

**EMPLEO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON NANOTECNOLOGÍA PARA EL
MEJORAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN DE
LOS TERCEROS CARRILES DE LA VÍA BUCARAMANGA- CUESTABOBA.**



Autor:

LAURA MARCELA CASANOVA ARENAS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
2018

EMPLEO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON NANOTECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS TERCEROS CARRILES DE LA VÍA BUCARAMANGA- CUESTABOBA.

THE USED OF MODIFIED ASPHALT MIXTURES WITH NANOTECHNOLOGY, FOR THE IMPROVEMENT OF THE FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURE IN THE CONSTRUCTION OF THE THIRD LANES OF THE BUCARAMANGA-CUESTABOBA ROAD.

Laura Marcela Casanova Arenas
Ingeniera Civil, Aspirante a Especialista de Pavimentos
Estudiante de Posgrado de la Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, D.C, Colombia,
U6100281@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El presente estudio tiene como objeto definir las estructuras de pavimento asfáltico en los tramos de terceros carriles de la vía Bucaramanga – Cuestaboba haciendo uso de una mezcla asfáltica en caliente HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono (NFTC) sin proceso de purificación. Para el diseño de las estructuras se empleó el método racional con base a las leyes de fatiga definidas por la Universidad de Nottingham, este cálculo arrojó espesores menores de capa asfáltica comparados con la estructura con mezcla convencional MDC-19 y MDC-25. Con los valores de los números de ejes equivalentes admisibles obtenidos, se calculó gráficamente la duración de las estructuras con capa asfáltica modificada, mostrando un aumento para el tercer carril No. 1 de cinco (5) años adicionales, y para los terceros carriles No. 2, 3 y 4 de tres (3) años más respecto a la vida útil del pavimento con capa asfáltica sin modificar, demostrando así que la aplicación de la nanotecnología en las mezclas asfálticas mejora significativamente las patologías y la durabilidad a largo plazo del pavimento asfáltico del corredor.

Palabras claves: Mezcla asfáltica en caliente; pavimentos; nanotubos de carbono; nanofibras de carbono; módulo de elasticidad; duración; ahuellamiento.

ABSTRACT

The present study have the purpose to define the asphalt pavement structures in the third lane sections of Bocaramanga-Cuestaboba road using a hot mix asphalt HMA-2 modified with carbon nanotubes and carbon nanofibers (NFTC) non-purified. The rational method was used for the desing of the structures based on the fatigue laws defined by the Nottingham University, this calculation showed lower asphalt thicknesses compared infront the structure with conventional mix MDC-19 ang MDC-25. With the values of the equivalent single axle load, was calculate graphically the term of the structures with modified asphalt layer, showing an increase for the third lane No.1 of five (5) years more, and for the third lanes No. 2, 3 and 4 of three (3) years over the life of the pavement with non-modified asphalt layer, demostrating that the application of nanotechnology in asphalt mixtures improves significantly the payhologies and the long-term durability of the corridor asphalt pavement.

Keywords: Hot mix asphalt; pavements; carbon nanotubes; carbon nanofibers; elastic modulus; term; rutting.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la Ingeniería civil específicamente en la Infraestructura vial se han identificado algunos casos donde las características de las mezclas asfálticas con cementos asfálticos convencionales no logran resistir el conjunto de los efectos del tránsito y del clima, por lo que es necesario hacer uso de asfaltos modificados que presenten adecuadas características reológicas, mayor adherencia, resistencia a la susceptibilidad térmica y menor envejecimiento [1].

Entre las alternativas para la mejora de las propiedades de las mezclas asfálticas a escala mundial se destaca el uso de la nanotecnología, considerada como la ciencia que estudia la materia desde una escala nanométrica [2], permitiendo identificar a los investigadores propiedades importantes para la invención de materiales y sistemas novedosos que podrían dar soluciones a los diferentes problemas que se presentan en la actualidad.

La inclusión de la Nanotecnología en el territorio Colombiano comienza en el 2004 cuando el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), selecciona el área de “Nanotecnología y Materiales Avanzados” como una de las ocho áreas más valiosas para el avance en materia de competitividad y productividad colombiana [3]. Es así como, con el tiempo se han generado intereses en el uso de esta tecnología en diferentes áreas del conocimiento, entre la que se destaca la Ingeniería civil, en especial para la construcción de pavimentos.

