

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE
PAVIMENTO FLEXIBLE CON BASE EN LOS COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DE MANTENIMIENTO**

**IRENE ELIZABETH ABRIL RODRÍGUEZ
RAÚL ALEXANDER VARÓN PEÑA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE
PAVIMENTO FLEXIBLE CON BASE EN LOS COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DE MANTENIMIENTO**

**IRENE ELIZABETH ABRIL RODRÍGUEZ
RAÚL ALEXANDER VARÓN PEÑA**

**Trabajo de grado modalidad investigación para optar por el título de
Ingeniero Civil**

Director

**EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ingeniero Civil, M. Sc.**

Co-Director

**OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 1.1 MÉTODOS DE DISEÑOS ANALÍTICOS, MECANICISTAS O RACIONALES. 16 | |
| 1.2 MÉTODO DE DISEÑO EMPÍRICO | 16 |
| 1.2.1 DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE MÉTODO AASHTO-93 | 17 |
| 1.3 CAPAS DE REFUERZO | 18 |
| 1.4 MEDIDA DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL | 19 |
| 1.4.1 CORRELACIÓN DE MERLÍN: | 19 |
| 1.4.2 CORRELACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE DE ILINOIS: 19 | |
| 1.5 EL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES..... | 20 |
| 1.6 MANTENIMIENTO DE PAVIMENTO FLEXIBLE | 21 |
| 1.6.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO: | 21 |
| 1.6.2 MANTENIMIENTO PERIÓDICO: | 22 |
| 1.7 TASA DE DESCUENTO | 23 |
| 2. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO | 24 |
| 3. APLICACIÓN A UN CASO PARTICULAR | 27 |
| 3.1 VARIABLES DE DISEÑO | 27 |
| 3.1.1 LA CARGA DE TRÁNSITO:..... | 27 |
| 3.1.2 CAPACIDAD DE LA SUBRASANTE: | 30 |
| 3.2 DIMENSIONAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTO..... | 30 |
| 3.3 DIMENSIONAMIENTO DE CAPA DE REFUERZO | 34 |
| 3.4 MANTENIMIENTO RUTINARIO HDM-4..... | 34 |
| 3.5 EVALUACIÓN DE COSTOS..... | 35 |
| 3.5.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN:..... | 35 |

| | |
|--|----|
| 3.5.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO MODELO HDM-4: | 36 |
| 3.5.3 COSTOS DE MANTENIMIENTO POR CAPAS DE REFUERZO: | 37 |
| 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 40 |
| 5. CONCLUSIONES | 42 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 43 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 46 |
| ANEXOS..... | 49 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Curva de deterioro pavimento flexible..... | 21 |
| Figura 2. Intercambiador vial Mesón de los Búcaros. | 28 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Propiedades de las capas de la estructura de pavimento..... | 30 |
| Tabla 2. Parámetros de diseño..... | 31 |
| Tabla 3. Precio unitario del material que compone la estructura. . | 35 |
| Tabla 4. Costo unitario de actividad de mantenimiento. | 36 |
| Tabla 5. Costo unitario de capa de refuerzo. | 37 |
| Tabla 6. Costo total de construcción y de mantenimiento..... | 40 |
| Tabla 7. Costo promedio anual por kilómetro. | 40 |

LISTA GRAFICAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Grafica 1. | Factor de condición en función de la vida residual. | 18 |
| Grafica 2. | Influencia de técnicas de mantenimiento en la índice de serviciabilidad | 22 |
| Grafica 3. | Relacion entre IRI y PSI..... | 25 |
| Grafica 4. | Evolución anual de ejes equivalentes, sentido sur- norte. | 29 |
| Grafica 5. | Evolución anual de ejes equivalentes, sentido Oeste-Este..... | 30 |
| Grafica 6. | Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°1 | 31 |
| Grafica 7. | Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°2..... | 32 |
| Grafica 8. | Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°3..... | 32 |
| Grafica 9. | Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°4..... | 32 |
| Grafica 10. | Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°5..... | 33 |
| Grafica 11. | Espesores de las capas de refuerzo..... | 34 |
| Grafica 12. | Costo total de construcción..... | 36 |
| Grafica 13. | Costos de mantenimiento rutinario, modelo HDM-4 | 37 |
| Grafica 14. | Costo total capas de refuerzo | 38 |
| Grafica 15. | Costo total de mantenimiento. | 38 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|-----------------------------------|----|
| ANEXO A. APUS | CD |
| ANEXO B. SENTIDO OESTE-ESTE | CD |
| ANEXO C. SENTIDO SUR-NORTE..... | 49 |

RESUMEN

TÍTULO:

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE CON BASE EN LOS COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y DE MANTENIMIENTO.*

AUTORES:

**IRENE ELIZABETH ABRIL RODRÍGUEZ
RAÚL ALEXANDER VARÓN PEÑA**.**

PALABRAS CLAVE: Pavimento flexible, vida útil, mantenimiento, AASHTO-93, HDM-4.

DESCRIPCIÓN

El objetivo de la realización de este artículo consiste en proponer una metodología de diseño de pavimento flexible que considere los costos de construcción y de mantenimiento, para un tiempo de análisis de 40 años, se realizó un aforo vehicular en el Intercambiador vial del Mesón de los Búcaros que permitió hallar la carga de tránsito y así diseñar cinco alternativas de estructura de pavimento, con periodo de diseño de 15 años, aplicando el método de diseño American Association of State Highway and Transportation Officials de año 93, para cada uno de los corredores viales en sentido sur-norte y oeste-este, al llegar al último año de su periodo de diseño se implementó una capa de refuerzo de espesor variable, para garantizar que cada una de las diferentes alternativas propuestas cumpla para los 40 años de vida útil, usando el método de diseño AASHTO-93. Con la aplicación del software High Development & Management - 4 se propone un modelo de deterioro que contiene actividades de mantenimiento rutinario para calcular el costo de mantenimiento durante el periodo de análisis de la estructura, teniendo en cuenta la aplicación de las capas de refuerzo. Seguido de esto se calcularon los costos de construcción y de mantenimiento para cada alternativa, se realizó un análisis del costo total durante el tiempo de vida útil para así elegir la alternativa más factible de ejecutar en términos monetarios.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: MSc. Eduardo Alberto Castañeda, Ingeniero Civil. Co-Director: Omar Giovanni Sánchez, Ingeniero Civil.

ABSTRACT

TITLE:

METHODOLOGY PROPOSED DESIGN OF A STRUCTURE OF FLEXIBLE PAVEMENT COSTS BASED ON CONSTRUCTION AND MAINTENANCE

KEYWORDS:

Flexible Pavement, useful life, maintenance, AASHTO-93, HDM-4

The main objective of this article is to propose a methodology for flexible pavement design that takes in account building and maintenance costs, for a time period of 40 years. It has been measured the vehicular capacity in the interchange road called "Mesón de los Búcaros", that allowed to find the vehicular load, and to design five alternatives of pavement structure, with design period of fifteen years, using the design method American Association of State Highway and Transportation Officials of old 93, for each one of the corridors North-south and East-West.

In the last year of design, it was applied a reinforcing layer with variable thickness, to make sure that each one of the alternatives reaches forty years of useful life, using the design method AASHTO-93.

