

2. Resumen

1. Modelo para la Evaluación de la Durabilidad Proyectada en Mezclas Asfálticas Tipo Md-19: Aplicación Puente Calle 127 con Av. Boyacá, Bogotá D.C.

Autor 1: Laura Liliana Cuervo Giraldo¹

Autor 2: Juan David Duarte González²

Autor 3: Jhon Edison Castro Aldana³

¹ facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

laura.giraldocue@usantotomas.edu.co

² facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

juan.gonzalezdua@usantotomas.edu.co

³ facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

jhon.aldanacas@usantotomas.edu.co

Tutor: Ing. Yeisson Domingo Pérez Lemus,
Esp, M.Sc

La durabilidad de las mezclas asfálticas constituye un factor determinante en la conservación y desempeño funcional de la infraestructura vial. En el contexto urbano de Bogotá, las condiciones climáticas variables, la alta carga vehicular y las deficiencias constructivas generan un deterioro acelerado de los pavimentos flexibles, especialmente de aquellos elaborados con mezcla densa en caliente tipo MD-19.

Este trabajo propone el desarrollo de un modelo predictivo para la evaluación de la durabilidad proyectada de dicha mezcla, integrando parámetros mecánicos y físicos que influyen en su vulnerabilidad temprana.

El modelo combina la caracterización de propiedades de laboratorio como rugosidad, macrotextura y resistencia al deslizamiento.

Se aplicarán herramientas estadísticas y modelos de regresión para correlacionar el deterioro observado con las variables de desempeño, buscando estimar la vulnerabilidad temprana remanente del pavimento. Los resultados esperados permitirán apoyo en la toma de decisiones para el mantenimiento y rehabilitación de la red vial, optimizando la asignación de recursos públicos y promoviendo una gestión predictiva y sostenible de los pavimentos urbanos en Bogotá D.C.

Palabras Clave: Durabilidad de mezclas asfálticas, Factores climáticos, tráfico repetido, pavimentos flexibles, pruebas de laboratorio.

3. Abstract

The durability of asphalt mixtures is a determining factor in the preservation and functional performance of road infrastructure. In the urban context of Bogotá, variable climatic conditions, high traffic volume, and construction deficiencies lead to accelerated deterioration of flexible pavements, especially those made with hot-mix asphalt (MD-19).

This work proposes the development of a predictive model for evaluating the projected durability of this mixture, integrating mechanical, physical, and environmental parameters that influence its service life.

The model combines the characterization of properties such as roughness, slip resistance, and pavement macrotexture.

Statistical tools and regression models will be applied to correlate the observed deterioration with performance variables, seeking to estimate the remaining service life of the pavement. The expected results will support decision-making for the maintenance and rehabilitation of the road network, optimizing the allocation of public resources and promoting predictive and sustainable management of urban pavements in Bogotá D.C.

Keywords: Durability of asphalt mixtures, Climatic factors, Repeated traffic, Flexible pavements, Laboratory tests.

4. Introducción

Actualmente, los métodos tradicionales de diseño y evaluación de mezclas asfálticas no logran predecir de manera confiable su durabilidad en condiciones reales de servicio. Por ello, se hace necesario el desarrollo de un modelo que integre parámetros mecánicos, físicos y ambientales para estimar la vulnerabilidad temprana proyectada de la mezcla.

El estudio se desarrollará tomando como caso de aplicación el Puente calle 127 con AV. Boyacá, ubicada en el norte de Bogotá D.C., una vía de alto flujo vehicular que presenta diferentes condiciones de carga, humedad y macrotextura del pavimento.

En la figura 1, se observa el corredor que fue seleccionado por su relevancia dentro de la red vial urbana y por evidenciar patologías típicas de las mezclas asfálticas tipo MD-19 en servicio, lo que lo convierte en un escenario representativo para la evaluación de la durabilidad proyectada y la validación del modelo propuesto.

Figura 1. Vista General del Tramo Evaluado en el Puente Calle 127 con Av. Boyacá.



Nota. Fotografía tomada por los autores, 2026.

5. Planteamiento del Problema

La infraestructura vial de Bogotá, vital para su movilidad y economía, sufre un deterioro acelerado y constante. A pesar de las constantes intervenciones y mantenimientos, las fallas en el pavimento asfáltico en general persisten, manifestándose en fisuras, ahuellamientos y baches que afectan la seguridad vial, aumentan los costos de operación vehicular y disminuyen la calidad de vida de los ciudadanos. La falta de un enfoque sistemático y técnico para diagnosticar las patologías y daños más comunes lleva a la implementación de soluciones de mantenimiento y rehabilitación ineficientes o de corta duración.

Actualmente, las decisiones sobre la gestión del pavimento se basan a menudo en inspecciones visuales superficiales y reactivas, sin un análisis profundo de las causas estructurales o materiales. Esto resulta en reparaciones mínimas y superficiales que no abordan el origen del problema, provocando una reaparición temprana de las fallas y un ciclo de intervenciones costosas y repetitivas.

Además, la ausencia de un modelo estandarizado para proyectar la vulnerabilidad temprana remanente del asfalto dificulta la planificación estratégica del mantenimiento, lo que impide priorizar de manera efectiva los recursos, conllevando a una gestión ineficiente de los activos viales, donde se invierte en rehabilitar vías que aún podrían tener años de vulnerabilidad temprana, mientras que otras en estado crítico no se tienen en cuenta y se deterioran aún más. Es crucial contar con un modelo de gestión reactivo a uno predictivo y

proactivo, que asegure la sostenibilidad y resiliencia de la infraestructura vial capitalina.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar modelos basados en indicadores funcionales medibles en etapas tempranas, que permitan anticipar el comportamiento del pavimento y apoyar la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento.

