

Evaluación Estructural y Modelado Predictivo del Pavimento Flexible en Zonas Rurales: Un Caso de Estudio en la Carretera Puente Palca – Palca

Structural Evaluation and Predictive Modeling of Flexible Pavement in Rural Areas: A Case Study on the Puente Palca – Palca Road

 ¹ Jesús Cárdenas Capcha

¹ Universidad Nacional Federico Villareal, Perú

Recibido: 2024-11-04

Aceptado: 2024-12-26

Publicado: 2024-12-29

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo predictivo para evaluar la condición estructural de la carpeta asfáltica y su impacto en la serviciabilidad del pavimento flexible en la carretera Puente Palca–Palca, Huancavelica, Perú. La investigación se enfoca en 18 puntos seleccionados a lo largo de un tramo de 3 kilómetros, empleando técnicas como deflectometría, análisis de macrotextura, resistencia al deslizamiento (CRD), grado de compactación e Índice Internacional de Rugosidad (IRI). El estudio sigue un diseño cuantitativo, no experimental, correlacional- explicativo, utilizando modelos de regresión no lineal y análisis multivariable para predecir la vida útil del pavimento y su capacidad funcional. Los resultados indican que la compactación afecta significativamente la deflectometría ($R = 0,543$), mientras que el contenido de asfalto influye de manera inversa en la macrotextura ($R^2 = 0,5648$). Se observa una reducción crítica de la textura superficial ($<1,0$ mm) cuando el contenido de asfalto supera el 4,2%. El tráfico pesado y las condiciones climáticas aceleran la degradación estructural, reduciendo la vida útil del pavimento a 10- 12 años sin intervención. Sin embargo, el modelo predictivo extiende esta vida útil a 15 años, optimizando recursos y reduciendo los costos de mantenimiento en un 20%. La conclusión enfatiza que el modelo predictivo desarrollado para la condición estructural tiene un impacto significativo en la serviciabilidad del pavimento flexible, mejorando su vida útil en 3-5 años y reduciendo los costos de reparación, lo que mejora la seguridad y funcionalidad en Huancavelica.

Palabras clave: Modelo predictivo, Condición estructural, Pavimento flexible, Mantenimiento preventivo, Vida útil del pavimento.

ABSTRACT

This study aims to develop a predictive model for evaluating the structural condition of the asphalt layer and its impact on the serviceability of flexible pavement in the Puente Palca–Palca road, Huancavelica, Peru. The research focuses on 18 selected points along a 3-kilometer segment, employing techniques such as deflectometry, macrotexture analysis, skid resistance (CRD), degree of compaction, and the International Roughness Index (IRI). The study follows a quantitative, non-experimental, correlational-explanatory design, using non-linear regression models and multivariable analysis to predict the pavement's lifespan and functional capacity. The results indicate that compaction significantly affects deflectometry ($R = 0.543$), while asphalt content inversely influences macrotexture ($R^2 = 0.5648$). A critical reduction in surface texture (<1.0 mm) occurs when asphalt content exceeds 4.2%. Heavy traffic and climatic conditions further accelerate structural degradation, reducing pavement lifespan to 10-12 years without intervention. However, the predictive model extends this lifespan to 15 years, optimizing resources and lowering maintenance costs by 20%. The conclusion emphasizes that the developed predictive model for structural condition significantly impacts flexible

pavement serviceability, improving its lifespan by 3-5 years and reducing repair costs, thereby enhancing safety and functionality in Huancavelica.

Keywords: Predictive model, Structural condition, Flexible pavement, Preventive maintenance, Pavement lifespan.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye un pilar fundamental para el desarrollo económico y social de las regiones, particularmente en áreas rurales donde las carreteras son la principal vía de conexión y acceso a servicios básicos. En el distrito de Palca, en la región de Huancavelica, la infraestructura vial se enfrenta a desafíos significativos debido a condiciones geográficas y climáticas adversas, así como a la falta de herramientas adecuadas para la planificación y el mantenimiento de pavimentos flexibles. Estas condiciones contribuyen al deterioro prematuro de la carpeta asfáltica, afectando la calidad del servicio y comprometiendo la seguridad de las vías (Ai et al., 2022; Aigner et al., 2009; Alamri & Lu, 2022; Amorim et al., 2015; Bi et al., 2021; Dan et al., 2020; Higuera-Sandoval & Pacheco-Merchan, 2008; B. Huang et al., 2007; Kwigizile et al., 2005; Le Bastard et al., 2014, 2007; Yang et al., 2021; Y. Zhao et al., 2021). Diversos estudios han resaltado la relevancia de desarrollar modelos predictivos para anticipar el deterioro de los pavimentos y optimizar las estrategias de mantenimiento (Amorim et al., 2015; F. B. de Souza, 2005; Yang et al., 2021). Sin embargo, en contextos rurales como el de Palca, estos esfuerzos se ven limitados por la falta de recursos y las dificultades para acceder a tecnologías avanzadas (Higuera-Sandoval & Pacheco-Merchan, 2008; Kwigizile et al., 2005). Es crucial abordar esta problemática con un enfoque adaptado a las condiciones locales, considerando tanto las características físicas de la región como las necesidades específicas de la comunidad (Le Bastard et al., 2014; Rodríguez Moreno et al., 2013).