Using the software Highway Development & Management - 4, it is proposed an impairment model that contains routine maintenance activities, to calculate the maintaining cost during the structure analysis period, taking in account the application of reinforcing layers. After this, building and maintaining costs were calculated for each alternative, and it was developed a total cost analysis during the useful life, so it could be possible to choose the most feasible alternative to execute according to monetary terms.

Trabajo de Grado.

**Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: MSc. Eduardo Alberto Castañeda, Ingeniero Civil. Co-Director: Omar Giovanni Sánchez, Ingeniero Civil.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de una vía, una de las variables más importantes es el tránsito, ya que el volumen, el número y el peso de los vehículos son factores determinantes en el diseño de la estructura de pavimento [1]. Para realizar el cálculo del dimensionamiento de una estructura de pavimento es importante conocer las cargas por eje, la repetición de las cargas de tránsito y las deformaciones acumuladas sobre el pavimento en el carril de diseño. [2] Para un pavimento flexible las deformaciones se producen en cada una de las capas que conforman la estructura. [3]

Las actividades de mantenimiento rutinario aplicado a una estructura de pavimento contribuyen a la durabilidad, seguridad y comodidad de los usuarios. Para determinar y corregir los daños que se puedan presentar en un pavimento, es necesario realizar diagnóstico y corrección de los daños presentes, como actividad principal. [4] Para compensar los efectos del clima, desgaste y daños provocados por el tránsito, así como el deterioro debido a efectos de envejecimiento, fallas en los materiales, construcción y diseño, es importante la aplicación de programas de mantenimiento. Para aplicar una técnica de mantenimiento en el pavimento es necesario conocer el tipo de falla en la superficie y en cada una de sus capas inferiores. [5]

En este artículo propone una metodología de diseño para una estructura de pavimento flexible teniendo en cuenta los costos de construcción y mantenimiento, durante un periodo de análisis de 40 años, con periodo de diseño inicial de 15 años y aplicación de capa de refuerzo al final del periodo de diseño de tal manera que no sea necesario realizar otra intervención de recarpeteo dentro de los 40 años de análisis, usando cinco alternativas de construcción de la estructura de pavimento aplicada a dos sentidos de flujo vehicular, en un caso particular en el

Intercambiador vial del Mesón de los Búcaros y usando el software HDM-4 para calcular el costo de mantenimiento rutinario de la estructura durante el tiempo de vida útil, así realizar un análisis económico que permita conocer el costo por año de cada alternativa, según la propuesta de metodología de diseño.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Existen diferentes metodologías de diseño en pavimentos flexibles:

1.1 MÉTODOS DE DISEÑOS ANALÍTICOS, MECANICISTAS O RACIONALES.

Los métodos analíticos tienen en cuenta como el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento, los cuales influyen en el comportamiento del mismo. Para el cálculo del esfuerzo y las deformaciones se da uso de teorías como la elástica y que con la ayuda de programas de computador. En este programa se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales como: el módulo elástico y la relación de Poisson; el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación, al tener estos valores calculados se comparan con los valores de esfuerzo y deformación admisible del pavimento para la vida útil proyectada y con un procedimiento de ensayo y error, es decir aumentando o disminuyendo los espesores de las capas, se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento. [3]

En este grupo se encuentran el método de Shell y el método desarrollado por CSIR en Sudáfrica, estos dos métodos tienen una secuencia similar de análisis, utilizan para el diseño las tensiones y deformaciones que se originan en posiciones críticas dentro del paquete estructural, producto de las sollicitaciones de tránsito existentes durante el periodo de diseño. [15]

1.2 MÉTODO DE DISEÑO EMPÍRICO

En las metodologías de diseño de pavimentos flexibles de carácter empírico, se correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. En el dimensionamiento de pavimentos los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales, el tipo de suelo de fundación y la calidad de los materiales.

En este grupo el método más reconocido es el de American Association of State Highway and Transportation Officials (AAHSTO) desarrollado a partir del ensayo vial AASHO. [3]

1.2.1 Diseño de pavimento flexible método AASHTO-93

Los espesores de las capas de pavimento se determinan con base en el número estructural (SN) que es una calificación de la capacidad, para reducir los esfuerzos que transmite el tránsito en la superficie del pavimento de manera que la capa de soporte los pueda resistir sin deformarse excesivamente.

$$\text{Log}(w) = M + N - X + 2,32L - 8,07 \quad (1)$$

$$M = Z_R * S_o \quad (2)$$

$$N = 9,36 * \text{Log}(SN + 1) \quad (3)$$

$$X = 0,20 * \frac{\text{Log} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} \quad (4)$$

$$L = \text{Log}(M_R) \quad (5)$$

Dónde:

W= Número de aplicaciones de ejes simples con carga de 8,2 toneladas.

So=Desviación estándar de las variables.

SN=Número estructural en pulgadas.

Δ PSI=Pérdida de la serviciabilidad prevista en el diseño.

M_R=Módulo resiliente de la capa que soporta la estructura, en psi.

Z_R=Factor desviación estándar normal.

1.3 CAPAS DE REFUERZO

Los refuerzos sirven para corregir fallas estructurales o funcionales las cuales no han logrado desarrollar un alto grado de deterioro en la estructura de pavimento, aplicando el método de diseño AASTHO-93.

Para este proceso es necesario conocer la vida residual de la estructura en el año 15, esta se calculó así:

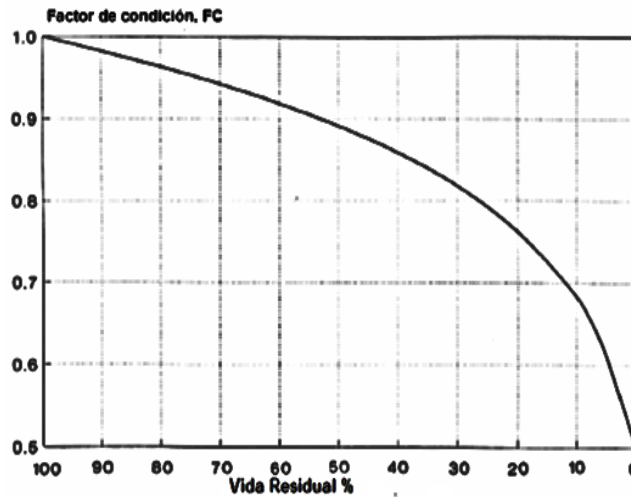
$$VR = \left(1 - \frac{\text{Tránsito soportado}}{\text{Tránsito de diseño}} \right) * 100\% \quad (6)$$

Al aplicar la capa de refuerzo se calculó el número estructural del refuerzo para así conocer el número de ejes equivalentes que soportará a partir de ese momento, dentro del periodo de análisis.

$$SN_{\text{refuerzo}} = SN_{\text{requiere}} - SN_{\text{existente}} \quad (7)$$

Para calcular el SN existente se procede a multiplicar el SN original de la estructura por un factor que es función de la vida residual.

Grafica 1. Factor de condición en función de la vida residual.



Fuente: Guía de AASHTO-93.

Al conocer el número de ejes equivalentes que soportará la estructura con el refuerzo se halla el número de años, en el cual también se analiza si la estructura requiere de la aplicación de otra capa de refuerzo.

