



# Análisis económico financiero de la gestión de pavimentos de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia

---

Trabajo de Grado Universidad Tecnológica Nacional FRM – 2016

Autor:

Núñez Romero Carlos Eduardo



<http://www.photoarchive.co/picture.php?/1805>  
(Imagen Aérea Puente Calle 100, Bogotá D.C, Colombia)

Este documento presenta la resolución de todas las consignas correspondientes al Trabajo de Grado Universidad Tecnológica Nacional FRM. Correspondiente al curso de posgrado Administración en Negocios de la UTN – Facultad Regional Mendoza.

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto de tesis a Dios quien es el que me ha dado la fuerza para seguir, a mis padres quienes siempre me han apoyado de forma incondicional, a la vida por permitirme esta oportunidad de crecimiento tanto académico como personal, a la Argentina por recibirme y darme estudio como un hijo más, a la UTN y todos sus colaboradores quienes me brindaron siempre ayuda y guía haciéndome sentir como en casa.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus sinceros agradecimientos al PHD. Wilmar Darío Fernández Gómez uno de los directores de esta tesis, quien con su sabiduría y experiencia apporto de forma notable en este proceso; al MBA Daniel Garro quien de forma oportuna y concreta desde su papel como director de tesis me brindo lineamientos importantes para el desarrollo del presente trabajo y al Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) quien me brindó los datos para el desarrollo de esta tesis.

En general, a todas aquellas personas e instituciones que de alguna manera se vincularon al proyecto y aportaron para su culminación.

## RESUMEN

De la información obtenida del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, se basa en algunos modelos de inversión con base en el deterioro de los pavimentos flexibles, sin embargo se ha evidenciado que su alcance y respuesta es insuficiente respecto a la gestión de los pavimentos de la ciudad y la percepción de la ciudadanía. Por lo anterior, el presente estudio propone un marco de gestión de pavimentos flexibles, basado en el ciclo de vida y la evaluación económica – financiera. Se llevó a cabo la aplicación del método AASHTO 93 con el fin de realizar la evaluación del ciclo de vida, determinando las curvas de los pavimentos de tres diferentes tipos de secciones viales. La modelación contempló tres escenarios diferentes (deseado, absoluto y reconstrucción) que sugieren el momento en el que se realiza el mantenimiento. Además, se elaboró la evaluación económica y financiera para cada escenario, determinando la rentabilidad mediante el análisis del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto de inversión para el mantenimiento de las vías. En consecuencia, se propone una expresión que armoniza la gestión de los pavimentos, abordando el número de veces a intervenir la vía, los niveles de PSI requeridos y la propuesta económica más favorable. En conclusión, es más eficiente llevar a cabo mantenimiento en un escenario deseado, en el cual se tenga en cuenta el PSI, y donde los costos de inversión del proyecto sean valorados de acuerdo con la capacidad de financiamiento del inversionista.

Palabras Clave: Gestión de pavimentos, Análisis del ciclo de vida, Mantenimiento y Rehabilitación, Periodo de proyecto, Índice de Condición del Pavimento.

## ABSTRACT

The information obtained from the Bogota's Institute of Urban Development is based on some investment models be founded on the deterioration of flexible pavements, however, it has shown that it's scope and response is insufficient regarding the management of the pavements of the city and the perception of citizens. Therefore, the present study proposes a management framework flexible pavements based on the life cycle and the economic and financial evaluation. The application of AASHTO 93 method in order to perform life cycle assessment was carried out by determining the curves of pavements three different types of road sections. Modeling contemplate three different scenarios (desired, absolute and reconstruction) suggesting the time when maintenance is performed. Moreover, the economic and financial evaluation for each scenario was developed, determining the profitability by analyzing the Net Present Value (NPV) of the investment project for track maintenance. Accordingly, an expression that harmonizes the management of pavements is proposed, addressing the number of times to intervene the way, PSI required levels and more favorable economic proposal. In conclusion, it is more efficient to perform maintenance on a desired scenario, which takes into account the PSI, and where the investment costs of the project are valued in accordance with the financing capacity of the investor.

Keywords: Pavement management, life-cycle assessment, Maintenance and Rehabilitation Project Period, Pavement Condition Index.

## ÍNDICE

IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	11
Responsable .....	11
Director .....	11
Codirector .....	11
Ubicación académica .....	11
Denominación del proyecto.....	12
Palabras Clave.....	12
Tipo de Actividad.....	12
Disciplina.....	12
Campo de acción .....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Descripción de la problemática .....	13
1.2. Justificación.....	13
1.3. Objetivos .....	14
1.3.1. Objetivo General.....	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
1.4. Descripción del proyecto .....	14
1.5. Síntesis .....	15
1.6. Resultados esperados.....	15
2. MARCO DE REFERENCIA .....	17
2.1. Marco conceptual.....	17
2.2. Marco de antecedentes.....	18
2.3. Marco teórico .....	19
2.3.1. Método AASHTO – 1993:.....	19
2.3.2. Evaluación financiera.....	22
2.3.3. Evaluación Económica .....	22
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1. Determinación de las posibles curvas del ciclo de vida del pavimento de la ciudad de Bogotá, según el tipo de secciones viales de la ciudad.....	24

3.2. Realizar una evaluación financiera y económica de las curvas del ciclo de vida	27
3.3. Optimizar la propuesta más adecuada correspondiente a una función objetivo establecido en costos	27
4. RESULTADOS	29
4.1. Curvas del ciclo de vida del pavimento de la ciudad de Bogotá, según el tipo de secciones viales de la ciudad	29
4.1.1. Aplicación del método seleccionado:	29
4.2. Evaluación económica y financiera de las curvas del ciclo de vida	36
4.2.2. Evaluación económica partiendo de un supuesto de financiamiento bajo tasas relativas reales de mercado:	48
4.3. Optimización de la propuesta más adecuada correspondiente a una función objetivo establecido en costos	53
DISCUSIÓN	56
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	63

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Costos por Kilómetro Carril según tipo de intervención de M&R. Fuente: IDU-Bogotá 2016.....	23
<b>Tabla 2:</b> Condiciones iniciales para MVA no troncal, SITP y TRONCAL. ....	29
<b>Tabla 3:</b> Período total en años de MVA no troncal, SITP y TRONCAL.....	30
<b>Tabla 4:</b> Desempeño relativo MVA no troncal, SITP y TRONCAL.....	30
<b>Tabla 5:</b> Valor presente del costo de pavimento para la MVA no troncal en miles.(km/carril) .....	31
<b>Tabla 6:</b> Valor presente del costo de pavimento para SITP en miles. (Km/carril) .	31
<b>Tabla 7:</b> Valor presente del costo de pavimento para TRONCAL en miles. (Km/carril).....	31
<b>Tabla 8:</b> Costo Anual equivalente para la MVA no troncal en miles. (Km/carril) ...	32
<b>Tabla 9:</b> Costo Anual equivalente para SITP en miles. (Km/carril) .....	32
<b>Tabla 10:</b> Costo Anual equivalente para TRONCAL en miles. (Km/carril) .....	32
<b>Tabla 11:</b> Valor de des utilidad para la MVA no troncal en miles. (Km/carril) .....	33
<b>Tabla 12:</b> Valor de des utilidad para SITP en miles. (Km/carril).....	33
<b>Tabla 13:</b> Valor de des utilidad para TRONCAL en miles. (Km/carril) .....	33
<b>Tabla 14:</b> Número de ejes para MVA no troncal, SITP y TRONCAL. ....	33
<b>Tabla 15:</b> Flujo de caja para MVA no troncal (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril).....	39
<b>Tabla 16:</b> Flujo de caja para MVA no troncal (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril).....	40
<b>Tabla 17:</b> Flujo de caja para MVA no troncal (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril) .....	41
<b>Tabla 18:</b> Flujo de caja para SITP (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril) .....	42
<b>Tabla 19:</b> Flujo de caja para SITP (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril) .....	43
<b>Tabla 20:</b> Flujo de caja para SITP (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril).....	44
<b>Tabla 21:</b> Flujo de caja para TRONCAL (Deseado) en miles. (Km/carril).....	45
<b>Tabla 22:</b> Flujo de caja para TRONCAL (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril).....	46
<b>Tabla 23:</b> Flujo de caja para TRONCAL (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril) .....	47
<b>Tabla 24:</b> Análisis económico para MVA no troncal (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril) .....	48
<b>Tabla 25:</b> Análisis económico para MVA no troncal (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril) .....	49



<b>Tabla 26:</b> Análisis económico para MVA no troncal (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril) .....	49
<b>Tabla 27:</b> Análisis económico para SITP (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril).....	50
<b>Tabla 28:</b> Análisis económico para SITP (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril).....	50
<b>Tabla 29:</b> Análisis económico para SITP (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril) .....	51
<b>Tabla 30:</b> Análisis económico para TRONCAL (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril).....	52
<b>Tabla 31:</b> Análisis económico para TRONCAL (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril).....	52
<b>Tabla 32:</b> Análisis económico para TRONCAL (Mantenimiento de reconstrucción en miles. (Km/carril) .....	53

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Metodología. ....	24
<b>Figura 2:</b> Entradas y salidas del método AASHTO 93.....	25
<b>Figura 3:</b> Esquema del ciclo de vida de un pavimento y los momentos de mantenimiento. Fuente: Fernández & Flintsch, 2015.....	26
<b>Figura 4:</b> Niveles de PSI para la MVA no troncal, SITP y TRONCAL.....	35

## IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

### Responsable

Apellidos y Nombres: Núñez Romero Carlos Eduardo  
Título Académico: Ingeniero Industrial  
Nacionalidad: Colombiano  
Documento Argentino: 95.217.406  
Pasaporte: 1026267613  
Domicilio: Calle 10 N° 80 – 41 Apto 1103 Oasis de Castilla (Bogotá, Colombia)  
Teléfono: +57 320 2760513  
Correo electrónico: Car900128@hotmail.com  
CV: Anexo 1 – Curriculum Vitae Responsable

### Director

Apellido y Nombre: Daniel Garro  
Título Académico: Economista y Master en Administración de Empresas  
Documento de Identidad: 16.059.331  
Domicilio Particular: A. Volta 689 Godoy Cruz Mendoza Argentina  
Teléfono: +54-261-577-0763  
Correo electrónico: dagarro@speedy.com.ar  
CV: Anexo 3 – Curriculum Vitae Director

### Codirector

Apellido y Nombre: Wilmar Darío Fernández Gómez  
Título Académico: PhD  
Documento de Identidad: 79´494.815  
Domicilio Particular: Cr 9 N° 71 – 17, Interior 1. Bogotá, Colombia.  
Teléfono: + 57 3112427428  
Correo electrónico: wdfing@yahoo.com  
CV: Anexo 2 – Curriculum Vitae Codirector

### Ubicación académica

Unidad Académica: Universidad Tecnológica Nacional FRM  
Unidad Ejecutora: Departamento de Posgrado  
Teléfono / Fax: +54 0261 5244534 /89  
Correo Electrónico: posgrado@frm.utn.edu.ar

### **Denominación del proyecto**

Análisis económico financiero de la gestión de pavimentos de la ciudad de Bogotá D.C, Colombia.

### **Palabras Clave**

Costos, gestión, pavimentos, LCA (Life Cycle Assessment).

### **Tipo de Actividad**

Ingeniería, pavimentos y análisis económico financiero.

### **Disciplina**

Administración y Gestión.

### **Campo de acción**

Gestión Administrativa.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción de la problemática

La percepción del estado de la malla vial para la ciudad de Bogotá D.C por parte de la ciudadanía se considera deficiente (Avellaneda, 2006), la cobertura de vías pavimentadas en la ciudad es de 92%; sin embargo un 50% de las personas considera que las vías de acceso a sus barrios está en mal estado y un 72% del porcentaje de personas bajo la línea de pobreza considera que los pavimentos de sus barrios están en muy mal estado. Además, la percepción de los tiempos de movilización por parte de la ciudadanía son muy altos, los tiempos promedio de transporte son mayores para los estratos de ingresos más bajos (61,3 minutos para el estrato 1 y 46,6 minutos para el estrato 2).

La deficiente gestión de la malla vial capitalina hace que la percepción de la ciudadanía y su descontento de cómo se maneja este tema sea muy negativa, Prada Bernal (2008) asegura que el distrito capital ha comprado maquinaria para procesar dos mil toneladas diarias de asfalto, pero no tiene capacidad de gestión para ponerla en funcionamiento, mientras que las vías de la ciudad son casi intransitables, por falta de pavimentos en un estado aceptable para su utilización.

Si bien el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) en una búsqueda de un adecuado sistema de gestión para Bogotá D.C ha desarrollado una serie de investigaciones y ha recibido el apoyo por parte de entidades internacionales como el Banco Mundial (Ríos & Martínez, 2009) desde la perspectiva ciudadana no realiza una buena gestión de los pavimentos capitalinos, (Villamizar Mansilla & Balen Valenzuela, 2005) es mejor realizar mantenimiento periódico y rutinario al corredor que dejar que se deteriore y realizar la reconstrucción al finalizar su vida útil.

### 1.2. Justificación

La problemática de Bogotá D.C respecto a la gestión de los pavimentos, se fundamenta en la baja capacidad de reacción en el mantenimiento de las vías con respecto a la consecución de los datos obtenidos, razón por lo cual, cuando se dispone de estos datos no son lo suficientemente veraces teniendo en cuenta el tiempo transcurrido y los posibles cambios sufridos entorno a la evaluación de las vías; así mismo, se evidencia la escasa demostración de un método para la toma de decisiones de cara a la construcción de presupuestos y selección de tramos de intervención; por tal motivo es necesario el análisis financiero y económico de la gestión de pavimentos de la ciudad.

Para modelar el ciclo de vida de pavimentos se establecen modelos que conjugan elementos como el deterioro y uso; además, se tienen en cuenta factores como el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), costos (de mantenimiento y reconstrucción), entre otros; actualmente uno de los métodos mayormente aplicados para observar de manera fácil y efectiva las curvas de ciclo de vida de pavimentos (Abaza, 2002) es el desarrollado por la Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 93, por sus siglas en inglés), método que se aplicará en el presente estudio.

De acuerdo a lo anterior, el presente estudio se basa en el análisis de las curvas del ciclo de vida de los pavimentos de la ciudad de Bogotá D.C., de conformidad a las secciones viales definidas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU); usa indicadores como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el beneficio económico, y relaciona estos análisis con el concepto de UCL (pavement life-cycle disutility), con el fin de establecer un posible marco de gestión para los pavimentos flexibles en la ciudad objeto de estudio.