Algunos de los componentes estudiados para el mejoramiento de los asfaltos son los nanotubos y nanofibras de carbono, que se definen como un tipo de material sintético de carbono nanoestructurado compuestos por una o varias láminas de grafito u otro material, enrolladas sobre sí mismas [4,5].

Dada la necesidad de mitigar los daños que se presentan día a día en los pavimentos de Colombia (asociados principalmente a los efectos generados por las cargas de tránsito, el clima, las condiciones regionales, las propiedades de los materiales, el estado de la subrasante, entre otros), se propone implementar la Nanotecnología como una alternativa de diseño en las mezclas asfálticas para la construcción de pavimentos flexibles en la infraestructura vial del país.

De esta manera se podrá identificar la favorabilidad del comportamiento de este tipo de pavimento en una vía específica, en aspectos tales como la durabilidad, la reducción de costos de mantenimiento y/o rehabilitación, e incluso en la mejora de la seguridad de la misma. Para esta propuesta se va a tomar como caso de estudio la vía Bucaramanga – Cuestaboba.

Por lo anterior se ve la conveniencia de su implementación en la construcción de la estructura del pavimento flexible en los tramos de terceros carriles de la vía Bucaramanga – Cuestaboba (ubicado en el departamento de Santander, Colombia), por presentar las siguientes características [6]:

- **Tipo de transporte:**

De acuerdo a la información del tráfico de la vía analizada, se identifica que, además de presentar un importante volumen de tránsito también circulan vehículos de categoría iguales y/o mayores a C5.

Según el cálculo de número de ejes equivalentes para un periodo de diseño de 10 años (2019-2028) en los terceros carriles realizado por [6], se obtuvo un valor de 8.062.650 ejes equivalentes. Lo que permite inferir que la vía, por su alto nivel de tránsito, necesitará una estructura lo suficientemente resistente para soportar las cargas de tránsito a las que va a estar sometido en los años proyectados.

- **Importancia de la vía:**

La vía Bucaramanga – Cuestaboba posee una longitud aproximada de 66.6 km, que pertenece al corredor vial Bucaramanga – Pamplona (perteneciente a la Tercera Ola de las vías de cuarta generación 4G, programa de infraestructura del gobierno Nacional). El corredor de interés se encargará de comunicar los departamentos de Santander y Norte de Santander. Debido a su ubicación, esta vía posee un flujo importante de tránsito vehicular tanto de carga, como de pasajeros, estos últimos derivados del comercio y el turismo ya que la vía es una conexión intermunicipal e interdepartamental, por lo cual es esencial brindar un trayecto cómodo, seguro y funcional.

A partir de lo anterior se podría inferir, que de acuerdo a los alentadores resultados que arrojan las investigaciones en el uso de nanotubos y nanofibras de carbono en mezclas asfálticas, la infraestructura vial del país se podría ver bastante beneficiada, ya que la adición de nanotubos y nanofibras de carbono ofrece una mayor resistencia y durabilidad a las condiciones de servicio [7]. A pesar que la inversión inicial para la implementación de estos materiales en la construcción de pavimentos sería más alta a la del el uso de una mezcla convencional, el aporte futuro en materia de reducción de costos derivados de los procesos de mantenimiento y rehabilitación sería mucho menor y aumentaría la funcionalidad del corredor.

El principal objetivo de este estudio es definir la estructura de pavimento flexible en la zona de estudio empleando una mezcla asfáltica HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono sin proceso de purificación y calcular su duración con las condiciones propias del corredor, para así comparar los efectos que puedan obtenerse en relación a una mezcla convencional MDC-19 y MDC-25 que se empleará en el actual proyecto.

Según las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, las mezclas MDC-19 y MDC-25 son mezclas densas de gradación continua, las cuales poseen un tamaño máximo de agregado de 19.0 mm y 25.0 mm respectivamente.