1.4 MEDIDA DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL

1.4.1 Correlación de Merlín:

Mediante el método de medición de Merlin se puede obtener una correlación entre el índice de rugosidad (IRI) y el índice de serviciabilidad (PSI) presentes en una estructura de pavimento flexible durante el tiempo de servicio de esta.

Ecuación de Merlin:

$$IRI = 5.5 \ln\left(\frac{5}{PSI}\right) \quad (8)$$

Dónde:

IRI: Índice de Rugosidad Internacional, en m/Km

PSI: Índice de serviciabilidad. [14]

1.4.2 Correlación del Departamento de transporte de Illinois:

Para correlacionar el índice de serviciabilidad y el IRI, índice de rugosidad, se utiliza la siguiente fórmula:

$$PSI = 5xe^{-0,0041xIRI} \quad (9)$$

Dónde:

PSI: Índice de serviciabilidad.

IRI: Índice de Rugosidad Internacional, en Pulgadas por milla.

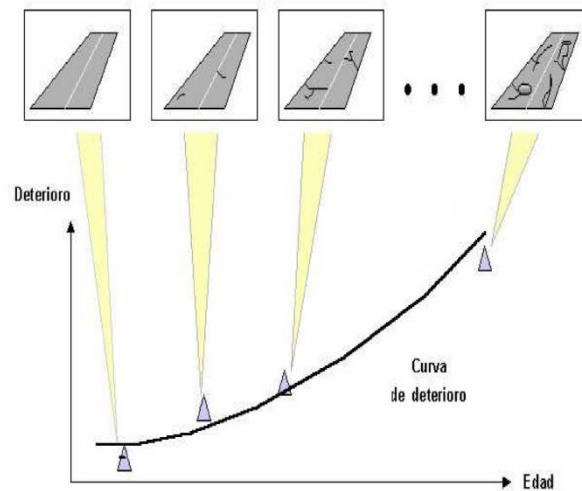
1.5 EL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

El deterioro de una estructura de pavimento flexible puede generar los siguientes tipos de falla:

Falla Estructural: Se relaciona a la fatiga de la estructura.

Falla funcional: Se conoce como la insuficiencia del pavimento para brindar una superficie que soporte un tránsito confortable y seguro.

Figura 1. Curva de deterioro pavimento flexible



Fuente Mario Rafael Becerra.

Las técnicas aplicadas para el mantenimiento de los pavimentos de concreto asfáltico, depende de la falla en la superficie de rodamiento y/o sus capas inferiores.

1.6 MANTENIMIENTO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

El mantenimiento de pavimentos tiene como función preservar, reparar y restaurar una vía y conservarla en condiciones de uso seguro. [6]

Los programas de mantenimiento están diseñados para compensar los efectos del clima, crecimientos orgánicos, desgaste y daños provocados por el tránsito, así como el deterioro debido a los efectos de envejecimiento, fallas de los materiales, construcción y diseño. [11]

1.6.1 Mantenimiento Preventivo:

Se origina antes del deterioro de las características estructurales de la vía.

De acuerdo a la Frecuencia se clasifica en:

Mantenimiento Rutinario: Son actividades ejecutadas con lapsos de tiempo de un año o menos.

Técnicas de mantenimiento rutinario:

Bacheo: Es una reparación de áreas menores dañadas, que tiene como finalidad reponer una superficie de rodadura lisa.

Sellos de Grieta: Con esta acción se restringe el ingreso de agua superficial y otras sustancias que puedan afectar o dañar la estructura del pavimento.

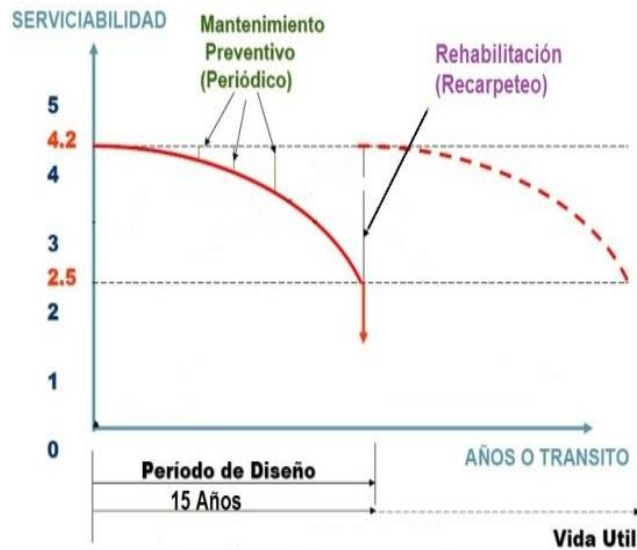
1.6.2 Mantenimiento Periódico:

Son actividades normales de mantenimiento, realizadas en lapso de tiempo mayor de un año; estas acciones son tanto preventivas como correctivas.

Técnicas de mantenimiento periódico:

Recarpeteos: El recarpeteo consiste en la colocación de una nueva capa de rodadura sobre la estructura de pavimento existente, con el fin de devolverle condiciones similares al diseño original de la carretera para que pueda soportar el volumen de tráfico. [11].

Grafica 2. *Influencia de técnicas de mantenimiento en la índice de serviciabilidad*



Fuente: Fuente Mario Rafael Becerra

1.7 TASA DE DESCUENTO

Es el valor de la tasa porcentual a la cual se descuentan anualmente los flujos de costos. La tasa de descuento es uno de los parámetros más importantes en la evaluación socioeconómica de proyectos, por ser el factor que permite comparar los costos económicos del proyecto en diferentes momentos del tiempo. [16].

El Ministerio de Transporte de Colombia cita valores para la tasa de descuento entre el 10% y 15%. Para el desarrollo de la metodología se consideró una tasa de descuento del 10%.

2. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología de diseño del pavimento flexible con base en los costos de construcción y de mantenimiento consiste en plantear diferentes alternativas de la composición de la estructura de pavimento flexible sin variar las propiedades del tipo de material. El tipo de pavimento a utilizar es el que está compuesto con base granular ya que es el más usado en el país.

Cada estructura estará conformada por las siguientes capas:

Dónde:

MDC-25: Mezcla densa en Caliente – 25

MDC-19: Mezcla densa en caliente – 19

BG: Base Granular

SBG: Subbase Granular

SR: Subrasante

1. MDC-25 + BG + SBG + SR
2. MDC-25 + BG + SR
3. MDC-25 + MDC-19 + BG +SBG+ SR
4. MDC-25 + MDC-19 + BG+SR
5. MDC-25 + MDC-19 + SR

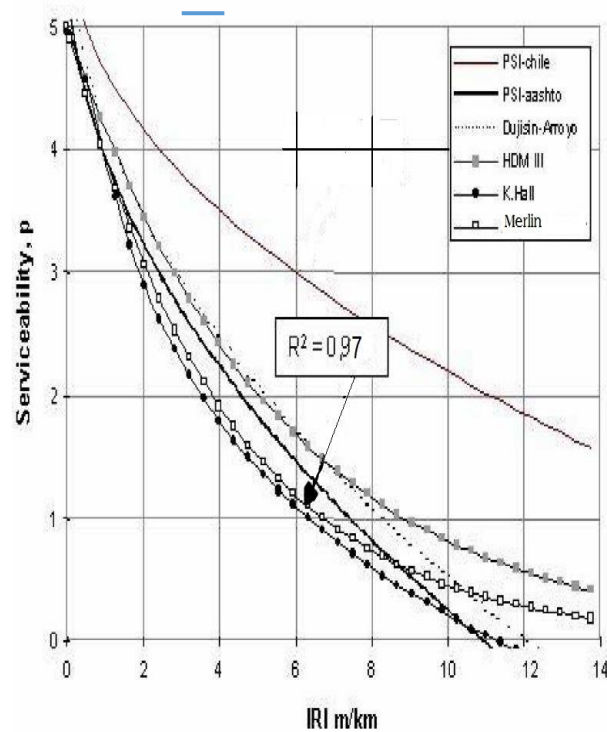
Para el dimensionamiento de cada estructura se aplicará el método AASHTO-93, para un periodo de diseño estructural que corresponde a 15 años.