### 1.3. Objetivos

Considerando la necesidad de proponer un método para gestionar los pavimentos flexibles abordando las diferentes variables que se presentan, se establece el objetivo general y los objetivos específicos con el fin de proponer una solución a la situación problema:

#### 1.3.1. Objetivo General

- Proponer un marco de gestión de pavimentos flexibles para la ciudad de Bogotá, basado en el ciclo de vida y la evaluación económica y financiera.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las posibles curvas de ciclo de vida del pavimento de la ciudad de Bogotá, según el tipo de secciones viales de la ciudad.
- Realizar una evaluación económica y financiera de las curvas de ciclo de vida determinadas.
- Optimizar la propuesta más adecuada correspondiente a una función objetivo establecido en costos.

### 1.4. Descripción del proyecto

En el presente trabajo las secciones viales a trabajar son Malla Vial Arterial (MVA) No troncal entendiéndose esta como la red de vías de mayor jerarquía, que actúa como soporte de la movilidad y la accesibilidad urbana y regional y de conexión con el resto del país (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2012), excluyendo las vías

en las cuales se evidencia la existencia de infraestructura para el funcionamiento constante de los buses (articulados, biarticulados e híbridos) del sistema de transporte masivo de Bogotá: TransMilenio; además las vías denominadas SITP (Sistema Integrado de Transporte Público) son aquellas en las cuales se moviliza el mencionado tipo de transporte público; por ultimo Troncal que son todas aquellas vías en las cuales no se moviliza el transporte masivo de la ciudad de Bogotá D.C. (TransMilenio) ni el SITP (Sistema Integrado de Transporte Urbano).

### 1.5. Síntesis

El presente estudio se ha desarrollado de acuerdo a un orden lógico que permitió llevar a cabo la propuesta de gestión de pavimentos flexibles, en respuesta a la problemática planteada inicialmente. Por lo anterior, en el capítulo 2 se evidencian algunos estudios previos de modelación de las intervenciones de mantenimiento a partir de diferentes curvas de ciclo de vida, tomando como base conceptos como gestión, pavimentos y ciclo de vida, sumado a la comprensión del método AASHTO 93 e incorporando consideraciones como la evaluación financiera y económica.

Así mismo, en el capítulo 3 se presenta la metodología en la cual se establecen una serie de actividades en cumplimiento de los objetivos específicos, los cuales determinan la ejecución del objetivo general, por el cual se constituye el presente estudio. Dentro de esta metodología, se describen cada una de las acciones realizadas para cada etapa de la investigación, se determina como se llevará a cabo la apropiación del método AASHTO 93 para el caso de los pavimentos de la ciudad de Bogotá y como se evaluará económica y financieramente la gestión de los pavimentos para el caso en mención, lo anterior, para finalmente definir como se constituirá la propuesta más óptima en respuesta a la problemática identificada.

En consecuencia, el capítulo 4 muestra cuales son los resultados obtenidos tras implementar y ejecutar las acciones propuestas en la metodología, generando una discusión tras la evaluación y análisis de los mismos, para luego generar unas conclusiones y recomendaciones fortaleciendo la propuesta oficiada bajo este documento.

### 1.6. Resultados esperados

Proponer un marco de gestión de pavimentos flexibles para la ciudad de Bogotá, basado en el número de intervenciones óptimas en un periodo de ciclo de vida según el tipo de secciones viales; así como realizar una evaluación económico-financiera de las mencionadas curvas de ciclo de vida, analizando sus ventajas y desventajas, para así establecer una propuesta adecuada correspondiente a una función objetivo establecida en costos.

Los directos beneficiarios de este proyecto son todas aquellas personas las cuales estén relacionadas directamente o indirectamente con el estado de dichas vías, sea por que vivan cerca de ellas o por uso de las mismas, mejorando la calidad de vida de las mismas en la reducción de tiempo para trasladarse en el día a día.

Sin embargo el público objetivo de este proyecto son los administradores viales de Bogotá (Instituto de desarrollo urbano) en especial la unidad de mantenimiento vial de dicho ente, ya que daría serviría de apoyo como herramienta para la gestión de pavimentos, además este modelo se podría replicar en otras ciudades o municipios en todas las oficinas de planeación a nivel nacional.



## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. Marco conceptual

En la actualidad es de suma importancia desarrollar proyectos con recursos escasos, satisfaciendo necesidades y parámetros de la sociedad; para poder realizar las tareas descritas debe ocuparse de la administración, organización y funcionamiento de una empresa, actividad económica u organismo (RAE, 2016), esto se conoce como gestionar; por tanto la gestión de pavimentos, son todas aquellas labores que deben efectuarse para poder cumplir con las especificaciones técnicas del pavimento a realizar y cumpliendo con los requerimientos de la sociedad o ciudadanía, entendiéndose como pavimento la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendida entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento (Rico Rodríguez, 2005).

Por otro lado, el ciclo de vida de un producto (CVP) se puede definir como la herramienta comercial que intenta identificar la evolución de su volumen de los beneficios que genera, concepto que se puede aplicar a un producto genérico y según Kotler (1992) se establecen cuatro hipótesis para poder afirmar que un producto tiene un ciclo de vida:

- Los productos tienen vida limitada.
- Las ventas de un producto pasan por diferentes etapas.
- Los beneficios aumentan y disminuyen en las diferentes etapas del ciclo de vida del producto.
- Los productos exigen diferentes estrategias en cada fase o etapa.

Teniendo en cuenta esta afirmación, los pavimentos definidos como la reunión de capas de materiales debidamente gradadas, mezcladas y compactadas, de modo que en conjunto den por resultado una superficie tersa (Pontificia Universidad Javeriana, 1964), tienen un ciclo de vida que debe ser estudiado y valorado con el fin de definir los momentos de intervención adecuados evitando el deterioro absoluto de la vía.

Gestionar parte del principio del conocimiento de lo que se va a abordar, su comportamiento, las variables que en ello participan, además de entender su ciclo de vida que es el conjunto de etapas que recorre una determinada entidad desde que inicia su existencia hasta que la termina y es aplicable a realidades muy diversas como personas, edificios, empresas u organizaciones (Romeva, 2002).

## 2.2. Marco de antecedentes

Khaleed A. Abaza (2002) realizó un estudio sobre optimización de modelo de ciclo de vida de pavimentos en el cual usa el modelo conocido como (AASHTO 1993), después de aplicar dicho modelo encontró que para un pavimento con un diseño inicial de vida útil de 40 años lo mejor sería realizar 4 intervenciones de mantenimiento, evitando así que el nivel de PSI baje a menos de tres (3), además de esto concluyó que si se realizan mantenimientos periódicos y preventivos es mucho más eficiente que hacer reparaciones en la vía. De otro lado, Mansilla (2005), plasmó un estudio y evaluación financiera de las acciones de mantenimiento desarrolladas en los principales corredores viales en pavimento flexible de Bogotá D.C incluidos en el programa distrital de mantenimiento; concluyeron que aproximadamente es 32% más económico realizar mantenimiento periódico y rutinario al corredor que dejar que este se deteriore y realizar la reconstrucción al finalizar su vida útil. Esta deducción se realiza sin tomar en cuenta los costos del parque automotor y el beneficio social que implica mantener las vías en un buen estado, además en las recomendaciones aclaran que el tema de mantenimientos en los corredores de Bogotá se empezó a aplicar a partir del año 2003, lo que indica que se encuentra en un proceso de retroalimentación para mejorar posibles errores, deficiencias y limitaciones.

Martínez (2009) concluyó que debido al alto desarrollo urbanístico y automotor que se ha venido presentando en las principales ciudades del mundo y de Colombia, que ha sometido a los pavimentos a mayores esfuerzos y deformaciones, existe la necesidad de evaluar dichos pavimentos para garantizar su óptimo funcionamiento, igualmente afirma que aunque el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) prácticamente ha implementado un sistema de gestión vial en la ciudad basado en la metodología internacional Highway Development & Management (HDM IV), se evidencia que aún no hacen nada por mantener y preservar en óptimas condiciones las mallas viales, pues a la fecha no se ha realizado ningún tipo de procedimiento como: mantenimientos periódicos o rutinarios que eviten daños prematuros y desencadenen grandes deterioros sobre estos pavimentos ocasionando el daño total de la estructura, que genere sobrecostos en intervenciones futuras además de la disminución de la calidad de vida de los habitantes.

Arias (2001) aseveró que la implementación de este tipo de sistemas de gestión de pavimentos no se deben quedar en el papel, es importante que se desarrolle un seguimiento exhaustivo a la aplicación de este tipo de herramientas tan importantes, además que las estrategias de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras del pavimento son de vital importancia a lo largo de su vida útil ya que se van deteriorando con el tiempo y con el aumento gradual del tránsito. El objeto de la administración de pavimentos es la preservación de la inversión inicial mediante la

aplicación de tratamientos adecuados de mantenimiento y rehabilitación para prolongar la existencia del mismo.

Basados en las investigaciones presentadas, se puede considerar factible la relación directa entre mantenimiento periódico y preventivo respecto a la calidad de la vía como una opción más económica, que la reconstrucción del pavimento tal como se plantea en este estudio.

### 2.3. Marco teórico

#### 2.3.1. Método AASHTO – 1993:

El modelo de la AASHTO, así como sus posteriores correcciones, se sustentan fundamentalmente en los datos recogidos de una prueba experimental (prueba AASHTO) desarrollada entre los años 1958 y 1960, en Illinois, Estados Unidos, y cuya duración fue de aproximadamente dos años.

El comportamiento de los pavimentos fue medido con el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), cuya escala varía entre 0 y 5. A un pavimento nuevo se le asigna un valor entre 4 y 5 (según su calidad constructiva), a medida que se deteriora va disminuyendo hasta llegar a valores en que se requiere una rehabilitación, que en el caso de carreteras de alta velocidad varía entre 2 y 3, y en caminos de bajo tránsito 2 o menos. En relación a este índice cabe destacar que se trata de una calificación subjetiva (asignada por el usuario), asociada con el confort y la calidad del desplazamiento que percibe el usuario al transitar sobre un determinado pavimento.

Las características climáticas de la zona de la prueba AASHTO, Illinois, presentan condiciones de alta pluviometría, con precipitaciones medidas anuales de 860 milímetros; profundidades de helada relativamente altas (630 milímetros), y con un promedio de 12 ciclos de heladas por año. De acuerdo a estos antecedentes, las condiciones ambientales se pueden definir como muy rigurosas, de alta humedad y fuertes heladas.

Al finalizar el periodo de prueba de dos años, el equipo de investigación se abocó a la tarea de desarrollar ecuaciones a partir de los datos recogidos en terreno, cuya expresión original tuvo la siguiente forma:

$$W = f(D, L1, L2P1, P2) \quad (1)$$

Dónde: **W** es el número de ejes de carga que pasan por la pista, **D** el espesor del paquete estructural, **L1** la carga por eje, **L2** el tipo de eje (simple o tándem), **P1** el índice de serviciabilidad pavimento nuevo y **P2** el índice de serviciabilidad de rehabilitación.

Cabe resaltar que “la ecuación planteada originalmente omitió una serie de factores que indudablemente influyen en el diseño, de tal forma que para poder ser aplicada fuera de Illinois, se le agregaron empíricamente otros factores a la ecuación, basados en el criterio de unos pocos ingenieros.

Posteriormente, en los años 1972 y 1981, se publicaron versiones revisadas de la ecuación original, con carácter provisional (Interim Guide), que también incorporaron modificaciones. En el año 1986 nuevamente se agregaron otros parámetros, los cuales, también fueron agregados de forma cualitativa. (Darter, 1991)

Por lo anterior, el método AASHTO – 93 que consiste en diseñar las uniones por fatiga y ejecutar una verificación por resistencia última (Harmsen, 2005), propone una serie de expresiones, las cuales se muestran a continuación:

- Calcular el tiempo incremental: Se postula un periodo fijo total en años, se estipulan diferentes periodos ( $m$ ) y se aplica la siguiente formula:

$$T_j = \frac{T_{m+1}}{1+m}, \quad (2)$$

$$T_j = j * \Delta T_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.1)$$

Dónde: **T(m+1)** es el periodo total en años, **m** el periodos, **Tj** el resultado de tiempo incremental y **1** es constante.

Lo anterior, genera como resultado el tiempo incremental, el cual determina cada cuanto se debe hacer la intervención ( $m$ ).

- Desempeño relativo: Este valor sumado al costo de vida tiene un peso de consideración al momento de elegirse el número de periodos a intervenir, además permite establecer el Área bajo la curva.

$$RP_{LC} = \frac{A_{LC}}{(P_o - P_f)T_{m+1}} \quad (3)$$

Dónde: **ALC** es el área bajo la curva, **Po** es el índice de pavimento inicial, **Pf** es el índice de quiebre, **T(m+1)** es el periodo total en años y **RPLC** el desempeño relativo.

- Costo óptimo del ciclo de vida del pavimento: El resultado de esta ecuación no permite concluir el número de periodos a intervenir, sin embargo es fundamental para realizar el cálculo del valor de des utilidad de la vía.

$$P_{LC} = C_c + M_c * f(P/A, r, T_{m+1}) + \sum_{j=1}^m R_j * f(P/F, r, T_j) \quad (4)$$

$$f(P/A, r, T_{m+1}) = \left[ \frac{(1+r)^{T_{m+1}-1}}{r(1+r)^{T_{m+1}}} \right] \quad (4.1)$$

$$f(P/F, r, T_j) = \frac{1}{(1+r)^{T_j}} \quad (4.2)$$

Dónde: **Cc** es el costo inicial de construcción, **Mc** es el costo anual de mantenimiento, **(1+r)** es el interés, **T(m+1)** es el periodo total en años, **Tj** es el resultado de tiempo incremental, **Rj** es el costo futuro de rehabilitación y **PLC** es el costo óptimo de vida del pavimento.

- Costo anual equivalente: El resultado generado por la aplicación de esta ecuación relacionado con el costo óptimo de vida del pavimento arrojarán como resultado los fundamentos y las bases para calcular el valor de des utilidad.

$$EA_{LC} = P_{LC} * f(A/P, r, T_{m+1}) \quad (5)$$

$$f\left(\frac{A}{P}, r, T_{m+1}\right) = \left[ \frac{r(1+r)^{T_{m+1}}}{(1+r)^{T_{m+1}-1}} \right] \quad (5.1)$$

Dónde: **PLC** es el valor presente del costo de pavimento, **(1+r)** es el interés, **T(m+1)** el periodo total en años y **EALC** el costo anual equivalente en m<sup>2</sup>.

- Valor de des utilidad: Este valor define directamente la cantidad de periodos a intervenir el pavimento, téngase en cuenta que se elige el número que más se aproxime a cero (0).

$$U_{LC} = \frac{EA_{LC}}{(A_{LC}/T_{m+1})} \quad (6)$$

Dónde: **EALC** es el costo anual equivalente m<sup>2</sup>, **ALC** es el área bajo la curva, **T(m+1)** es el periodo total en años y **ULC** es el valor de des utilidad.