6. Objetivos

6.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de evaluación de la durabilidad funcional en mezclas asfálticas tipo MD-19, a partir de indicadores de desempeño temprano como el IRI, la macrotextura y la resistencia al deslizamiento, aplicado al caso de estudio del Puente Calle 127 con Av. Boyacá en Bogotá D.C.

6.2 Objetivos Específicos

Caracterizar el comportamiento funcional del pavimento mediante el análisis del IRI en edades tempranas (7 y 90 días)

Analizar la relación entre el IRI y variables superficiales como la macrotextura (MT) y la resistencia al deslizamiento (CRD), a partir de datos experimentales de campo.

Desarrollar un modelo matemático de proyección del IRI en función del tiempo, que permita estimar la vida útil funcional del pavimento.

Proponer un índice de durabilidad (IVT) que integre variables funcionales y superficiales para la evaluación temprana del desempeño del pavimento.

7. Marco Teórico y Conceptual

Teoría de la Mecánica de Pavimentos y el Deterioro

La durabilidad de los pavimentos asfálticos es uno de los aspectos fundamentales en el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura vial, ya que determina el comportamiento a largo plazo frente a las cargas de tránsito y las condiciones climáticas. En este contexto, la mezcla densa en caliente MD-19 se ha consolidado como una de las más utilizadas en Colombia para capas de rodadura, debido a su buen desempeño mecánico, facilidad de aplicación y adaptabilidad a entornos urbanos con alta carga vehicular.

Estudios como los de Huang (2010) establecen una correlación entre el contenido de vacíos, el nivel de compactación y la resistencia a la humedad, con la durabilidad de la mezcla. Estos factores afectan directamente la integridad estructural del pavimento, acelerando el desarrollo de patologías como el ahuellamiento, el desprendimiento y la fisuración por fatiga.

El comportamiento mecánico de la mezcla MD-19 está influenciado por variables físicas y ambientales, como el tipo de ligante, las temperaturas extremas y la humedad, las cuales interactúan con las cargas repetitivas del tráfico. Investigaciones recientes, como la de Zhang et al. (2022),

han demostrado que las condiciones climáticas extremas especialmente la combinación de humedad y temperaturas variables pueden acelerar la deformación plástica y disminuir significativamente la vulnerabilidad temprana del asfalto.

En Colombia, a pesar de los esfuerzos académicos por caracterizar las mezclas asfálticas en condiciones específicas, existe una carencia de modelos que integren de forma efectiva las propiedades físicas y mecánicas del material con las condiciones reales de servicio. La mayoría de las metodologías empleadas se basan en diagnósticos visuales o inspecciones superficiales, sin una correlación técnica entre las fallas observadas y su origen estructural o material.

La necesidad de modelos predictivos que integren variables como la rugosidad, la resistencia a la humedad, la macrotextura y la respuesta del asfalto bajo carga repetitiva, es clave para mejorar la planeación de mantenimiento. Estos modelos permiten estimar con mayor precisión la vulnerabilidad temprana remanente, facilitando intervenciones oportunas que optimicen los recursos y aumenten la resiliencia de la red vial urbana.

La presente investigación se sustenta en el marco normativo nacional, aplicable al diseño, construcción y evaluación de pavimentos asfálticos, con el fin de garantizar la coherencia técnica y la validez del modelo propuesto para la evaluación de durabilidad de mezclas tipo MD-19 en el Puente calle 127 con AV. Boyacá, Bogotá D.C.

Con relación al diseño y construcción de pavimentos:

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS), a través del *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para vías de bajo, medio y alto volumen de tránsito*, establece los criterios estructurales y funcionales para la conformación de las capas del pavimento.

Esta normativa constituye la base de referencia para la caracterización de materiales, el dimensionamiento y la evaluación de desempeño bajo condiciones de carga vehicular. En esta investigación, dichos lineamientos se utilizan como punto de partida para comparar los parámetros teóricos de diseño con el comportamiento real observado en campo.

El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) define especificaciones técnicas complementarias para pavimentos urbanos dentro del *Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción para la Red Vial y el Espacio Público de Bogotá D.C. (ET-IC-01)*. Dichas especificaciones son particularmente relevantes para este estudio, ya que la Calle 127 con AV. Boyacá forma parte de la red vial local bajo jurisdicción del IDU. Esta normativa orienta la selección de materiales, el control de compactación y las condiciones de durabilidad esperadas en ambientes urbanos de alta carga, para el caso de estudio es aplicable al ser la que rige en el ámbito distrital.

Las Normas Técnicas Colombianas (NTC) emitidas por ICONTEC y normas de ensayo INVIAS 2013, regulan los métodos de ensayo para las mezclas asfálticas, definiendo procedimientos para determinar propiedades y características para capa terminada. Estas normas se aplican directamente en la etapa experimental y de laboratorio del estudio, asegurando que la caracterización de la mezcla MD-19 cumpla

con los estándares de calidad requeridos en el país.

A nivel internacional, la *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* y la ASTM International (American Society for Testing and Materials) establecen estándares de diseño y evaluación que complementan las normas nacionales. En particular, la *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)* de AASHTO incorpora el concepto de confiabilidad y predicción de desempeño de los pavimentos, considerando factores como tráfico, clima y envejecimiento del asfalto.

En conjunto, estas normativas se complementan al establecer un marco integral de referencia, mientras INVIAS y el IDU proporcionan los criterios locales de diseño y construcción, ICONTEC e INVIAS estandarizan los métodos de ensayo, y AASHTO - ASTM amplían la perspectiva metodológica hacia un enfoque mecanicista-empírico más preciso. Esta integración permite adoptar una postura técnica que combina la normativa nacional con buenas prácticas internacionales, fortaleciendo la confiabilidad del modelo de durabilidad proyectada aplicado en la Calle 127 con AV. Boyacá.