Se considera un mezcla asfáltica en caliente HMA convencional como una mezcla compuesta por un ligante de asfalto y agregados pétreos de tamaño nominal en el rango de 0.5 pulg a 0.75 pulg [7], en este caso la mezcla HMA-2 se relaciona a un tamaño mecánico máximo de $\frac{1}{2}$ pulgada. Es importante tener en cuenta que la capa de pavimento asfáltico es aquella porción de la estructura que recibirá directamente las cargas de tráfico por la fuerte tensión y presión de los vehículos sobre ella, por lo cual es indispensable contar con un valor de módulo de elasticidad suficientemente alto para controlar los efectos a los que va a estar sometido [7].

Y para llegar a esto es necesario principalmente, determinar los espesores de la estructura asfáltica mediante el uso del método racional haciendo uso de los valores de los módulos correspondientes a la mezcla asfáltica modificada. Posteriormente estimar la vida útil del pavimento asfáltico de acuerdo a cada diseño estudiado para los tramos de la vía seleccionada para el estudio. Y finalmente comparar los valores obtenidos de la mezcla convencional MDC-19 y MDC-25 contra la mezcla HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras sin procesos de purificación e identificar los efectos que tendrá el uso de esta. Con este procedimiento se espera obtener espesores menores a los diseños con mezclas convencionales y de acuerdo al alto módulo de la mezcla modificada, una durabilidad superior al periodo de diseño propuesto para mezcla convencional y posibles reducciones los daños producidos por los efectos del tránsito y el clima y así disminuir las actividades de mantenimiento que se puedan tener en el corredor.

Este trabajo no solo busca identificar una estructura conveniente para el proyecto sino también apostar por las nuevas tecnologías y estudios que se realizan y así aprovechar las propiedades que presentan estos materiales para el desarrollo de la infraestructura vial del país, debido a que el territorio Colombiano está viviendo un crecimiento en el campo de las vías y la interconexión de las regiones del país contribuyendo al desarrollo económico, cultural y social, y así poder entrar a competir con los demás países del mundo en materia de infraestructura vial.

1. METODOLOGÍA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Vía Bucaramanga-Cuestaboba hace parte de la Unidad Funcional 2 del corredor vial Bucaramanga – Pamplona, la cual inicia en la ciudad de Bucaramanga aproximadamente a 959 msnm, con una temperatura media anual de 23.4 °C y una precipitación anual de 1159 mm, la vía transcurre por la zona de montaña de pendiente alta, pasando por el municipio de Mutiscua hasta alcanzar los 2600 msnm, temperaturas aproximadas de 12.5 °C y precipitaciones de 947 mm, y por último termina el recorrido en el municipio de Pamplona del departamento de Norte de Santander, en donde se reduce la altitud a 2200 msnm, con temperatura de 14.4°C y precipitación de aproximadamente 921 mm al año [6]. Dentro de los tipos de terrenos que se pueden encontrar en el corredor son: escarpado, montañoso y ondulado en las zonas donde se presenta páramo [8]. En la Figura 1 se muestra la localización de la vía Bucaramanga – Cuestaboba.

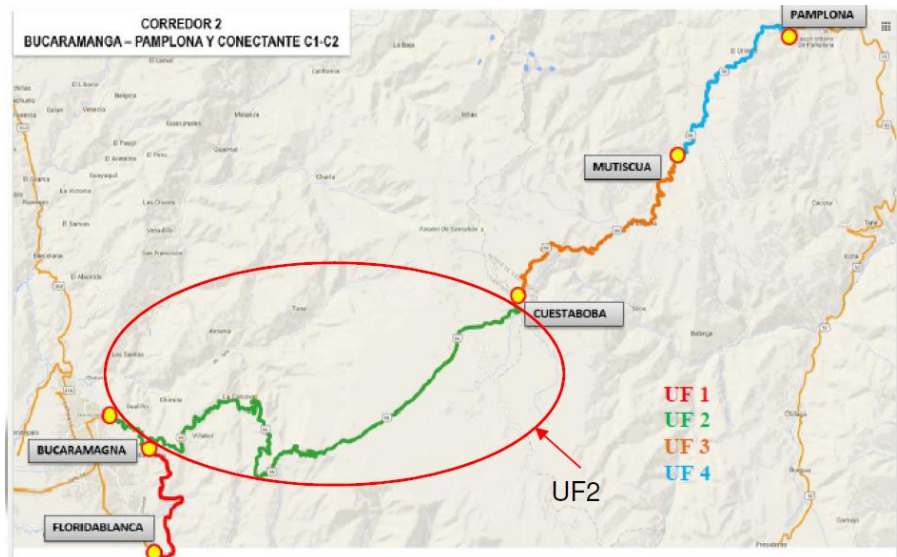


Fig. 1. Unidad Funcional 2. Sector Bucaramanga-Cuestaboba.
Fuente: Informe de Pavimentos Unidad Funcional 2 Versión 1 [6].