- Número de ejes: Permite determinar la cantidad de veces que un eje puede pasar la sección vial sin generar deterioros incompatibles con el uso.

$$\log W_{80} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.27 \quad (7)$$

Dónde: **SN** es el total requerido de grosor de pavimento, **MR** los módulos Resilientes, **ZR** es la desviación estándar normal y **So** es la combinación de las predicciones del error estándar del tráfico y la predicción de mantenimiento.

### 2.3.2. Evaluación financiera

#### 2.3.2.1. El Valor Actual Neto (VAN)

Para determinar la rentabilidad de un proyecto de inversión mediante este indicador, es necesaria la determinación de una tasa de descuento (TD), con la cual serán actualizados los diferentes flujos de efectivo involucrados (inversiones y beneficios).

#### 2.3.2.2. Fórmula del Valor Actual Neto (VAN)

El valor Actual Neto (VAN) de un proyecto de inversión está dado por la diferencia del Valor Actual de los Beneficios (VAB) y el Valor Actual de la inversión o Principal (VAP), es decir,  $VAN = VAB - VAP$  o bien mediante la siguiente expresión algebraica:

$$VAN = \frac{B_j}{(1+i)^n} \quad (8)$$

Dónde: **B<sub>j</sub>** son los beneficios obtenidos en el periodo **j**, **i** es la tasa de descuento o actualización y **n** es el número de periodos.

Dado que la expresión anterior genera tres posibles resultados para el Valor Actual Neto (positivo, cero y negativo), los criterios que guían las decisiones de aceptación o rechazo de proyectos son las siguientes:

- Si el VAN es cero o positivo, el proyecto debe aceptarse
- Si el VAN es negativo, el proyecto debe rechazarse
- Prioridad de los proyectos seleccionados (Cervantes, 2002)

### 2.3.3. Evaluación Económica

La tarea de evaluar consiste en comparar los beneficios y los costos del proyecto, con miras a determinar si el cociente que expresa la relación y los costos del proyecto, con miras a determinar si el cociente que expresa la relación entre unos y otros presenta o no ventajas mayores que las que se obtendrían con proyectos distintos, igualmente viables.

Enfocado aun desde un tercer ángulo la evaluación de juicio sobre proyectos, se trata de determinar si el aporte del proyecto a los objetivos del desarrollo económico y social justifica su realización, teniendo en cuenta los usos alternativos que pueden tener los mismos recursos.

En suma, se podría decir que en la evaluación económica se aplican ciertos criterios prestablecidos al análisis de los resultados netos del proyecto para decidir si es viable, conveniente y oportuno realizarlo. (Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), 1973)

### 3. METODOLOGÍA

Los datos analizados corresponden a información secundaria obtenida de los archivos del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá D.C. Dicho análisis corresponde a un período comprendido entre los meses de enero a junio de 2015; los registros obtenidos son: mantenimiento absoluto, mantenimiento deseado y reconstrucción para malla vial arterial no troncal, malla vial troncal y rutas SITP (Tabla 1) para las vías de tipo: Malla Vial Arterial No Troncal, Malla Vial Arterial Troncal y Rutas SITP; estos datos comprenden actividades como: levantamiento de asfalto, transporte de materiales a sitio, mezcla y fundición en sitio y transporte y disposición final de residuos con un gestor autorizado por la autoridad ambiental.

**Tabla 1:** Costos por Kilómetro Carril según tipo de intervención de M&R. Fuente: IDU-Bogotá 2016.

PROGRAMA	MANT. Absoluto	MANT. Deseado	Reconstrucción
MVA No Troncal	\$ 516.128.000	\$ 44.320.000	\$ 1.241.996.800
MVA Troncal	\$ 914.284.800	\$ 55.990.400	\$ 2.041.600.000
Rutas SITP	\$ 604.417.056	\$ 37.014.400	\$ 1.412.329.600

La Tabla 1 muestra los costos por kilómetro carril según el tipo de intervención a desarrollar; cabe resaltar que aunque la información entregada por el IDU no corresponde a la clasificación establecida por la misma entidad, esto no afecta el objetivo del proyecto, simplemente permite un análisis global de dichas secciones viales. Por consiguiente, el análisis que se plantea en el presente trabajo consiste en comparar estos datos con el fin de establecer una óptima intervención para la ciudad, mediante la relación de costos en la aplicación del método AASHTO y el análisis económico y financiero.

En consecuencia, la Figura 1 muestra la metodología aplicada con el fin de establecer un desarrollo lógico de las actividades, las cuales se derivaron de cada uno de los objetivos específicos.

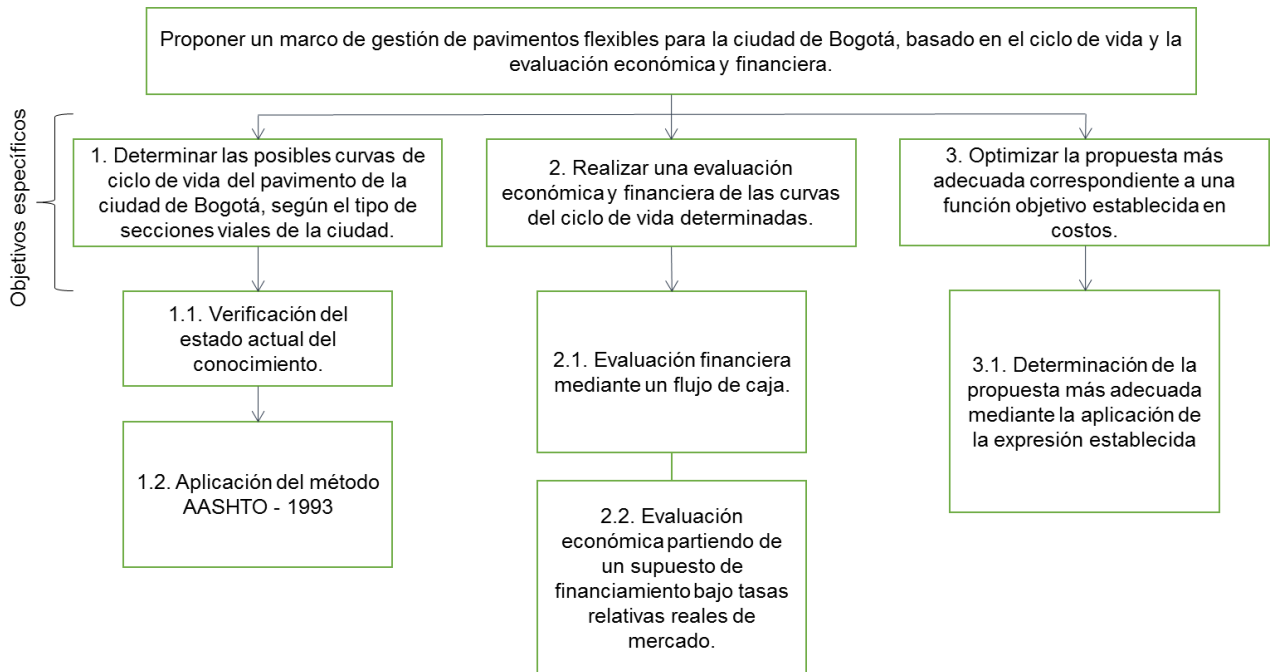


Figura 1: Metodología.

### 3.1. Determinación de las posibles curvas del ciclo de vida del pavimento de la ciudad de Bogotá, según el tipo de secciones viales de la ciudad

**3.1.1. Verificación del estado actual de conocimiento:** Se consultaron bases de datos que contenían artículos relacionados con la generación de curvas de vida de pavimentos flexibles, lo que permitió conocer varias metodologías para el análisis del ciclo de vida de los mismos; sin embargo era imprescindible para la investigación elegir un método adaptable a las condiciones de la ciudad de Bogotá, para lo cual se generaron unos cuestionamientos que conllevaron a la determinación de parámetros para calificar la totalidad de los métodos y distinguir el más ajustado a la necesidad del proyecto (ver numeral 1.2.). Dentro de las bases de datos consultadas se encuentran: American Society of Civil Engineers (ASCE), Science Direct, Transportation Research Board (TRB) y Scientific Research Library on line (SciELO). Generalmente para hacer comparable el comportamiento de económico y ambiental de proyectos de infraestructura se hace uso del concepto del análisis del ciclo de vida.

**3.1.2. Aplicación del método AASHTO – 1993:** Después de consultar las diferentes propuestas y métodos (métodos empíricos de diseño, modelos INVIAS 98, métodos empírico – mecánicos de diseño, método SHELL 98, método AASHTO 93) para estimar el ciclo de vida de pavimentos flexibles, se eligió el método AASTHO de 1993 que cumple con las características de conocimiento general en el medio de la ingeniería de pavimentos, es de fácil por su uso general y extensa aplicación y además incluye el concepto de percepción de serviciabilidad

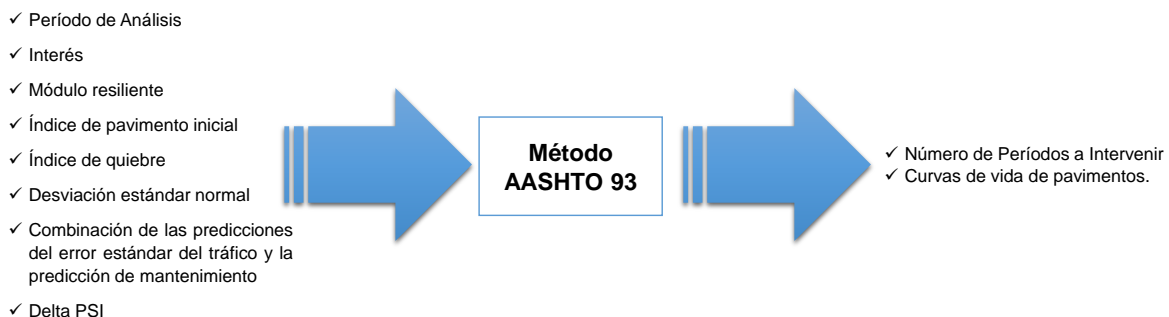


en el diseño de pavimentos como una medida de su capacidad para brindar una superficie lisa y suave al usuario. (Silva, 2013).

El método AASTHO 1993 está basado en los resultados del ensayo vial AASHTO desarrollado en Illinois a finales de los 50's y ha sido actualizado permanentemente, obteniendo como resultado la versión más reciente publicada en 2013 (no aplicable para países como Colombia). La versión de 1993 es la más difundida y sencilla de aplicar (Jugo, 2010) y es un método ampliamente utilizado en Colombia y en la mayoría de países de Latinoamérica y en efecto, el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá admite diseños de pavimentos bajo esta metodología (IDU, 2002), razón por la cual se adoptó para la presente investigación.

Además, se establece que “Las ecuaciones de diseño del Método AASHTO fueron desarrolladas considerando el efecto que sobre el comportamiento tienen tanto la solución estructural (incluyendo espesores de capas y calidad de los materiales y mezclas con que esas capas son construidas), y las cargas actuantes (tomando en cuenta magnitud, configuración y frecuencia)” (Corredor, 2010).

Para desarrollar el método en mención se hace necesaria la aplicación de una serie de ecuaciones que permiten hallar valores como: el cálculo del tiempo incremental, desempeño relativo, costo óptimo del ciclo de vida del pavimento, costo anual equivalente y el número de ejes; información primaria suministrada por el IDU de la ciudad de Bogotá D.C. respecto a los segmentos viales denominados como Malla Vial no Troncal, Troncal y SITP (Sistema Integrado de Transporte Público). De acuerdo con la verificación del estado actual del conocimiento y lo establecido a nivel mundial en cuanto a la aplicación del método AASHTO 93, se procede a desarrollar la metodología adaptada para la ciudad de Bogotá con el fin de establecer el número de periodos a intervenir la(s) vía(s) técnicamente. La Figura 2 muestra en el primer bloque de entrada las variables que alimentan el funcionamiento del método seleccionado, para luego generar unas salidas como resultados.

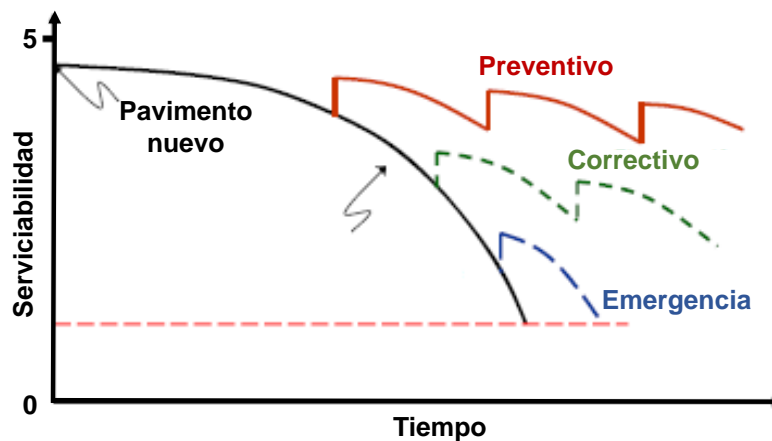


**Figura 2:** Entradas y salidas del método AASHTO 93

Las variables a considerar son el período de análisis o la duración del ciclo de vida, generalmente en Colombia son 20 años, dentro de los cuales se incluyen momentos de intervención bien sea preventiva, correctiva o de emergencia (Figura 3). Tarifa de Interés Anual que en este caso es del 3% y que corresponde al promedio del incremento del IPC para el período de enero a junio de 2015. Desde el punto de vista estructural del pavimento, es necesario establecer los módulos de elasticidad promedio de la capas de pavimento, esos valores oscilan entre 3000 y 6000 MPa para materiales asfálticos (20°C), entre 300 y 500 MPa para materiales granulares no tratados y entre 50 y 150 MPa para suelos naturales.

Con respecto a la percepción del servicio o índice de serviciabilidad del pavimento, se considera que para un pavimento nuevo oscila entre 4.5 y 4.2 dependiendo de la calidad de la construcción, para este caso se adoptó un valor de 4.5. Así mismo, considera condiciones de variabilidad como la desviación estándar normal con un valor de 95% de confianza, aplicada a variables del diseño del pavimento como el tráfico, los materiales y la predicción de mantenimiento.

Finalmente, el delta PSI que corresponde a la diferencia entre la percepción inicial y final del pavimento según el usuario. Delta PSI para este proyecto es 3.0, dicho valor significa que durante el ciclo de vida del pavimento antes de una actividad de mantenimiento y rehabilitación, el pavimento reduce su serviciabilidad a un punto en donde es económicamente más barato acometer trabajos de rehabilitación, si el valor se incrementa, es decir se retarda la intervención, el costo de mantenimiento puede aumentarse de manera exponencial.



**Figura 3:** Esquema del ciclo de vida de un pavimento y los momentos de mantenimiento. Fuente: Fernández & Flintsch, 2015.