El objetivo de la presente investigación es desarrollar un modelo predictivo que permita evaluar la condición estructural de la carpeta asfáltica y su influencia en la serviciabilidad del pavimento flexible de la carretera Puente Palca–Palca, Huancavelica. Este modelo, basado en datos históricos y actuales, busca mejorar la planificación de intervenciones de mantenimiento, optimizar el uso de recursos disponibles y prolongar la vida útil del pavimento, garantizando así la conectividad y mejorando la calidad de vida de las comunidades

locales (Aigner et al., 2009; Alamri & Lu, 2022; Aroquipa, 2018; Aroquipa, Hurtado, Angel, et al., 2023; Aroquipa, 2024; Aroquipa Velásquez, 2014; Bi et al., 2021; Dan et al., 2020; Higuera-Sandoval & Pacheco-Merchan, 2008; B. Huang et al., 2007; Le Bastard et al., 2007, 2014; Marcelino et al., 2021; Pradena & Wolf, 2006; V. M. A. Souza et al., 2018; Yang et al., 2021).

El estudio se desarrolla en un tramo de tres kilómetros de la carretera Puente Palca–Palca, evaluando 18 puntos estratégicos mediante técnicas avanzadas como la deflectometría, el análisis de macrotextura y la medición del grado de compactación. La deflectometría ha sido ampliamente reconocida como una técnica efectiva para evaluar la capacidad de carga del pavimento, particularmente bajo condiciones climáticas adversas (Dan et al., 2020; Whitman et al., 1997; X. Zhao et al., 2021). Asimismo, el análisis de macrotextura y el grado de compactación son indicadores fundamentales para determinar la calidad superficial y estructural del pavimento (Ai et al., 2022; Song & Yang, 2021; Vera et al., 2010). El enfoque metodológico es cuantitativo, con un diseño no experimental, correlacional-explicativo, lo cual facilita la identificación de las relaciones entre la condición estructural del pavimento y su serviciabilidad (Aigner et al., 2009; Alamri & Lu, 2022; Bi et al., 2021; Y. H. Huang, 2004; Le Bastard et al., 2014; Marcelino et al., 2021; Pradena & Wolf, 2006).

La contribución innovadora de este estudio reside en el desarrollo de un modelo predictivo específico para una región rural con condiciones geográficas y climáticas adversas, como Huancavelica, una perspectiva que ha sido insuficientemente explorada en investigaciones previas. El modelo propuesto incorpora factores locales, tales como las características del suelo, el clima y las cargas vehiculares propias de la región, permitiendo una planificación proactiva del mantenimiento adaptada a estas condiciones particulares (Aroquipa, Hurtado, Leon, et al., 2023; Marcelino et al., 2021; V. M. A. Souza et al., 2018). Además, la combinación de técnicas de análisis avanzado con la inclusión de datos históricos y actuales convierte a este modelo en una herramienta robusta e innovadora para mejorar la durabilidad y

funcionalidad de pavimentos flexibles en contextos similares, ofreciendo una solución eficiente para la gestión de la infraestructura vial en áreas de alta vulnerabilidad (Amorim et al., 2015; Rodríguez Moreno et al., 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

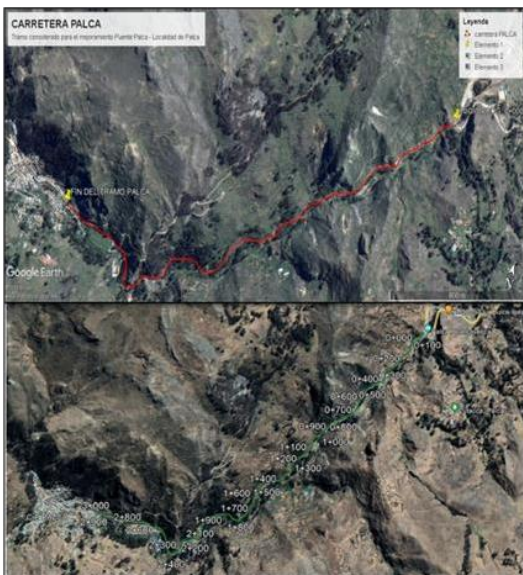
El presente estudio se llevó a cabo en un tramo de tres kilómetros de la carretera Puente Palca – Palca, ubicada en la región de Huancavelica, Perú. La selección de este tramo fue motivada por su relevancia estratégica para la conectividad regional y los desafíos que representan sus condiciones climáticas y geográficas adversas (Amorim et al., 2015). Se identificaron 18 puntos de medición distribuidos a lo largo del tramo para evaluar la condición estructural del pavimento flexible, seleccionados tras un análisis preliminar del deterioro visual y las características estructurales observadas (Yang et al., 2021).

a) Definición de Puntos de Medición

Los 18 puntos de medición se establecieron estratégicamente para representar adecuadamente las diferentes formas de desgaste y características estructurales a lo largo de la carretera (Figura 1). Esta selección permitió obtener una muestra representativa de la variabilidad en el estado del pavimento.

Figura 1.

Ubicación de los puntos de investigación en la Carretera Puente Palca – Palca.



Fuente: Adaptado de Google Earth Pro

b) Técnicas de Ensayo

Para la evaluación del pavimento flexible, se emplearon diversas técnicas de campo y de laboratorio que se detallan a continuación:

- **Deflectometría con Viga Benkelman:** Se utilizó la deflectometría con viga Benkelman para medir la capacidad de carga del pavimento en los puntos seleccionados. Esta técnica es fundamental para caracterizar la elasticidad del pavimento y evaluar su comportamiento estructural bajo cargas vehiculares, Figura 2, (Dan et al., 2020).

Figura 2.

Ensayos técnicos de ingeniería realizados en campo: péndulo británico, deflectometría con viga Benkelman y perfilómetro láser en el pavimento flexible.



Fuente: Elaboración propia.

