediante algoritmos de procesamiento de imágenes. Sin embargo, el estudio se concentra principalmente en la detección de daños existentes, sin incorporar modelos predictivos que permitan anticipar la evolución futura del deterioro.

En una línea similar, Vergara Roa (2025) propuso un modelo de visión por computadora orientado a la detección de patologías superficiales tanto en pavimentos rígidos como flexibles. Este trabajo amplía el alcance de las aplicaciones de visión artificial al considerar diferentes tipologías estructurales, evidenciando la versatilidad de estas herramientas para distintos contextos de infraestructura vial. No obstante, la

investigación se enfoca fundamentalmente en la clasificación de deterioros y no aborda la integración de los resultados dentro de sistemas de gestión de mantenimiento.

Por otra parte, González Arismendi (2025) incorporó vehículos aéreos no tripulados como plataforma de adquisición de imágenes para la detección de patologías en pavimentos flexibles. Este enfoque representa un avance significativo respecto a los métodos convencionales debido a que permite ampliar la cobertura espacial de las inspecciones, reducir riesgos operativos y optimizar tiempos de levantamiento de información. Sin embargo, la dependencia de condiciones climáticas favorables y la necesidad de procesamiento posterior de imágenes constituyen aspectos que requieren investigación adicional.

De manera complementaria, González et al. (2025) desarrollaron una metodología para evaluar deterioros mediante inspección aérea no tripulada. Los autores concluyen que la utilización de drones puede mejorar significativamente la eficiencia de los programas de auscultación vial, especialmente en áreas de difícil acceso. Este hallazgo resulta particularmente relevante para la Red Vial Fundamental del Altiplano boliviano, donde existen extensos tramos localizados en regiones remotas con limitaciones de accesibilidad.

Montúfar (2025) orientó su investigación hacia el inventario automatizado de baches y el mantenimiento predictivo mediante visión computacional. Este estudio constituye uno de los primeros antecedentes que vinculan directamente la detección automática de deterioros con estrategias de gestión predictiva, aproximándose al enfoque planteado en la presente investigación doctoral.

Asimismo, Roman Garay et al. (2025) desarrollaron un sistema inteligente capaz de detectar baches y estimar su profundidad utilizando algoritmos de aprendizaje profundo. El principal aporte de esta investigación consiste en incorporar información tridimensional al proceso de evaluación, permitiendo cuantificar no solamente la presencia del deterioro sino también su magnitud física. Esta capacidad representa un avance importante para los sistemas de gestión vial debido a que facilita una priorización más precisa de intervenciones.

Henao Alzate (2025) analizó técnicas de procesamiento digital de imágenes y aprendizaje automático para detectar imperfecciones superficiales en pavimentos. Los resultados obtenidos evidencian que los modelos de aprendizaje profundo presentan niveles de precisión superiores a los enfoques tradicionales basados en extracción

M. Quelca T.// Modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos...361-379
manual de características. Este hallazgo coincide con la tendencia internacional observada en aplicaciones recientes de inteligencia artificial para infraestructura vial.

Por su parte, Correa Sandoval y Acosta (2026) desarrollaron una herramienta inteligente para captura, selección y visualización automatizada de imágenes georreferenciadas. Este trabajo destaca la importancia de la calidad y organización de los datos utilizados para entrenar modelos de inteligencia artificial. En efecto, la literatura especializada coincide en señalar que el desempeño de los algoritmos depende significativamente de la representatividad y calidad de los conjuntos de entrenamiento.

Desde una perspectiva más amplia de gestión vial, Bustamante et al. (2026) analizaron la priorización de intervenciones mediante PCI en carreteras peruanas. Aunque el estudio no incorpora visión artificial, evidencia la necesidad de disponer de información objetiva y actualizada para optimizar la asignación de recursos de mantenimiento. Esta problemática constituye precisamente uno de los principales desafíos que la inteligencia artificial busca resolver.