8. Metodología

8.1 Tipo de Investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en la recolección, medición, procesamiento y análisis de datos numéricos asociados al

desempeño funcional de pavimentos asfálticos. Este enfoque permite evaluar objetivamente el comportamiento de variables técnicas, establecer relaciones estadísticas entre ellas y formular modelos predictivos sustentados en evidencia medible.

8.2 Enfoque Metodológico

El estudio se clasifica como una investigación aplicada, puesto que está orientado a la solución de una problemática real en el campo de la infraestructura vial urbana, específicamente relacionada con la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan estimar la durabilidad funcional de mezclas asfálticas tipo MD-19 en condiciones reales de servicio. En este sentido, el propósito no se limita a generar conocimiento teórico, sino a proponer una metodología útil para la toma de decisiones en conservación, mantenimiento y gestión de pavimentos.

Corresponde a una investigación no experimental, ya que las variables objeto de estudio no son manipuladas deliberadamente por el investigador, sino observadas y analizadas tal como se presentan en el entorno real. Las mediciones se realizan directamente sobre un tramo en servicio, registrando el comportamiento funcional del pavimento en dos momentos específicos de tiempo, sin intervenir las condiciones estructurales, operacionales o ambientales del sistema evaluado.

Adicionalmente, la investigación presenta un alcance descriptivo-correlacional. Es descriptiva porque

caracteriza el estado funcional del pavimento mediante indicadores técnicos como el Índice de Regularidad Internacional (IRI), la macrotextura superficial (MT) y la resistencia al deslizamiento (CRD). A su vez, es correlacional porque busca identificar el grado de relación existente entre dichas variables, así como su incidencia en la evolución temprana del desempeño del pavimento.

En conjunto, esta clasificación metodológica permite abordar el problema de investigación desde una perspectiva técnica y objetiva, generando resultados aplicables a la gestión vial y al diseño de estrategias de mantenimiento preventivo en corredores urbanos de alta demanda vehicular.

8.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de medición en campo orientadas a la evaluación funcional del pavimento, así como herramientas para el registro, procesamiento y análisis de la información obtenida. Las variables seleccionadas permiten valorar condiciones de regularidad superficial, textura y seguridad operacional del tramo intervenido.

Se utilizaron las siguientes técnicas e instrumentos:

8.3.1 Medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

La determinación del IRI se realizó con base en el método de ensayo INV E 790:2013, mediante equipo especializado para la medición del perfil longitudinal del pavimento. Este procedimiento permitió cuantificar el nivel de rugosidad superficial y establecer la calidad de rodadura del tramo evaluado. Las mediciones se efectuaron en dos momentos: a los 7 días posteriores a la instalación de la mezcla asfáltica, sin apertura al tránsito vehicular, y a los 90 días de puesta en servicio, con el fin de identificar variaciones tempranas en el comportamiento funcional.

8.3.2 Evaluación de la Macrotextura Superficial (MT)

La macrotextura fue determinada conforme al método de ensayo INV E 791:2013, utilizando la técnica del círculo de arena. Este ensayo permite estimar la profundidad media de textura de la superficie de rodadura, parámetro asociado con la capacidad de drenaje superficial, la adherencia neumático-pavimento y la seguridad vial en condiciones húmedas.

8.3.3 Medición de la Resistencia al Deslizamiento (CRD)

La resistencia al deslizamiento se evaluó mediante equipo tipo péndulo británico, siguiendo el procedimiento establecido en la norma INV E 792:2013. Esta medición permite determinar las condiciones de fricción superficial del

pavimento, aspecto fundamental para el análisis de seguridad vial, especialmente en zonas de frenado, curvas o presencia de humedad.

8.3.4 Registro, organización y sistematización de la información

Los datos obtenidos en campo fueron consolidados en matrices de control y hojas de cálculo, permitiendo su depuración, clasificación y análisis posterior. Este proceso facilitó la aplicación de herramientas estadísticas, el cálculo de promedios, tasas de variación y el desarrollo del modelo matemático propuesto para la evaluación de la durabilidad funcional del pavimento.

8.4 Limitaciones del Estudio

El modelo estará limitado a las condiciones específicas de Bogotá (altitud, clima, tráfico), por lo que su aplicabilidad en otros contextos puede requerir ajustes.

La precisión del modelo depende de la calidad y cantidad de los datos recolectados, tanto en laboratorio como en campo.

El análisis se restringe a la mezcla MD-19; no incluye otras tipologías asfálticas.

El modelo se basa en un número limitado de mediciones (7 y 90 días), lo cual restringe la posibilidad de evaluar comportamientos no lineales en la evolución del deterioro.

Estas limitaciones no invalidan el estudio, pero sí indican que el modelo debe

entenderse como una herramienta preliminar calibrable.

8.5 Fase I – Diagnóstico y Levantamiento de Información

La primera fase de la investigación estuvo orientada a realizar el diagnóstico inicial del corredor objeto de estudio, correspondiente al tramo ubicado en la Calle 127 con Avenida Boyacá, con el propósito de identificar el estado funcional del pavimento, reconocer las patologías visibles presentes y establecer los posibles factores asociados a su deterioro temprano.

Esta etapa permitió obtener una línea base técnica del comportamiento superficial de la vía, indispensable para el desarrollo de las fases posteriores de medición, análisis y modelación. Asimismo, facilitó la comprensión de las condiciones reales de operación del tramo, considerando su importancia dentro de la red vial urbana y la alta demanda de tránsito que soporta diariamente

Actividades principales:

a. Delimitación del tramo de estudio, caracterización inicial del estado funcional del pavimento. Se efectuó un reconocimiento visual detallado del tramo, con el fin de documentar las condiciones existentes al momento del estudio.

b. Registro fotográfico

Resultado esperado: caracterización inicial del estado funcional del pavimento y localización de fallas recurrentes que servirán de base para la toma de muestras y ensayos posteriores.

