

Technological advances in flexible pavement assessment methods: A literature review

Prysila Abilen Loayza Lozano¹; José Carlos Solís Tito²; Ronald Julian Chihuan Quispe³; Yudith Guillermina Salome Ochoa⁴; Américo Montañez Tupayachi⁵; Jinmer Bravo Apaza⁶

^{1,4,6}Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú, prysila36@gmail.com, 2022032144@unfv.edu.pe, jimbravo@hotmail.com

^{2,5}Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, jose.solis@unsaac.edu.pe, americo.montanez@unsaac.edu.pe

³Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú, ronald.chihuan@unat.edu.pe

Abstract – *This research analyses the technological advances in flexible pavement assessment methods, focusing especially on three key indicators: the Pavement Condition Index (PCI), the International Roughness Index (IRI) and the Pavement Serviceability Index (PSI). The main objective of this research was to examine how new technologies transform road infrastructure management and improve the accuracy and efficiency in the assessment of pavement condition. The research is bibliographical and documentary with a deductive method, qualitative approach and applied orientation. It is descriptive and explanatory, with a non-experimental, transversal and retrospective design. For data collection, the documentary review technique was used and the instrument was retrospective based on a review of scientific articles published in the Scopus database between 2019 and 2025. The results obtained show that the incorporation of techniques such as machine learning, neural networks and specialized algorithms allow for a significant improvement in the accuracy of the prediction of these indices, surpassing traditional methodologies. In addition, the use of technologies such as computer vision and drones transform pavement inspection and allow for faster, more precise and automated analysis. The use of smart sensors and Internet of Things (IoT) technologies facilitate continuous and real-time monitoring of road infrastructure, optimizing resources for its maintenance and contributing to extending the useful life of pavements.*

Keywords—*Pavement assessment, advanced technologies, Pavement Condition Index (PCI), International Roughness Index (IRI), Pavement Serviceability Index (PSI).*

Avances tecnológicos de los métodos de evaluación de pavimentos flexibles: Una revisión de la literatura

Prysila Abilen Loayza Lozano¹; José Carlos Solís Tito²; Ronald Julian Chihuan Quispe³; Yudith Guillermina Salome Ochoa¹; Américo Montañez Tupayachi²; Jinmer Bravo Apaza¹

¹Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú, prysila36@gmail.com, 2022032144@unfv.edu.pe, jinmbravo@hotmail.com

²Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, jose.solis@unsaac.edu.pe

³Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú, ronald.chihuan@unat.edu.pe

Resumen— La presente investigación analiza el avance tecnológico en los métodos de evaluación de pavimentos flexibles, enfocándose especialmente en tres indicadores clave: el Índice de Condición de Pavimento (PCI), el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) y el Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI). El objetivo principal de la presente investigación fue examinar cómo las nuevas tecnologías transforman la gestión de infraestructuras viales y mejoran la precisión y eficiencia en la evaluación del estado de los pavimentos. La investigación es documental bibliográfico con método deductivo, enfoque cualitativo y orientación aplicada. Es de tipo descriptivo y explicativo, con un diseño no experimental, transversal y retrospectivo. Para la recolección de datos, se empleó la técnica de revisión documental y el instrumento fue retroactivo basado en revisión de artículos científicos publicados en la base de datos Scopus entre 2019 y 2025. Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de técnicas como el aprendizaje automático, redes neuronales y algoritmos especializados permiten mejorar notablemente la precisión en la predicción de estos índices, superando las metodologías tradicionales. Además, el uso de tecnologías como la visión por computadora y los drones transforman la inspección de pavimentos y permiten realizar análisis más rápidos, precisos y automatizados. El empleo de sensores inteligentes y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) facilitan el monitoreo continuo y en tiempo real de la infraestructura vial, optimizando los recursos para su mantenimiento y contribuyendo a la prolongación de la vida útil de los pavimentos.

Palabras clave—Evaluación de pavimentos, tecnologías avanzadas, Índice de Condición de Pavimento (PCI), Índice Internacional de Rugosidad (IRI), Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI).

I. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles son estructuras compuestas por una serie de capas de materiales seleccionados, cuya función principal es distribuir las cargas del tránsito vehicular a las capas inferiores del suelo, protegiendo así la estabilidad y durabilidad de la vía. Estas estructuras están diseñadas para resistir no solo las cargas vehiculares, sino también las condiciones ambientales, como la variabilidad climática y los efectos del tiempo [1]. El objetivo primordial del diseño de pavimentos flexibles es proporcionar una transitabilidad segura y confortable a lo largo de su vida útil, la cual se proyecta generalmente en un periodo de 20 años [2]. Sin embargo, una proporción significativa de las obras de pavimentación no logran alcanzar este periodo de vida útil

esperado, debido a factores como el deterioro prematuro de las capas del pavimento, la insuficiencia en el mantenimiento preventivo o la deficiencia en el diseño inicial. Este déficit genera un considerable perjuicio económico para el Estado, al requerir intervenciones de reparación o rehabilitación antes de lo previsto, lo que también afecta directamente a los usuarios de las vías, quienes experimentan una disminución en la calidad del servicio vial. Por tanto, garantizar la durabilidad de los pavimentos es crucial no solo para la optimización de los recursos públicos, sino también para asegurar un transporte eficiente y seguro para la población beneficiaria.

En este contexto, el sistema de gestión de pavimentos surge como una herramienta fundamental para mantener las infraestructuras viales en condiciones óptimas durante su vida útil. Este sistema se basa en un proceso continuo que incluye la inspección, el monitoreo y la intervención para mitigar el deterioro del pavimento, a través de métodos de evaluación como el Índice de Condición de Pavimento (PCI), el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), y el Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI), con los que se pueden identificar de manera precisa las áreas críticas que requieren mantenimiento, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos. De entre estos, el PCI es uno de los más utilizados debido a su capacidad para proporcionar una evaluación rápida y detallada del estado general del pavimento, basándose en el análisis visual de las fallas y el deterioro presente en la superficie. De igual manera, el IRI, que mide la rugosidad del pavimento, es un indicador clave para evaluar la comodidad y seguridad del tránsito vehicular, especialmente en lo que respecta a la calidad de la rodadura y el confort del usuario. Estos métodos no solo permiten establecer el estado actual de la infraestructura, sino también predecir su rendimiento futuro, facilitando la planificación de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo [3].