Por otro lado, los resultados obtenidos son el número de períodos a intervenir la vía y las curvas de vida de pavimentos, definidas como la representación gráfica que relaciona el nivel de PSI respecto al tiempo.

### 3.2. Realizar una evaluación financiera y económica de las curvas del ciclo de vida

**3.2.1. Evaluación financiera mediante un flujo de caja:** A partir del Valor Presente Neto (VPN) definido como el valor presente de los ingresos actuales menos el valor presente de los costos actuales y futuros (Andújar, 2006), las variables que influyen en el VPN son: Ingresos, préstamo, costos y gastos producción, depreciación, intereses, flujo de caja antes de Impuestos, impuestos (35%, porcentaje establecido por ley), flujo de caja después de impuestos, depreciación, amortización, inversión inicial, valor salvamento; sin embargo para efectos de este análisis se consideró únicamente el valor de los costos y gastos de producción actuales y futuros (como información de entrada), estableciendo los egresos necesarios, los cuales deben ser cubiertos por la entidad para el mantenimiento de cada una de las secciones viales para el año 2015 tomando como unidad de medida el metro cuadrado, determinando el flujo de salidas antes y después de impuestos y el flujo de caja neto de acuerdo al tiempo incremental para un año seleccionado.

Lo anterior con el propósito de definir los diferentes periodos de intervención de la vía (m), suponiendo la cantidad de dinero necesaria en el presente para llevar a cabo las obras a futuro, de manera tal, que desde el punto de vista financiero se establezca cuáles y cuantos periodos son los menos costosos.

**3.2.2. Evaluación económica partiendo de un supuesto de financiamiento bajo tasas relativas reales de mercado:** Con base en los costos otorgados por la entidad competente, se estableció un plan de inversión determinando un costo por uso de capital, definido como el valor correspondiente al rendimiento generado por intereses relativos de mercado en un periodo establecido.

### 3.3. Optimizar la propuesta más adecuada correspondiente a una función objetivo establecido en costos

**3.3.1. Determinación de la propuesta más adecuada mediante la aplicación de la expresión establecida:** Se realizó un promedio ponderado entre el número de veces a intervenir la vía (valor determinado bajo el método AASHTO 93 según el ciclo de vida de los pavimentos), y la evaluación financiera, con el fin de establecer un punto medio entre costo y PSI admisible; lo cual optimiza esta propuesta dado que da satisfacción tanto a los costos como al PSI. La ecuación aplicada es la siguiente:

$$Z_{max} = \left[ \frac{M_{AASHTO} + M_{FCAJA}}{2} \right] \quad (9)$$

Dónde: **Zmax** es Máximo beneficio (costo/percepción ciudadanía), **MAASHTO** es el número de períodos a intervenir según el método AASHTO 93 y **MFCAJA** es el número de períodos a intervenir según el flujo de caja.

Con las siguientes restricciones:

$$M_{AASHTO} > 0;$$

$$M_{FCAJA} > 0;$$

$$Z_{max} > 0$$

## 4. RESULTADOS

De acuerdo a la metodología, se presentan los resultados del presente proyecto, junto con su respectivo análisis teniendo en cuenta todos los aspectos técnicos y conceptuales. El desarrollo del mencionado se ejecutó en tres fases descritas a continuación.

### 4.1. Curvas del ciclo de vida del pavimento de la ciudad de Bogotá, según el tipo de secciones viales de la ciudad

**4.1.1. Aplicación del método seleccionado:** El cálculo de la curva de ciclo de vida de pavimentos se llevó a cabo para tres (3) tipos de vía existentes en la ciudad de Bogotá D.C. de acuerdo a los datos proporcionados por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), conforme a la organización establecida por el mismo ente regulador determinando el ciclo de vida de pavimento y haciendo un análisis de costos para un período de 40 años para la MVA no troncal, SITP y Troncal.

En la Tabla 2 se aprecian las condiciones iniciales para determinar la curva de ciclo de vida de pavimentos para los tres tipos de sección vial objeto de estudio; así mismo, se desarrolló el método AASHTO 93 de acuerdo a lo establecido en la metodología, desde el cálculo del tiempo incremental hasta el número de ejes para esta sección vial.

**Tabla 2:** Condiciones iniciales para MVA no troncal, SITP y TRONCAL.

ATRIBUTO		VALOR
Periodo de Análisis	T(m+1)	40,00
Interés	r	0,05
Número de ejes	Wt	1000000,00
Módulos de elasticidad	Mr	1500,00
Índice de pavimento inicial	Po	4,50
Índice de quiebre	Pf	1,50
Desviación estándar normal	ZR	-1,65
Combinación de las predicciones del error estándar del tráfico y la predicción de mantenimiento	So	0,35
Delta PSI	*PSI	3,00
Delta P	*P	0,00

Cálculo del tiempo incremental estableciendo un período fijo total en años estimando diferentes periodos (m) mediante las ecuaciones 2 y 2.1.

**Tabla 3:** Período total en años de MVA no troncal, SITP y TRONCAL.

Período total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Períodos	m	1	2	3	4	5	6
Resultado de tiempo incremental	*Tj	20,00	13,33	10,00	8,00	6,67	5,71
Constante	1						

De acuerdo con la Tabla 3, el resultado de tiempo incremental (en años), varía de forma inversa respecto al número de periodos; por tanto para un periodo de intervención ( $m = 1$ ) el resultado de tiempo incremental es 20,00 años, para un periodo de intervención ( $m = 2$ ) el resultado de tiempo incremental es de 13,33 años, para un periodo de intervención ( $m = 3$ ) el resultado de tiempo incremental es de 10 años, para un periodo de intervención ( $m = 4$ ) el resultado de tiempo incremental es de 8 años, para un periodo de intervención ( $m = 5$ ) el resultado de tiempo incremental es de 6,67 y para un periodo de intervención ( $m = 6$ ) el resultado de tiempo incremental es de 5,71 años.

Se lleva a cabo el cálculo del desempeño relativo aplicando la ecuación 3, valor teórico e hipotético que indica un parámetro de comportamiento para el pavimento respecto al número de periodos a intervenir, tal como se evidencia en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Desempeño relativo MVA no troncal, SITP y TRONCAL.

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Área bajo la curva	ALC	66,20	82,71	89,71	90,67	87,79	85,14
Índice de pavimento inicial	Po	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Índice de quiebre	Pf	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Periodo total en años	T(m+1)	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Desempeño relativo	RPLC	0,5517	0,6893	0,7476	0,7556	0,7316	0,7095

Se determina el valor presente del costo del pavimento, para lo cual se toma el costo inicial de construcción relacionando el periodo total (en años) y el interés. El resultado de aplicar las ecuaciones 4, 4.1 y 4.2 no permite concluir el número de periodos a intervenir, sin embargo es fundamental para realizar el cálculo del valor de des utilidad de la vía. En la tabla 5, tabla 6 y tabla 7 se observa dicho valor presente del costo del pavimento según sea el tipo de sección vial, dicho valor varía dependiendo del costo anual de mantenimiento.

**Tabla 5:** Valor presente del costo de pavimento para la MVA no troncal en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Costo inicial de construcción	Cc	\$ 369.333	\$ 369.333	\$ 369.333	\$ 369.333	\$ 369.333	\$ 369.333
Costo anual de mantenimiento	Mc	\$ 44.320	\$ 37.672	\$ 29.546	\$ 23.046	\$ 18.023	\$ 14.773
Interés	(1+r)	1	1	1	1	1	1
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Resultado de tiempo incremental	*Tj	20	13	10	8	7	6
Costo futuro de rehabilitación	Rj	\$ 369.333	\$ 465.302	\$ 543.019	\$ 609.359	\$ 680.622	\$ 741.330
Valor presente del costo de pavimento	PLC	\$ 1.269.021	\$ 1.258.529	\$ 1.209.693	\$ 1.177.226	\$ 1.170.236	\$ 1.183.788

**Tabla 6:** Valor presente del costo de pavimento para SITP en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Costo inicial de construcción	Cc	\$ 308.453	\$ 308.453	\$ 308.453	\$ 308.453	\$ 308.453	\$ 308.453
Costo anual de mantenimiento	Mc	\$ 37.014	\$ 31.462	\$ 24.676	\$ 19.247	\$ 15.052	\$ 12.338
Interés	(1+r)	1	1	1	1	1	1
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Resultado de tiempo incremental	*Tj	20	13	10	8	7	6
Costo futuro de rehabilitación	Rj	\$ 308.453	\$ 388.603	\$ 453.509	\$ 508.914	\$ 568.430	\$ 619.131
Valor presente del costo de pavimento	PLC	\$ 1.059.839	\$ 1.051.076	\$ 1.010.290	\$ 983.175	\$ 977.337	\$ 988.655

**Tabla 7:** Valor presente del costo de pavimento para TRONCAL en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Costo inicial de construcción	Cc	\$ 466.586	\$ 466.586	\$ 466.586	\$ 466.586	\$ 466.586	\$ 466.586
Costo anual de mantenimiento	Mc	\$ 55.990	\$ 47.591	\$ 37.326	\$ 29.115	\$ 22.769	\$ 18.663
Interés	(1+r)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Resultado de tiempo incremental	*Tj	20	13	10	8	7	6
Costo futuro de rehabilitación	Rj	\$ 466.586	\$ 587.826	\$ 686.007	\$ 769.816	\$ 859.845	\$ 936.538
Valor presente del costo de pavimento	PLC	\$ 1.603.182	\$ 1.589.927	\$ 1.528.232	\$ 1.487.215	\$ 1.478.384	\$ 1.495.504

Aplicando las ecuaciones 5 y 5.1 se estableció el costo anual equivalente relacionado con el valor presente del costo del pavimento y el interés en el periodo total (en años), determinando el costo kilometro carril según el número de periodos a intervenir.

**Tabla 8:** Costo Anual equivalente para la MVA no troncal en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Valor presente del costo de pavimento	PLC	\$ 1.269.021	\$ 1.258.529	\$ 1.209.693	\$ 1.177.226	\$ 1.170.236	\$ 1.183.788
Interés	(1+r)	1	1	1	1	1	1
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Costo anual equivalente m <sup>2</sup>	EALC	\$ 73.956	\$ 73.344	\$ 70.498	\$ 68.606	\$ 68.199	\$ 68.988

**Tabla 9:** Costo Anual equivalente para SITP en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Valor presente del costo de pavimento	PLC	\$ 1.059.839	\$ 1.051.076	\$ 1.010.290	\$ 983.175	\$ 977.337	\$ 988.655
Interés	(1+r)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Costo anual equivalente m <sup>2</sup>	EALC	\$ 61.765	\$ 61.254	\$ 58.877	\$ 57.297	\$ 56.957	\$ 57.617

**Tabla 10:** Costo Anual equivalente para TRONCAL en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Valor presente del costo de pavimento	PLC	\$ 1.603.182	\$ 1.589.927	\$ 1.528.232	\$ 1.487.215	\$ 1.478.384	\$ 1.495.504
Interés	(1+r)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Costo anual equivalente m <sup>2</sup>	EALC	\$ 93.430	\$ 92.658	\$ 89.062	\$ 86.672	\$ 86.157	\$ 87.155

Se determina el valor de desutilidad al aplicar la ecuación 6, obteniendo el área bajo la curva a relacionar ( $A_{LC}$ ) y el periodo total (en años) con el costo anual equivalente, tengase en cuenta que se elige el número que más se aproxime a cero (0) dado que este es el valor de desutilidad, es decir el costo que se le imputa a la vía por la pérdida de uso, cuanto más tiende a cero (0) representa un óptimo manejo y cuanto más incrementa supone un detrimento.

Por ende para la (MVA no troncal) el menor valor de desutilidad es (\$ 30.266.512) correspondiente a ( $m = 4$ ), el menor valor de desutilidad para (SITP) es de (\$ 25.277.455) correspondiente a ( $m = 4$ ), mientras tanto para la sección vial denominada (TRONCAL) el valor de desutilidad a fijarse es de (\$ 38.236.329) correspondiente a ( $m = 4$ ). Debido a que los datos consignados en la tabla 2 son los mismos para los 3 tipos de sección vial las curvas de ciclo de vida de pavimentos poseen en líneas generales el mismo comportamiento, por ende no es casualidad que en los 3 casos el número de periodos a intervenir la vía sea 4, además es por esta misma razón que la tabla 14 da el mismo resultado para los 3 casos. Por otro lado, al observar la tabla 3 se identifica que el resultado de tiempo incremental para un ( $m = 4$ ) es de un lapso de (8 años) entre cada intervención.



**Tabla 11:** Valor de des utilidad para la MVA no troncal en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Costo anual equivalente m <sup>2</sup>	EALC	\$ 73.956	\$ 73.344	\$ 70.498	\$ 68.606	\$ 68.199	\$ 68.988
Área bajo la curva	ALC	66	83	90	91	88	85
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Valor de des utilidad	ULC	\$ 44.686	\$ 35.470	\$ 31.434	\$ 30.266	\$ 31.073	\$ 32.412

**Tabla 12:** Valor de des utilidad para SITP en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Costo anual equivalente m <sup>2</sup>	EALC	\$ 61.765	\$ 61.254	\$ 58.877	\$ 57.297	\$ 56.957	\$ 57.617
Área bajo la curva	ALC	66	83	90	91	88	85
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Valor de des utilidad	ULC	\$ 37.320	\$ 29.623	\$ 26.252	\$ 25.277	\$ 25.951	\$ 27.069

**Tabla 13:** Valor de des utilidad para TRONCAL en miles. (Km/carril)

Periodo	m	1	2	3	4	5	6
Costo anual equivalente m <sup>2</sup>	EALC	\$ 93.430	\$ 92.658	\$ 89.062	\$ 86.672	\$ 86.157	\$ 87.155
Área bajo la curva	ALC	66,20	82,71	89,71	90,67	87,79	85,14
Periodo total en años	T(m+1)	40	40	40	40	40	40
Valor de des utilidad	ULC	\$ 56.453	\$ 44.811	\$ 39.711	\$ 38.236	\$ 39.256	\$ 40.946

Con base en el total requerido de grosor de pavimento, se calcula la cantidad de veces que un eje puede pasar la sección vial sin generar fisuras, aplicando la ecuación 7.

**Tabla 14:** Número de ejes para MVA no troncal, SITP y TRONCAL.

Total requerido de grosor de pavimento	SN	5,15
Módulos de elasticidad	MR	1500,00
Desviación estándar normal	ZR	-1,65
Combinación de las predicciones del error estándar del tráfico y la predicción de mantenimiento	So	0,35
Numero de ejes	Wt calculado	1075582

Con el fin de establecer la relación del PSI respecto al número de posibles intervenciones de mantenimiento a las vías, se presentan a continuación las curvas de pavimentos que muestran la calidad del pavimento con base en las variables en mención.