8.6 Fase II – Procesamiento de Datos

La segunda fase de la investigación estuvo orientada al procesamiento, organización y validación de la información obtenida durante las actividades de campo y laboratorio, con el propósito de garantizar la confiabilidad de los datos utilizados en el análisis posterior y en la construcción del modelo propuesto.

En esta etapa se realizó la consolidación de resultados, la depuración de registros inconsistentes y el cálculo de valores representativos por cada punto de medición, permitiendo disponer de una base de datos estructurada y técnicamente consistente. Asimismo, se efectuó el tratamiento estadístico inicial mediante promedios, variaciones y comparación entre mediciones realizadas en diferentes momentos de evaluación.

Como parte del proceso metodológico, la Tabla 1 presenta el plan de ensayos ejecutados durante la investigación y las normas técnicas de referencia utilizadas para cada procedimiento de evaluación funcional.

Actividades principales:

a. Se realizó la preparación de tramos de estudio y la ejecución de los ensayos requeridos para la investigación, como se muestra en la tabla 1, siguiendo los procedimientos establecidos en la normativa técnica nacional vigente

Modelo para la Evaluación de la Durabilidad Proyectada en Mezclas Asfálticas Tipo MD-19

Tabla 1. Plan de Ensayos

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
IRI	INV E 790-13
Circulo de arena	INV E 791-13
Péndulo	INV E 792-13

Nota. Los ensayos listados se utilizarán para determinar el comportamiento mecánico y la resistencia al deterioro de la mezcla MD-19.

b. Análisis comparativo entre resultados obtenidos y los valores de referencia establecidos por INVIAS y el IDU para mezclas MD-19.

Resultado esperado: obtención de parámetros mecánicos y físicos confiables para integrar al modelo de durabilidad y correlacionar con el deterioro observado.

8.7 Fase III – Modelación y Proyección de Durabilidad

La tercera fase de la investigación estuvo orientada al desarrollo de un modelo predictivo capaz de relacionar el comportamiento funcional observado del pavimento con las variables medidas en campo, con el propósito de estimar la vulnerabilidad temprana proyectada de la mezcla asfáltica tipo MD-19 bajo condiciones reales de servicio.

Esta etapa constituye el núcleo analítico del estudio, ya que permite transformar la información recopilada en una herramienta técnica de proyección, orientada a anticipar tendencias de deterioro

y apoyar la planificación de intervenciones oportunas sobre la infraestructura vial.

Actividades principales:

a. Sistematización de datos provenientes de campo y laboratorio mediante hojas de cálculo.

b. Análisis de correlación entre variables medidas

c. Aplicación de modelos de regresión múltiple y/o método mecanicista-empírico, siguiendo los lineamientos de la *AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)*.

Resultado esperado: formulación de un modelo predictivo para las condiciones de la Calle 127 con AV. Boyacá, útil para apoyar la toma de decisiones de mantenimiento preventivo y correctivo.

8.8 Fase IV – Análisis e interpretación

La cuarta fase de la investigación estuvo orientada al análisis integral de los resultados obtenidos y a la interpretación técnica del comportamiento funcional del pavimento, con el propósito de establecer conclusiones sustentadas sobre la evolución temprana de la mezcla asfáltica tipo MD-19 en condiciones reales de servicio.

En esta etapa se evaluaron los resultados derivados de las mediciones de campo, identificando tendencias de desempeño, variaciones entre periodos de análisis y el grado de incidencia de cada variable sobre la condición funcional del pavimento. De igual manera, se analizaron las relaciones existentes entre el Índice de Regularidad Internacional (IRI), la

macrotextura superficial (MT) y la resistencia al deslizamiento (CRD), con el fin de comprender su interacción dentro del proceso de deterioro temprano.

Como parte del desarrollo metodológico, se formuló el Índice de Vulnerabilidad Temprana (IVT), concebido como un indicador sintético de durabilidad funcional que integra variables de regularidad, textura y fricción en un solo parámetro de evaluación. Este índice permite simplificar la interpretación de resultados y facilita la priorización de acciones de mantenimiento en etapas iniciales.

9. Resultados y Análisis

9.1 Fase I y II: Diagnostico, levantamiento de la información y procesamiento de datos

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para las variables funcionales evaluadas durante el periodo de análisis correspondiente a los 7 y 90 días.

Tabla 2. Resultados obtenidos

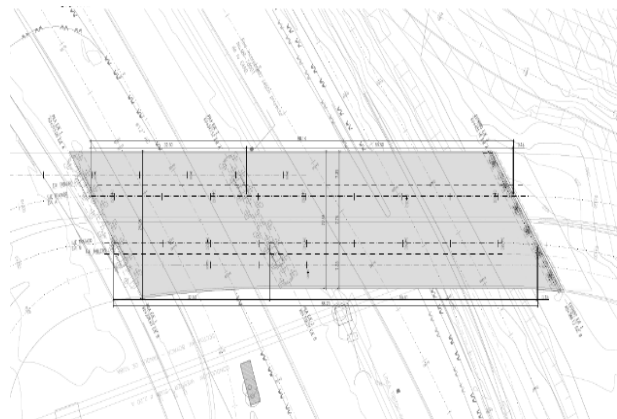
EDAD / DÍAS	IRI	MT	CRD
7	2,77	0,21	42,41
90	2,85	0,27	57,01

Nota. Tasa de cambio inicial 7 a 90 días

Basados en especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público, para Bogotá D.C desarrollamos un Modelo de Durabilidad Funcional Proyectada (IVT)

en el tramo de estudio mostrado en la figura 2, con las variables de salida (IRI, textura y fricción) las cuales reflejan deterioro progresivo y fueron medidas previo a la puesta en servicio del puente y tres meses después.

Figura 2. Tramo de Estudio Calle 127 con Av. Boyacá.