Como método de mantenimiento se aplicará una capa de refuerzo de espesor variable al final del periodo de diseño de cada estructura de pavimento flexible, mediante el uso del método AASHTO-93. Cada estructura se analizará durante un

periodo de 40 años, es necesario conocer el espesor de la capa de refuerzo para garantizar que al finalizar el periodo de análisis las diferentes estructuras de pavimento flexible tengan un índice de serviciabilidad mayor a 2.5 m/Km.

En el *software* HDM-4 se crea un modelo de mantenimiento rutinario que garantizará que el índice de serviciabilidad no sea inferior de 2.5, usando la correlación de Merlin ver figura 4, teniendo en cuenta el valor del índice de rugosidad que se lleva como un valor al *software* HDM-4.

Grafica 3. Relacion entre IRI y PSI



Fuente: Analysis of pavement serviceability for the AASHTO Desing Method

Al final se calculará el costo de construcción y mantenimiento de cada una de las estructuras propuestas; para elegir la alternativa más viable de implementar en términos económicos.

3. APLICACIÓN A UN CASO PARTICULAR

Para explicar más detalladamente la metodología se escogió un proyecto en particular. El proyecto comprende la construcción de una intersección que se encuentra ubicada en el sector conocido como "El Mesón de los Búcaros", un tradicional punto de encuentro de la ciudad, en el cual confluyen la Carrera 27, la Avenida Quebrada Seca y el Bulevar Bolívar. Localizado a un costado del centro de la ciudad, es un sitio de tránsito entre el Oriente, la Costa Atlántica y el Centro país, convirtiéndolo en una puerta urbana, y un lugar con potencial simbólico para la ciudad.

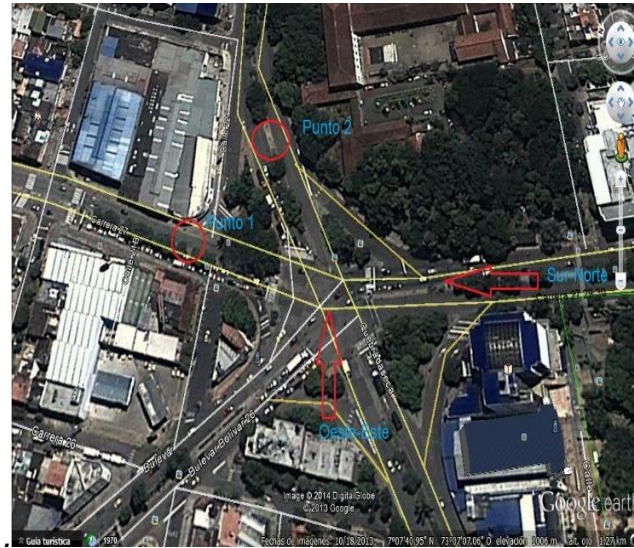
3.1 VARIABLES DE DISEÑO

A continuación se muestran los valores que intervienen en el proceso de diseño de una estructura de pavimento flexible.

3.1.1 La carga de tránsito:

Para la estimación del número de ejes equivalentes se realizó un conteo en sentido sur-norte y oeste-este, corredores viales pertenecientes al Mesón de los Búcaros, dicho conteo se ejecutó en los puntos que aparecen en la siguiente figura.

Figura 2. Intercambiador vial Mesón de los Búcaros.



Fuente Google Earth

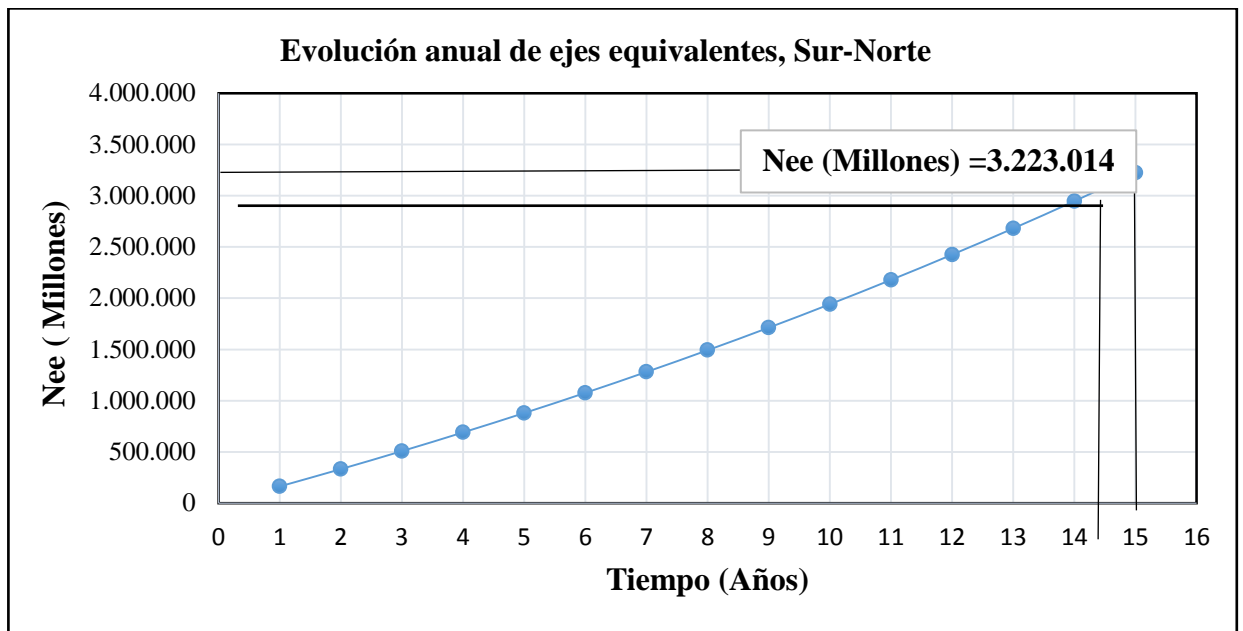
Durante tres días representativos del tránsito en la semana en los siguientes horarios:

- 6:00 – 8:00 am
- 11:30 – 1:30 pm
- 6:00 – 8:00 pm
- 11:30 – 1:30 am

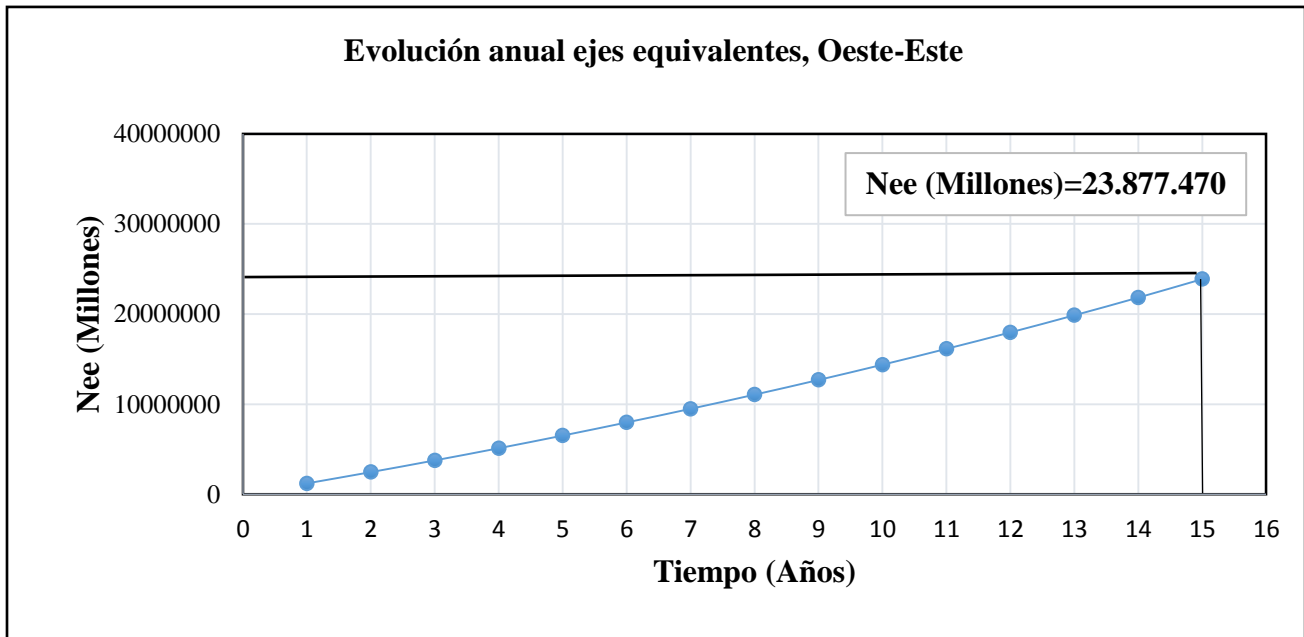
El conteo se realizó clasificando los vehículos de la siguiente manera: Bus, Camión de dos ejes pequeño (C2P), camión de dos ejes grandes (C2G), camión de tres ejes (C3), camión de cuatro ejes (C4), camión de cinco ejes (C5) y camión con más de cinco ejes (>C5). Con el total de vehículos se procede a calcular el tránsito promedio diario (TPD), teniendo en cuenta que se halló dividiendo el total de vehículos aforados en el número de días de duración del aforo. Se definió el periodo de diseño de 15 años. . La tasa de crecimiento es de 3,84 %, según el Inventario Parcial Vial de cinco intersecciones de Bucaramanga, UIS [12]. Se estableció el factor de daño por vehículo como se muestra en la tabla 2, propuesto por la Guía Metodológica

para diseño de rehabilitación de pavimentos flexibles de carreteras. Dado que los vehículos livianos no contribuyen significativamente al daño estructural de las capas del pavimento, se consideran solo los vehículos pesados para estimar la cantidad de número de ejes equivalentes que afectarán el camino durante su vida de servicio. A continuación se puede apreciar la evolución de ejes equivalentes en cada uno de los corredores viales.

Grafica 4. Evolución anual de ejes equivalentes, sentido sur- norte.



Grafica 5. Evolución anual de ejes equivalentes, sentido Oeste-Este.



3.1.2 Capacidad de la subrasante:

Para caracterizar la capacidad mecánica del suelo de subrasante se practicaron ensayos de CBR en el área de influencia del proyecto, Se estableció un valor de 3% para el diseño del proyecto.

3.2 DIMENSIONAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTO

Para cada una de las capas que conforma la estructura de pavimento, se asumieron las siguientes propiedades. [7]

Tabla 1. Propiedades de las capas de la estructura de pavimento.

| CAPA | Mr [PSI] | a | M |
|--------|----------|------|---|
| MDC-19 | 550913 | 0,44 | - |
| MDC-25 | 581405 | 0,44 | - |
| BG | 28000 | 0,13 | 1 |
| SBG | 15000 | 0,11 | 1 |
| SR | 4500 | - | - |

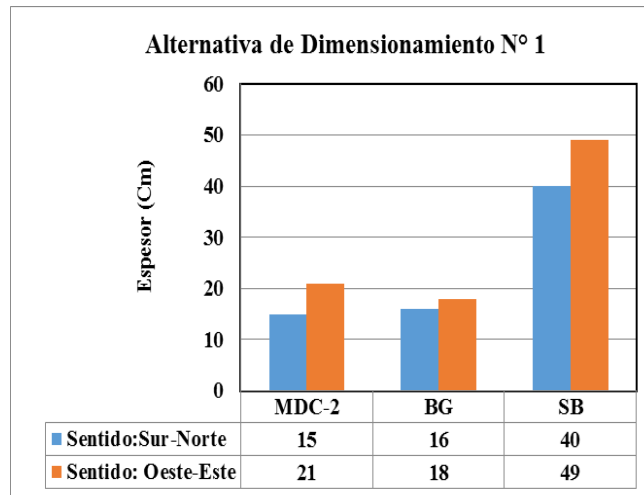
Para aplicar el método AASHTO-93 se definieron los siguientes parámetros para los corredores viales Sur-Norte y Oeste-Este:

Tabla 2. Parámetros de diseño.

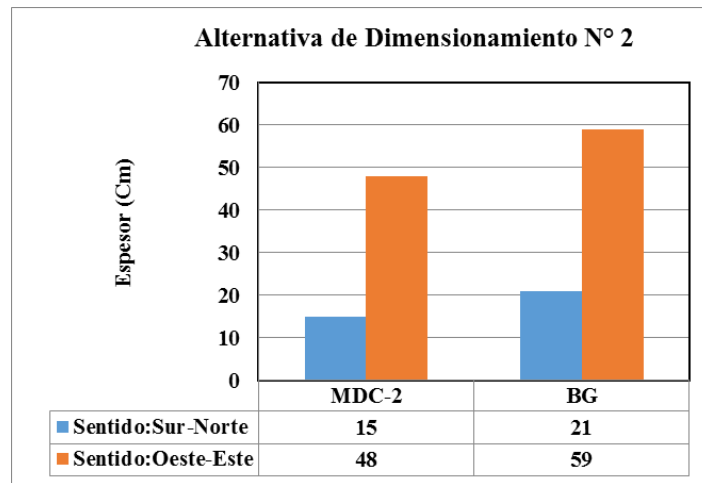
| Descripción | Valor |
|-------------------|-------|
| Confiabilidad [%] | 90 |
| Zr | -1,28 |
| So | 0,45 |
| PSIo | 4,2 |
| PSIt | 2,5 |
| Δ PSI | 1,7 |

Aplicando el método AASHTO-93 las dimensiones de las capas fueron las siguientes:

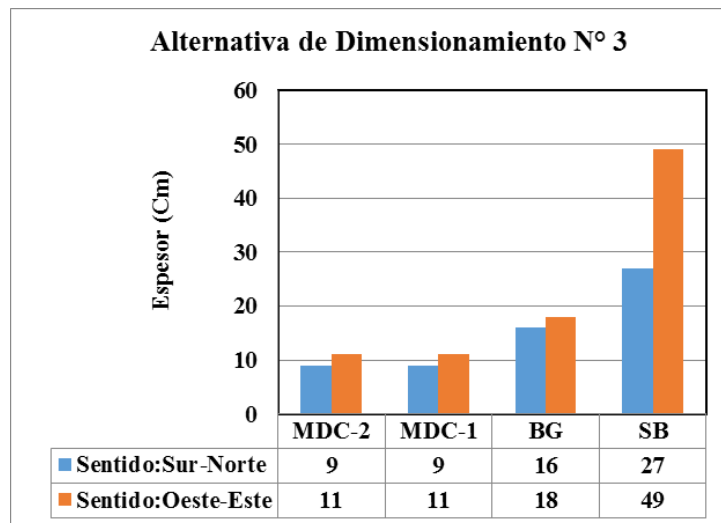
Grafica 6. Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°1



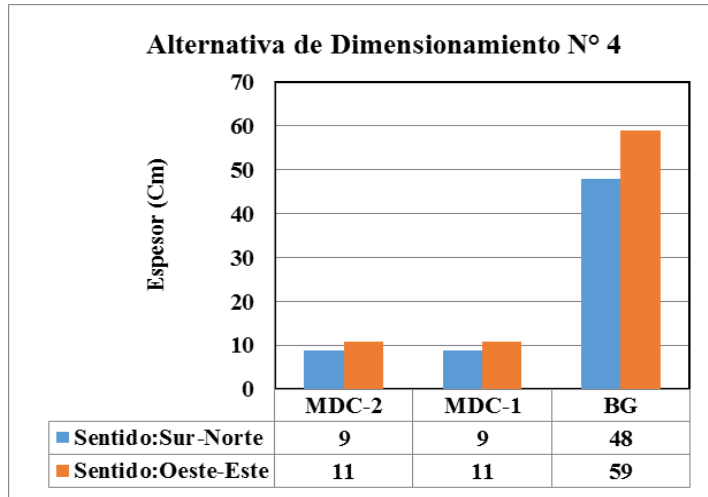
Grafica 7. Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°2



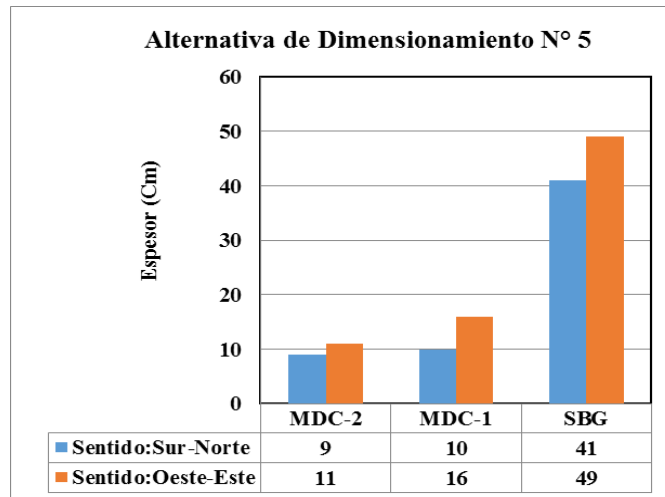
Grafica 8. Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°3



Grafica 9. Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°4



Grafica 10. Espesores de la alternativa de dimensionamiento N°5

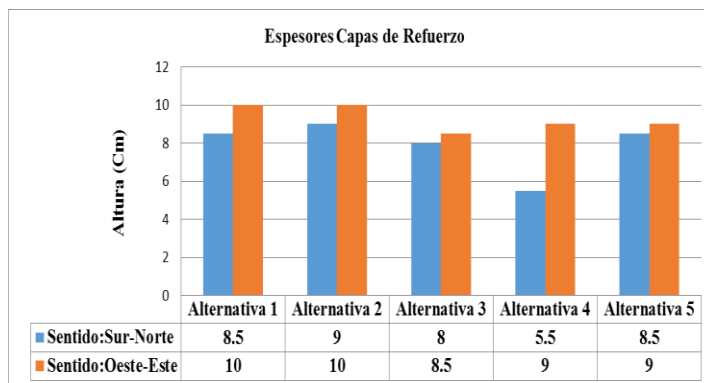


3.3 DIMENSIONAMIENTO DE CAPA DE REFUERZO

Con base en el método AASHTO-93, se aplicó una capa de refuerzo de espesor variable a los 15 años de servicio de la estructura, teniendo en cuenta el número de ejes equivalentes que soportara las diferentes estructuras de pavimento de tal manera que no sea necesario realizar otra intervención de recarpeteo durante el periodo de análisis.

Se obtuvo los siguientes resultados:

Grafica 11. Espesores de las capas de refuerzo



3.4 MANTENIMIENTO RUTINARIO HDM-4

En esta etapa se implementó la aplicación del *software* HDM-4 el cual requiere de ciertas configuraciones iniciales que son fundamentales para el buen desarrollo de los resultados; entre las cuales se destacan las siguientes:

- Patrón de flujo de tránsito.
- Tipo de flujo de velocidad.

- Zona climática.
- Conversión monetaria.
- Flota vehicular.
- Trafico promedio anual.
- Tasa de crecimiento vehicular.
- Longitud y ancho de los tramos de vía.
- Clase de vía.
- Categoría y clase de la superficie.
- Espesor y Modulo Resiliente de las capas de todas las alternativas.
- CBR de la subrasante.
- IRI inicial y final.
- Tipo de mantenimiento.
- Intervenciones por cada tipo de mantenimiento.
- Costos unitarios de las actividades de mantenimiento.
- Valor tasa de descuento.

3.5 EVALUACIÓN DE COSTOS

A continuación se muestran los valores producidos por la construcción, capas de refuerzo e implementación de técnica de mantenimiento a cada una de las diferentes alternativas propuestas para los dos corredores viales estudiados.

3.5.1 Costos de Construcción:

Las diferentes alternativas propuestas tendrán una longitud de 1000 metros y un ancho de calzada de 7 metros.

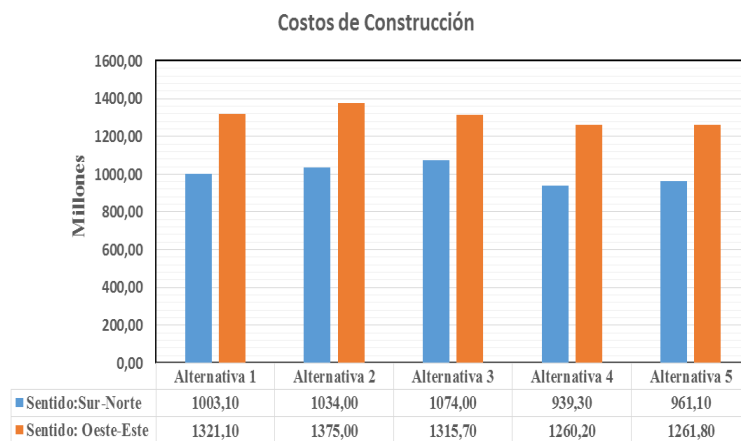
Los calculos de construcción de cada alternativa de pavimento flexible, estan directamente relacionados con el analisis de precios unitarios para cada material que compone la estructura.

