

Actualización y Mejora de los Métodos Estadísticos para Evaluar la Calidad de los Desplazamientos a partir de la Distribución de Defectos en los Pavimentos de las Carreteras

Updating and Improving Statistical Methods for Evaluating the Quality of Travel Based on the Distribution of Defects in Road Pavements

Atualização e Aprimoramento de Métodos Estatísticos para Avaliação da Qualidade de Viagem com Base na Distribuição de Defeitos em Pavimentos Rodoviários

Celio Daroncho¹

celio.daroncho@fatec.sp.gov.br

1- Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Resumen:

Este artículo propone una actualización metodológica para evaluar la calidad de los viajes en las carreteras a partir de la relación entre la distribución de las dificultades de la superficie del pavimento y los puntajes asignados por evaluadores capacitados. Utilizando datos recolectados de 37 tramos de carreteras rurales en São Paulo, Brasil, se aplicaron escalas de regresión lineal múltiple y clasificación basadas en la distribución normal. Los resultados indican que la calidad percibida del viaje se puede estimar de manera confiable a partir de variables objetivas de angustia. Se sugieren mejoras al método original, incluida la incorporación de técnicas de aprendizaje automático y la validación de datos interregional ampliada. Se concluye que la integración de datos subjetivos y objetivos puede orientar las prioridades de mantenimiento y mejorar la eficiencia de la gestión de la infraestructura vial.

Palabras clave: Calidad de viaje, deterioro del pavimento, regresión múltiple, escalas Likert, gestión de infraestructuras.

Abstract:

This paper proposes a methodological update for assessing travel quality on highways based on the relationship between the distribution of pavement surface distresses and scores assigned by trained evaluators. Using data collected from 37 rural highway segments in São Paulo, Brazil, multiple linear regression and classification scales based on the normal distribution were applied. The results indicate that perceived travel quality can be reliably estimated from objective distress variables. Improvements to the original method are suggested, including the incorporation of machine learning techniques and expanded cross-regional data validation. It is concluded that the integration of subjective and objective data can guide maintenance priorities and improve the efficiency of road infrastructure management.

Keywords: Travel quality, pavement distress, multiple regression, Likert scales, infrastructure management.

Recebido

Received

Recibido

03 ago. 2025

Aug. 03, 2025

03 ago. 2025

Aceito

Accepted

Aceptado

15 ago. 2025

Aug. 15, 2025

15 ago. 2025

Publicado

Published

Publicado

01 out. 2025

Oct. 01, 2025

01 oct. 2025

<https://git.fateczl.edu.br>

e_ISSN

2965-3339

DOI

10.5281/zenodo.20166790

São Paulo

v. 4 | n. 1

v. 4 | i. 1

e41387

Outubro/Dezembro

October/December

Octubre/Diciembre

2025



Resumo:

Este artigo propõe uma atualização metodológica para a avaliação da qualidade de viagem em rodovias, com base na relação entre a distribuição de defeitos superficiais do pavimento e notas atribuídas por avaliadores treinados. Utilizando dados coletados em 37 segmentos rodoviários vicinais no estado de São Paulo, aplicaram-se técnicas de regressão linear múltipla e análise de escalas de classificação baseadas na distribuição normal. Os resultados indicam que é possível estimar a qualidade percebida da viagem a partir de variáveis objetivas de defeitos, com confiabilidade estatística. São sugeridas melhorias no método original, incluindo a incorporação de técnicas de machine learning e a expansão da base de dados para validação cross-regional. Conclui-se que a integração de dados subjetivos e objetivos pode orientar prioridades de manutenção e melhorar a eficiência na gestão de infraestrutura rodoviária.

Palavras-chave: Qualidade de viagem, defeitos de pavimento, regressão múltipla, escalas de Likert, gestão de infraestrutura.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del desplazamiento por autopistas está influida por múltiples factores, entre los que destacan las condiciones de la superficie del pavimento. Defectos como grietas, agujeros, parches y deformaciones afectan directamente al confort y seguridad de los usuarios (Haas, Hudson & Zaniewski, 1994). Tradicionalmente, la evaluación de estas condiciones se realiza mediante inspecciones visuales e instrumentales, pero la incorporación de la percepción de los usuarios ha cobrado relevancia en la literatura internacional (Al-Omari & Darter, 1994; Gülen et al., 1994).