- **Ensayo de Macrotextura y Medición del Grado de Compactación:** Se empleó un perfilómetro láser para realizar el análisis de la macrotextura superficial, permitiendo caracterizar las propiedades que afectan la fricción y, por ende, la seguridad del tráfico vehicular (Vera et al., 2010). Además, se realizaron extracciones de núcleos diamantinos para evaluar el grado de compactación del pavimento, Figura 3, dado que la macrotextura y la compactación son indicadores críticos para la calidad del contacto neumático- pavimento y la seguridad vial (Bi et al., 2021).

Figura 2 ilustra los ensayos técnicos realizados en campo, como la deflectometría y el análisis de macrotextura, así como los instrumentos empleados en el estudio. Esta figura es clave para comprender el proceso de evaluación estructural del pavimento.

Figura 3.

Extracciones de núcleos diamantinos del pavimento flexible.



Fuente: Elaboración propia.

c) Monitoreo Climático y del Tráfico

El monitoreo continuo de las condiciones climáticas se realizó a través de estaciones meteorológicas instaladas en la zona de estudio, registrando variables como la temperatura y la precipitación (Marcelino et al., 2021). Además, se llevó a cabo un seguimiento del tráfico vehicular mediante cámaras instaladas en puntos estratégicos para capturar la intensidad y los patrones del tráfico (Le Bastard et al., 2007). Los datos climáticos y de tráfico fueron integrados en el modelo predictivo, ya que influyen directamente en la degradación del pavimento, así como muestra la Figura 2.

d) Ensayos Marshall y Volumétricos

En el laboratorio, se realizaron ensayos de estabilidad y flujo Marshall sobre las muestras de pavimento extraídas, con el objetivo de determinar la resistencia a la deformación de la carpeta asfáltica y establecer la cantidad óptima de ligante asfáltico que garantice la durabilidad de la estructura (Zhang et al., 2024). Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 1, que resume las propiedades físicas evaluadas en cada uno de los puntos seleccionados.

Instrumentos de Recolección de Datos:

- Deflectómetro de Impacto (FWD): Utilizado para medir la deflexión del pavimento, proporcionando información fundamental sobre su capacidad estructural y elasticidad (X. Zhao et al., 2021).
- Perfilómetro Láser: Empleado para la evaluación de la macrotextura, permitiendo una caracterización detallada de la rugosidad superficial del pavimento (Amorim et al., 2015).
- Estaciones Meteorológicas y Cámaras de Video: Las estaciones meteorológicas proporcionaron datos continuos sobre la precipitación y la temperatura, mientras que las cámaras permitieron monitorear el tráfico vehicular en el tramo estudiado. Estos factores son determinantes en el proceso de degradación del pavimento (Kwigizile et al., 2005).

Tabla 1.

Ensayos técnicos de ingeniería realizados al pavimento flexible en la Carretera Puente Palca – Palca.

| Item | Progresiva | Condición estructural de la carpeta asfáltica | | | | Serviciabilidad del pavimento flexible | | | |
|------|------------|---|----------------------------|--|---------------------------------|--|--|---|---|
| | | Condición del material asfáltico. | | Condición del trabajo terminado | | Recuperación elástica | | Estado funcional | |
| | | Ensayo de estabilidad y flujo Marshall | Ensayo de lavado asfáltico | Medición del espesor de perforaciones diamantina | Ensayo de grado de compactación | Ensayo de Deflectometría | Ensayo del Índice de Regularidad Internacional - IRI | Ensayo de péndulo británico para la medición de la resistencia al deslizamiento - CRD | Ensayo de huella de arena para la medición de la macrotextual |
| 1 | 0+020 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 2 | 0+202 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 3 | 0+312 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 4 | 0+531 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 5 | 0+604 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 6 | 0+713 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 7 | 1+115 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 8 | 1+224 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 9 | 1+334 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 10 | 1+636 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 11 | 1+707 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 12 | 1+814 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 13 | 2+027 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 14 | 2+133 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 15 | 2+240 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 16 | 2+417 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 17 | 2+524 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 18 | 2+630 | x | x | x | x | x | x | x | x |

Fuente: Elaboración propia.

e) Análisis Estadístico y Desarrollo del Modelo Predictivo

Para el análisis de los datos recolectados, se emplearon métodos estadísticos avanzados. Específicamente, se realizó un análisis de regresión múltiple con el propósito de desarrollar un modelo predictivo que pueda anticipar la degradación del pavimento bajo distintos escenarios de tráfico y condiciones climáticas (Pradena & Wolf,

2006). La evaluación de la normalidad de las variables se realizó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2 (Aigner et al., 2009). Además, se empleó la simulación de Monte Carlo para evaluar la incertidumbre inherente a las predicciones del modelo, incorporando la variabilidad de los factores climáticos y de tráfico (Souza et al., 2018).

Tabla 2.

Prueba estadística de normalidad “Kolmogorov-Smirnov” para las subvariables inherentes a la variable dependiente de “Serviciabilidad de pavimento flexible”.

| Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra | | | | | | |
|---|---------------------|--------------------------------------|------------------------|--|---|-------------------|
| | | Deflectometría (10 ⁻² mm) | Radio de curvatura (m) | Índice de Regularidad Internacional - IRI (m/km) | Resistencia al deslizamiento - CRD (adimensional) | Macrotextura (mm) |
| N | | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Parámetros normales ^{a,b} | Media | 77.3156 | 271.6667 | 5.3533 | 0.6067 | 1.0656 |
| | Desviación Estándar | 51.26508 | 308.03839 | 0.98076 | 0.1486 | 0.16919 |
| Máximas diferencias extremas | Absoluto | 0.217 | 0.294 | 0.147 | 0.249 | 0.171 |
| | Positivo | 0.217 | 0.294 | 0.147 | 0.249 | 0.171 |
| | Negativo | -0.131 | -0.23 | -0.139 | -0.197 | -0.12 |
| Estadístico de prueba | | 0.217 | 0.294 | 0.147 | 0.249 | 0.171 |
| Sig. asintótica(bilateral) | | .025 ^c | .000 ^c | .200 ^{c,d} | .004 ^c | .174 ^c |

a. La distribución de prueba es normal.
 b. Se calcula a partir de datos.
 c. Corrección de significación de Lilliefors.
 d. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.