Tabla 3. Precio unitario del material que compone la estructura. .

| Capa | Valor Unitario | Unidad |
|------------------|----------------|--------|
| MDC-19 | \$ 580.139 | m3 |
| MDC-25 | \$ 450.368 | m3 |
| Base Granular | \$ 126.442 | m3 |
| Subbase Granular | \$ 90.099 | m3 |

Los costos de construcción, en valor presente neto, son los siguientes:

Grafica 12. Costo total de construcción



3.5.2 Costos de Mantenimiento Modelo HDM-4:

Mediante el uso del *software* HDM-4 se plantea un modelo con la aplicación de sello de fisuras y bacheo teniendo en cuenta los siguientes costos unitarios.

Tabla 4. Costo unitario de actividad de mantenimiento.

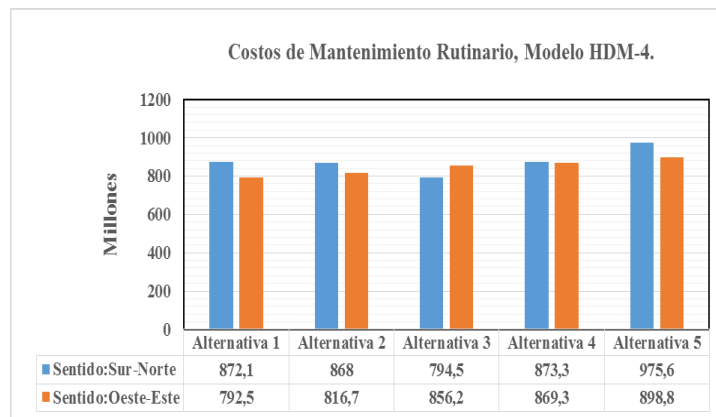
| Actividad | Unidad de Medida | Costo por Unidad de Medida |
|------------------|------------------|----------------------------|
| MDC para Bacheo | M3 | \$ 625.055,00 |
| Sello de grietas | ML | \$ 6.818,00 |

Con la implementación del *software* se estimó el costo de mantenimiento rutinario que se empieza a aplicar cuando su PSI final es de 2,5 y su valor de IRI es igual a

3.8 [m/km], mediante la correlación de Merlin. Esto aplicado para cada alternativa propuesta en cada uno de los corredores viales, durante el periodo de análisis, con el fin de estimar el costo del mantenimiento rutinario, antes de la aplicación de la capa de refuerzo y después de esta, durante el periodo de estudio.

Al aplicar el modelo de deterioro a las diferentes alternativas de dimensionamiento en cada corredor vial, el software HDM-4 arrojó los siguientes resultados, los cuales ya tienen incluido la tasa de descuento.

Grafica 13. Costos de mantenimiento rutinario, modelo HDM-4



3.5.3 Costos de Mantenimiento por capas de Refuerzo:

El espesor de la capa se estableció variable de tal manera que logre garantizar que las diferentes estructuras lleguen hasta el final de su periodo de análisis con un PSI=2,5 realizando un solo recarpeteo,

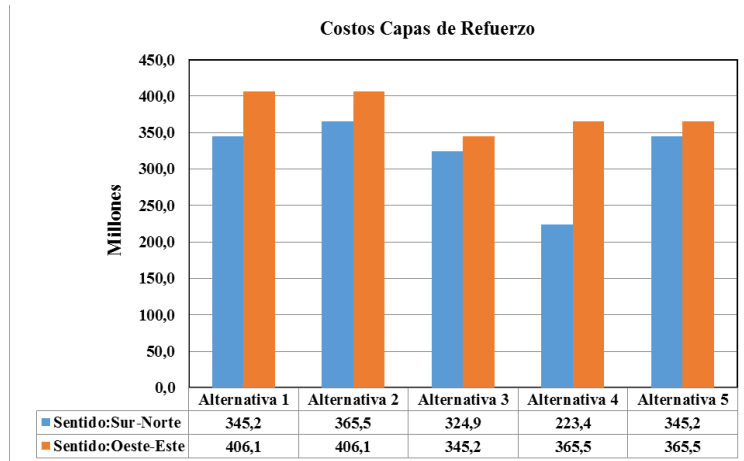
El análisis de precios unitarios, y los costos de construcción para la actividad mencionada son los siguientes.

Tabla 5. Costo unitario de capa de refuerzo.

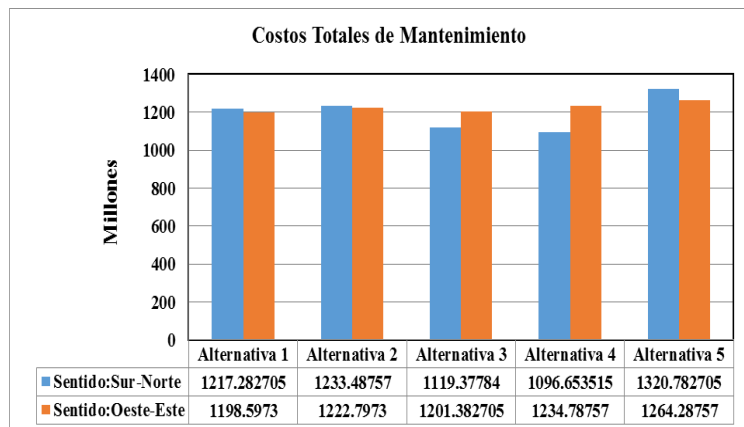
| Capa | Valor Unitario | Unidad |
|--------|----------------|--------|
| MDC-19 | 580.139 | m3 |

Los costos generados al realizar el recarpeteo, por medio de la tasa de descuento se trasladaron desde su año de implementación hasta el año de inicio del proyecto.

Grafica 14. Costo total capas de refuerzo



Grafica 15. Costo total de mantenimiento.



4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La composición de la estructura y el espesor de cada capa causan cambios significativos en los costos de construcción, a su vez el costo de mantenimiento se ve afectado principalmente por el espesor que requiere capas de refuerzo durante el tiempo de análisis de la estructura.

Tabla 6. Costo total de construcción y de mantenimiento.

| Alternativa | Sur – Norte | Oeste – Este |
|-------------|-------------|--------------|
| | [Millones] | [Millones] |
| 1 | \$ 2.220,4 | \$ 2.519,7 |
| 2 | \$ 2.267,5 | \$ 2.597,8 |
| 3 | \$ 2193,4 | \$ 2.517,1 |
| 4 | \$ 2.035,4 | \$ 2.495,0 |
| 5 | \$ 2.281,9 | \$ 2.526,1 |

Con los costos totales de construcción y mantenimiento de cada alternativa, durante el tiempo de análisis se estableció un costo promedio anual por kilómetro.