Para asegurar la efectividad del sistema de gestión de pavimentos, es fundamental que la evaluación de su condición se realice mediante monitoreos periódicos y preventivos. Estos monitoreos deben ser diseñados para detectar de manera temprana los signos de deterioro, lo que permite intervenir antes de que los daños sean irreversibles o se conviertan en un riesgo para la seguridad vial. La recopilación de datos de campo, combinada con el uso de herramientas de análisis y

modelos predictivos, permite identificar las estrategias de mantenimiento más apropiadas, optimizando así los recursos destinados a la rehabilitación y conservación de las vías. Este enfoque preventivo no solo contribuye a mantener la funcionalidad de la infraestructura vial, sino que también mejora la eficiencia de la gestión pública relacionadas con el transporte, al prolongar la vida útil de los pavimentos y reducir los costos asociados con reparaciones frecuentes o costosas.

El método PCI es una técnica empleada para evaluar el estado de conservación de pavimentos, proporcionando una medición integral de su condición mediante la inspección visual de las fallas más comunes, como grietas, baches y deformaciones. Este índice se basa en una escala numérica que permite clasificar el pavimento en diferentes niveles de deterioro, facilitando la priorización de intervenciones de mantenimiento y reparación. El PCI es una herramienta crucial para la gestión eficiente de infraestructuras viales, ya que proporciona una evaluación objetiva y sistemática del deterioro del pavimento a lo largo del tiempo [4].

El método IRI es una herramienta ampliamente utilizada para medir la rugosidad de los pavimentos y evaluar su calidad en términos de confort y seguridad para los usuarios. Este índice cuantifica las irregularidades de la superficie de la carretera mediante un vehículo equipado con sensores, los cuales registran las variaciones en la altura del pavimento a lo largo de la vía. El IRI proporciona una medición precisa que permite clasificar las condiciones del pavimento, facilitando la toma de decisiones para la gestión y mantenimiento de las infraestructuras viales [5].

El método PSI es una métrica utilizada para evaluar el confort y la funcionalidad de un pavimento desde la perspectiva del usuario, basándose en la calidad de la superficie de rodadura. Este índice se calcula mediante la medición de la rugosidad y las irregularidades superficiales del pavimento, considerando factores como las deformaciones, grietas, baches y otras fallas visibles. El PSI proporciona una escala numérica que refleja el grado de comodidad y seguridad del pavimento, con valores más altos indicando mejores condiciones de transitabilidad. Este indicador es particularmente útil para la gestión de infraestructuras viales, ya que permite priorizar los pavimentos que requieren intervenciones para mejorar la calidad del viaje y reducir los costos operativos asociados con el mantenimiento de las vías. La evaluación periódica del PSI, en combinación con otros métodos como el PCI o el IRI, ofrece una visión integral del estado de los pavimentos, facilitando la toma de decisiones sobre el tipo de mantenimiento necesario [6].

Actualmente, los métodos PCI, IRI y PSI están profundamente influenciados por los avances tecnológicos, particularmente en el campo de la Inteligencia Artificial (IA). Estos índices, que generalmente dependen de procesos manuales o semiautomatizados para la recolección de datos y

la evaluación, están experimentando una evolución hacia sistemas mucho más precisos, eficientes y predictivos. La integración de IA, sensores avanzados, y tecnologías como drones y vehículos autónomos en el monitoreo de pavimentos permite una evaluación continua, detallada y en tiempo real, lo que optimiza la gestión de infraestructuras viales.

II. METODOLOGÍA

El método utilizado en la investigación es el deductivo, ya que, se establecen escenarios de mayor o menor precisión en la predicción de los índices PCI, IRI y PSI, identificando las causas que influyen en su precisión, como el uso de aprendizaje automático, redes neuronales y algoritmos especializados. Es de orientación aplicada, dado que busca definir criterios para la mejora en la inspección y monitoreo de pavimentos mediante el uso de tecnologías avanzadas. Además, tiene un enfoque cualitativo, ya que se basa en la revisión de artículos científicos y análisis de tendencias tecnológicas en el ámbito de la infraestructura vial.

La investigación es de tipo descriptivo, porque identifica las principales ventajas y limitaciones de las técnicas utilizadas en la predicción y mantenimiento de pavimentos. También es de tipo explicativo, ya que establece la relación entre la implementación de avances tecnológicos y la mejora en la eficiencia de la inspección vial. Esto permite comprender los factores que influyen en la precisión de los modelos predictivos y cómo optimizar los procesos de mantenimiento mediante la automatización y el monitoreo en tiempo real.

El nivel de la investigación es descriptivo, ya que detalla las innovaciones tecnológicas aplicadas al análisis de pavimentos. Es de enfoque cualitativo, pues se fundamenta en la revisión y contraste de estudios previos sobre el tema. De acuerdo con la técnica de contrastación, es no experimental, ya que se basa en la recopilación y análisis de información existente sin manipulación directa de variables. Según su direccionalidad, la investigación es transversal y retrospectiva, puesto que los datos se recolectaron en un período determinado mediante la revisión de artículos científicos publicados en la base de datos Scopus entre 2019 y 2025. El diseño del estudio es de tipo documental bibliográfico, debido a que el fenómeno estudiado se analiza con base en publicaciones previas que evidencian la evolución y aplicación de tecnologías emergentes en la inspección y mantenimiento de pavimentos.