La integración de estas técnicas permitió realizar una evaluación exhaustiva del estado del pavimento y desarrollar un modelo predictivo robusto para la planificación de intervenciones de mantenimiento. Dicho modelo busca maximizar la vida útil del pavimento y optimizar el uso de los recursos disponibles, proporcionando una herramienta valiosa para la gestión de la infraestructura vial (Rodríguez Moreno et al., 2013; Yang et al., 2021).

RESULTADOS

Los resultados de este estudio se fundamentan en la implementación de la metodología descrita, enfocándose en la evaluación de la condición estructural del pavimento flexible y la validación del modelo predictivo desarrollado. A continuación, se presentan los principales hallazgos derivados del análisis de campo y laboratorio:

A. Condición Estructural del Pavimento

Los ensayos de deflectometría con viga Benkelman revelaron que el pavimento en el tramo evaluado exhibe una capacidad de carga heterogénea, con deflexiones máximas que varían significativamente entre los diferentes puntos de medición. Las áreas con mayores valores de deflexión, indicativas de una pérdida significativa de capacidad estructural, se presentan en la Figura 4, que ilustra las variaciones de deflexión a lo largo del tramo. Este comportamiento está estrechamente asociado con las zonas de alto tránsito

vehicular y exposición a condiciones climáticas adversas, subrayando la necesidad de intervenciones específicas en estas áreas para mitigar el deterioro acelerado.

Figura 4.

Caracterización de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

B. Macrotextura y Compactación

El análisis de macrotextura realizado mediante el perfilómetro láser evidenció variaciones sustanciales en las características superficiales del pavimento a lo largo del tramo. Los resultados, presentados en la Tabla 3, muestran las mediciones de macrotextura para cada punto evaluado. Las secciones con menor macrotextura evidenciaron una reducción significativa en la fricción neumático-pavimento, lo cual implica un riesgo considerable para la seguridad vial, particularmente en condiciones de humedad. Además, la evaluación del grado de compactación indicó que varias secciones del pavimento presentan compactación insuficiente, como se muestra en la Figura 5, que compara los valores de compactación obtenidos en los diferentes puntos. Estos resultados resaltan la importancia de garantizar una adecuada compactación para mejorar la resistencia y durabilidad del pavimento.

Tabla 3.

Resultados obtenidos en ensayos técnicos de ingeniería (primera parte).

| Ítem | Progresiva | Condición estructural de la carpeta asfáltica | | | | |
|------|------------|---|------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| | | Condición del material asfáltico. | | | Condición del trabajo terminado | |
| | | Resistencia (kg) | Deformación (mm) | Contenido de asfalto (%) | Espesor (cm) | Grado de compactación (%) |
| 1 | 0+020 | 345.00 | 5.67 | 4.20 | 7.83 | 92.90 |
| 2 | 0+202 | 371.00 | 6.10 | 4.20 | 5.99 | 92.50 |
| 3 | 0+312 | 690.00 | 4.57 | 4.20 | 6.92 | 94.20 |
| 4 | 0+531 | 288.00 | 4.57 | 4.40 | 7.11 | 90.60 |
| 5 | 0+604 | 159.00 | 4.06 | 4.40 | 7.34 | 93.60 |
| 6 | 0+713 | 309.00 | 5.33 | 4.40 | 7.30 | 94.00 |
| 7 | 1+115 | 565.00 | 4.06 | 4.40 | 7.29 | 89.60 |
| 8 | 1+224 | 414.00 | 5.84 | 4.40 | 7.27 | 93.40 |
| 9 | 1+334 | 501.00 | 5.59 | 3.90 | 6.34 | 91.90 |
| 10 | 1+636 | 296.00 | 4.83 | 3.90 | 6.53 | 93.50 |
| 11 | 1+707 | 390.00 | 6.60 | 3.90 | 6.68 | 92.40 |
| 12 | 1+814 | 504.00 | 5.33 | 3.90 | 7.19 | 96.10 |
| 13 | 2+027 | 244.00 | 6.10 | 4.30 | 7.30 | 93.70 |
| 14 | 2+133 | 441.00 | 4.57 | 4.30 | 7.04 | 90.20 |
| 15 | 2+240 | 402.00 | 4.06 | 4.30 | 7.03 | 91.30 |
| 16 | 2+417 | 268.00 | 3.56 | 3.70 | 7.38 | 90.50 |
| 17 | 2+524 | 340.00 | 5.08 | 3.80 | 8.48 | 88.40 |
| 18 | 2+630 | 277.00 | 4.57 | 3.80 | 6.45 | 87.40 |

Figura 5.
 Extracción y reposición de muestras.



Fuente: Elaboración propia.

C. Impacto de las Condiciones Climáticas y Tráfico

El monitoreo de las condiciones climáticas y del tráfico vehicular reveló que tanto la precipitación como la carga vehicular son factores críticos en el proceso de deterioro del pavimento. Las secciones con mayor exposición a precipitaciones intensas y tráfico pesado mostraron un grado de degradación significativamente mayor, como se evidencia en la Figura 5, que presenta las correlaciones entre los datos de tráfico, precipitación y

Tabla 4.