El sector Bucaramanga – Cuestaboba, objeto del presente estudio, se encuentra ubicado en el extremo NE de Colombia, entre las subregiones de la Montaña Santandereana y el Macizo de Santurbán de la región Andina, en el

departamento de Santander [8], más exactamente entre los PR3+400 y PR 68+000 en la vía 6603 con una longitud aproximada de 66.6 km. Para esta vía están contempladas las siguientes actividades [6]:

- Rehabilitación de la calzada existente, operación y mantenimiento entre los PR3+400 y PR8+300 con una longitud aproximada de 4.9 Km.
- Rehabilitación de la Doble Calzada existente, operación y Mantenimiento entre los PR8+300 al PR18+400 con una longitud aproximada de 10.1 Km.
- Mejoramiento de la calzada existente, operación y mantenimiento, construcción de tramos de tercer carril y sobre ancho en curvas según el diseño geométrico, con una longitud aproximada de 49,6 Km.

1.2 ASPECTOS GENERALES

El fin de este ejercicio es comparar y corroborar la contribución en cuanto a la durabilidad que podría tener la implementación de una mezcla HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras sin purificación, respecto a la estructura de pavimento con mezcla asfáltica convencional (MDC-19 y MDC-25) establecida para el proyecto. Pues de acuerdo a [7] se ha demostrado que la adición de nanotubos y nanofibras de carbono (NFTC) no sólo contribuye a la resistencia y a la mejora de la respuesta mecánica sino que se reduce estructuralmente el espesor de la capa de asfalto la cual traería una solución económicamente viable para la durabilidad del pavimento.

Los principales fenómenos que aquejan a los pavimentos asfálticos, y por los cuales se deben buscar soluciones reales son los siguientes:

- **Ahuellamiento:**

Definido como la deformación vertical continua acumulable por la repetición de cargas de los vehículos, lo cual produce la aparición de depresiones longitudinales a lo largo del recorrido de las llantas. Esta patología genera pérdida de la funcionalidad y fallas estructurales en el pavimento. Se considera que el pronóstico de este fenómeno es muy difícil identificar por la falta de ensayos y métodos apropiados, generalmente mediante estos procesos se busca controlar la resistencia a deformaciones mediante a la rigidez de la mezcla [9].

- **Fatiga:**

Se define como un cambio estructural permanente, progresivo y localizado, que después de un determinado número de periodos en un área sujeta a deformaciones y tensiones variables, producen grietas o posible fractura de la estructura [10].

Teniendo en cuenta que la patología de la fisuración se encuentra relacionada con las cargas de tránsito, también es indispensable reconocer la influencia

de la temperatura [7]. Los tramos del caso de estudio se encuentran ubicados cercanos a sectores con temperaturas alrededor de 17.4 °C, siendo esto un factor determinante para la elección del tipo de mezcla asfáltica a usar, ya que las bajas temperaturas aportan a la fatiga que es uno de los principales mecanismo de falla para los pavimentos asfálticos [11].

En la Fig. 2 se presenta el climatograma que corresponde a El picacho, región mas cercana a la ubicación de los sectores de terceros carriles, y la condición climática que determinará el comportamiento de la estructura de pavimento.