El análisis de PSI con respecto al tiempo para cada periodo (m), evidencia que al intervenir la vía con mayor frecuencia, se genera un menor desgaste del pavimento

permitiendo un mantenimiento con una relativa baja inversión y una valiosa aceptación por parte de los usuarios en un periodo de 40 años de vida útil.

Por lo anterior, se observa que para un (1) periodo de intervención (m), el PSI en la parte inferior de la curva es menor a 1,5 por tanto esta opción es descartada, para dos (2) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 2,5 lo que significaría que estas dos (2) intervenciones serían de reconstrucción, para tres (3) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 3 evidenciando un mantenimiento absoluto, para cuatro (4) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 3,5 con un mantenimiento deseado, para cinco (5) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 3,6 con un mantenimiento deseado igual que para seis (6) intervenciones, en las cuales el PSI se mantiene en niveles superiores o cercanos a 4.

Así mismo y tal como se muestra en el numeral 2.1.2. *Aplicación del método AASHTO – 1993*, específicamente en la Figura 3 (Esquema del ciclo de vida de un pavimento y los momentos de mantenimiento. Fuente: Fernández & Flintsch, 2015), se establecen los niveles de intervención para un mantenimiento deseado, absoluto o de reconstrucción; dichos valores de PSI son: 3.5, 3 y 2.5 respectivamente.

En la Figura 4 se evidencian las curvas de pavimento de las tres secciones viales, las cuales son idénticas dado que tal y como se muestra en la Tabla 2: Condiciones iniciales para MVA no troncal, SITP y TRONCAL. las condiciones iniciales para el análisis son las mismas, siendo éstas las que definen las pendientes para cada tramo de las curvas reflejadas.

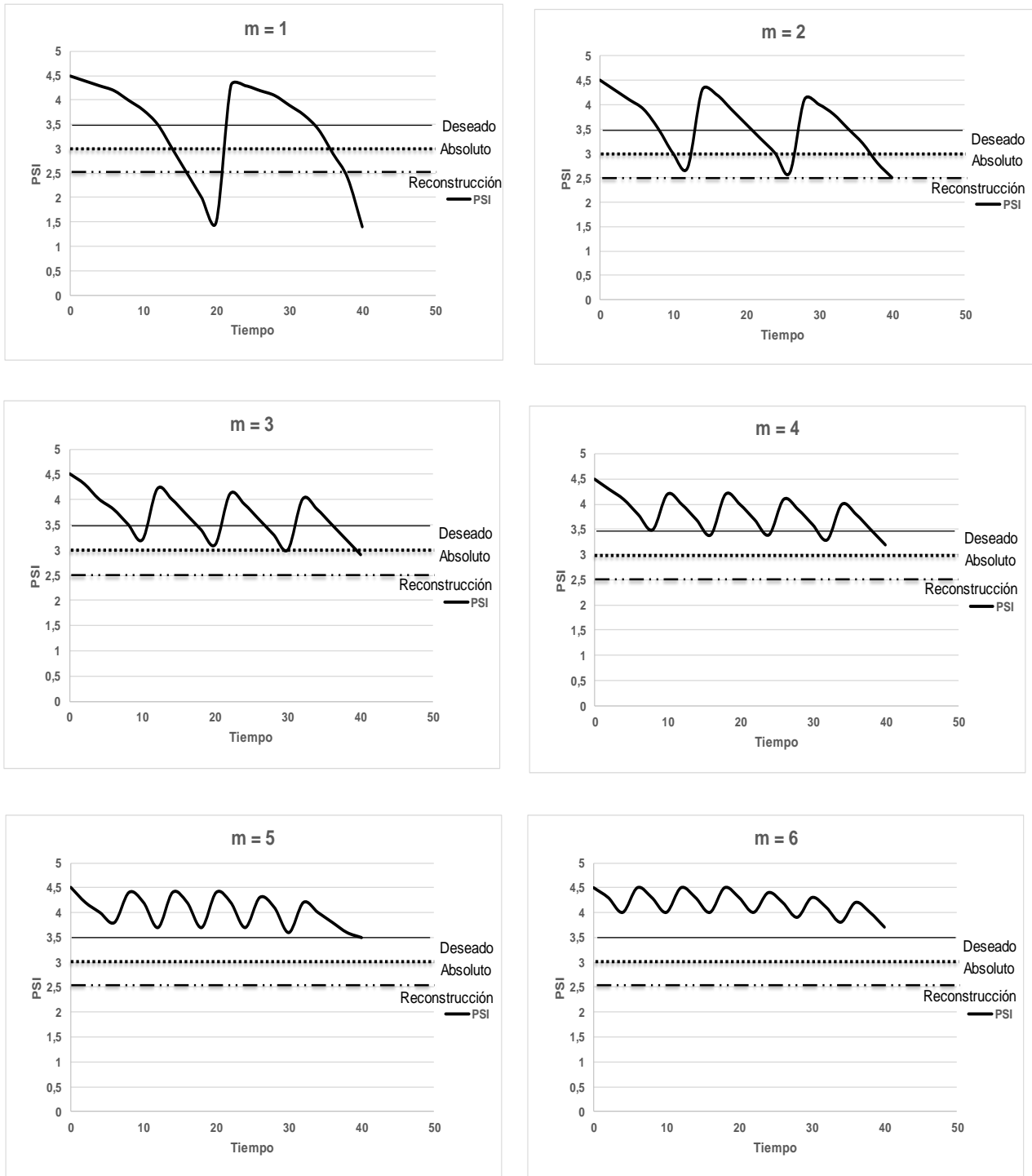


Figura 4: Niveles de PSI para la MVA no troncal, SITP y TRONCAL.

## 4.2. Evaluación económica y financiera de las curvas del ciclo de vida

Con el propósito de realizar una evaluación económica y financiera de las curvas de ciclo de vida determinadas, se realizaron los siguientes procedimientos:

**4.2.1. Evaluación financiera mediante el flujo de caja:** En los siguientes flujos de caja se tomó el costo de intervención de cada clase de sección vial, con la clasificación dada por el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), relacionándolo con el número de veces a intervenir la vía (m), obteniendo el costo de la intervención en el periodo (resultado del tiempo incremental - Tj).

Como resultado de un ponderado entre valores de inflación con respecto a los años 2014 y 2015 según cifras oficiales del Banco de la República de Colombia que determinó un 3.66% y 6.8% (respectivamente); se parte del principio de inflación del 5% como un dato fiable, permitiendo crear un marco de tendencia que se aproxima, bajo las condiciones anteriormente descritas a la realidad.

En los siguientes flujos el valor de préstamo es equivalente a cero para cada periodo dado que se parte del supuesto de que el mantenimiento de la vía se hará con capital propio, por tanto, no se generan intereses ni amortización de la deuda. Es relevante mencionar que el valor de ingresos es nulo dado que para efectuar el mantenimiento de la vía se generarán únicamente egresos, por lo cual no se efectúan impuestos sobre la ganancia.

De acuerdo a lo anterior, se establece un flujo de caja para los siguientes tipos de vía:

### 4.2.1.1. MVA No troncal

Tal como se observa en la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17, hay una relación directamente proporcional entre el número de intervenciones (m) y los costos de mantenimiento para esta sección vial; sin embargo al analizar los respectivos flujos de caja se observa que para una (1) intervención, el PSI en la parte inferior de la curva es menor a 1,5 por tanto esta opción es descartada, para dos (2) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 2,5 lo que significaría que estas dos (2) intervenciones serían de reconstrucción, al observar la Tabla 17 el *Valor Final Invertido* sería \$9.124.276.714 COP; para tres (3) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 3 evidenciando un mantenimiento absoluto, al observar la Tabla 17 el *Valor Final Invertido* sería \$6.692.026.423 COP; para cuatro (4) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 3,5 con un mantenimiento deseado, al observar la Tabla 17 el *Valor Final Invertido* sería \$844.728.824 COP; para cinco (5) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores a 3,6 con un mantenimiento deseado, al observar la Tabla 17 el *Valor*

*Final Invertido* sería \$1.126.885.330 COP; para seis (6) intervenciones el PSI se mantiene en niveles superiores o cercanos a 4 con un mantenimiento deseado, al observar la Tabla 17 el *Valor Final Invertido* sería \$1.416.580.489 COP.

En consecuencia de lo anterior, se definen cuatro (4) intervenciones como la propuesta más adecuada teniendo en cuenta que es la opción más económica y el PSI es aceptable, lo que conlleva a un mantenimiento deseado.

#### 4.2.1.2. SITP

Para la sección vial SITP se excluye realizar una sola intervención teniendo en cuenta que los niveles de PSI son menores a 1.5, así mismo, llevar a cabo dos (2) intervenciones genera la necesidad de reconstruir la sección vial para lo cual se requiere de un valor final invertido de más de diez mil millones de pesos colombianos (\$10.375.619.391 COP, exactamente) tal como se evidencia en la tabla Tabla 20, respecto a los \$7.836.767.060 COP que representa hacer tres intervenciones de mantenimiento absoluto (tabla Tabla 17), los \$705.485.798 COP, \$941.132.318 COP y \$1.183.074.839 COP que se requieren para hacer cuatro, cinco y seis intervenciones de mantenimiento deseado respectivamente (tabla Tabla 17).

Por lo anterior, desde el punto de vista económico se determinan cuatro intervenciones para la sección vial SITP, que representa un PSI con niveles superiores a 3.5 y dentro de las opciones de mantenimiento deseado, es la más viable respecto al valor de inversión final.

#### 4.2.1.3. TRONCAL

La sección vial TRONCAL al igual que las otras dos secciones presenta un comportamiento similar, dado que los valores de inversión final aumentan y disminuyen bajo las mismas condiciones, es decir, se elimina la posibilidad de realizar una sola intervención dado que los niveles de PSI son insuficientes, se descarta la doble intervención debido a que la reconstrucción no es una opción útil desde el punto de vista de PSI como de inversión económica, teniendo en cuenta que representa uno de los valores más altos dentro de las serie de posibilidades (\$11.854.458.660 COP, tabla 23), razón por la cual hacer un mantenimiento absoluto tampoco se cataloga como viable dado que comparten el mismo valor de inversión (\$11.854.458.660 COP, tabla 22).

En cuanto al mantenimiento deseado, llevar a cabo cuatro, cinco o seis intervenciones es lo más adecuado, pero la desigualdad se refleja en sus valores de inversión final definidos como: \$1.067.163.915 COP, \$1.423.618.239 COP, \$1.789.596.305 COP respectivamente (ver tabla 21), evidenciando que entre el

valor máximo y mínimo hay una diferencia de cerca de setecientos mil millones de pesos, lo que conlleva a elegir cuatro intervenciones como la opción más viable.

**Tabla 15:** Flujo de caja para MVA no troncal (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 44.320	\$ (44.320)	\$ (44.320)	\$ (44.320)	\$ (44.320)	No apto
1	20,00	\$ 117.594	\$ (117.594)	\$ (117.594)	\$ (117.594)	\$ (117.594)	No apto
2	13,33	\$ 84.942	\$ (84.942)	\$ (84.942)	\$ (84.942)	\$ (325.594)	Apto
	26,67	\$ 162.797	\$ (162.797)	\$ (162.797)	\$ (162.797)		
3	10,00	\$ 72.192	\$ (72.192)	\$ (72.192)	\$ (72.192)	\$ (574.645)	Apto
	20,00	\$ 117.594	\$ (117.594)	\$ (117.594)	\$ (117.594)		
	30,00	\$ 191.548	\$ (191.548)	\$ (191.548)	\$ (191.548)		
4	8,00	\$ 65.480	\$ (65.480)	\$ (65.480)	\$ (65.480)	\$ (844.728)	Apto
	16,00	\$ 96.745	\$ (96.745)	\$ (96.745)	\$ (96.745)		
	24,00	\$ 142.936	\$ (142.936)	\$ (142.936)	\$ (142.936)		
	32,00	\$ 211.182	\$ (211.182)	\$ (211.182)	\$ (211.182)		
5	6,67	\$ 61.356	\$ (61.356)	\$ (61.356)	\$ (61.356)	\$ (1.126.885)	Apto
	13,33	\$ 84.942	\$ (84.942)	\$ (84.942)	\$ (84.942)		
	20,00	\$ 117.594	\$ (117.594)	\$ (117.594)	\$ (117.594)		
	26,67	\$ 162.797	\$ (162.797)	\$ (162.797)	\$ (162.797)		
	33,33	\$ 225.377	\$ (225.377)	\$ (225.377)	\$ (225.377)		
6	5,71	\$ 58.570	\$ (58.570)	\$ (58.570)	\$ (58.570)	\$ (1.416.580)	Apto
	11,43	\$ 77.403	\$ (77.403)	\$ (77.403)	\$ (77.403)		
	17,14	\$ 102.292	\$ (102.292)	\$ (102.292)	\$ (102.292)		
	22,86	\$ 135.184	\$ (135.184)	\$ (135.184)	\$ (135.184)		
	28,57	\$ 178.652	\$ (178.652)	\$ (178.652)	\$ (178.652)		
	34,29	\$ 236.096	\$ (236.096)	\$ (236.096)	\$ (236.096)		

**Tabla 16:** Flujo de caja para MVA no troncal (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 516.128	\$ (516.128)	\$ (516.128)	\$ (516.128)	\$ (516.128)	No apto
1	20,00	\$ 1.369.441	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)	No apto
2	13,33	\$ 989.193	\$ (989.193)	\$ (989.193)	\$ (989.193)	\$ (3.791.712)	Apto
	26,67	\$ 1.895.856	\$ (1.895.856)	\$ (1.895.856)	\$ (1.895.856)		
3	10,00	\$ 840.718	\$ (840.718)	\$ (840.718)	\$ (840.718)	\$ (6.692.026)	Apto
	20,00	\$ 1.369.441	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)		
	30,00	\$ 2.230.675	\$ (2.230.675)	\$ (2.230.675)	\$ (2.230.675)		
4	8,00	\$ 762.556	\$ (762.556)	\$ (762.556)	\$ (762.556)	\$ (9.837.278)	Apto
	16,00	\$ 1.126.642	\$ (1.126.642)	\$ (1.126.642)	\$ (1.126.642)		
	24,00	\$ 1.664.564	\$ (1.664.564)	\$ (1.664.564)	\$ (1.664.564)		
	32,00	\$ 2.459.319	\$ (2.459.319)	\$ (2.459.319)	\$ (2.459.319)		
5	6,67	\$ 714.528	\$ (714.528)	\$ (714.528)	\$ (714.528)	\$ (13.123.128)	Apto
	13,33	\$ 989.193	\$ (989.193)	\$ (989.193)	\$ (989.193)		
	20,00	\$ 1.369.441	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)	\$ (1.369.441)		
	26,67	\$ 1.895.856	\$ (1.895.856)	\$ (1.895.856)	\$ (1.895.856)		
	33,33	\$ 2.624.625	\$ (2.624.625)	\$ (2.624.625)	\$ (2.624.625)		
6	5,71	\$ 682.085	\$ (682.085)	\$ (682.085)	\$ (682.085)	\$ (16.496.770)	Apto
	11,43	\$ 901.406	\$ (901.406)	\$ (901.406)	\$ (901.406)		
	17,14	\$ 1.191.248	\$ (1.191.248)	\$ (1.191.248)	\$ (1.191.248)		
	22,86	\$ 1.574.288	\$ (1.574.288)	\$ (1.574.288)	\$ (1.574.288)		
	28,57	\$ 2.080.491	\$ (2.080.491)	\$ (2.080.491)	\$ (2.080.491)		
	34,29	\$ 2.749.461	\$ (2.749.461)	\$ (2.749.461)	\$ (2.749.461)		