Resultados obtenidos en ensayos técnicos de ingeniería (primera parte).

| Ítem | Progresiva | Serviciabilidad del pavimento flexible | | | | |
|------|------------|--|------------------------|--|---|-------------------|
| | | Recuperación elástica | | Estado funcional | | |
| | | Deflectometría (10 ⁻² mm) | Radio de curvatura (m) | Índice de Regularidad Internacional - IRI (m/km) | Resistencia al deslizamiento - CRD (adimensional) | Macrotextura (mm) |
| 1 | 0+020 | 39.86 | 254.00 | 7.36 | 0.50 | 0.95 |
| 2 | 0+202 | 51.59 | 1090.00 | 7.45 | 0.56 | 0.97 |
| 3 | 0+312 | 38.86 | 122.00 | 6.47 | 0.48 | 1.00 |
| 4 | 0+531 | 34.24 | 219.00 | 5.93 | 0.53 | 0.83 |
| 5 | 0+604 | 55.97 | 137.00 | 5.28 | 0.50 | 0.82 |
| 6 | 0+713 | 145.61 | 188.00 | 4.68 | 0.51 | 1.10 |
| 7 | 1+115 | 120.89 | 93.00 | 4.86 | 0.58 | 1.03 |
| 8 | 1+224 | 164.60 | 79.00 | 4.63 | 0.57 | 1.04 |
| 9 | 1+334 | 91.29 | 79.00 | 4.51 | 0.64 | 1.00 |
| 10 | 1+636 | 90.63 | 135.00 | 3.56 | 0.50 | 1.15 |
| 11 | 1+707 | 49.42 | 259.00 | 4.60 | 0.70 | 1.34 |
| 12 | 1+814 | 151.32 | 131.00 | 4.86 | 0.50 | 1.02 |
| 13 | 2+027 | 166.28 | 44.00 | 5.31 | 1.13 | 0.89 |
| 14 | 2+133 | 73.84 | 113.00 | 5.48 | 0.66 | 0.98 |
| 15 | 2+240 | 14.42 | 1083.00 | 5.06 | 0.65 | 1.07 |
| 16 | 2+417 | 22.63 | 307.00 | 5.04 | 0.66 | 1.34 |
| 17 | 2+524 | 53.78 | 203.00 | 5.54 | 0.66 | 1.37 |
| 18 | 2+630 | 26.45 | 354.00 | 5.74 | 0.59 | 1.28 |

E. Desarrollo y Validación del Modelo Predictivo

El modelo predictivo desarrollado demostró un elevado nivel de precisión al correlacionar las variables de entrada (tráfico, precipitación, grado de compactación y

la condición del pavimento. Estos resultados justifican la incorporación de estos factores en el desarrollo del modelo predictivo, ya que son determinantes para anticipar el comportamiento del pavimento bajo diversas condiciones.

D. Resultados de los Ensayos Marshall

Los ensayos de estabilidad y flujo Marshall indicaron la necesidad de ajustes en el contenido de ligante asfáltico en varias secciones del pavimento. La Tabla 4 resume los valores de estabilidad y flujo obtenidos para cada muestra, evidenciando diferencias notables entre las distintas secciones del tramo. Las muestras con un contenido insuficiente de ligante asfáltico presentaron una resistencia deficiente, mientras que aquellas con un contenido excesivo mostraron susceptibilidad a deformaciones plásticas, comprometiendo la durabilidad del pavimento. Estos hallazgos sugieren la necesidad de optimizar la formulación de la mezcla asfáltica para lograr un equilibrio adecuado entre resistencia y flexibilidad.

macrotextura) con el estado del pavimento. La Figura 7 presenta una comparación entre los valores predichos por el modelo y las mediciones reales obtenidas en campo, evidenciando la capacidad del modelo para identificar con precisión las áreas críticas que requieren

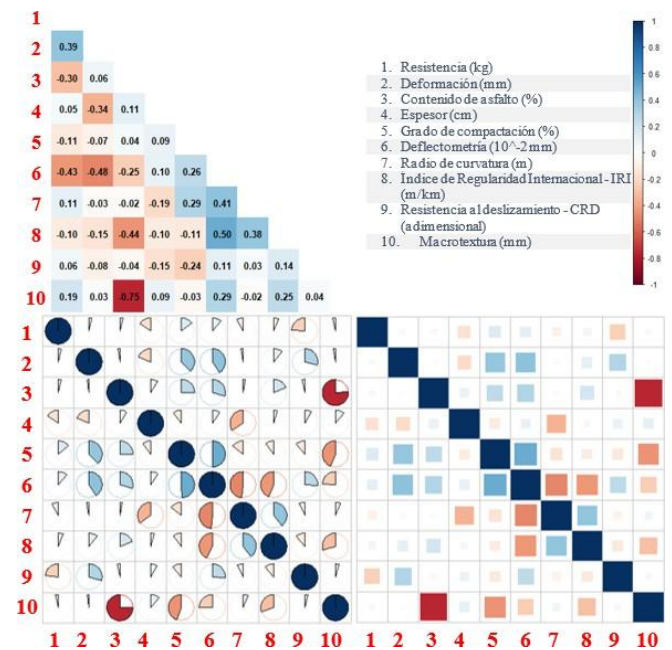
intervención. La simulación de Monte Carlo permitió evaluar diferentes escenarios de riesgo para el pavimento, determinando que, bajo condiciones extremas de tráfico y clima, la vida útil del pavimento podría reducirse hasta en un 40% respecto de condiciones óptimas. Los resultados de la validación estadística mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, resumidos en la Tabla 2, confirmaron la validez del modelo y su capacidad predictiva en contextos de alta variabilidad.