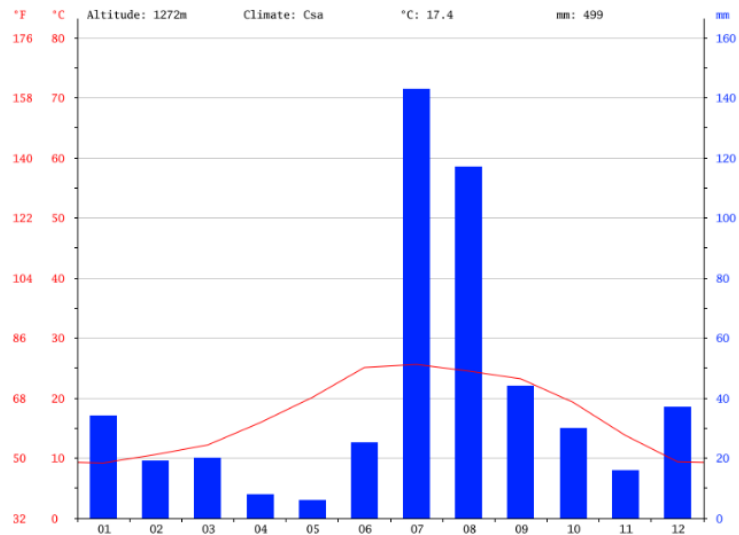


Fig. 2. Climatograma El Picacho

Fuente: Climate-data.org, «Clima: El Picacho» [11]

Es importante recordar que el asfalto es un material viscoelástico donde las condiciones de temperatura determinarán su comportamiento elástico. El asfalto se solidifica a bajas temperaturas mostrando un comportamiento totalmente elástico, mientras que el asfalto actuará como fluido determinado por el comportamiento viscoso (plástico) [10].

Tanto la temperatura de la mezcla asfáltica como la frecuencia con la que se aplica la carga son variables que intervienen en el cálculo del módulo de elasticidad, ya que este módulo en conjunto a los demás parámetros determinarán que espesor se tendrá en la carpeta asfáltica para la estructura de pavimento objeto del presente estudio.

Algunas de las finalidades de las mezclas asfálticas modificadas son [1,10]:

- Emplear ligantes con mayor viscosidad a altas temperaturas, aumentando su rigidez, con el fin de reducir las deformaciones permanentes en la superficie.
- Aumentar la elasticidad para reducir el fisuramiento ocasionado por el cambios térmicos bruscos y la fatiga.
- Hacer uso de un ligante que tenga adecuadas características de adherencia con el agregado pétreo.
- Reducir los problemas en el procesos de colocación y compactación de la mezcla.

- Minimizar la posible exudación del concreto asfáltica.
- Decrecer los espesores de la estructura.

Teniendo en cuenta que una mezcla modificada con NFTC no purificado, ha mostrado mejores respuestas a la fatiga, un elemento esencial en materia de durabilidad a largo plazo por estar relacionada con el agrietamiento térmico [7], permite pronosticar un resultado alentador en cuanto a el aumento en vida útil de este pavimento.

1.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

La información clave para la realización del presente trabajo, se basa en el informe de pavimentos de la Unidad Funcional 2 (Bucaramanga – Cuestaboba) del corredor vial Bucaramanga – Pamplona, el cual fue elaborado y facilitado por el Concesionario Autovía Bucaramanga-Pamplona S.A.S.

De dicho documento se tomó la información de la estructura de pavimento asfáltico que se tiene proyectado construir en los sectores de los terceros carriles específicamente en las abscisas K33+535 al K34+9765, K39+894 al K40+940, K44+723 al K45+685 y K67+260 al K68+820. [6], la cual fue diseñada por el Metodo AASHTO 1993.

Del diseño de la estructura de pavimento realizado por el Concesionario AUTOVIA BUCARAMANGA-PAMPLONA S.A.S, se escogió la alternativa No. 1 que consiste en una mezcla densa en caliente MDC-19 y MDC-25, base granular clase A, constituida por materiales granulares convencionales, y subbase granular Clase A, para un periodo de diseño de 10 años, de la cual se obtuvieron los siguientes resultados [6]:

Tabla 1. Espesores de las Capas de la Estructura de pavimento para los tramos de terceros carriles.

TERCEROS CARRILES UF 2						
ALTERNATIVA 1						
No. Tercer Carril	Desde	Hasta	MDC-19 (cm)	MDC-25 (cm)	Base Granular (cm)	Subbase Granular (cm)
1	K33+535	K34+975	10	10	20	20
2	K39+894	K40+940	10	10	30	35
3	K44+723	K45+685	10	10	30	35
4	K67+260	K68+820	10	10	30	35

Fuente: Informe de Pavimentos Unidad Funcional 2 Versión 1 [6].