En síntesis, la revisión crítica de la literatura permite identificar tres tendencias principales:

1. Automatización progresiva de los procesos de inspección vial.
2. Incorporación creciente de inteligencia artificial y aprendizaje profundo.
3. Evolución desde enfoques reactivos hacia modelos predictivos de gestión.

No obstante, también se identifican importantes vacíos de conocimiento relacionados con la aplicación de estas tecnologías en regiones de alta montaña como el Altiplano boliviano, donde las condiciones climáticas presentan características significativamente diferentes a las observadas en la mayoría de los estudios internacionales.

7. Propuesta metodológica para la red vial fundamental del Altiplano boliviano

Considerando los hallazgos obtenidos en la revisión teórica y las particularidades climáticas de la región altiplánica, se propone una estrategia metodológica orientada a la modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos mediante visión artificial.

La propuesta integra técnicas de inteligencia artificial, procesamiento digital de imágenes, georreferenciación y sistemas de gestión vial, estructurándose en seis fases principales.

Fase I. Caracterización de deterioros

La primera fase contempla la identificación y clasificación de los deterioros predominantes en la Red Vial Fundamental del Altiplano boliviano.

Los principales deterioros considerados son:

- Fisuras longitudinales.
- Fisuras transversales.
- Fisuras por fatiga.
- Fisuración en bloque.
- Baches.
- Ahuellamiento.
- Desprendimiento superficial.
- Pérdida de agregados.

Esta etapa permitirá construir una taxonomía de deterioros adaptada a las condiciones específicas de la región.

Fase II. Captura masiva de imágenes

La segunda fase comprende la adquisición sistemática de información visual mediante diferentes plataformas tecnológicas:

- Vehículos instrumentados.
- Cámaras de alta resolución.
- Drones.
- Dispositivos móviles georreferenciados.

La utilización combinada de estas tecnologías permitirá generar una base de datos representativa de las condiciones reales de la red vial.

Fase III. Construcción del dataset

Una vez recopiladas las imágenes, se procederá a:

- Etiquetar manualmente deterioros.
- Validar clasificaciones por expertos.
- Georreferenciar registros.
- Estandarizar formatos.

El resultado será un dataset especializado para entrenamiento de modelos de inteligencia artificial orientados a pavimentos del Altiplano boliviano.

Fase IV. Desarrollo del modelo de visión artificial

En esta etapa se entrenarán modelos de aprendizaje profundo basados en arquitecturas especializadas para reconocimiento de objetos.

Entre las alternativas consideradas se encuentran:

- YOLOv11.
- Faster R-CNN.
- Mask R-CNN.
- EfficientDet.

La selección final dependerá de indicadores de desempeño como:

- Precisión.
- Recall.
- F1 Score.
- Mean Average Precision (mAP).

Fase V. Modelación predictiva del deterioro

A diferencia de la mayoría de investigaciones identificadas en la literatura, esta propuesta incorpora un componente predictivo orientado a estimar la evolución futura de los deterioros detectados.

Se propone emplear:

- Random Forest.
- XGBoost.
- Redes neuronales recurrentes (LSTM).

Estos algoritmos permitirán anticipar la evolución de la condición superficial y optimizar la programación de intervenciones.

Fase VI. Integración con un Sistema de Gestión de Pavimentos

Finalmente, los resultados obtenidos serán incorporados dentro de un Sistema de Gestión de Pavimentos que permita:

- Priorizar intervenciones.
- Optimizar recursos.
- Estimar necesidades presupuestarias.
- Generar escenarios de mantenimiento.

La integración de estos componentes constituye el principal aporte metodológico de la investigación.