Nota. Elaboración propia, 2026

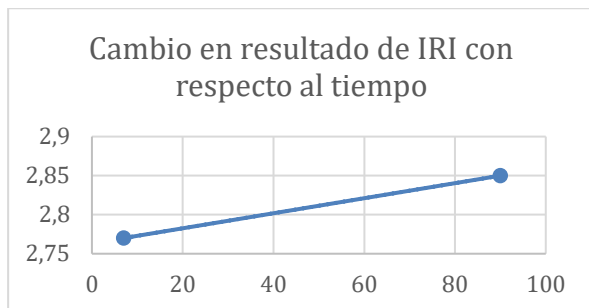
INV E 790:2013 (IRI)

Permite estimar las irregularidades de la superficie en una sección del pavimento, este se calcula a partir de la medición del perfil longitudinal de las huellas externa e interna de la circulación del tránsito en un pavimento. El promedio estadístico de estos valores se reporta como la rugosidad de la sección de pavimento evaluada.

En los tramos seleccionados se ejecuta un total de 30 ensayos a los 7 días posteriores a la instalación, sin permitir el paso de vehículos, con el fin de evaluar las condiciones óptimas de servicio.

Posteriormente, se realiza una nueva evaluación a los 90 días de exposición al tráfico, con el propósito de verificar las variaciones presentadas. (ver figura 3).

Figura 3. IRI vs Tiempo



Nota. Elaboración propia, 2026

$$\Delta IRI = IRI_{90} - IRI_7 = 0.08 \frac{m}{km}$$

Como se observa en la Figura 3, el incremento del IRI entre las mediciones realizadas fue reducido, desde el punto de vista técnico, este incremento puede considerarse bajo y compatible con el comportamiento esperado de una carpeta asfáltica nueva sometida a tránsito inicial. En pavimentos recién construidos es común que durante los primeros meses ocurran pequeños procesos de acomodación superficial asociados a:

- Asentamiento de la mezcla
- Compactación secundaria inducida por el tráfico
- Redistribución de esfuerzos internos
- Adaptación entre capa de rodadura y estructura inferior.

El hecho de que el IRI permanezca por debajo de valores críticos cercanos a 3.0 m/km sugiere que el tramo mantiene una adecuada calidad de rodadura. Esto es particularmente relevante en una estructura tipo puente, donde las irregularidades longitudinales pueden amplificarse por juntas, transiciones de acceso o efectos dinámicos del tránsito pesado.

Debido a que

Coeficiente β_1 :

$$\beta_1 = \frac{2.84 - 2.76}{83} = 0.00096$$

Tasa de deterioro:

$$\gamma_{IRI} = \frac{0.08}{83} = 0.00096 \frac{m}{km} \text{ día}$$

Este valor indica que el deterioro funcional inicial es lento y controlado. En términos de gestión vial, una baja pendiente de crecimiento del IRI representa una condición favorable, ya que permite ampliar las ventanas de mantenimiento preventivo antes de alcanzar niveles de servicio inaceptables.

El IRI aumenta aproximadamente 0.00096 m/km por día durante la fase temprana.

INV E 791:2013 (Macrotextura)

Coeficiente β_2 :

$$\beta_2 = \frac{0.08}{0.06} = 1.17$$

Esta norma describe un procedimiento para la determinación de la profundidad media de la macrotextura superficial de un pavimento, mediante la aplicación de un volumen conocido de material granular sobre la superficie, como se muestra en la figura 4 y el subsiguiente cálculo del área total cubierta.

La macrotextura se define como las desviaciones de un pavimento respecto de una superficie completamente plana con dimensiones características de longitud de onda entre 0.5 y 50 mm y de una amplitud que varía entre 0.1 y 20 mm.

Figura 4. Ensayo Circulo de Arena.



Nota. Fotografía tomada por los autores, 2026

Promedios aproximados

Inicial₇: 0.21 mm

Final₉₀: 0.27 mm

Δ Macrotextura: 0.06 mm

Un incremento de 0.01 mm en macrotextura genera aproximadamente un aumento de 0.0117 m/km en el IRI

Más textura → superficie más irregular
→ sube IRI

Este comportamiento no debe interpretarse como deterioro negativo inmediato. En mezclas asfálticas densas recién colocadas, durante los primeros meses suele ocurrir una ligera exposición del agregado superficial debido al pulimiento inicial de la película bituminosa externa. Como resultado, la textura puede incrementarse moderadamente.

Desde la ingeniería vial, una macrotextura controlada genera beneficios importantes:

- Mejora drenaje superficial.
- Reduce hidroplaneo.
- Favorece adherencia en lluvia.
- Incrementa capacidad de frenado.
- Mejora seguridad operacional.

El aumento observado indica que la mezcla MD-19 alcanzó una condición superficial más estable luego de la entrada en servicio, sin evidenciar desprendimiento severo de agregados.

Adicionalmente, el valor final obtenido se mantiene dentro de rangos funcionales aceptables para mezclas densas urbanas, lo cual confirma un adecuado diseño granulométrico y correcta compactación inicial.

INV E 792:2013 (Resistencia al Deslizamiento)

Esta norma describe el procedimiento para medir las propiedades superficiales de fricción (resistencia al deslizamiento) de un pavimento utilizando el equipo péndulo británico.

Este péndulo es un equipo dinámico de impacto utilizado para medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas provisto en su extremo de una zapata de caucho, cuando la arista o borde de la zapata roza con una presión determinada y en una longitud fija la superficie a ensayar. El equipo se emplea tanto en el laboratorio como en el campo sobre superficies planas y para medidas de pulimento sobre muestras curvadas de laboratorio, usadas en pruebas de pulimento acelerado con llanta. **(CRD)**

La Figura 5 presenta la ejecución del ensayo de resistencia al deslizamiento mediante equipo tipo péndulo británico.

Figura 5. Ensayo Péndulo.