Tabla 7. Costo promedio anual por kilómetro.

| Alternativa | Sur – Norte | Oeste - Este |
|-------------|-------------|--------------|
| 1 | \$ 49,3 | \$ 63,0 |
| 2 | \$ 50,4 | \$ 65,0 |
| 3 | \$ 48,7 | \$ 62,9 |
| 4 | \$ 45,2 | \$ 62,4 |
| 5 | \$ 50,7 | \$ 63,2 |

Con base en los resultados obtenidos, se puede apreciar que la alternativa más viable en términos económicos de implementar tanto para el sentido Sur-Norte como en el sentido Oeste- Este, es la alternativa número cuatro; la cual está conformada por las siguientes capas:

MDC-25 + MDC-19 + BG+SR

5. CONCLUSIONES

Se propuso una metodología para el diseño de pavimento que mediante el análisis de costos de construcción y de mantenimiento permite seleccionar la mejor alternativa de diseño.

La metodología se estableció con base en la guía de diseño de pavimentos AASHTO-93 y con los modelos de deterioro de HDM-4.

Para aplicar la metodología se seleccionó un periodo de análisis de 40 años, con intervenciones de reforzamiento y mantenimiento, controlando que el nivel de serviciabilidad no sea menor de 2.5.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MONTEJO, Alfonso. *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Segunda Edición. Universidad Católica de Colombia. 2001. Santa Fe de Bogotá D.C. ISBN: 958-96036-2-9.

[2] MONTEJO, Alfonso. *Ingeniería de Pavimentos*. Tercera Edición. Universidad Católica de Colombia. 2006. Santa Fe de Bogotá. D.C

[3] RONDÓN, Hugo; REYES, Fredy; Metodologías de diseño de Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances y Limitaciones; *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2007. Vol. 17-2.

[4] Ministerio de Transporte; Universidad Javeriana. *Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria (Pavimentada y en Afirmado)*. <http://web.mintransporte.gov.co/pvr/images/stories/documentos/pavimentos1>. [Consulta 25-10-2014]

[5] CORONADO, Jorge. Manual Centroamericano de mantenimiento de carreteras. Tomo III. 2000. diciembre. <<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/catalogo-centroamericano-de-danos-a-pavimentos-viales.pdf>>. [Consulta 01-11-2014].

[6] CASTRO, Andrés; VEGA Maira. *Análisis del periodo de diseño para pavimento flexible con base en el modelo HDM-4*. Director: Eduardo Castañeda. Universidad Industrial de Santander, 2009.

[7] CORREDOR, Gustavo. *Experimento vial de la AASHO y las guías de diseño AASHTO*. Maestría en vías terrestres. Módulo III. Diseño de pavimentos I. <<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/aashto-931.pdf>>

[8] Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Universidad Nacional. Ministerio de transporte Instituto Nacional de Vías.

[9] JUGO, Augusto. *Manual de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos flexibles*. Acciones básicas, versión revisada 2005. <
http://vialidad21.galeon.com/manual_mrvial.pdf>

[10] ARGUETA, Javier. CASTRO Elisa. Metodología para la calibración de los modelos de deterioro de pavimentos generados por el programa HDM-4. Universidad de el Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 2009 programa HDM-4. Universidad del Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura 2009.
http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/018150/018150_Cap2.pdf

[11] Manual Centroamericano de daños a pavimentos, Universidad de Oriente, Capítulo II.

[12] UIS. Inventario Parcial Vial de cinco intersecciones de Bucaramanga.

[13] Guía Metodológica para diseño de rehabilitación de pavimentos flexibles de carreteras. INVIAS 2002.

[14] RODRÍGUEZ, Pablo. Desarrollo de la ecuación de correlación para la determinación del IRI en pavimentos asfálticos nuevos, utilizando el rugosímetro Merlin. <www.camineros.com/documentos/doc1.pdf>

[15] THENOUX Guillermo, BARRERA Ernesto y otros. Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Dirección de viabilidad, Ministerio de obras públicas. Enero, 2002 básicas, versión revisada 2005. <
http://vialidad21.galeon.com/manual_mrvial.pdf>

[16] PÉREZ RODRÍGUEZ, Viviana Marcela, QUINTERO PÉREZ, Yuneidy Tatiana. Evaluación de alternativas de inversión en planes de gestión de pavimentos locales. Director: Freddy Jesús Herrera. Universidad Industrial de Santander, 2014.

BIBLIOGRAFÍA

ARGUETA, Javier. CASTRO Elisa. Metodología para la calibración de los modelos de deterioro de pavimentos generados por el programa HDM-4. Universidad de el Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 2009 programa HDM-4. Universidad del Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura 2009.
http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/018150/018150_Cap2.pdf

CASTRO, Andrés; VEGA Maira. *Análisis del periodo de diseño para pavimento flexible con base en el modelo HDM-4*. Director: Eduardo Castañeda. Universidad Industrial de Santander, 2009.

CORONADO, Jorge. Manual Centroamericano de mantenimiento de carreteras. Tomo III. 2000. diciembre.
<<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/catalogo-centroamericano-de-danos-a-pavimentos-viales.pdf>>. [Consulta 01-11-2014].

CORREDOR, Gustavo. *Experimento vial de la AASHO y las guías de diseño AASHTO*. Maestría en vías terrestres. Módulo III. Diseño de pavimentos I. <<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/aashto-931.pdf>>

Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Universidad Nacional. Ministerio de transporte Instituto Nacional de Vías.

Guía Metodológica para diseño de rehabilitación de pavimentos flexibles de carreteras. INVIAS 2002.

JUGO, Augusto. *Manual de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos flexibles. Acciones básicas, versión revisada 2005.* <
http://vialidad21.galeon.com/manual_mrvial.pdf>

Manual Centroamericano de daños a pavimentos, Universidad de Oriente, Capítulo II.

Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Universidad Nacional. Ministerio de transporte Instituto Nacional de Vías.

Ministerio de Transporte; Universidad Javeriana. *Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria (Pavimentada y en Afirmado).*
<http://web.mintransporte.gov.co/pvr/images/stories/documentos/pavimentos1>.
[Consulta 25-10-2014]

MONTEJO, Alfonso. *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras.* Segunda Edición. Universidad Católica de Colombia. 2001. Santa Fe de Bogotá D.C. ISBN: 958-96036-2-9.

MONTEJO, Alfonso. *Ingeniería de Pavimentos.* Tercera Edición. Universidad Católica de Colombia. 2006. Santa Fe de Bogotá. D.C

PÉREZ RODRÍGUEZ, Viviana Marcela, QUINTERO PÉREZ, Yuneidy Tatiana. Evaluación de alternativas de inversión en planes de gestión de pavimentos locales. Director: Freddy Jesús Herrera. Universidad Industrial de Santander, 2014.

RODRÍGUEZ, Pablo. Desarrollo de la ecuación de correlación para la determinación del IRI en pavimentos asfálticos nuevos, utilizando el rugosímetro Merlin. <www.camineros.com/documentos/doc1.pdf>

RONDÓN, Hugo; REYES, Fredy; Metodologías de diseño de Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances y Limitaciones; *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2007. Vol. 17-2.

THENOUX Guillermo, BARRERA Ernesto y otros. Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Dirección de viabilidad, Ministerio de obras públicas. Enero, 2002 básicas, versión revisada 2005. <
http://vialidad21.galeon.com/manual_mrvial.pdf>

UIS. Inventario Parcial Vial de cinco intersecciones de Bucaramanga.

ANEXOS

ANEXO A. APUS

ANEXO B. Sentido Oeste-Este

ANEXO C. Sentido Sur-Norte