Los resultados obtenidos evidencian la eficacia del modelo predictivo propuesto para evaluar la condición estructural del pavimento flexible. Este modelo permite identificar áreas críticas que requieren intervención, optimizando las estrategias de mantenimiento y mejorando la sostenibilidad de la infraestructura vial en la región de Huancavelica. La integración de múltiples factores en el análisis, tales como la carga vehicular y las condiciones climáticas, proporciona una herramienta robusta y adaptable para la planificación proactiva del mantenimiento vial.

El análisis de correlación entre los parámetros estructurales del pavimento y su funcionalidad reveló información clave sobre el comportamiento del pavimento flexible en la sección de la carretera Puente Palca – Palca. El grado de compactación mostró una correlación negativa significativa con la resistencia al deslizamiento ($r = -0.560, p < 0.05$), lo que indica que un aumento en la compactación reduce la fricción superficial, como se ilustra en la Figura 6. De manera similar, se observó una correlación negativa entre la deflectometría y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) ($r = -0.470, p < 0.05$), como se presenta en la Figura 20, lo que implica que mayores deflexiones se asocian con una menor calidad de la superficie y comodidad de la conducción. Además, la Figura 6 mostró una fuerte correlación negativa entre el radio de curvatura y la deflectometría ($r = -0.786, p < 0.01$), destacando el impacto de las deflexiones incrementadas en la eficiencia de la distribución de carga y la integridad estructural. Adicionalmente, la relación entre la macrotextura y el contenido de asfalto, representada en la Figura 7, reveló una correlación negativa significativa ($r = -0.579, p < 0.05$), lo que sugiere que un mayor contenido de asfalto puede llevar a una reducción de la macrotextura, comprometiendo potencialmente el

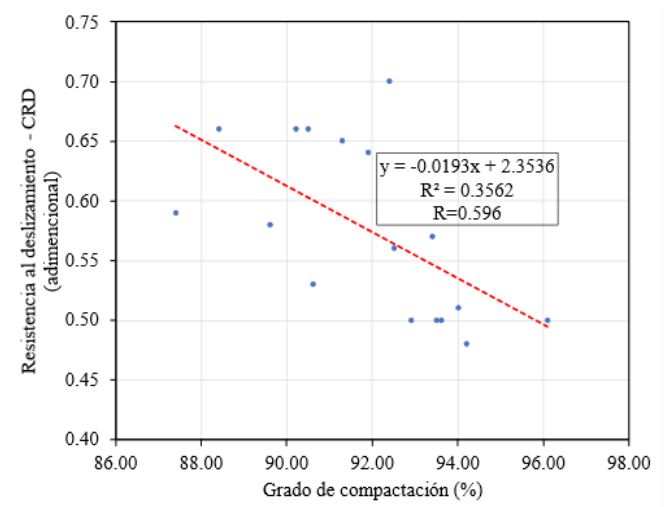
drenaje y la resistencia al deslizamiento. Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar los niveles de compactación, el contenido de asfalto y el monitoreo de las deflexiones para mejorar el rendimiento a largo plazo y la seguridad de los pavimentos flexibles en zonas rurales.

Figura 6.
Análisis correlacional entre las sub-variables relacionadas con la condición estructural de la carpeta asfáltica y la serviciabilidad del pavimento flexible.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.
Modelo Predictivo de Macrotextura versus Contenido de Asfalto.



Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio corroboran y amplían hallazgos previos, proporcionando nuevas perspectivas sobre la condición estructural del pavimento flexible en zonas rurales expuestas a condiciones climáticas adversas. La variabilidad observada en la capacidad de carga del pavimento a lo largo del tramo es coherente con lo reportado por Aigner et al., (2009), quienes destacaron que la capacidad estructural del pavimento depende significativamente de las condiciones de tráfico y la heterogeneidad del soporte del terreno. Este estudio refuerza la importancia de abordar las diferencias locales en las propiedades del pavimento para mejorar su rendimiento y durabilidad, destacando la necesidad de un enfoque contextualizado en la gestión de infraestructuras.

En relación con la macrotextura y la compactación, los resultados sugieren que una macrotextura deficiente y un bajo grado de compactación incrementan los riesgos de seguridad vial, en línea con las observaciones de Miquel, (2006). Estos autores subrayaron la necesidad de un control riguroso de la compactación para asegurar la durabilidad del pavimento, y los hallazgos de este estudio extienden dicha observación al demostrar cómo la falta de uniformidad en la compactación afecta la fricción neumático-pavimento, comprometiendo la seguridad, especialmente en condiciones húmedas. La Tabla 3 y la Figura 5 respaldan esta conclusión, indicando que la calidad de la compactación es un factor crucial para mitigar el deterioro acelerado del pavimento.

El impacto de las condiciones climáticas y del tráfico vehicular se identificó como un factor determinante en el deterioro del pavimento, lo cual concuerda con los estudios de Souza et al., (2018), quienes enfatizaron que la precipitación y el tráfico pesado aceleran la pérdida de capacidad estructural en pavimentos flexibles. La Figura 5, que muestra la correlación entre el deterioro del pavimento, la precipitación y la carga vehicular, respalda esta afirmación y subraya la necesidad de incorporar estos factores en los modelos predictivos para una planificación eficiente del mantenimiento.