En la investigación, se definieron como palabras claves los siguientes términos: *“Pavement Condition Index PCI”*, *“International Roughness Index IRI”*, *“Present Serviceability Index PSI”*. Asimismo, los criterios de inclusión y exclusión se detallan en la tabla 1:

TABLA 1
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Código	Descripción del Criterio
CI1	El título o resumen contiene las palabras clave: "Pavement Condition Index PCI", "International Roughness Index IRI", "Present Serviceability Index PSI"
CI2	Estudios escritos en idiomas de inglés
CI3	Los documentos deben ser de categoría artículos originales
CI4	Los documentos deben presentar el texto completo.
CI5	Estudios publicados entre los años 2019 - 2025.
CE1	Los estudios fuera del área temática de ingeniería.
CE2	Estudios que no contenían información suficiente sobre tecnologías modernas.
CE3	Estudios no enfocados en pavimentos flexibles.

El estudio también empleó la guía PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) como marco para su desarrollo, la cual, estructura la información de manera clara con el objetivo de identificar tanto las fortalezas como las debilidades relacionadas con el tema de investigación, proporcionando así contribuciones significativas al ámbito científico. Esta metodología se utilizó para la búsqueda y selección de registros en la base de Scopus, como se ilustra en la Fig. 1. A través de los estudios seleccionados bajo criterios de exclusión e inclusión, se pudo realizar un análisis bibliométrico de la literatura, considerando aspectos como el año de publicación, los idiomas predominantes en los artículos, las palabras clave utilizadas, las bases de datos más frecuentemente consultadas y la tipología de los documentos.

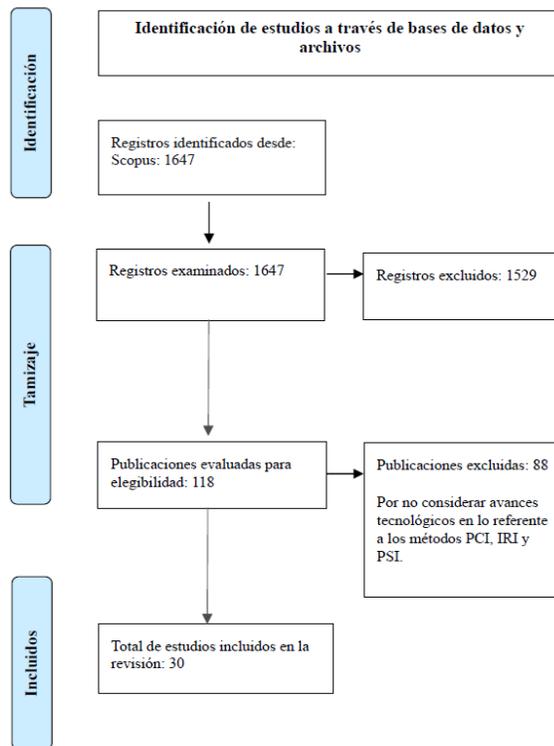


Fig. 1. Diagrama de flujo de PRISMA 2019-2025 para la selección de artículos científicos sobre métodos de evaluación de pavimentos.

Se seleccionaron 1,647 estudios, los cuales fueron sometidos a un proceso de selección basado en criterios de elegibilidad, teniendo como resultado de este proceso, 30 estudios que cumplen con los criterios definidos por los autores: (a) el título o resumen contiene una o todas las variables de estudio; (b) las palabras claves se asocian a la variable de estudio; (c) el área temática se relaciona con la ingeniería y (d) el estudio está disponible en su versión completa.

III. RESULTADOS

A continuación, se presenta la etapa de resultados, que inicia con una visión general de la diversidad de trabajos examinados en este estudio sobre avances tecnológicos de los métodos de evaluación de pavimentos flexibles en lo concerniente a los métodos PCI, IRI y PSI, durante el periodo comprendido entre 2019 y 2025, los cuales ascienden a un total de 30.

Durante la sección se estructuran dos aspectos: resultados de contenido que ayudarán a conocer los avances tecnológicos de los métodos de evaluación de pavimentos flexibles en lo concerniente a los métodos PCI, IRI y PSI y los resultados bibliométricos que ofrecen una visión cuantitativa sobre la distribución temporal y geográfica de la producción científica en el campo de los avances tecnológicos en la evaluación de pavimentos flexibles.

A. Resultados de contenido

De acuerdo con la revisión realizada, en los últimos años, se han desarrollado diversos métodos innovadores para la evaluación de pavimentos, impulsados por avances tecnológicos en aprendizaje automático, procesamiento de imágenes, sensores inteligentes y sistemas de información geográfica. Asimismo, herramientas como redes neuronales artificiales, aprendizaje profundo, y sistemas híbridos mejoran significativamente la precisión en la predicción de índices clave como el PCI e IRI, superando los métodos tradicionales en diversas métricas de desempeño.

Paralelamente, el uso de drones para capturar imágenes de alta resolución y generar modelos 2D/3D, optimiza la inspección y el monitoreo en tiempo real de las carreteras. Además, el empleo de algoritmos y enfoques basados en lógica difusa reducen la subjetividad en las evaluaciones. Estas tecnologías facilitan una gestión más eficiente y sostenible de los pavimentos, integrando datos complejos con análisis avanzados para enfrentar los desafíos del monitoreo vial.

La tabla 2 resume los avances tecnológicos logrados en el marco de cada una de las investigaciones. Estos avances se exponen con el fin de ofrecer una visión clara de los progresos

realizados, facilitando así una comparación entre los diferentes enfoques y resultados obtenidos en cada estudio.