Tabla 3. Comparación entre el enfoque tradicional y la propuesta metodológica

Aspecto	Método Tradicional	Propuesta
Inspección	Visual	Automatizada
Cobertura	Limitada	Masiva
Frecuencia	Esporádica	Continua
Subjetividad	Alta	Baja
Predicción	No disponible	Incorporada
Priorización	Manual	Inteligente
Costos a largo plazo	Elevados	Reducidos

8. Implicaciones para la gestión vial en Bolivia

La implementación de tecnologías de visión artificial en la Red Vial Fundamental puede generar importantes beneficios técnicos, económicos y operacionales.

Desde una perspectiva técnica, permitirá mejorar la calidad y frecuencia de la información utilizada para la toma de decisiones.

Desde una perspectiva económica, facilitará una asignación más eficiente de recursos de conservación, reduciendo intervenciones correctivas de alto costo.

Desde una perspectiva institucional, contribuirá a la modernización de los sistemas de gestión vial utilizados por entidades responsables de la conservación de carreteras.

Adicionalmente, la generación de bases de datos georreferenciadas de deterioros abrirá nuevas oportunidades para investigaciones futuras relacionadas con modelación de desempeño, resiliencia de infraestructura y adaptación al cambio climático.

Conclusiones

La evaluación tradicional de pavimentos mediante inspección visual continúa siendo ampliamente utilizada; sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con subjetividad, costos operativos elevados y baja frecuencia de actualización.

La visión artificial constituye una alternativa tecnológica viable para automatizar la detección y clasificación de deterioros superficiales en pavimentos flexibles y rígidos.

Las investigaciones desarrolladas por Torres Gastelu (2025), Vergara Roa (2025), González Arismendi (2025), Henao Alzate (2025) y Roman Garay et al. (2025) evidencian el creciente potencial de la inteligencia artificial para transformar los procesos de auscultación vial.

La incorporación de drones y sistemas móviles de captura de imágenes permite ampliar significativamente la cobertura espacial de las inspecciones y reducir tiempos operativos.

Los algoritmos de aprendizaje profundo constituyen actualmente las herramientas más prometedoras para la detección automática de deterioros debido a su elevada capacidad de reconocimiento de patrones complejos.

La literatura científica evidencia una transición progresiva desde modelos reactivos de conservación hacia enfoques predictivos fundamentados en inteligencia artificial.

Existe una limitada producción científica relacionada con aplicaciones de visión artificial en regiones de alta montaña, lo que justifica el desarrollo de investigaciones específicas para el Altiplano boliviano.

La propuesta metodológica desarrollada integra visión artificial, aprendizaje profundo, modelación predictiva y gestión vial, constituyendo un aporte original orientado a la optimización del mantenimiento vial en la Red Vial Fundamental de Bolivia.

La implementación de sistemas inteligentes de gestión permitirá mejorar la eficiencia en la asignación de recursos y aumentar la sostenibilidad de las inversiones realizadas en infraestructura vial.

La investigación abre nuevas líneas de trabajo relacionadas con inteligencia artificial explicable, gemelos digitales de infraestructura vial y mantenimiento predictivo basado en datos masivos.

Referencias

Álvarez Rivas, I. A. (2008). *Análisis y estudio de la red vial pavimentada de la I Región utilizando el sistema computacional dTIMS*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103314>

Bustamante, N. N., Peláez, K., & Rafael, A. (2026). Gestión de mantenimiento de pavimentos flexibles basada en PCI: Evaluación y priorización en la carretera PE-08A (Cajamarca, Perú). *Technology Rain Journal*. <https://doi.org/10.55204/trj.v5i1.e125>

Cavani Rodríguez, A. E. (2025). *Evaluación del índice de condición del pavimento por medio del manual americano de inspección visual en la Avenida Ferrocarril de la ciudad de Juliaca 2024*. Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. <https://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/4540>

Choquehuayta Gutierrez, D. A. (2025). *Evaluación de la condición superficial de pavimentos flexibles mediante métodos de inspección visual para la propuesta de*

M. Quelca T.// Modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos...361-379

alternativas de solución en vías de la Provincia de Melgar 2025. Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. <https://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/6124>