**Tabla 17:** Flujo de caja para MVA no troncal (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 1.241.996	\$ (1.241.996)	\$ (1.241.996)	\$ (1.241.996)	\$ (1.241.996)	No apto
1	20,00	\$ 3.295.387	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)	No apto
2	13,33	\$ 2.380.369	\$ (2.380.369)	\$ (2.380.369)	\$ (2.380.369)	\$ (9.124.276)	Apto
	26,67	\$ 4.562.138	\$ (4.562.138)	\$ (4.562.138)	\$ (4.562.138)		
3	10,00	\$ 2.023.081	\$ (2.023.081)	\$ (2.023.081)	\$ (2.023.081)	\$ (16.103.515)	Apto
	20,00	\$ 3.295.387	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)		
	30,00	\$ 5.367.838	\$ (5.367.838)	\$ (5.367.838)	\$ (5.367.838)		
4	8,00	\$ 1.834.994	\$ (1.834.994)	\$ (1.834.994)	\$ (1.834.994)	\$ (23.672.168)	Apto
	16,00	\$ 2.711.123	\$ (2.711.123)	\$ (2.711.123)	\$ (2.711.123)		
	24,00	\$ 4.005.563	\$ (4.005.563)	\$ (4.005.563)	\$ (4.005.563)		
	32,00	\$ 5.918.042	\$ (5.918.042)	\$ (5.918.042)	\$ (5.918.042)		
5	6,67	\$ 1.719.421	\$ (1.719.421)	\$ (1.719.421)	\$ (1.719.421)	\$ (31.579.151)	Apto
	13,33	\$ 2.380.369	\$ (2.380.369)	\$ (2.380.369)	\$ (2.380.369)		
	20,00	\$ 3.295.387	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)	\$ (3.295.387)		
	26,67	\$ 4.562.138	\$ (4.562.138)	\$ (4.562.138)	\$ (4.562.138)		
	33,33	\$ 6.315.830	\$ (6.315.830)	\$ (6.315.830)	\$ (6.315.830)		
6	5,71	\$ 1.641.353	\$ (1.641.353)	\$ (1.641.353)	\$ (1.641.353)	\$ (39.697.392)	Apto
	11,43	\$ 2.169.121	\$ (2.169.121)	\$ (2.169.121)	\$ (2.169.121)		
	17,14	\$ 2.866.590	\$ (2.866.590)	\$ (2.866.590)	\$ (2.866.590)		
	22,86	\$ 3.788.325	\$ (3.788.325)	\$ (3.788.325)	\$ (3.788.325)		
	28,57	\$ 5.006.440	\$ (5.006.440)	\$ (5.006.440)	\$ (5.006.440)		
	34,29	\$ 6.616.232	\$ (6.616.232)	\$ (6.616.232)	\$ (6.616.232)		

**Tabla 18:** Flujo de caja para SITP (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 37.014	\$ (37.014)	\$ (37.014)	\$ (37.014)	\$ (37.014)	No apto
1	20,00	\$ 98.210	\$ (98.210)	\$ (98.210)	\$ (98.210)	\$ (98.210)	No apto
2	13,33	\$ 70.940	\$ (70.940)	\$ (70.940)	\$ (70.940)	\$ (271.924)	Apto
	26,67	\$ 135.962	\$ (135.962)	\$ (135.962)	\$ (135.962)		
3	10,00	\$ 60.292	\$ (60.292)	\$ (60.292)	\$ (60.292)	\$ (479.922)	Apto
	20,00	\$ 98.210	\$ (98.210)	\$ (98.210)	\$ (98.210)		
	30,00	\$ 159.974	\$ (159.974)	\$ (159.974)	\$ (159.974)		
4	8,00	\$ 54.687	\$ (54.687)	\$ (54.687)	\$ (54.687)	\$ (705.485)	Apto
	16,00	\$ 80.797	\$ (80.797)	\$ (80.797)	\$ (80.797)		
	24,00	\$ 119.375	\$ (119.375)	\$ (119.375)	\$ (119.375)		
	32,00	\$ 176.371	\$ (176.371)	\$ (176.371)	\$ (176.371)		
5	6,67	\$ 51.242	\$ (51.242)	\$ (51.242)	\$ (51.242)	\$ (941.132)	Apto
	13,33	\$ 70.940	\$ (70.940)	\$ (70.940)	\$ (70.940)		
	20,00	\$ 98.210	\$ (98.210)	\$ (98.210)	\$ (98.210)		
	26,67	\$ 135.962	\$ (135.962)	\$ (135.962)	\$ (135.962)		
	33,33	\$ 188.226	\$ (188.226)	\$ (188.226)	\$ (188.226)		
6	5,71	\$ 48.916	\$ (48.916)	\$ (48.916)	\$ (48.916)	\$ (1.183.074)	Apto
	11,43	\$ 64.644	\$ (64.644)	\$ (64.644)	\$ (64.644)		
	17,14	\$ 85.431	\$ (85.431)	\$ (85.431)	\$ (85.431)		
	22,86	\$ 112.900	\$ (112.900)	\$ (112.900)	\$ (112.900)		
	28,57	\$ 149.203	\$ (149.203)	\$ (149.203)	\$ (149.203)		
	34,29	\$ 197.179	\$ (197.179)	\$ (197.179)	\$ (197.179)		

**Tabla 19:** Flujo de caja para SITP (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 604.417	\$ (604.417)	\$ (604.417)	\$ (604.417)	\$ (604.417)	No apto
1	20,00	\$ 1.603.698	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)	No apto
2	13,33	\$ 1.158.405	\$ (1.158.405)	\$ (1.158.405)	\$ (1.158.405)	\$ (4.440.324)	Apto
	26,67	\$ 2.220.162	\$ (2.220.162)	\$ (2.220.162)	\$ (2.220.162)		
3	10,00	\$ 984.531	\$ (984.531)	\$ (984.531)	\$ (984.531)	\$ (7.836.767)	Apto
	20,00	\$ 1.603.698	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)		
	30,00	\$ 2.612.255	\$ (2.612.255)	\$ (2.612.255)	\$ (2.612.255)		
4	8,00	\$ 892.999	\$ (892.999)	\$ (892.999)	\$ (892.999)	\$ (11.520.047)	Apto
	16,00	\$ 1.319.366	\$ (1.319.366)	\$ (1.319.366)	\$ (1.319.366)		
	24,00	\$ 1.949.305	\$ (1.949.305)	\$ (1.949.305)	\$ (1.949.305)		
	32,00	\$ 2.880.011	\$ (2.880.011)	\$ (2.880.011)	\$ (2.880.011)		
5	6,67	\$ 836.755	\$ (836.755)	\$ (836.755)	\$ (836.755)	\$ (15.367.976)	Apto
	13,33	\$ 1.158.405	\$ (1.158.405)	\$ (1.158.405)	\$ (1.158.405)		
	20,00	\$ 1.603.698	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)	\$ (1.603.698)		
	26,67	\$ 2.220.162	\$ (2.220.162)	\$ (2.220.162)	\$ (2.220.162)		
	33,33	\$ 3.073.595	\$ (3.073.595)	\$ (3.073.595)	\$ (3.073.595)		
6	5,71	\$ 798.763	\$ (798.763)	\$ (798.763)	\$ (798.763)	\$ (19.318.714)	Apto
	11,43	\$ 1.055.601	\$ (1.055.601)	\$ (1.055.601)	\$ (1.055.601)		
	17,14	\$ 1.395.024	\$ (1.395.024)	\$ (1.395.024)	\$ (1.395.024)		
	22,86	\$ 1.843.586	\$ (1.843.586)	\$ (1.843.586)	\$ (1.843.586)		
	28,57	\$ 2.436.381	\$ (2.436.381)	\$ (2.436.381)	\$ (2.436.381)		
	34,29	\$ 3.219.785	\$ (3.219.785)	\$ (3.219.785)	\$ (3.219.785)		

**Tabla 20:** Flujo de caja para SITP (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 1.412.329	\$ (1.412.329)	\$ (1.412.329)	\$ (1.412.329)	\$ (1.412.329)	No apto
1	20,00	\$ 3.747.330	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)	No apto
2	13,33	\$ 2.706.824	\$ (2.706.824)	\$ (2.706.824)	\$ (2.706.824)	\$ (10.375.619)	Apto
	26,67	\$ 5.187.809	\$ (5.187.809)	\$ (5.187.809)	\$ (5.187.809)		
3	10,00	\$ 2.300.536	\$ (2.300.536)	\$ (2.300.536)	\$ (2.300.536)	\$ (18.312.021)	Apto
	20,00	\$ 3.747.330	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)		
	30,00	\$ 6.104.007	\$ (6.104.007)	\$ (6.104.007)	\$ (6.104.007)		
4	8,00	\$ 2.086.654	\$ (2.086.654)	\$ (2.086.654)	\$ (2.086.654)	\$ (26.918.671)	Apto
	16,00	\$ 3.082.938	\$ (3.082.938)	\$ (3.082.938)	\$ (3.082.938)		
	24,00	\$ 4.554.904	\$ (4.554.904)	\$ (4.554.904)	\$ (4.554.904)		
	32,00	\$ 6.729.667	\$ (6.729.667)	\$ (6.729.667)	\$ (6.729.667)		
5	6,67	\$ 1.955.230	\$ (1.955.230)	\$ (1.955.230)	\$ (1.955.230)	\$ (35.910.052)	Apto
	13,33	\$ 2.706.824	\$ (2.706.824)	\$ (2.706.824)	\$ (2.706.824)		
	20,00	\$ 3.747.330	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)	\$ (3.747.330)		
	26,67	\$ 5.187.809	\$ (5.187.809)	\$ (5.187.809)	\$ (5.187.809)		
	33,33	\$ 7.182.010	\$ (7.182.010)	\$ (7.182.010)	\$ (7.182.010)		
6	5,71	\$ 1.866.456	\$ (1.866.456)	\$ (1.866.456)	\$ (1.866.456)	\$ (45.141.664)	Apto
	11,43	\$ 2.466.604	\$ (2.466.604)	\$ (2.466.604)	\$ (2.466.604)		
	17,14	\$ 3.259.726	\$ (3.259.726)	\$ (3.259.726)	\$ (3.259.726)		
	22,86	\$ 4.307.873	\$ (4.307.873)	\$ (4.307.873)	\$ (4.307.873)		
	28,57	\$ 5.693.044	\$ (5.693.044)	\$ (5.693.044)	\$ (5.693.044)		
	34,29	\$ 7.523.610	\$ (7.523.610)	\$ (7.523.610)	\$ (7.523.610)		

**Tabla 21:** Flujo de caja para TRONCAL (Deseado) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 55.990	\$ (55.990)	\$ (55.990)	\$ (55.990)	\$ (55.990)	No apto
1	20,00	\$ 148.559	\$ (148.559)	\$ (148.559)	\$ (148.559)	\$ (148.559)	No apto
2	13,33	\$ 107.309	\$ (107.309)	\$ (107.309)	\$ (107.309)	\$ (411.331)	Apto
	26,67	\$ 205.665	\$ (205.665)	\$ (205.665)	\$ (205.665)		
3	10,00	\$ 91.202	\$ (91.202)	\$ (91.202)	\$ (91.202)	\$ (725.961)	Apto
	20,00	\$ 148.559	\$ (148.559)	\$ (148.559)	\$ (148.559)		
	30,00	\$ 241.987	\$ (241.987)	\$ (241.987)	\$ (241.987)		
4	8,00	\$ 82.723	\$ (82.723)	\$ (82.723)	\$ (82.723)	\$ (1.067.163)	Apto
	16,00	\$ 122.220	\$ (122.220)	\$ (122.220)	\$ (122.220)		
	24,00	\$ 180.574	\$ (180.574)	\$ (180.574)	\$ (180.574)		
	32,00	\$ 266.790	\$ (266.790)	\$ (266.790)	\$ (266.790)		
5	6,67	\$ 77.513	\$ (77.513)	\$ (77.513)	\$ (77.513)	\$ (1.423.618)	Apto
	13,33	\$ 107.309	\$ (107.309)	\$ (107.309)	\$ (107.309)		
	20,00	\$ 148.559	\$ (148.559)	\$ (148.559)	\$ (148.559)		
	26,67	\$ 205.665	\$ (205.665)	\$ (205.665)	\$ (205.665)		
	33,33	\$ 284.723	\$ (284.723)	\$ (284.723)	\$ (284.723)		
6	5,71	\$ 73.993	\$ (73.993)	\$ (73.993)	\$ (73.993)	\$ (1.789.596)	Apto
	11,43	\$ 97.786	\$ (97.786)	\$ (97.786)	\$ (97.786)		
	17,14	\$ 129.228	\$ (129.228)	\$ (129.228)	\$ (129.228)		
	22,86	\$ 170.781	\$ (170.781)	\$ (170.781)	\$ (170.781)		
	28,57	\$ 225.695	\$ (225.695)	\$ (225.695)	\$ (225.695)		
	34,29	\$ 298.266	\$ (298.266)	\$ (298.266)	\$ (298.266)		