TABLA 2
AVANCES TECNOLÓGICOS EN LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Autor	Método propuesto
[7]	Método que emplea datos de deflectómetros de caída de peso (FWD). Se aplicaron redes neuronales multicapa (MLP) y redes neuronales de función de base radial (RBF), optimizadas con algoritmos y se mejoraron con el método de sistema inteligente de máquinas de comité (CMIS). Los resultados mostraron una alta precisión con valores de error muy bajos, destacando la efectividad del modelo CMIS.
[8]	Técnica para la detección automática de fallas en el pavimento asfáltico que se basa en el procesamiento de imágenes. El método automatizado se evaluó mediante el procesamiento de los videos de la carretera, el cual presentó un porcentaje de precisión del 88,44%.
[9]	Método mediante fotogrametría, facilitada por aeronaves no tripuladas (UAS), que permite una evaluación más completa de los daños en el pavimento. La integración de UAS en la evaluación del estado del pavimento ha demostrado proporcionar una evaluación integral y reducir significativamente el tiempo y los recursos necesarios para las inspecciones de campo.
[10]	Método que emplea un vehículo terrestre no tripulado (UGV) para el monitoreo de las fallas del pavimento, desarrollando el prototipo <i>Rover for bituminous pavement distress survey</i> (ROADS). El cual puede calcular el PCI mediante una cámara digital de alta resolución y un sensor de imágenes multispectral.
[11]	Compara el PCI hallado de forma objetiva y subjetiva, concluyendo que es posible utilizar el PCI subjetivo para facilitar el proceso de evaluación mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), que permite la fácil visualización de las características de la vía a través de mapas.
[12]	Método que emplea vehículos aéreos no tripulados (UAV) para producir modelos 2D y 3D como medios visuales para evaluar las condiciones del pavimento. Los resultados mostraron que el nivel de precisión de la deformación del pavimento en el modelo frente a los resultados de las mediciones manuales en el campo oscila entre el 75 y el 98%.
[13]	Método mediante software de reconocimiento de imágenes de <i>back-end</i> utilizando un registrador de tráfico montado en un vehículo y un dispositivo de imágenes con capacidad de transmisión Wi-Fi. El algoritmo simple de superpíxeles de agrupación en clústeres lineales iterativos (SLIC) se utiliza para identificar áreas con daños en el pavimento. Los resultados del método totalmente automatizado propuesto obtienen resultados similares a los realizados mediante la inspección manual.
[14]	Modelo que estima el índice de condición del pavimento difuso (FPCI), utilizando el software del sistema de inferencia difusa MATLAB 2020b para diseñar un sistema de inferencia difusa a partir de los datos de rendimiento del pavimento a largo plazo (LTPP). Como resultado, la clasificación de pavimento difuso FPCI fue más precisa que la realizada mediante la manera tradicional.
[15]	Modelos de predicción del PCI dividiendo las carreteras en tres grupos según la clase de construcción del pavimento: pavimentos adaptados para altas cargas de tráfico, cargas de tráfico medias y cargas de tráfico bajas. Además de estimar su relación con los ESAL de carga de tráfico, la edad del pavimento y la rugosidad del pavimento.
[16]	Método de ponderación de la teoría de la evidencia difusa " <i>Dempster's Shafer's (D-S)</i> " para determinar el Índice de Angustia de la Condición del Pavimento (PCDI). La teoría D-S proporciona un marco diseñado para superar el riesgo de la incertidumbre y la ignorancia. Para la evaluación de pavimentos se consideran cinco indicadores estructurales principales como grietas longitudinales,

	grietas transversales, etc. y once indicadores funcionales principales como baches, surcos, parches, etc. y la opinión experta se toma de los expertos que están involucrados en el campo de la ingeniería de transporte.
[17]	Metodología de <i>pave box</i> , un enfoque de detección basado en la explotación de los datos recopilados por las cajas negras ubicadas en el interior de los vehículos que pasan habitualmente por la carretera. La caja de pavimento procesa los datos mediante algoritmos y proporciona una evaluación de la condición del pavimento que permite detectar todos los daños severos y no menos del 70% de los daños menores en la superficie del pavimento.
[18]	El PCI se utiliza junto con el modelo de conjuntos difusos variables de peso de entropía para desarrollar un método de evaluación novedoso para el nivel de calidad del rendimiento del pavimento. En primer lugar, se determina la matriz de pertenencia relativa de la muestra de evaluación. A continuación, se obtienen los coeficientes de ponderación de los diferentes índices utilizando el método de ponderación de entropía. Finalmente, el nivel de calidad del rendimiento del pavimento se determina a partir del valor medio de la característica de clasificación.
[19]	Modelo de predicción del rendimiento del pavimento basado en aprendizaje automático, mediante la base de datos de rendimiento del pavimento a largo plazo (LTPP). Se analizaron tres modelos de predicción distintos, el modelo de Red Neuronal Totalmente Conectada (FCNN), el modelo de Memoria a Largo Corto Plazo (LSTM) y el modelo combinado LSTM-Atención. El estudio muestra que el modelo LSTM-Attention se comporta significativamente mejor que los modelos FCNN y LSTM.
[20]	Modelo de red neuronal convolucional (CNN) llamado PCIER para evaluar la condición del pavimento utilizando imágenes aéreas. El modelo clasifica el PCI en cuatro categorías y fue entrenado con datos obtenidos de Google Earth. Con una precisión de prueba del 97% y métricas de rendimiento altas, el modelo demuestra ser eficaz.
[21]	Método que automatiza la sugerencia de mantenimiento de pavimentos, específicamente en la ubicación, profundidad y prioridad de los parches. Se integra la evaluación estructural y superficial del pavimento, utilizando datos de deflexión y parámetros como el índice de rugosidad y la densidad de agrietamiento, para mejorar la precisión de las recomendaciones. Se desarrolla un algoritmo basado en umbrales para sugerir estrategias de parcheo y una herramienta web interactiva para visualizar y analizar los resultados, validada con imágenes obtenidas por sensores láser.
[22]	Método para modelar la relación entre el tipo y la gravedad de las fallas en pavimentos y el PCI utilizando Redes Neuronales Artificiales (ANN). Los resultados mostraron que el modelo ANN predice el PCI con alta fiabilidad, lo que reduce la necesidad de experiencia técnica en el cálculo del PCI.
[23]	Empleo del software SIG para calcular el PCI empleando cuatro métodos de interpolación (<i>IDW, spline, trend</i> y <i>kriging</i>). Los resultados mostraron que el método <i>spline</i> tuvo la mejor correlación y ajuste con el método convencional, ayudando a priorizar el mantenimiento del pavimento y estimar los costos correspondientes en cada punto de defecto.
[24]	Método que integra tecnologías de aprendizaje profundo y procesamiento de imágenes mediante un algoritmo para la detección precisa de grietas en el pavimento, seguido de la aplicación de un algoritmo basado en segmentación en el procesamiento de imágenes para estimar el ancho de la grieta con precisión. Este enfoque integrado mejora el proceso de evaluación.
[25]	Sistema de detección inteligente (ISA) basado en impresión 3D e IoT para evaluar la calidad de la construcción del pavimento, introduciendo el Índice de Percepción de la Conducción (DPI) para correlacionar variables como la compactación, la rugosidad y la deflexión, y estableciendo un estándar de evaluación de calidad para pavimentos asfálticos.