El trabajo original de Daroncho (2001) exploró la relación entre la distribución de defectos y las puntuaciones asignadas por evaluadores formados, utilizando múltiples escalas de regresión lineal y de valoración. Sin embargo, los avances recientes en técnicas estadísticas y de aprendizaje automático ofrecen oportunidades para mejorar la precisión y aplicabilidad de este método.

Las técnicas de teledetección, incluyendo imágenes de drones de alta resolución y escaneo LiDAR (Light Detection and Ranging), permiten ahora la captura exhaustiva y frecuente de datos sobre el estado del pavimento (Cursino, Machado, 2021). Simultáneamente, los algoritmos de inteligencia artificial, especialmente las redes neuronales convolucionales (CNN - Convolutional Neural Networks), han demostrado una capacidad superior para detectar y clasificar automáticamente defectos en el pavimento (Sholevar, Golroo, Esfahani, 2022). Estas tecnologías emergentes ofrecen oportunidades para superar las limitaciones de los métodos tradicionales, como la subjetividad en la evaluación visual y la baja frecuencia de inspecciones.

Este artículo pretende revisar y actualizar la metodología propuesta por Daroncho (2001), incorporando nuevos enfoques estadísticos y proponiendo una estructura ampliada para la recogida y análisis de datos. Además, se discute la viabilidad de aplicar el método en diferentes contextos y su integración con los sistemas de gestión del pavimento.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1. CALIDAD DEL DESPISTE Y DEFECTOS DEL PAVIMENTO

La calidad de marcha es una estructura multidimensional que abarca comodidad, seguridad y eficiencia (Haas & Hudson, 1996). Los defectos del pavimento superficial, como grietas, agujeros y deformaciones, son indicadores objetivos que se correlacionan con la percepción subjetiva de los usuarios (SHRP, 1993; Austroads, 1987).

2.2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN SUBJETIVA Y OBJETIVA

El enfoque de los paneles de evaluadores formados fue pionero por AASHO (1962) tras ser consolidado por Carey e Irick (1960). Más recientemente, este método ha sido reemplazado gradualmente por enfoques automatizados. Singh et al. (2022)

demonstraron que los sistemas basados en visión por ordenador pueden alcanzar un 95% de precisión en la detección de grietas, superando significativamente la evaluación humana en términos de consistencia y rapidez.

2.3. TELEDETECCIÓN EN INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE

Las aplicaciones de drones y LiDAR en la monitorización de infraestructuras viarias se han expandido rápidamente tras 2020. Zhang, Chen, Wu, Guo, Jia (2021) desarrollaron un sistema integrado de dron-LiDAR que captura datos 3D de alta precisión para la evaluación de deformaciones superficiales, mientras que Kothai, Prabakaran, Srinivasa Murthy, Cenkeramaddi, Kakani et al. (2024) propusieron una revisión sistemática integral sobre técnicas automatizadas de detección, clasificación y análisis de daños en pavimentos basadas en algoritmos de inteligencia artificial (*machine learning* y *deep learning*).

2.4. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS

Los avances en *deep learning* han revolucionado el análisis de datos de infraestructuras. Deng, Li, Zhou, ZHANG, Yang, Shang Li (2023) aplicaron redes neuronales recurrentes para predecir la evolución de defectos a lo largo del tiempo, mientras que Paraschos, Geronikos, Kepaptsoglou y Koulouriotis (2025) desarrollaron una metodología basada en *aprendizaje por refuerzo* (*Reinforcement Learning* – RL) para optimizar la planificación del mantenimiento del pavimento.

2.5. ESCALAS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A pesar de los avances tecnológicos, la percepción humana sigue siendo crucial para evaluar la calidad de los viajes. Estudios recientes de Staniek (2022), Zhang, Chen, Wu, Guo, Jia (2025) y Mahamed, Esam, Nafaa, Ashour, Emad, Elhenawy, Ashqar, Hassan, Glaser, Rakotonirainy (2023) han explorado nuevas metodologías para integrar datos sensoriales objetivos con evaluaciones subjetivas en tiempo real mediante aplicaciones móviles, creando sistemas híbridos de evaluación continua. La Escala de Likert (1932) permite la transformación de juicios subjetivos en medidas cuantitativas. La normalización de estos datos mediante puntuaciones *z* facilita la comparación entre diferentes muestras y contextos (Werkema, 1996).