Nota. Fotografía tomada por los autores, 2026

Valores promedio en etapa de evaluación Inicial₇: 42 a 44 CRD

Valores promedio en etapa de evaluación Final₉₀: 57 a 60 CRD

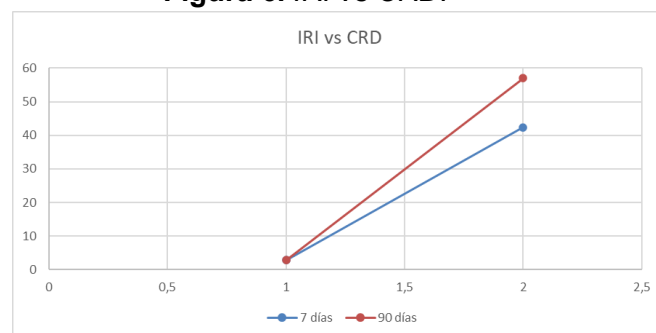
Variación existente:

$$\Delta \text{ CRD: } 15$$

Coeficiente:

$$\beta_3 = \frac{0.08}{15} = 0.005$$

Figura 6. IRI vs CRD.



Nota. Elaboración propia, 2026.

Como se observa en la figura 6, el efecto del CRD sobre el IRI es bajo, indicando que la fricción no controla directamente la rugosidad en la fase inicial.

Este hallazgo tiene alta relevancia técnica, ya que confirma que la superficie desarrolló mejores condiciones de fricción una vez sometida al tránsito inicial. Dicho fenómeno es ampliamente reconocido en pavimentos nuevos y se relaciona con:

- Remoción de película superficial de ligante.
- Exposición de aristas minerales del agregado.
- Activación de microtextura.
- Incremento del contacto efectivo llanta-superficie.

En términos de seguridad vial, una mejora del CRD reduce distancias de frenado y mejora maniobrabilidad,

Modelo para la Evaluación de la Durabilidad Proyectada en Mezclas Asfálticas Tipo MD-19

especialmente en zonas de puente, curvas de acceso o frenado frecuente.

Para el caso de Bogotá, donde las lluvias son recurrentes y existen cambios de humedad durante el año, disponer de adecuados niveles de fricción es un aspecto prioritario de operación vial.

Tabla 3. Interpretación de Resultados.

VARIABLE	CAMBIO	INTERPRETACIÓN
MT	0,21 a 0,27	Aumenta (más rugosidad)
CRD	42 a 57	Mejora adherencia
IRI	2,76 a 2,85	Empeora servicio

Nota. Elaboración propia a partir de resultados experimentales.

Como se observa en la tabla 3, los resultados obtenidos permitieron analizar el comportamiento conjunto entre rugosidad, textura y fricción superficial.

Uno de los principales aportes del estudio fue analizar de manera integrada cómo interactúan las variables medidas.

Se observó que:

- El IRI aumentó ligeramente.
- La macrotextura aumentó moderadamente.
- La fricción mejoró significativamente.

Esto demuestra que una pequeña pérdida de regularidad superficial no implica necesariamente reducción del desempeño global. De hecho, durante la etapa temprana pueden coexistir:

- ligera pérdida de lisura,
- mejora de adherencia,

- estabilización superficial.

Este resultado es importante porque en muchos esquemas de mantenimiento se toma únicamente el IRI como criterio de intervención. Sin embargo, la presente investigación evidencia que la evaluación aislada de una sola variable puede inducir decisiones incompletas.

Un pavimento con IRI moderadamente creciente pero alta fricción y textura adecuada aún puede ofrecer excelentes condiciones funcionales.

9.2 Fase III: Modelo multivariable - ecuación de regresión

$$IRI = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 MT + \beta_3 CRD$$

$\beta_1 \rightarrow$ efecto del tiempo (t) Indica cuánto cambia el IRI por día

$\beta_2 \rightarrow$ efecto de la macrotextura (MT) Indica cómo influye la textura en el IRI

$\beta_3 \rightarrow$ efecto del CRD Relación entre fricción y rugosidad

En la tabla 4 se presentan los coeficientes obtenidos y su interpretación funcional dentro del modelo matemático propuesto.

Modelo para la Evaluación de la Durabilidad Proyectada en Mezclas Asfálticas Tipo MD-19

Tabla 4. Variables con respecto a las tasas de cambio.

COEFICIENTE	VALOR	SIGNIFICADO
β_0	2.30	condición base
β_1	0.00096	deterioro por tiempo
β_2	1.17	influencia de textura
β_3	0.005	influencia de CRD (baja)

Nota. Elaboración propia a partir del análisis estadístico.

$$IRI_7 = 2,76$$

$$2.76 = \beta_0 + 0.00096 t + 1.17 MT + 0.005 CRD$$

Despejamos coeficiente β_0 tomando como factor multiplicador los resultados promedio a 7 días

$$2.76 = \beta_0 + 0.00096 (7) + 1.17 (0.21) + 0.005 (43.5)$$

$$\beta_0 \approx 2.76 - 0.0067 - 0.2457 - 0.2175$$

$$\beta_0 \approx 2.30$$

Modelo Final

$$IRI = 2.30 + 0.00096 t + 1.17 MT + 0.005 CRD$$

El modelo representa la fase de vulnerabilidad temprana, no la vida útil total del pavimento.

Los coeficientes fueron estimados a partir de la variación observada entre los estados inicial y temprano, por lo que representan sensibilidades aproximadas y no parámetros estadísticos calibrados mediante regresión clásica.

La interpretación ingenieril de los coeficientes permite establecer:

Efecto del Tiempo

El coeficiente temporal confirma deterioro progresivo normal. Cada día transcurrido incrementa ligeramente el IRI.

Efecto de la Macrotextura

La macrotextura mostró mayor sensibilidad relativa dentro del modelo. Esto indica que cambios superficiales en la textura tienen incidencia directa sobre la regularidad medida.