[26]	Modelos predictivos del IRI a lo largo del tiempo mediante un enfoque basado en Redes Neuronales Artificiales (ANN) para modelar el IRI, comparando su rendimiento con un modelo de regresión lineal múltiple. Los modelos desarrollados permiten identificar patrones y factores clave, como el IRI inicial del pavimento y las condiciones climáticas, que influyen significativamente en su evolución.
[27]	Modelos de Redes Neuronales Artificiales (ANN) para predecir el IRI en función de la edad del pavimento y la Carga Equivalente Acumulada de un Eje (CESAL). Los resultados muestran que los modelos ANN tienen una excelente capacidad predictiva.
[28]	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el mantenimiento de carreteras, utilizando modelos 2D/3D generados a partir de fotografías aéreas obtenidas mediante UAV. Los resultados indican que el escenario moderado es el más costo-efectivo, ya que mantiene las condiciones viales dentro de un IRI aceptable.
[29]	Modelos predictivos del IRI para pavimentos empleando una base de datos histórica de 14 años para predecir el IRI en función de la edad del pavimento y la Carga Equivalente Acumulada de un Eje (CESAL). Los modelos muestran una excelente capacidad de predicción con altos coeficientes de determinación y bajos errores.
[30]	Método que analiza el IRI utilizando datos del Sistema de Rendimiento del Pavimento a Largo Plazo (LTPP) mediante dos técnicas: regresión lineal múltiple (MLR) y redes neuronales artificiales (ANN). Los resultados muestran que ambos modelos son efectivos, pero los modelos ANN son significativamente más precisos y eficientes.
[31]	Método que analiza herramientas modernas para la inspección y el mantenimiento de carreteras, específicamente vehículos aéreos no tripulados (UAV), cámaras y GPS para crear modelos tridimensionales virtuales de carreteras. Estos modelos permiten extraer información precisa y calcular el IRI, con resultados que coinciden con las mediciones oficiales. La investigación resalta el potencial de estas tecnologías para optimizar la recopilación de datos, mejorar la precisión en el análisis y agilizar los procesos de mantenimiento de carreteras.
[32]	Modelos de aprendizaje automático para predecir el IRI y su deterioro en pavimentos asfálticos, utilizando simulaciones del software Pavement ME y redes neuronales artificiales (ANN), se diseñan dos modelos: el Modelo I, un modelo predictivo de IRI basado solo en ANN, y el Modelo II, un modelo híbrido que combina predicciones de daños específicos (fatiga y agrietamiento térmico) con relaciones cerradas entre estos indicadores y el IRI. Los resultados muestran que el Modelo II ofrece mayor precisión y eficiencia en comparación con el Modelo I, y se adapta mejor a diferentes consideraciones de diseño, acercándose a las simulaciones IRI de Pavement ME.
[33]	Modelos híbridos para predecir el IRI utilizando un enfoque que combina el sistema de inferencia difusa basado en redes adaptativas (ANFIS) con algoritmos. Los modelos híbridos propuestos (GANFIS, PSOANFIS, FAANFIS) se comparan con redes neuronales artificiales (ANN) para evaluar su rendimiento en la predicción del IRI. Este estudio demuestra la efectividad de los modelos híbridos para predecir con precisión el IRI y evaluar la calidad de la rugosidad de la superficie de la carretera.
[34]	Modelo innovador para predecir el IRI utilizando técnicas de predicción de series temporales de tendencia difusa combinadas con optimización por enjambre de partículas (PSO). Se utiliza la base de datos <i>Long-Term Pavement Performance</i> para entrenar y evaluar el modelo. Los resultados experimentales muestran que el modelo propuesto supera a otros enfoques tradicionales destacando su efectividad en la predicción del IRI y en la gestión del rendimiento del pavimento.
[35]	Modelos difusos para predecir el comportamiento del pavimento utilizando la lógica difusa para convertir variables lingüísticas cualitativas en valores cuantitativos. Se recopila el conocimiento de expertos en construcción y mantenimiento de pavimentos sobre factores como la edad del pavimento, el tráfico, el IRI y el PCI.

	Utilizando el software InFuzzy, se desarrollan modelos difusos para estos índices. Los modelos muestran un buen ajuste a los datos observados, lo que demuestra su efectividad en la predicción del comportamiento del pavimento.
[36]	Modelo que busca disminuir el PSI del pavimento, lo que ayuda a prolongar su vida útil y reducir los gastos de mantenimiento. Se utiliza el algoritmo de optimización basado en la enseñanza y el aprendizaje (TLBO), logrando una asignación de tráfico más equilibrada.

En el análisis de los avances tecnológicos aplicados a la evaluación y mantenimiento de pavimentos se identificó 30 artículos científicos agrupados en 8 categorías principales. El mayor número de estudios se centró en el aprendizaje automático y redes neuronales, con 8 artículos, resaltando su potencial en la predicción precisa del estado del pavimento. Le siguen con 5 artículos, las tecnologías de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sistema de aeronave no tripulada (UAS), ambas destacadas por su capacidad para agilizar y mejorar las inspecciones de carreteras. Asimismo, 4 artículos se basan en modelos predictivos y técnicas de optimización.

Los sistemas de información geográfica también fueron abordados en 3 estudios, al igual que la teoría difusa y modelos híbridos, que buscan manejar la incertidumbre en los análisis y el procesamiento de imágenes y visión por computadora.

En la tabla siguiente se muestra la categorización de avances tecnológicos de los 30 artículos científicos en función a la tecnología propuesta.