3. MÉTODO

3.1. RECOGIDA DE DATOS

Se utilizaron datos originales de 37 tramos de carretera lateral cerca de Araraquara-SP, recogidos entre enero y marzo de 2001. Variables incluidas:

- Calificaciones otorgadas por 32 evaluadores formados (escala 1–5);
- Mediciones y conteos de 31 tipos de defectos, clasificados por gravedad.

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

- Regresión lineal *múltiple Stepwise*: identificar variables significativas en la predicción de las calificaciones.
- Escala de Likert: transformar las calificaciones en puntuaciones Z y comparar distribuciones.
- Prueba de hipótesis: comparación de medias mediante la prueba *t de Student*.

3.3. PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN

- Incorporación de redes neuronales o *random forests* para modelado no lineal.
- Expansión de muestras con datos de múltiples regiones.
- Uso de imágenes digitales y sensores para automatizar la recopilación de datos de defectos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

El modelo de regresión explicó el 70,83% de la varianza ($R^2 = 0,7083$), con cinco variables significativas (Tabla 1).

Tabla 1: Coeficientes significativos del modelo de regresión

Variable	Coeficiente	valor p
Interceptor	3,51144	< 0,001
Parche (gravedad media)	-0,00079	0,046
Desgaste (severidad media)	-0,00058	0,019
Parche (de alta severidad)	-0,00071	0,032
Grieta por fatiga (gravedad media)	-0,00073	0,015
Pisa el hombro	0,00473	0,029

Fuente: Daroncho (2021)

4.2. ESCALAS DE CLASIFICACIÓN

Las escalas derivadas de las puntuaciones Z mostraron concordancia entre las puntuaciones asignadas y estimadas ($t = 0,1556$, $p > 0,05$), validando la consistencia del método.

4.3. PROPUESTA DE MODELADO AVANZADO

Se sugiere la aplicación de algoritmos de *machine learning*, junto con el uso de drones (LiDAR) para identificar defectos automáticamente en 3D. De este modo, es posible capturar las relaciones e interacciones no lineales entre variables, además

del uso de visión por ordenador para la clasificación automática de defectos. Esta acción eliminaría la actividad con usuarios recurrentes para dar calificaciones, y podría realizarse para entrenamiento de herramientas y calibraciones posteriores en momentos específicos.

5. CONCLUSIÓN

El método propuesto por Daroncho (2001) demostró ser robusto para estimar la calidad del recorrido basándose en defectos del pavimento. Actualizarlo con técnicas modernas de análisis de datos puede ampliar su aplicabilidad y precisión. Se recomienda:

- Validación interregional con muestras extendidas;
- Integración con sistemas de gestión de pavimentos;
- Automatización de la recogida y clasificación de defectos mediante sensores e inteligencia artificial.

REFERÊNCIAS

AASHO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS. **The AASHO road test: report 5 - pavement research**. Washington, D.C.: Highway Research Board, 1962. (Special Report 61E). Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr61/sr-61e.pdf>. Acesso em: 10/mar/2025.

AL-OMARI, Bashar; DARTER, Michel I. Relationships between international roughness index and present serviceability rating. **Transportation Research Record**, n. 1435, p. 130–136, 1994. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1435/1435-017.pdf>. Acesso em: 10/mar/ 2025.

AUSTROADS. A Guide to the Visual Assessment of Pavement Condition. Sydney, 1987. Disponível em: https://www.tmr.qld.gov.au/_/media/busind/techstdpubs/pavements/guidelines/guide-to-the-visual-assessment-of-pavements.pdf?sc_lang=en&hash=C3EBB975D2D7F1D90DE2D647E856FECA. Acesso em: 10/mar/2025.

CAREY, W. N.; IRICK, P. E. The pavement serviceability-performance concept. **Highway Research Board Bulletin**, n. 250, p. 40–58, 1960. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbbulletin/250/250-003.pdf>. Acesso em: 10/mar/2025.