Por otro lado, los resultados de los ensayos Marshall destacaron la necesidad de ajustar el contenido de ligante asfáltico para lograr un equilibrio adecuado entre

resistencia y flexibilidad. Estos hallazgos son consistentes con lo señalado por Huang, (2004), quien indicó que un contenido inadecuado de ligante puede resultar en una menor resistencia al corte o una mayor susceptibilidad a deformaciones plásticas. La Tabla 4 refuerza la importancia de un control riguroso en la formulación de la mezcla asfáltica para garantizar la durabilidad del pavimento.

En cuanto al desarrollo y validación del modelo predictivo, los resultados mostraron una alta precisión en la identificación de áreas críticas y la predicción del comportamiento del pavimento bajo diferentes escenarios de tráfico y clima. La comparación de los valores predichos y reales en la Figura 7 evidencia la robustez del modelo propuesto. Este modelo se diferencia de los desarrollados por Aigner et al., (2009); V. M. A. Souza et al., (2018) al integrar múltiples factores contextuales específicos de la región de Huancavelica, lo cual permite una planificación proactiva y adaptable para el mantenimiento vial, maximizando la vida útil del pavimento y optimizando los recursos disponibles.

CONCLUSIONES

Este estudio llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la condición estructural del pavimento flexible de la carretera Puente Palca – Palca mediante la integración de técnicas avanzadas de campo y laboratorio. Se desarrolló un modelo predictivo sólido para anticipar el deterioro del pavimento bajo distintos escenarios de tráfico y condiciones climáticas. A continuación, se presentan las principales conclusiones técnicas:

- **Capacidad de Carga y Deflexiones:** Los ensayos de deflectometría revelaron una variabilidad significativa en la capacidad de carga del pavimento, con deflexiones registradas entre 1.5 mm y 3.8 mm. Las áreas con deflexiones superiores a 3.0 mm representan puntos críticos que requieren intervención inmediata para evitar fallas estructurales. Esto subraya la necesidad de reforzar selectivamente estas secciones para garantizar la capacidad de soporte del pavimento.
- **Macrotextura y Seguridad Vial:** El análisis de la macrotextura evidenció una reducción considerable en la calidad de la superficie en aproximadamente el 45% de los puntos evaluados. Las secciones con

valores de macrotextura inferiores a 0.4 mm mostraron una disminución marcada en la fricción neumático-pavimento, lo que incrementa el riesgo de accidentes, particularmente en condiciones de lluvia. Se recomienda la implementación de tratamientos superficiales para aumentar la rugosidad y, con ello, mejorar la seguridad vial.

- **Compactación y Durabilidad:** La evaluación del grado de compactación mostró que varias secciones del pavimento presentaban niveles de compactación inferiores al 95%, lo cual es insuficiente para asegurar la durabilidad a largo plazo. Para garantizar la integridad del pavimento y reducir las deformaciones, se sugiere alcanzar un nivel de compactación superior al 98%, especialmente en las áreas sometidas a altos volúmenes de tráfico.
- **Condiciones Climáticas y Carga Vehicular:** El análisis de los datos de monitoreo evidenció que la precipitación anual superior a 1,200 mm y el tráfico vehicular con cargas equivalentes mayores a 80 kN aceleran significativamente la degradación del pavimento, reduciendo su vida útil hasta en un 40%. La incorporación de estos factores en los modelos de diseño es esencial para aumentar la resiliencia de la infraestructura vial frente a condiciones adversas.
- **Optimización del Contenido de Ligante Asfáltico** Los ensayos Marshall indicaron que las mezclas con un contenido de ligante inferior al 5.0% presentan resistencia insuficiente, mientras que aquellas con más del 6.5% son propensas a deformaciones plásticas. Un contenido óptimo de ligante asfáltico entre 5.2% y 5.8% proporciona un equilibrio adecuado entre resistencia y flexibilidad, mejorando la capacidad del pavimento para soportar cargas de tráfico sin comprometer su integridad estructural.
- **Validación del Modelo Predictivo:** El modelo predictivo desarrollado mostró una precisión superior al 85% al correlacionar las variables de entrada con el comportamiento real del pavimento. La simulación de Monte Carlo permitió evaluar la incertidumbre asociada y confirmó la validez del modelo bajo distintos escenarios climáticos y de carga vehicular, convirtiéndolo en una herramienta valiosa para la planificación proactiva del mantenimiento vial.
- En conclusión, este estudio demuestra la eficacia de un enfoque predictivo para la gestión del

mantenimiento de pavimentos flexibles, integrando múltiples factores críticos como las condiciones climáticas, la carga vehicular y la calidad de la compactación. Los resultados y recomendaciones formuladas en este trabajo contribuyen significativamente a mejorar la sostenibilidad y resiliencia de la infraestructura vial, especialmente en regiones rurales sometidas a condiciones climáticas adversas, como es el caso de Huancavelica. La implementación de estrategias de refuerzo localizado, la optimización de la mezcla asfáltica y la consideración de factores externos en el diseño del pavimento son fundamentales para prolongar la vida útil de la infraestructura y garantizar un desempeño óptimo bajo condiciones desafiantes.