TABLA 3
CATEGORIZACIÓN DE AVANCES TECNOLÓGICOS

Tecnología	Autor
Aprendizaje automático y redes neuronales	[7], [19], [20], [22], [26], [27], [30], [32].
Procesamiento de imágenes y visión por computadora	[8], [13], [24].
Tecnologías UAV y UAS	[9], [10], [12], [31], [35].
Sistemas de Información Geográfica	[11], [23], [28].
Teoría difusa y modelos híbridos	[14], [18], [33].
Modelos predictivos y técnicas de optimización	[15], [16], [29], [34].
Sensores y tecnología de detección	[17], [25].
Algoritmos	[21], [36].

De lo expuesto, los avances tecnológicos transforman la evaluación y mantenimiento de los pavimentos, mediante herramientas innovadoras que mejoran tanto la precisión como la eficiencia en los procesos de gestión vial, demostrando su capacidad para optimizar la predicción del estado del pavimento, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Además, mejoran la inspección y monitoreo de carreteras, permitiendo la captura de datos en tiempo real con mayor precisión.

B. Resultados bibliométricos

A continuación, se presentan los principales resultados bibliométricos de la revisión sistemática de los artículos finales evaluados. Para la presente investigación se organizaron los artículos según fecha de publicación y fueron clasificados según la producción científica anual. En la Fig. 2 se observa que los años 2022, 2023 y 2024 tuvieron la mayor producción científica con un aporte científico 6 documentos por año, seguido por el año 2020 con 5 documentos. Es importante señalar que, en el año actual, aunque se han realizado investigaciones, ninguna de ellas ha abordado avances tecnológicos en los métodos de evaluación de pavimentos.

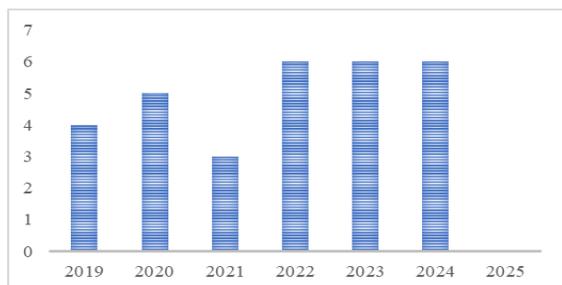


Fig. 2. Producción científica anual de artículos científicos originales sobre avances tecnológicos de los métodos de evaluación de pavimentos flexibles entre los años 2019-2025.

Respecto al país de origen, se muestra una variedad de países que contribuyen aportando artículos en diferentes años. En la Fig. 3 se presenta la producción científica mundial durante los años 2019 - 2025. Los principales países con más artículos publicados fueron Estados Unidos y China con 4 estudios cada uno.



Fig. 3. Mapa de países con artículos científicos originales sobre avances tecnológicos de los métodos de evaluación de pavimentos flexibles, publicados a nivel mundial entre los años 2019-2025.

Discusión. El aprendizaje automático y las redes neuronales han emergido como herramientas fundamentales para la evaluación de pavimentos, destacándose por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y modelar relaciones complejas entre múltiples variables. Por ejemplo, los modelos basados en redes neuronales artificiales muestran un desempeño sobresaliente para predecir el PCI, superando significativamente las aproximaciones tradicionales [22]. De manera similar, las redes neuronales convolucionales

demuestran su eficacia en el procesamiento de imágenes aéreas, alcanzando una precisión del 97% en la predicción del PCI [20].

Los modelos híbridos también demuestran ser altamente efectivos, ya que tiene un alto desempeño en la predicción del PCI con métricas de error significativamente bajas, al combinar múltiples enfoques de aprendizaje automático [7]. Sin embargo, a pesar de los avances significativos, persisten desafíos importantes, como la dependencia de bases de datos extensas y representativas, la dificultad para generalizar modelos a diferentes condiciones geográficas y la limitada interpretabilidad inherente a las redes neuronales profundas, lo que puede limitar su aceptación en aplicaciones prácticas [19] [22].

Adicionalmente, el desarrollo de software especializado, como el basado en el algoritmo SLIC (*Simple Linear Iterative Clustering*), permite identificar automáticamente daños en el pavimento y calcular el PCI con alta precisión. Este método se muestra particularmente eficaz en entornos urbanos, como en el caso de Taiwán, aunque su rendimiento puede estar limitado por la resolución y profundidad de las imágenes 2D utilizadas [13]. Por otro lado, el aprendizaje profundo fue un avance clave en este campo, ya que el uso de redes neuronales profundas para la detección de grietas y la segmentación de imágenes alcanzó una precisión del 95% en la identificación de daños y del 90% en la estimación del ancho de grietas, superando significativamente los métodos convencionales en términos de eficiencia y fiabilidad [24].

Las tecnologías UAV y UAS son herramientas clave en la evaluación de pavimentos, destacándose por su capacidad para recopilar datos de alta precisión de manera eficiente y segura, ya que, permiten capturar imágenes de alta resolución y generar modelos tridimensionales que facilitan el análisis detallado de las condiciones de las carreteras. Las evaluaciones basadas en UAS no solo igualan, sino que, en algunos casos, superan los métodos tradicionales, especialmente en la segmentación precisa de redes viales urbanas, lo que demuestra su idoneidad para entornos complejos [9]. Además, la integración de cámaras y sistemas GPS en los UAV demuestran resultados impresionantes en el cálculo del IRI, destacando su viabilidad para aplicaciones de mantenimiento y planificación vial [31]. Asimismo, la combinación de UAV con vehículos terrestres no tripulados ofrecen una perspectiva multidimensional que mejora la evaluación estructural y superficial del pavimento [10]. Sin embargo, el uso de UAV no está exento de desafíos, como la necesidad de estandarización en los procedimientos de recopilación de datos y la dependencia de condiciones climáticas óptimas para operaciones exitosas [35]. Además, la integración de SIG con datos obtenidos mediante UAV mejoran la evaluación de condiciones viales al proporcionar un análisis más detallado y preciso, permitiendo proyectar

costos de mantenimiento con base en escenarios de mejora del IRI, evidenciando su potencial no solo para la evaluación de pavimentos, sino también para la optimización de recursos en planes de rehabilitación [28].