Efecto del CRD

El coeficiente del CRD fue bajo, lo que sugiere que la fricción y la rugosidad son variables funcionales parcialmente independientes.

Esto es coherente con la teoría de pavimentos: una vía puede ser muy regular pero resbalosa, o puede presentar cierta rugosidad con excelente adherencia.

9.3 Fase IV: Construcción del Índice de Vulnerabilidad Temprana (IVT)

Con el propósito de integrar en un solo parámetro las principales variables funcionales evaluadas en el estudio, se formuló el Índice de Vulnerabilidad Temprana (IVT), orientado a estimar el nivel de susceptibilidad del pavimento frente al deterioro inicial durante los primeros meses de servicio.

Modelo para la Evaluación de la Durabilidad Proyectada en Mezclas Asfálticas Tipo MD-19

El IVT se construyó a partir de la normalización de los indicadores medidos en campo: Índice de Regularidad Internacional (IRI), macrotextura superficial (MT) y resistencia al deslizamiento (CRD). Este procedimiento permitió llevar las variables a una escala comparable (adimensional) y consolidarlas dentro de un esquema único de evaluación.

Para el caso del IRI, donde valores mayores representan una condición menos favorable, se empleó la siguiente expresión:

$$IRI = \frac{IRI - IRI_{min}}{IRI_{max} - IRI_{min}}$$

Para la macro textura superficial (MT), se aplicó la ecuación:

$$MT^* = \frac{MT - MT_{min}}{MT_{max} - MT_{min}}$$

En cuanto a la resistencia al deslizamiento (CRD), dado que valores más altos indican mejor desempeño, se utilizó una relación inversa para representar vulnerabilidad:

$$CRD^* = 1 - \frac{CRD - CRD_{min}}{CRD_{max} - CRD_{min}}$$

Al obtener el valor individual y sumar cada variable se obtiene el índice el cual se espera se encuentre entre cero y uno para poder indicar la condición de nivel de servicio.

Cuando el IVT sea cercano a 1 Significa:

- ⚠ alta susceptibilidad al deterioro
- ⚠ pérdida funcional temprana

⚠ mayor necesidad de seguimiento o mantenimiento

Ejemplo:

Adoptando los siguientes rangos mínimos y máximos (experimentales):

IRI: 0.5 a 4 m/km

MT: 0.2 a 0.35 mm

CRD: 40 a 60

$$IRI = \frac{2.85 - 0.5}{4 - 0.5} = 0.67$$

$$MT^* = \frac{0.27 - 0.2}{0.35 - 0.2} = 0.46$$

$$CRD^* = 1 - \frac{57 - 40}{60 - 40} = 0.15$$

IVT Resultante

$$\frac{0.67 + 0.46 + 0.15}{3} = 0.42$$

Interpretación del IVT

0.00 – 0.25

Baja vulnerabilidad

0.26 – 0.50

Vulnerabilidad moderada

0.51 – 0.75

Vulnerabilidad alta

0.76 – 1.00

Vulnerabilidad crítica

Debido a la disponibilidad de únicamente dos puntos temporales, se optó por un modelo lineal calibrado, evitando sobreajuste en regresiones multivariadas.

La aplicación del IVT utilizando únicamente la información correspondiente al deterioro temprano observado entre 0 y 90 días permitió establecer una condición funcional estable del pavimento durante la etapa inicial de servicio.

Los resultados indican que, aunque se presentó una ligera variación en la regularidad superficial, la mejora simultánea en textura y fricción compensó dicho comportamiento, evidenciando que la mezcla asfáltica tipo MD-19 mantuvo niveles adecuados de desempeño en sus primeros meses de operación.

10. Conclusiones y Recomendaciones

La presente investigación permitió desarrollar un modelo multivariable de durabilidad funcional proyectada para mezclas asfálticas tipo MD-19, integrando indicadores funcionales como el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), la macrotextura superficial (MT) y la resistencia al deslizamiento (CRD). A partir de las mediciones realizadas en condiciones reales de servicio sobre el puente de la Calle 127 con Avenida Boyacá, se evidenció que el comportamiento funcional temprano del pavimento presenta coherencia con los principios teóricos asociados al deterioro progresivo de pavimentos flexibles urbanos, donde variables como la rugosidad, la textura y la fricción superficial influyen directamente sobre las condiciones de operación, seguridad y desempeño de la carpeta asfáltica.

Los resultados obtenidos permitieron identificar la evolución inicial del comportamiento funcional del pavimento durante los primeros 90 días de servicio,

periodo crítico en el cual se estabilizan las condiciones superficiales posteriores a la construcción. A partir del análisis multivariable desarrollado, se evidenció una relación funcional entre el tiempo, la macrotextura y el comportamiento del IRI, mostrando que la textura superficial presentó la mayor influencia relativa sobre la regularidad del pavimento durante la etapa temprana de operación, mientras que la resistencia al deslizamiento mantuvo una incidencia indirecta sobre la rugosidad superficial.

El análisis de la evolución del IRI entre los días 7 y 90 evidenció un incremento reducido de 0.08 m/km, lo cual indica que la estructura superficial conservó condiciones adecuadas de regularidad durante la etapa inicial de operación. Este comportamiento sugiere que el proceso constructivo, la compactación lograda y la calidad de los materiales utilizados permitieron una respuesta funcional favorable frente a las primeras solicitaciones del tránsito.

Respecto a la relación entre el IRI y las variables superficiales, se observó que la macrotextura presentó un incremento ($\Delta MT \approx 0.06$ mm), asociado a procesos iniciales de desgaste y exposición del agregado, mientras que la resistencia al deslizamiento aumentó significativamente ($\Delta CRD \approx 15$), reflejando la eliminación de la película bituminosa inicial. Estos resultados evidencian una interacción coherente entre la evolución superficial y la estabilidad funcional del pavimento.