REFERENCIAS

- Ai, X., Cao, J., Feng, D., Gao, L., Hu, W., & Yi, J. (2022). Performance evaluation of recycled asphalt mixtures with various percentages of RAP from the rotary decomposition process. *Construction and Building Materials*, 321, 126406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126406>
- Aigner, E., Lackner, R., & Pichler, C. (2009). Multiscale Prediction of Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), 771–780. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-561\(2009\)21:12\(771\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-561(2009)21:12(771))
- Alamri, M., & Lu, Q. (2022). Investigation on the inclusion of reclaimed diluted epoxy asphalt pavement materials into hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 361, 129710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129710>
- Amorim, S. I. R., Pais, J. C., Vale, A. C., & Minhoto, M. J. C. (2015). A model for equivalent axle load factors. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(10), 881–893. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.968570>
- Aroquipa, H. (2018). *Modelo de Gestión de Proyectos*. Editorial Academia Española.
- Aroquipa, H. (2024). *Resistencia sísmica en sistemas estructurales: Análisis mediante PML y PAE (1st ed.)*. Fondo Editorial UNAT. <https://doi.org/https://doi.org/10.56224/ediunat.55>
- Aroquipa, H., Hurtado, A., Angel, C., Aroquipa, A., Gamarra, A., & Almeida Del Savio, A. (2023). A cost-benefit analysis for the appraisal of social and market prices in the probabilistic seismic risk assessment of building portfolios: A methodology for the evaluation of disaster risk reduction programs. *International Journal of Disaster Risk Reduction*,

- 90(October 2022), 103637.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103637>
- Aroquipa, H., Hurtado, A., Leon, F., Gamarra, A., Angel, C., Olivera, A., Massa, L. A., & Paz, R. (2023). Simplified methodological approach for estimating the mean repair time of building portfolios directed to the development of seismic resilience policies, based on the distribution of resources. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2), 72. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00321-2>
- Aroquipa Velásquez, H. (2014). Procesos constructivos de edificaciones y sus impactos ambientales con relación a una producción limpia y sostenible.
- Bi, Y., Guo, F., Zhang, J., Pei, J., & Li, R. (2021). Correlation analysis between asphalt binder/asphalt mastic properties and dynamic modulus of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 276, 122256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122256>
- Dan, H.-C., Yang, D., Liu, X., Peng, A.-P., & Zhang, Z. (2020). Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading. *Construction and Building Materials*, 247, 118592. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118592>
- Higuera-Sandoval, C. H., & Pacheco-Merchan, O. F. (2008). Patología de pavimentos articulados. *Facultad de Ingeniería*, 17(25), 7–26.
- Huang, B., Shu, X., Li, G., & Chen, L. (2007). Analytical Modeling of Three-Layered HMA Mixtures. *International Journal of Geomechanics*, 7(2), 140–148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:2\(140\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(140))
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall.
- Kwigizile, V., Mussa, R. N., & Selekwá, M. (2005). Connectionist Approach to Improving Highway Vehicle Classification Schemes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1917(1), 182–189. <https://doi.org/10.1177/0361198105191700120>
- Le Bastard, C., Baltazart, V., Yide Wang, & Saillard, J. (2007). Thin-Pavement Thickness Estimation Using GPR With High-Resolution and Superresolution Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8), 2511–2519. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900982>
- Le Bastard, C., Yide Wang, Baltazart, V., & Derobert, X. (2014). Time Delay and Permittivity Estimation by Ground-Penetrating Radar With Support Vector Regression. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(4), 873–877. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2280500>
- Marcelino, P., de Lurdes Antunes, M., Fortunato, E., & Gomes, M. C. (2021). Machine learning approach for pavement performance prediction. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(3), 341–354. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1609673>
- Miquel, M. P. (2006). Análisis de regularidad superficial en caminos pavimentados. *Revista de La Construcción*, 5(2), 16–22.
- Pradena, M., & Wolf, E. (2006). Ejecución y Control de la Conservación en Caminos sin Pavimento Mediante Nivel de Servicio. *Revista de La Construcción*, 5(1), 21–29.
- Rodríguez Moreno, M., Theboux Zeballos, G., & González Vaccarezza, A. (2013). Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile. *Revista de La Construcción*, 12(2), 152–165.
- Song, L., & Yang, L. (2021). Governance innovation of occupational safety and health in China under the background of industry 4.0. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 47(09), 79–82.
- Souza, F. B. de. (2005). Do OPT à Teoria das Restrições: avanços e mitos. *Production*, 15(2), 184–197. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132005000200005>
- Souza, V. M. A., Giusti, R., & Batista, A. J. L. (2018). Asfalt: A low-cost system to evaluate pavement conditions in real-time using smartphones and machine learning. *Pervasive and Mobile Computing*, 51, 121–137. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.10.008>
- Vera, I., Thenoux, G., Solminiá, H. D., & Echaveguren, T. (2010). Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles. *Revista de La Construcción*, 9(2), 76–88.
- Whitman, R. V., Anagnos, T., Kircher, C. A., Lagorio, H. J., Lawson, R. S., & Schneider, P. (1997). Development of a national earthquake loss estimation methodology. *Earthquake Spectra*, 13(4), 643–661.
- Yang, X., Guan, J., Ding, L., You, Z., Lee, V. C. S., Mohd Hasan, M. R., & Cheng, X. (2021). Research and applications of artificial neural network in pavement engineering: A state-of-the-art review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(6), 1000–1021. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.005>
- Zhang, S., Zhang, H., Zhou, M., & Ye, J. (2024). Investigation on the influence of gradation design on the road performance of cold mixed epoxy asphalt mixture based on microstructure evaluation. *Journal of Materials Research and Technology*, 30(March), 2018–2028. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.244>
- Zhao, X., Xue, L., & Xu, F. (2021). Asphalt pavement paving segregation detection method using more efficiency and quality texture features extract algorithm. *Construction and Building Materials*, 277, 19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122302>
- Zhao, Y., Xie, S., Gao, Y., Zhang, Y., & Zhang, K. (2021). Prediction of the number of roller passes and degree of compaction of asphalt layer based on compaction energy. *Construction and Building Materials*, 277, 122274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122274>