**Tabla 22:** Flujo de caja para TRONCAL (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 914.284	\$ (914.284)	\$ (914.284)	\$ (914.284)	\$ (914.284)	No apto
1	20,00	\$ 2.425.869	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)	No apto
2	13,33	\$ 1.752.288	\$ (1.752.288)	\$ (1.752.288)	\$ (1.752.288)	\$ (6.716.754)	Apto
	26,67	\$ 3.358.377	\$ (3.358.377)	\$ (3.358.377)	\$ (3.358.377)		
3	10,00	\$ 1.489.273	\$ (1.489.273)	\$ (1.489.273)	\$ (1.489.273)	\$ (11.854.458)	Apto
	20,00	\$ 2.425.869	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)		
	30,00	\$ 3.951.486	\$ (3.951.486)	\$ (3.951.486)	\$ (3.951.486)		
4	8,00	\$ 1.350.815	\$ (1.350.815)	\$ (1.350.815)	\$ (1.350.815)	\$ (17.426.054)	Apto
	16,00	\$ 1.995.769	\$ (1.995.769)	\$ (1.995.769)	\$ (1.995.769)		
	24,00	\$ 2.948.659	\$ (2.948.659)	\$ (2.948.659)	\$ (2.948.659)		
	32,00	\$ 4.356.513	\$ (4.356.513)	\$ (4.356.513)	\$ (4.356.513)		
5	6,67	\$ 1.265.737	\$ (1.265.737)	\$ (1.265.737)	\$ (1.265.737)	\$ (23.246.708)	Apto
	13,33	\$ 1.752.288	\$ (1.752.288)	\$ (1.752.288)	\$ (1.752.288)		
	20,00	\$ 2.425.869	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)	\$ (2.425.869)		
	26,67	\$ 3.358.377	\$ (3.358.377)	\$ (3.358.377)	\$ (3.358.377)		
	33,33	\$ 4.649.341	\$ (4.649.341)	\$ (4.649.341)	\$ (4.649.341)		
6	5,71	\$ 1.208.267	\$ (1.208.267)	\$ (1.208.267)	\$ (1.208.267)	\$ (29.222.879)	Apto
	11,43	\$ 1.596.779	\$ (1.596.779)	\$ (1.596.779)	\$ (1.596.779)		
	17,14	\$ 2.110.214	\$ (2.110.214)	\$ (2.110.214)	\$ (2.110.214)		
	22,86	\$ 2.788.741	\$ (2.788.741)	\$ (2.788.741)	\$ (2.788.741)		
	28,57	\$ 3.685.445	\$ (3.685.445)	\$ (3.685.445)	\$ (3.685.445)		
	34,29	\$ 4.870.479	\$ (4.870.479)	\$ (4.870.479)	\$ (4.870.479)		

**Tabla 23:** Flujo de caja para TRONCAL (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril)

m	*Tj	Costos y gastos producción	Flujo de caja antes de Impuestos	Flujo de caja después de Impuestos	Valor Futuro	Valor Presente Neto	Condición
0	0,00	\$ 2.041.600	\$ (2.041.600)	\$ (2.041.600)	\$ (2.041.600)	\$ (2.041.600)	No apto
1	20,00	\$ 5.416.972	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)	No apto
2	13,33	\$ 3.912.863	\$ (3.912.863)	\$ (3.912.863)	\$ (3.912.863)	\$ (14.998.527)	Apto
	26,67	\$ 7.499.263	\$ (7.499.263)	\$ (7.499.263)	\$ (7.499.263)		
3	10,00	\$ 3.325.551	\$ (3.325.551)	\$ (3.325.551)	\$ (3.325.551)	\$ (26.471.032)	Apto
	20,00	\$ 5.416.972	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)		
	30,00	\$ 8.823.677	\$ (8.823.677)	\$ (8.823.677)	\$ (8.823.677)		
4	8,00	\$ 3.016.373	\$ (3.016.373)	\$ (3.016.373)	\$ (3.016.373)	\$ (38.912.418)	Apto
	16,00	\$ 4.456.556	\$ (4.456.556)	\$ (4.456.556)	\$ (4.456.556)		
	24,00	\$ 6.584.364	\$ (6.584.364)	\$ (6.584.364)	\$ (6.584.364)		
	32,00	\$ 9.728.104	\$ (9.728.104)	\$ (9.728.104)	\$ (9.728.104)		
5	6,67	\$ 2.826.393	\$ (2.826.393)	\$ (2.826.393)	\$ (2.826.393)	\$ (51.909.952)	Apto
	13,33	\$ 3.912.863	\$ (3.912.863)	\$ (3.912.863)	\$ (3.912.863)		
	20,00	\$ 5.416.972	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)	\$ (5.416.972)		
	26,67	\$ 7.499.263	\$ (7.499.263)	\$ (7.499.263)	\$ (7.499.263)		
	33,33	\$ 10.381.990	\$ (10.381.990)	\$ (10.381.990)	\$ (10.381.990)		
6	5,71	\$ 2.698.064	\$ (2.698.064)	\$ (2.698.064)	\$ (2.698.064)	\$ (65.254.754)	Apto
	11,43	\$ 3.565.611	\$ (3.565.611)	\$ (3.565.611)	\$ (3.565.611)		
	17,14	\$ 4.712.113	\$ (4.712.113)	\$ (4.712.113)	\$ (4.712.113)		
	22,86	\$ 6.227.267	\$ (6.227.267)	\$ (6.227.267)	\$ (6.227.267)		
	28,57	\$ 8.229.609	\$ (8.229.609)	\$ (8.229.609)	\$ (8.229.609)		
	34,29	\$ 10.875.792	\$ (10.875.792)	\$ (10.875.792)	\$ (10.875.792)		

**4.2.2. Evaluación económica partiendo de un supuesto de financiamiento bajo tasas relativas reales de mercado:** Con el fin de determinar los beneficios y las pérdidas derivadas de un supuesto de financiamiento para el mantenimiento de cada una de las secciones viales, se postularon tres posibles escenarios para cada caso, calculando el costo por uso de capital y así, determinando un valor económico que finalmente definirá las ventajas obtenidas en compensación por la mejora de la sección vial en cuestión, lo anterior, siempre y cuando este beneficio se pueda cuantificar.

#### 4.2.2.1. MVA No troncal

Para el análisis económico de la MVA no troncal se tiene un costo por kilómetro carril de \$ 44.320.000 pesos como se observa en la tabla 24 para un mantenimiento deseado, de \$ 516.128.000 como se observa en la tabla 25 para un mantenimiento absoluto y de \$ 1.241.996.800 como se observa en la tabla 26 para reconstrucción; en todos los casos se postulan tres posibilidades de financiamiento del proyecto, en el primer escenario propuesto se financia a corto y largo plazo con un porcentaje de equivalencia de 40% y 60% respectivamente; para el segundo escenario se financian a corto y largo plazo con un porcentaje de equivalencia de 60% y 40% respectivamente; y en el último escenario el financiamiento se hace por partes iguales (50% y 50%) en cada plazo.

**Tabla 24:** Análisis económico para MVA no troncal (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 44.320.000	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 17.728	\$ 26.592
	% Equivalencia	40%	60%
	Interés Efectivo Anual	28%	34%
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	Capital Usado		\$ 44.320
	Costo por Uso		\$ 14.005
2	Valor	\$ 26.592	\$ 17.728
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	Capital Usado		\$ 44.320
	Costo por Uso		\$ 13.473
3	Valor	\$ 22.160	\$ 22.160
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	Capital Usado		\$ 44.320
	Costo por Uso		\$ 13.739



**Tabla 25:** Análisis económico para MVA no troncal (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 516.128.000	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 206.451	\$ 309.676
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio		
	Ponderado	0,112	0,204
		<b>Capital Usado</b> \$ 516.128	
		<b>Costo por Uso</b> \$ 163.096	
2	Valor	\$ 309.676	\$ 206.451
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio		
	Ponderado	0,168	0,136
		<b>Capital Usado</b> \$ 516.128	
		<b>Costo por Uso</b> \$ 156.902	
3	Valor	\$ 258.064	\$ 258.064
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio		
	Ponderado	0,14	0,17
		<b>Capital Usado</b> \$ 516.128	
		<b>Costo por Uso</b> \$ 159.999	

**Tabla 26:** Análisis económico para MVA no troncal (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 1.241.996.800	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 496.798	\$ 745.198
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio		
	Ponderado	0,112	0,204
		<b>Capital Usado</b> \$ 1.241.996	
		<b>Costo por Uso</b> \$ 392.470	
2	Valor	\$ 745.198	\$ 496.798
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio		
	Ponderado	0,168	0,136
		<b>Capital Usado</b> \$ 1.241.996	
		<b>Costo por Uso</b> \$ 392.470	
3	Valor	\$ 620.998	\$ 620.998
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio		
	Ponderado	0,14	0,17
		<b>Capital Usado</b> \$ 1.241.996	
		<b>Costo por Uso</b> \$ 385.019	

#### 4.2.2.2. SITP

El análisis económico para llevar a cabo el mantenimiento deseado en la sección vial SITP establece un costo de kilómetro carril de \$ 37.014.400 COP (tabla 27), respecto a los \$ 604.417.056 COP del mantenimiento absoluto (tabla 28) y la reconstrucción que se valora en unos \$ 1.412.329.600 COP (tabla 29). Para estos tres casos, se establecen tres posibles escenarios para el financiamiento del

proyecto: primero, puede financiarse 40% a corto plazo y 60% a largo plazo; segundo, 60% y 40% respectivamente; y en el último escenario el financiamiento se hace por partes iguales (50% y 50%) en cada plazo.

**Tabla 27:** Análisis económico para SITP (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 37.014.400	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 14.805	\$ 22.208
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	<b>Capital Usado</b>		\$ 37.014
		<b>Costo por Uso</b>	\$ 11.696
2	Valor	\$ 22.208	\$ 14.805
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	<b>Capital Usado</b>		\$ 37.014
		<b>Costo por Uso</b>	\$ 11.252
3	Valor	\$ 18.507	\$ 18.507
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	<b>Capital Usado</b>		\$ 37.014
		<b>Costo por Uso</b>	\$ 11.474

**Tabla 28:** Análisis económico para SITP (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 604.417.056	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 241.766	\$ 362.650
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	<b>Capital Usado</b>		\$ 604.417
		<b>Costo por Uso</b>	\$ 190.995
2	Valor	\$ 362.650	\$ 241.766
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	<b>Capital Usado</b>		\$ 604.417
		<b>Costo por Uso</b>	\$ 183.742
3	Valor	\$ 302.208	\$ 302.208
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	<b>Capital Usado</b>		\$ 604.417
		<b>Costo por Uso</b>	\$ 187.369

**Tabla 29:** Análisis económico para SITP (Mantenimiento de reconstrucción) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 1.412.329.600	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 564.931	\$ 847.397
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	<b>Capital Usado</b>	\$ 1.412.329	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 446.296	
2	Valor	\$ 847.397	\$ 564.931
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	<b>Capital Usado</b>	\$ 1.412.329	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 429.348	
3	Valor	\$ 706.164	\$ 706.164
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	<b>Capital Usado</b>	\$ 1.412.329	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 437.822	

#### 4.2.2.3. TRONCAL

El análisis económico para la sección vial TRONCAL se basa en las mismas condiciones de las otras dos secciones viales, dado que se evalúan las intervenciones respecto a los siguientes valores de inversión final: mantenimiento deseado \$ 914.284.800 COP (tabla 30), mantenimiento absoluto \$2.041.600.000 COP (tabla 31) y reconstrucción \$ 2.041.600.000 COP (tabla 32); resultados que se valoran con respecto a tres escenarios diferentes, cuando se establece un 40% de financiamiento a corto plazo y 60% a largo plazo, el segundo cuando estos dos porcentajes son inversos (60% y 40% respectivamente) y el último cuando se establece un porcentaje de financiamiento equivalente en los dos casos (50% y 50% respectivamente).

**Tabla 30:** Análisis económico para TRONCAL (Mantenimiento deseado) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 55.990.400	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 22.396	\$ 33.594
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	<b>Capital Usado</b>	\$ 55.990	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 17.692	
2	Valor	\$ 33.594	\$ 22.396
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	<b>Capital Usado</b>	\$ 55.990	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 17.021	
3	Valor	\$ 27.995	\$ 27.995
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	<b>Capital Usado</b>	\$ 55.990	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 17.357	

**Tabla 31:** Análisis económico para TRONCAL (Mantenimiento absoluto) en miles. (Km/carril)

Costo		\$ 914.284.800	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 365.713	\$ 548.570
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	<b>Capital Usado</b>	\$ 914.284	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 288.913	
2	Valor	\$ 548.570	\$ 365.713
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	<b>Capital Usado</b>	\$ 914.284	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 277.942	
3	Valor	\$ 457.142	\$ 457.142
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	<b>Capital Usado</b>	\$ 914.284	
	<b>Costo por Uso</b>	\$ 283.428	

**Tabla 32:** Análisis económico para TRONCAL (Mantenimiento de reconstrucción en miles. (Km/carril))

Costo		\$ 2.041.600.000	
Caso	Descripción	Inversionistas Corto Plazo	Inversionistas Largo Plazo
1	Valor	\$ 816.640	\$ 1.224.960
	% Equivalencia	40	60
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,112	0,204
	<b>Capital Usado</b>		\$ 2.041.600
	<b>Costo por Uso</b>		\$ 645.145
2	Valor	\$ 1.224.960	\$ 816.640
	% Equivalencia	60	40
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,168	0,136
	<b>Capital Usado</b>		\$ 2.041.600
	<b>Costo por Uso</b>		\$ 620.646
3	Valor	\$ 1.020.800	\$ 1.020.800
	% Equivalencia	50	50
	Interés Efectivo Anual	28	34
	Costo Promedio Ponderado	0,14	0,17
	<b>Capital Usado</b>		\$ 2.041.600
	<b>Costo por Uso</b>		\$ 632.896

En efecto y teniendo en cuenta las tres secciones viales, se recomienda que al realizar la inversión se establezca un 60% de pasivo a corto plazo y 40% a largo plazo dado que el costo por capital de uso resulta ser menor respecto a los otros dos planteamientos. Es de tener en cuenta que no es útil generar una deuda a largo plazo para realizar este tipo de obras, entendiendo que corto plazo hace referencia a menor a un año y largo plazo es mayor a un año.

#### 4.3. Optimización de la propuesta más adecuada correspondiente a una función objetivo establecido en costos

Con el propósito de realizar una evaluación económica y financiera de las curvas de ciclo de vida determinadas se realizaron los siguientes procedimientos:

**Determinación de la propuesta más adecuada mediante la aplicación de la expresión establecida:** Mediante la aplicación de la ecuación 9, se propone el número de veces a intervenir la vía, con el fin de generar un marco de gestión que dé cobertura a los niveles de PSI requeridos y a la propuesta económica más viable.

$$Z_{max} = \left[ \frac{M_{AASHTO} + M_{FCAJA}}{2} \right] \quad (9)$$

Dónde: **Zmax** es Máximo beneficio (costo/percepción ciudadanía), **MAASHTO** es el número de períodos a intervenir según el método AASHTO 93 y **MFCAJA** es el número de periodos a intervenir según el flujo de caja.