En relación con la macrotextura superficial, se observó un incremento desde 0.21 mm hasta 0.27 mm, comportamiento asociado al asentamiento inicial de la mezcla y a la exposición progresiva del

agregado pétreo por efecto del tránsito. Este fenómeno es técnicamente coherente y favorable, dado que una textura superficial moderada mejora la evacuación de agua, incrementa la adherencia neumático-pavimento y contribuye a la seguridad vial.

Respecto a la resistencia al deslizamiento (CRD), el aumento registrado de aproximadamente 15 unidades confirma que, tras la puesta en servicio, la mezcla desarrolló mejores condiciones de fricción superficial. Esto suele ocurrir por la remoción de la película inicial de ligante que recubre parcialmente los agregados recién colocados. En consecuencia, la superficie alcanza una macrotextura más activa y eficiente para la interacción con las llantas de los vehículos.

En cuanto a la modelación del IRI en función del tiempo, el modelo desarrollado logró representar adecuadamente la evolución observada en el periodo inicial, demostrando su capacidad para proyectar el desempeño funcional del pavimento y servir como herramienta para la estimación de su comportamiento futuro.

Desde la integración de variables funcionales y superficiales, el índice de vulnerabilidad temprana (IVT) permitió consolidar el IRI, la macrotextura y la resistencia al deslizamiento en un único indicador, mostrando una tendencia estable en los primeros meses de servicio y facilitando la evaluación temprana del desempeño del pavimento.

Desde el punto de vista ingenieril, la baja tasa de deterioro calculada (0.00096 m/km por día) representa una condición positiva, ya que indica que el pavimento no presentó deformaciones prematuras, segregación superficial ni pérdida acelerada

de uniformidad. Esto resulta especialmente relevante en corredores urbanos de alta demanda vehicular como el analizado.

La ecuación desarrollada constituye una herramienta preliminar de predicción funcional, útil para estimar tendencias iniciales de deterioro y apoyar procesos de gestión vial. Aunque se trata de un modelo calibrado con dos momentos de medición, su estructura metodológica es consistente y permite futuras recalibraciones con series temporales más extensas.

El modelo multivariable obtenido permite estimar la evolución funcional del pavimento a partir del tiempo y de variables superficiales.

El coeficiente asociado al tiempo muestra que el deterioro progresivo esperado es bajo durante la fase temprana, mientras que la macrotextura presenta mayor influencia relativa sobre la regularidad superficial.

En términos de gestión pública, el modelo propuesto permite migrar desde esquemas reactivos de mantenimiento — basados únicamente en fallas visibles— hacia estrategias predictivas soportadas en indicadores cuantificables. Esto puede traducirse en una mejor asignación presupuestal, mayor eficiencia operacional y ampliación de la vida útil de los corredores urbanos.

Se recomienda ampliar el monitoreo a 1, 3 y 5 años para recalibrar el modelo con mayor confiabilidad estadística.

La mezcla evaluada presenta una adecuada vulnerabilidad temprana bajo condiciones de tráfico urbano; sin embargo, factores como la geometría de la vía y la exposición a alta humedad y escorrentía

superficial sugieren la necesidad de monitoreo a mediano plazo, con el fin de optimizar la planificación de mantenimientos y la gestión de recursos en infraestructura vial.

El enfoque propuesto puede ser replicable en otros corredores urbanos de Bogotá.

Para Bogotá D.C., donde la red vial presenta deterioro recurrente por tráfico pesado, humedad, ciclos térmicos y sobrecarga operacional, herramientas como la desarrollada en esta investigación resultan especialmente valiosas, ya que permiten intervenir oportunamente antes de que aparezcan daños mayores como fisuración severa, baches o ahuellamiento profundo.

11. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Airey, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165–176.
<https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- ASTM International. (2018). *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures (D2041/D2041M-18)*.
- ASTM International. (2019). *Standard test method for effect of water on cohesive strength of compacted bituminous mixtures (D4867/D4867M-19)*.
- ASTM International. (2020). *Standard test method for penetration of bituminous materials (D5/D5M-20)*.
- ASTM International. (2021). *Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys (D6433-21)*.
- Caro, S., et al. (2019). Investigaciones sobre el envejecimiento del asfalto y su impacto en la durabilidad de pavimentos en Colombia. *Revista de la Construcción*, 18(3), 365–375. *
- Federal Highway Administration (FHWA). (2015). *Pavement management guide*. U.S. Department of Transportation.
- Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. P. (1994). *Modern pavement management*. Krieger Publishing Company.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. Pearson Education, Inc.
- Huang, Y. H. (2010). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2015). *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para la red vial y el espacio público de Bogotá D.C. (ET-IC-01)*. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2012). *Normas de ensayo de materiales*

Modelo para la Evaluación de la Durabilidad Proyectada en Mezclas Asfálticas Tipo MD-19

para carreteras (INV E). Ministerio de
Transporte de Colombia.

Pavement Condition Index (PCI). (2019). A
*guide to pavement distress and
pavement condition index*. U.S. Army
Corps of Engineers.

Ramírez Gómez, H., et al. (2019). *Modelo de
gestión de pavimentos para la
conservación sostenible de la malla
vial local*. Unidad Administrativa
Especial de Rehabilitación y
Mantenimiento Vial (UMV).

Sánchez, M. C., & Vargas, A. (2020).
*Estudio de patologías en pavimentos
asfálticos urbanos en Bogotá:
Causas y factores de incidencia*
[Tesis de pregrado, Universidad de
los Andes].

Timoshenko, S. P., & Goodier, J. N. (1970).
Theory of elasticity. McGraw-Hill.

Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno
de envejecimiento de los asfaltos.
Ciencia e Ingeniería Neogranadina,
20(2), 5–18. *

Zhang, J., & Wang, Y. (2021). A
comprehensive review of pavement
distress detection methods. *Journal
of Transportation Engineering, Part
B: Pavements*, 147(4), 04021074. *