Correa Sandoval, J. P., & Acosta, C. (2026). *Desarrollo de una herramienta inteligente para la captura, selección y visualización automatizada de imágenes georreferenciadas en la inspección de vías urbanas.* <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/78900>

Delgado Peralta, R. E., & Vásquez López, K. A. (2025). *Aplicación de inteligencia artificial para la detección, clasificación y análisis de señalización vial y fallas en pavimentos.* Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15896>

García Díaz, P. R. (2022). *Análisis comparativo de la malla vial rural de Colombia y la de los países suramericanos no fronterizos.* Universidad de La Salle. <https://hdl.handle.net/20.500.14625/32804>

González, P. J. L., Vázquez, O. M., Galván, J. Z. E., González, B. G. H., & Villeda, D. H. (2025). Metodología para la evaluación del deterioro en pavimentos urbanos con apoyo de inspección aérea no tripulada. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(6), 9775–9791. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.22078

González Arismendi, M. (2025). *Detección de patologías de pavimento flexible mediante imágenes capturadas con vehículos aéreos no tripulados (VANT) aplicando inteligencia artificial (IA).* Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/89266>

Henao Alzate, J. A. (2025). *Detección de imperfecciones en pavimento utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes y aprendizaje automático.* Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/48971>

Hernández Ortiz, K. A. (2024). *Modelos probabilísticos e inteligencia artificial para evaluar la integridad estructural de pavimentos flexibles en redes viales a partir de mediciones de deflectometría.* Universidad del Norte. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/13109>

Montúfar, G. (2025). Inventario de baches y mantenimiento predictivo de pavimentos mediante visión computacional. *Revista Oratores*, 23, 167–181. <https://doi.org/10.37594/oratores.n23.1844>

Ortega Herrera, J. P., & Pérez Quezada, P. R. (2026). *Evaluación automatizada de redes viales mediante inteligencia artificial: Desarrollo, validación y análisis de efectividad.* Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/48586>

Quispe Tello, F., & Maylle Andia, J. J. (2026). *Evaluación estructural y funcional para la determinación del nivel de intervención del pavimento rígido del jirón Porvenir del distrito de Huancaray.* Universidad Tecnológica de los Andes. <https://hdl.handle.net/20.500.14512/1521>

Roman Garay, M. A., Hernández Beltran, C. A., Morales Rosales, L. A., Rodríguez, H., Villa Camacho, M. A., Soto Audelo, J. L., & Lepej, P. (2025). Detección inteligente de baches y estimación de su profundidad con aprendizaje profundo para la conservación de carreteras. *CIENCIA ergo-sum*, 20. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10113658>

M. Quelca T.// Modelación automatizada de la degradación superficial de pavimentos...361-379

Sánchez, B. M. (2026). *Ahorro de costos en estabilización de terraplenes mediante geomallas biaxiales y predicción de fallas con modelos de inteligencia artificial*. Universidad Autónoma de Querétaro. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/12993>

Sánchez Tamay, D. Y. J. (2018). *Evaluación de la condición superficial de la carretera no pavimentada El Milagro–El Zapote mediante dos técnicas* *unsurfaced road maintenance management y conservación vial*, Provincia de Utcubamba, 2018. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1629>

Torres Gastelu, J. A. (2025). *Implementación de un método mediante visión artificial para la evaluación del estado de conservación superficial de pavimentos flexibles*, Ayacucho 2024. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/8061>

Vásquez Cabrera, A. C. (2023). *Evaluación del estado del pavimento de la vía “Mira-El Hato”, tramo San Luis–Santa Isabel en el cantón Mira, mediante el método PCI, para el desarrollo de una propuesta de intervención vial*. Universidad Internacional SEK. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/5066>

Vergara Roa, M. (2025). *Modelo de visión por computadora para la detección de patologías superficiales de pavimentos rígidos y flexibles*. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/61086>

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