CURSINO, Pedro Luis Soethe; MACHADO, Fernanda Almeida. Levantamento de condições existentes com LiDAR em dispositivos móveis e análise de pavimentos usando BIM. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE BUILDING INFORMATION MODELLING, 4., 2022, Guimarães. *Anais [...]*. Guimarães: Universidade do Minho, 2022. p. 448-457. DOI: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.77.39>.

DARONCHO, C. **Contribuição à análise de qualidade de viagem e suas relações com a distribuição de defeitos em segmentos de rodovias**. Dissertação (Mestrado). EESC-USP, São Carlos, 2001.

DENG, Yutong; LI, Feng; ZHOU, Siqi; ZHANG, Song; YANG, Yang; ZHANG, Qiang; LI, Yanfei. Use of recurrent neural networks considering maintenance to predict urban road performance in Beijing, China. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 381, n. 2254, p. 20220175, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0175>
HAAS, R.; HUDSON, W. R. (1996). Defining and serving clients for pavements. **Transportation Research Board**, n. 1524, p. 1 - 9. Washington D.C.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Malabar: Krieger Publishing, 1994.

KOTHAI, R. PRABAKARAN, N. SRINIVASA MURTHY, Y. V. CENKERAMADDI, L. R. KAKANI, V. Pavement Distress Detection, Classification, and Analysis Using Machine Learning Algorithms: A Survey, **IEEE Access**, v. 12, pp. 126943-126960, 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3455093>.

LIKERT, Renis. A technique for the measurement of attitudes. **Archives of Psychology**, n. 140, 1932.

MOHAMED, Rana; ESAM, Hafsa; NAFAA, Selvia; ASHOUR, Karim; EMAD, Doaa; ELHENAWY, Mohammed; ASHQAR, Huthaifa I.; HASSAN, Abdallah A.; GLASER, Sebastien; RAKOTONIRAINY, Andry. **Deep learning-based pavement defect detection**. In: AUSTRALASIAN ROAD SAFETY CONFERENCE, 2023, Cairns. *Proceedings of the Australasian Road Safety Conference 2023*. Australasian College of Road Safety, 2023. p. 349-351. DOI: <https://doi.org/10.33492/ARSC-2023>.

PARASCHOS, Panagiotis D.; GERONIKOS, Konstantinos; KEPAPTSOGLU, Konstantinos L.; KOULOURIOTIS, Dimitrios E. Reinforcement learning for pavement maintenance cost optimization. *Smart and Sustainable Built Environment*, [S. l.], v. 14, n. 2, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2025-0034>. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2025-0034>. Acesso em: 10 set. 2025.

SHOLEVAR, Nima; GOLROO, Amir; ESFAHANI, Sahand Roghani. Machine learning techniques for pavement condition evaluation. **Automation in Construction**, v. 136, n. p., 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104190>.

SHRP. **Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project**. SHRP-P-338, National Research Council, Washington, D.C., 1993.

SINGH, D. et al. Computer vision-based pavement crack detection systems: A comprehensive review. **Measurement**, v. 187, 110287, 2022.

STANIEK, Marcin. Road pavement condition diagnostics using smartphone-based data crowdsourcing in smart cities. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 8, l. 4, 2021.

WERKEMA, M. C. C. **Como estabelecer conclusões com confiança: entendendo inferência estatística**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

ZHANG, Yao; CHEN, Jiajun; WU, Zhengguang; GUO, Xiangyu; JIA, Silin. Optimizing pavement distress detection with UAV: A comparative study of vision transformer and convolutional neural networks. **KSCE Journal of Civil Engineerin**, v. 29, 100095, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100095>.

El contenido expresado en la obra, así como los derechos de autor de las figuras y datos, así como su revisión ortográfica y los estándares ABNT, son responsabilidad exclusiva del autor o autores

Los autores del trabajo declaran que durante la preparación del manuscrito, se utilizaron las herramientas/servicios de Inteligencia Artificial (IA) Gemini para ayudar en la traducción del resumen a abstract y resumen. Tras utilizar esta herramienta/servicio, los autores han editado y revisado el contenido según sea necesario y asumen toda la responsabilidad del contenido de la publicación.