De similar manera, los avances en sensores y tecnología de detección están revolucionando la forma en que se evalúa y mantiene el estado de los pavimentos. Ejemplo de ello, es el uso de cajas de pavimento (*Pave Box*), las cuales están equipadas con sensores de aceleración vertical en vehículos para detectar daños en el pavimento, y del cual se destaca por su capacidad para identificar más del 70% de los daños menores y todos los daños severos, lo que permite una inspección más rápida y de bajo costo en comparación con los métodos tradicionales. Además, este sistema minimiza la intervención humana, proporcionando datos más consistentes y detallados para la toma de decisiones sobre mantenimiento [17].

La aplicación de algoritmos para la gestión y mantenimiento de pavimentos, destaca su potencial para optimizar procesos mediante estrategias automatizadas y modelos matemáticos. El algoritmo de sugerencia de parcheo combina evaluaciones estructurales y superficiales para proponer estrategias específicas de mantenimiento, logrando una reparación más eficiente y focalizada [21], mientras que el modelo de asignación dinámica de tráfico aborda la sostenibilidad del pavimento al optimizar la distribución del tráfico para minimizar el deterioro y extender la vida útil. Ambos enfoques reflejan la importancia de integrar tecnologías avanzadas y análisis cuantitativos para mejorar la toma de decisiones en la gestión vial, demostrando un impacto significativo en la eficiencia de recursos, reducción de costos y prolongación del rendimiento de las infraestructuras viales [36].

IV. CONCLUSIONES

Los avances tecnológicos de la evaluación de pavimentos flexibles enfrentan retos significativos, como la generalización de los modelos a diferentes contextos geográficos, la dependencia de bases de datos amplias y representativas, y la limitada interpretabilidad de las redes neuronales profundas. A pesar de estas limitaciones, la integración de técnicas de aprendizaje automático y la combinación con enfoques tradicionales resalta el potencial de estas herramientas para mejorar la gestión y el mantenimiento vial, especialmente cuando se contextualizan los datos y se emplean en entornos específicos.

El uso de tecnologías avanzadas como el aprendizaje automático, las redes neuronales y los modelos híbridos ha transformado sustancialmente la evaluación de pavimentos, ofreciendo predicciones más precisas del PCI y optimizando los procesos de análisis. En el ámbito del procesamiento de imágenes y la visión por computadora, el uso de tecnologías

UAV ha permitido un análisis más detallado y eficiente de las condiciones de los pavimentos, superando las limitaciones de los métodos manuales tradicionales. Estas tecnologías, al proporcionar una alta precisión en la detección de daños, junto con la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algoritmos especializados, subrayan su relevancia para la planificación estratégica del mantenimiento vial. No obstante, la implementación exitosa de estas herramientas depende de superar desafíos técnicos, como la estandarización de procedimientos, la calidad de las imágenes y las restricciones operativas impuestas por factores climáticos y condiciones de campo.

Por último, los avances en sensores inteligentes y las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) han abierto nuevas posibilidades para el monitoreo continuo y en tiempo real de los pavimentos, contribuyendo no solo a reducir costos, sino también a mejorar la toma de decisiones en la gestión de infraestructuras viales. La aplicación de algoritmos de optimización para la asignación de recursos y la prolongación de la vida útil de los pavimentos refuerza la necesidad de adoptar enfoques integrados y sostenibles. Estos desarrollos tecnológicos no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también garantizan la durabilidad y sostenibilidad de las redes viales, beneficiando a largo plazo tanto a las comunidades como a las economías locales. La sinergia entre las tecnologías avanzadas y los métodos tradicionales es clave para asegurar una infraestructura vial resiliente y adaptativa frente a los desafíos futuros.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

En primer lugar, agradecer a Dios por permitirnos culminar el trabajo; asimismo un agradecimiento especial a la Universidad Nacional Federico Villarreal, y a nuestros docentes del Doctorado, por el conocimiento brindado.

REFERENCIAS

- [1] Montejó, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- [2] Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013). Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos - Sección suelos y pavimentos. Lima: Ministerio de Transporte y Comunicaciones. RAGNOLI, Antonella; DE BLASIIS, Maria Rosaria; DI BENEDETTO, Alessandro. Pavement distress detection methods: A review. *Infrastructures*, 2018, vol. 3, no 4, p. 58.
- [3] Shtayat, A., Moridpour, S., Best, B., & Rumi, S. (2022). An overview of pavement degradation prediction models. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 7783588.
- [4] Pinatt, J. M., Chicati, M. L., Ildefonso, J. S., & Filetti, C. R. G. D. A. (2020). Evaluation of pavement condition index by different methods: Case study of Maringá, Brazil. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100100.
- [5] Ziari, H., Sobhani, J., Ayoubinejad, J., & Hartmann, T. (2016). Prediction of IRI in short and long terms for flexible pavements: ANN and GMDH methods. *International journal of pavement engineering*, 17(9), 776-788.
- [6] Isradi, M., Prasetyo, J., Prasetyo, Y. D., Hartatik, N., & Rifai, A. I. (2023). Prediction of Service Life Base on Relationship Between Psi and Iri for Flexible Pavement. *Proceedings on Engineering*, 5(2), 267-274.