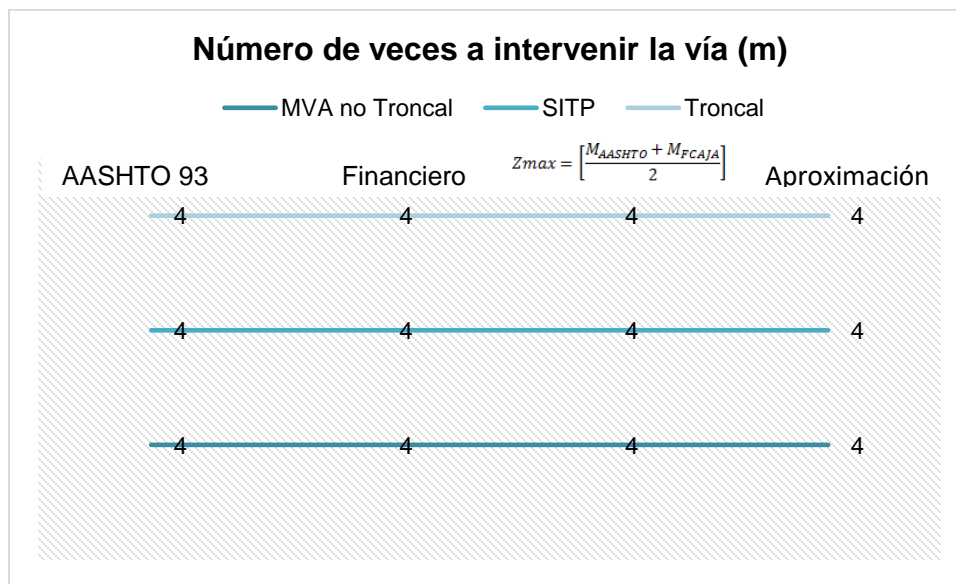
Con las siguientes restricciones:

$$M_{AASHTO} > 0;$$

$$M_{FCAJA} > 0;$$

$$Z_{max} > 0$$

A continuación se relacionan los resultados obtenidos por la aplicación tanto del método AASHTO 93 como del análisis de flujo de caja, siendo estos semejantes más no totalmente equivalentes, por lo cual, se procede a la aplicación de la ecuación 9 que proyecta un valor central entre los dos métodos utilizados para la evaluación de cada sección vial, estableciendo la cantidad de veces exacta a intervenir la vía, teniendo como garantía que este resultado de la ecuación no se verá afectada por valores polarizados, puesto que como se puede observar los métodos aplicados determinan valores cercanos o iguales.



**Gráfica 1:** Número de periodos a intervenir las secciones viales

De acuerdo con lo anterior, se establece que el número de veces a intervenir cada sección vial: MVA No troncal, SITP y TRONCAL debe ser cuatro (4) tal y como se muestra en la gráfica 4, las cuales deben ejecutarse cada ocho años partiendo del año de intervención número ocho desde la construcción de la vía, es decir en el años 8 (intervención 1), en el año 16 (intervención 2), en el año 24 (intervención 3), en el año 32 (intervención 4), teniendo en cuenta que para el caso de la MVA No Troncal se tomó un número aproximado estimando un valor entero, más no decimal como determinó la ecuación 9 lo que genera grandes ventajas sobre el mantenimiento de las vías dado que técnicamente y financieramente representa beneficios para el inversionista siendo sostenible y

eficiente, y tiene una alta aceptación por el usuario, lo cual se traduce en bienestar social para la comunidad que tendría acceso a las vías.

Es importante resaltar que en la evaluación de los tres métodos de análisis, el método AASHTO 93, la evaluación financiera y la optimización de la propuesta más favorable, se evidencia uniformidad en los resultados arrojados, por lo cual es posible afirmar que el número de veces a intervenir la vía determinado en esta investigación, es confiable y acertado, percibiendo concordancia entre los métodos en mención.

## DISCUSIÓN

Este estudio tuvo como propósito proponer un marco de gestión de pavimentos flexibles para la ciudad de Bogotá, basado en el ciclo de vida y la evaluación económica y financiera, por tanto los hallazgos más importantes se centran en el número de intervenciones y el tipo de mantenimiento sugerido para vías urbanas, el análisis económico y el análisis financiero.

De los resultados obtenidos se puede observar que el número de intervenciones deseadas (periodos – m) es 4, con un tiempo entre cada intervención de 8 años, similares a los resultados obtenidos por Khaled A. Abaza, (2002) para un pavimento con un diseño inicial de vida de 40 años igual al modelo propuesto en el presente trabajo, en los cuales obtuvieron los mismos datos de mantenimiento para una sección vial con características similares.

En contraste, Mansilla (2005) en un estudio y evaluación financiera de las acciones de mantenimiento desarrolladas en los principales corredores viales en pavimento flexible de Bogotá D.C, concluyó que aproximadamente es 32% más económico realizar mantenimiento periódico y rutinario al corredor que dejar que este se deteriore y realizar la reconstrucción, este porcentaje en el presente estudio arroja una cifra de casi el 1000% aproximadamente, lo que significa que es 10 veces más económico hacer mantenimiento deseado y periódico que hacer una reconstrucción total de la sección vial.

De acuerdo con lo anterior, ambos porcentajes varían de forma considerable, sin embargo se observa que concluyen que es mucho más económico realizar mantenimiento periódico y deseado que realizar labores de reconstrucción en la vía, además cabe aclarar que esta deducción se realiza sin tomar en cuenta los costos del parque automotor y el beneficio social que implica mantener las vías en un buen estado.

Con respecto al número de mantenimientos, Martínez (2009), Arias (2011) y Khaled A. Abaza (2002) también aseveran que hacer mantenimientos periódicos y preventivos es mucho más eficiente que hacer reconstrucción, dicha premisa está en las mismas líneas de conclusión consignadas en el presente trabajo.

Por otro lado, es importante resaltar la conclusión de Martínez (2009) quien manifestó que debido al alto desarrollo urbanístico y automotor que se ha venido presentando en las principales ciudades del mundo y de Colombia, que ha sometido a los pavimentos a mayores esfuerzos y deformaciones, existe la necesidad de evaluar dichos pavimentos para garantizar su óptimo funcionamiento, frente a esto, afirma que aunque el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) prácticamente ha implementado un sistema de gestión vial en la ciudad basado en la metodología



internacional HDM IV, se evidencia que estos esfuerzos aún no son representativos teniendo en cuenta la necesidad de mantenimiento y preservación de la malla vial en condiciones óptimas.

Lo anterior, se determina con base en que a la fecha no se ha realizado ningún tipo de procedimiento como mantenimiento periódico o rutinario, que eviten daños prematuros y/o grandes deterioros sobre estos pavimentos, lo cual ocasiona el inminente daño total o parcial de la estructura y generando sobrecostos en intervenciones futuras, causando un impacto negativo sobre la calidad de vida de los habitantes.

De conformidad a esta cuestión, Mansilla (2005) aclara que el tema de mantenimientos en los corredores de Bogotá se empezó a aplicar a partir del año 2003, lo que indica que se encuentra en un proceso de retroalimentación para mejorar posibles errores, deficiencias y limitaciones, razón por la cual los resultados no han sido los más destacables, sin embargo aportes como el presente estudio permiten un acercamiento a la realidad de la situación, con el fin de tomar decisiones frente a los retos presentados a causa de la implementación de modelos adaptados.

Por último, es importante destacar la afirmación de Arias (2011) quien aseveró que la implementación de este tipo de sistemas de gestión de pavimentos, no se deben quedar en el papel, es importante que se desarrolle un seguimiento exhaustivo a su aplicación, desarrollo y modificación, así como definir y proponer estrategias de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras tomando como base su vida útil, lo cual coincide totalmente con los análisis del presente estudio.

Es así, como es válido afirmar que el eje central de la administración de pavimentos debe ser la preservación, haciendo buen uso de las inversiones destinadas al proyecto, mediante la aplicación de tratamientos adecuados de mantenimiento y rehabilitación para prolongar la existencia del mismo.

## CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación presentada, es posible concluir que existe una relación directa entre el número de intervenciones de mantenimiento al pavimento y el nivel de PSI del mismo; además es recomendable que se seleccione el escenario ideal es decir, el mantenimiento deseado, tratando de evitar en lo posible escenarios deficientes que evidencien una mala gestión de los pavimentos, es decir un mantenimiento absoluto o una reconstrucción de la vía.

Si las personas a cargo de la gestión de dichos pavimentos deciden realizar intervenciones de mantenimiento no de tipo deseado sino absoluto, deben contemplar que en el presente estudio es en promedio diez veces más económico realizar mantenimiento deseado, así mismo, es antieconómico esperar que el PSI llegue hasta niveles de reconstrucción del pavimento.

Paralelo a lo anterior, al comparar los costos de un mantenimiento deseado, absoluto o una intervención de reconstrucción, se observa que es mucho más económico realizar mantenimiento deseado, además que los niveles de PSI en este tipo de tratamiento al pavimento son mucho más altos que en los otros tipos de intervención planteados.

Debido al análisis económico se establece que para el momento de la toma de decisiones respecto a los recursos (optando por propios o financiados) con los cuales se van a realizar dichas intervenciones, deben ser valorados de acuerdo con el capital propio dado que el interés actual para un préstamo incrementa el costo del mantenimiento de la vía. Sumado a lo anterior, para determinar cuál es la mejor opción para llevar a cabo la inversión, se deben tener en cuenta como criterios de elección que el uso de capital propio supone un ahorro respecto a los intereses de financiamiento, sin embargo, al no contar con los recursos propios para el desarrollo del proyecto vial es necesario optar por el préstamo de recursos monetarios.

Por todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la mejor forma para realizar intervenciones de mantenimiento en la malla vial debe ser en el escenario ideal deseado, y debe existir una relación de punto medio entre el número de intervenciones que se obtengan en el método de la ASSHTO 93 y la evaluación financiera.

## RECOMENDACIONES

Se recomiendan estudios de periodos de proyecto con umbrales de más de 40 años, con el fin de diversificar las opciones de gestión de pavimentos, lo cual puede implicar un avance en la proyección de los tipos de mantenimientos que requieren las vías.

Por otro lado es necesario cuantificar cual sería el impacto en la calidad de vida de las personas que hagan uso de estos corredores viales, mediante la evaluación de su percepción frente al uso de la vía, contrastando un alto nivel de PSI respecto a un bajo nivel de PSI. De esta manera se puede vislumbrar la importancia de tener vías en buen estado y altos niveles de satisfacción ciudadana.

Es necesario crear una herramienta en la cual se tengan datos actualizados y de valía respecto al estado de la malla vial para la administración de pavimentos en la ciudad, entre los cuales se destacan: Índice de quiebre, costos de mantenimiento, costo de intervenciones, PSI y módulos de elasticidad. Dicha herramienta debe ser alimentada constantemente con datos actualizados, y además debe ser de fácil acceso para la ciudadanía y entes investigadores que quieran aportar a esta problemática.

Por último, es importante tener en cuenta que hay un cúmulo de factores que interactúan en el territorio afectando el análisis de una vía, tanto para su construcción como para el mantenimiento de la misma. Estos factores de tipo social, geográfico, ambiental (relacionado directamente con la capacidad de carga) y demás, se evidencian como omisiones dentro de los cálculos dado que los datos iniciales provenientes del IDU, discriminan las vías en tres grandes grupos indistintamente de las características propias de los tramos, para lo cual, se recomienda profundizar en los diagnósticos de las vías, identificando singularidades en relación con los factores en mención para lograr un análisis más específico de las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abaza, K. A. (2002). Optimum Flexible Pavement Life-Cycle Analysis Model. *Journal of Transportation Engineering*, 128(6), 542-549. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:6\(542\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(542))
2. Gupta, A., Kumar, P., & Rastogi, R. (2013). Critical review of flexible pavement performance models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), 142-148. <http://doi.org/10.1007/s12205-014-0255-2>
3. Han, D., & Do, M. (2014). Life Cycle Cost Analysis on pavement inspection intervals considering maintenance work delay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-11. <http://doi.org/10.1007/s12205-014-1229-0>
4. (Rico Rodríguez, 2005)Ríos, J., & Martínez, I. (2009). Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá. *Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada*.
5. THIEL, C., STENGEL, T., & GEHLEN, C. (2014). Life cycle assessment (LCA) of road pavement materials. *Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, 368.
6. Villamizar Mansilla, M. P., & Balen Valenzuela, C. (2005). Estudio y evaluación financiera de las acciones de mantenimiento desarrolladas en los principales corredores viales en pavimento flexible de Bogotá D.C. Incluidos en el programa «Distritos de mantenimiento». Recuperado a partir de <http://dspace.uniandes.edu.co:9090/xmlui/handle/1992/714>
7. Andújar, J. R. (2006). *Introducción a la economía. Microeconomía*. Madrid, España: Reverté S.A.
8. Arias, I. D. (2011). *Estudio en los procedimientos de calidad en la administración de pavimentos en algunos tramos de vías de la localidad de Kennedy en la ciudad de Bogotá, para optimizar su mantenimiento y rehabilitación* .

9. Cervantes, J. G. (2002). *Evaluación económica y financiera. Proyectos y portafolios de inversión bajo condiciones de riesgo*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM.
10. Corredor, G. (2010). *Maestría en vías terrestres. Módulo III. Diseño de pavimentos I*. Sección para Delegados de la Cámara de Construcción.
11. Darter, M. (1991). Evaluación de la guía AASHTO 1986 para el diseño de pavimentos. *Revista Ingeniería de construcción* , 52.
12. Harmsen, T. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado (4ta. Edición)*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial.
13. IDU. (2002). *Evaluación y rehabilitación de vías en la localidad de Santa fe, en Bogotá D.C.* Bogotá: Unión Temporal de Vías Santa fe .
14. Instituto de Desarrollo Urbano - IDU. (2016). <https://www.idu.gov.co>.
15. Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2012). *Información general de la malla vial de Bogotá*. Bogotá D.C.
16. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). (1973). *Guía para la presentación de proyectos*. México: Siglo veintiuno editores.
17. Jugo, P. A. (2010). *Diseño de pavimentos para vías de bajo volúmen*.
18. Pontificia Universidad Javeriana. (1964). *Teoría y práctica de diseño y construcción de pavimentos* . Bogotá, Colombia: Facultad de ingeniería.
19. Prada Bernal, L. M. (1998). *Lecturas críticas de administración*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
20. RAE. (24 de 4 de 2016). *Real Academia Española*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=JAQijnd>

21. Rico Rodríguez, A. (2005). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. *Pavimentos flexibles*, 99.
22. Romeva, C. R. (2002). Diseño Concurrente. En C. R. Romeva, *Ciclo de Vida y Recursos Asociados* (pág. 20). Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
23. Silva, L. H. (2013). *Análisis de la estructura y del diseño geométrico de la vía Piatúa 4 de Agosto, hasta San Juan de Piatúa del Cantón SANTA CLARA, provincia de PASTAZA para mejorar el tráfico vehicular y fomentar la producción agrícola*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_102\\_181\\_62\\_936.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf)
24. Universidad de Piura. (2008). *Biblioteca UDEP*. Obtenido de [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_102\\_181\\_62\\_936.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf)

## ANEXOS