- [7] Karballaezadeh, N., Zaremotekhas, F., Shamshirband, S., Mosavi, A., Nabipour, N., Csiba, P., & Várkonyi-Kóczy, A. R. (2020). Intelligent road inspection with advanced machine learning; hybrid prediction models for smart mobility and transportation maintenance systems. *Energies*, 13(7), 1718.
- [8] Abbas, I. H., & Ismael, M. Q. (2021). Automated pavement distress detection using image processing techniques. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(5), 7702-7708.
- [9] Ortega Rengifo, D. M., Capa Salinas, J., Perez Caicedo, J. A., & Rojas Manzano, M. A. (2024). Unmanned aircraft systems in road assessment: a novel approach to the pavement condition index and vizir methodologies. *Drones*, 8(3), 99.
- [10] Mei, A., Zampetti, E., Di Mascio, P., Fontinovo, G., Papa, P., & D'Andrea, A. (2022). ROADS—Rover for Bituminous Pavement Distress Survey: An Unmanned Ground Vehicle (UGV) Prototype for Pavement Distress Evaluation. *Sensors*, 22(9), 3414.
- [11] Pinatt, J. M., Chicati, M. L., Ildefonso, J. S., & Filetti, C. R. G. D. A. (2020). Evaluation of pavement condition index by different methods: Case study of Maringá, Brazil. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100100.
- [12] Astor, Y., Nabesima, Y., Utami, R., Sihombing, A. V. R., Adli, M., & Firdaus, M. R. (2023). Unmanned aerial vehicle implementation for pavement condition survey. *Transportation Engineering*, 12, 100168.
- [13] Ho, M. C., Lin, J. D., & Huang, C. F. (2020). Automatic image recognition of pavement distress for improving pavement inspection. *GEOMATE Journal*, 19(71), 242-249.
- [14] Ali, A., Heneash, U., Hussein, A., & Eskebi, M. (2022). Predicting pavement condition index using fuzzy logic technique. *Infrastructures*, 7(7), 91.
- [15] Paplauskas, P., Vaitkus, A., & Simanavičienė, R. (2023). Road pavement condition index deterioration model for network-level analysis of national road network based on pavement condition scanning data. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 18(3), 70-101.
- [16] Wadalkar, S., Lad, R. K., & Jain, R. K. (2020). Performance assessment of flexible pavements: fuzzy evidence theory approach. *Civil Engineering Journal*, 6(8), 1492-1502.
- [17] Meocci, M., Branzi, V., & Sangiovanni, A. (2021). An innovative approach for high-performance road pavement monitoring using black box. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 485-506.
- [18] Li, Y., Wang, Y. H., Wu, Q. H., & Gu, X. B. (2022). The Quality Assessment of Pavement Performance Using the Entropy Weight-Variable Fuzzy Sets Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 5016050.
- [19] Chen, L., Li, H., Wang, S., Shan, F., Han, Y., & Zhong, G. (2024). Improved model for pavement performance prediction based on recurrent neural network using LTPP database. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
- [20] Han, S., Chung, I. H., Jiang, Y., & Uwakweh, B. (2023). PCIER: Pavement Condition Evaluation Using Aerial Imagery and Deep Learning. *Geographies*, 3(1), 132-142.
- [21] Jha, S., Zhang, Y., Park, B., Cho, S., Krogmeier, J. V., Bagchi, T., & Haddock, J. E. (2023). Data-Driven Web-Based Patching Management Tool Using Multi-Sensor Pavement Structure Measurements. *Transportation Research Record*, 2677(12), 83-98.
- [22] Issa, A., Samaneh, H., & Ghanim, M. (2022). Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101490.
- [23] Issa, A., Hijazi, I., Qanazi, S., Natsheh, E., & Rashed, A. (2023). Assessment of Existing Pavement Distresses Utilizing ArcMap-GIS: The Case of Nablus City. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(2).
- [24] Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J. H., Cho, J., & Lee, J. J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis: An End-to-End Approach. *Sensors*, 24(7), 2333.
- [25] Zhang, C., & Zheng, Y. (2021). Study on the evaluation standard of construction quality for asphalt pavement based on the intelligent sensing aggregate. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 9985627.
- [26] Sigdel, T., Pradhananga, R., & Shrestha, S. (2024). Artificial Neural Network-based model to predict the International Roughness Index of national highways in Nepal. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 25, 101128.
- [27] Gharieb, M., Nishikawa, T., Nakamura, S., & Thepvongsa, K. (2022). Modeling of pavement roughness utilizing artificial neural network approach for Laos national road network. *Journal of Civil Engineering and Management*, 28(4), 261-277.
- [28] Rizkya, A. M., Zahraa, A. A., Astora, Y., Septiana, R., Munawara, G., Sihombinga, A. V., & Fauzia, C. (2023). Road Maintenance Management Based on Geographic Information System (GIS). *management*, 20, 22.
- [29] Gharieb, M., Nishikawa, T., Nakamura, S., & Thepvongsa, K. (2022). Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Forecasting Pavement Roughness in Laos. *Coatings*, 12(3), 380.
- [30] Ali, A. A., Heneash, U., Hussein, A., & Khan, S. (2024). Application of Artificial neural network technique for prediction of pavement roughness as a performance indicator. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 36(2), 128-139.
- [31] Prosser-Contreras, M., Atencio, E., Muñoz La Rivera, F., & Herrera, R. F. (2020). Use of unmanned aerial vehicles (Uavs) and photogrammetry to obtain the international roughness index (iri) on roads. *Applied Sciences*, 10(24), 8788.
- [32] Li, H., AzariJafari, H., Kirchain, R., Santos, J., & Khazanovich, L. (2024). Surrogate modelling of surface roughness for asphalt pavements using artificial neural networks: a mechanistic-empirical approach. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1), 2434909.
- [33] Nguyen, H. L., Pham, B. T., Son, L. H., Thang, N. T., Ly, H. B., Le, T. T., ... & Tien Bui, D. (2019). Adaptive network based fuzzy inference system with meta-heuristic optimizations for international roughness index prediction. *Applied Sciences*, 9(21), 4715.
- [34] Li, W., Huyan, J., Xiao, L., Tighe, S., & Pei, L. (2019). International roughness index prediction based on multigranularity fuzzy time series and particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications: X*, 2, 100006.
- [35] Soncim, S. P., De Oliveira, I. C. S., & Santos, F. B. (2019). Development of fuzzy models for asphalt pavement performance. *Acta Scientiarum. Technology*, 41, e35626.
- [36] Mao, X., Wang, J., Yuan, C., Yu, W., & Gan, J. (2019). A dynamic traffic assignment model for the sustainability of pavement performance. *Sustainability*, 11(1), 170.