El recurso que se utilizará para el diseño de la nueva estructura, se trata de un investigación realizada por [7] en donde se evalúan las propiedades mecánicas de una mezcla de asfalto HMA-2 modificada con NFTC, mediante pruebas de rutting, de Mr (Módulo de Rotura) y de Fatiga.

La mezcla utilizada HMA-2 se realizó según lo establecido en el ASTM D6307 e INVIAS 450. Los Modificadores de nanotubos y nanofibras de carbono se usaron en estados purificados y no purificados por medio del filtrado con

HNO₃. Para la caracterización de esta mezcla se usaron ensayos de rutting, para la definición del fallo por fatiga se incluyeron muestras trapezoidales configuradas [7].

Según las ecuaciones del modelo de Nottingham, se establece una curva maestra, en la cual se emplea una superposición de los factores frecuencia-temperatura (TTS), que se definen según las siguientes ecuaciones:

$$X = \alpha_T + \ln(f) \quad (1)$$

$$\alpha_T = 2,52 * 10^4 \left[\left(\frac{1}{T} \right) - \left(\frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (2)$$

Donde X representa TTS, α_T representa el factor de modificación en función de la Temperatura (°K), f la frecuencia (Hz), T la temperatura absoluta durante la prueba (°K) y Ts la temperatura absoluta de referencia (°K). Según [7] se trabaja con una temperatura de absoluta de referencia de 15°C ya que es la temperatura mas común para el diseño Mr para HMA-2 en Bogotá, Colombia.

En la Fig. 3 se representa la curva maestra de acuerdo al modelo de Nottingham.

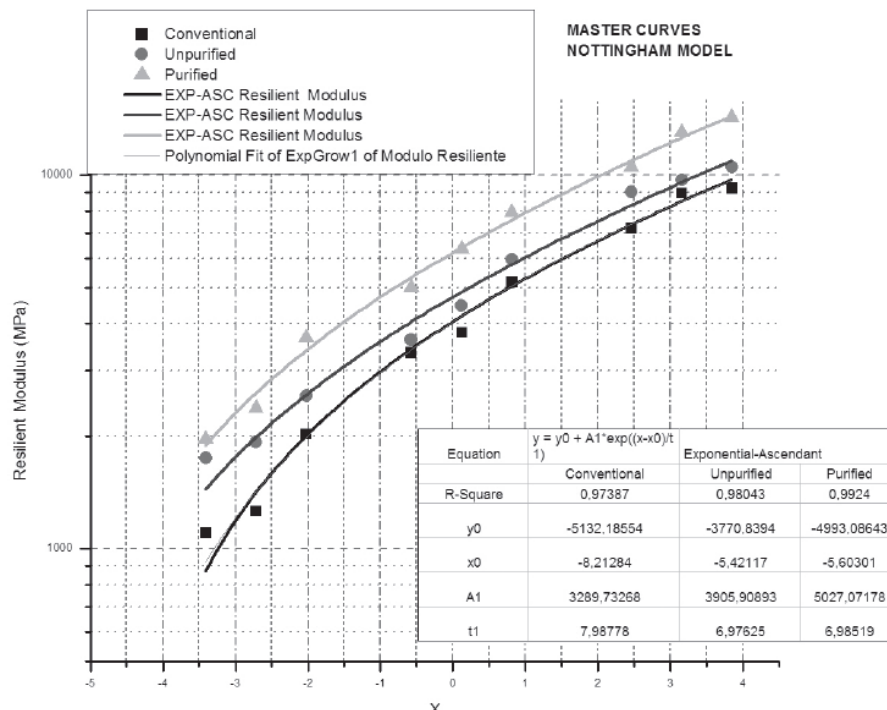


Fig. 3. Curva maestra del Modelo Nottingham para Módulo Resiliente.

Fuente: Desempeño mecánico de una mezcla HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono con proceso y sin proceso de purificación. [7].

La ecuación que describe el comportamiento de la curva maestra para cada tipo de mezcla (convencional, sin purificar y purificada) es la siguiente:

$$y = y0 + A1 * \exp\left(\frac{x-x0}{t1}\right) \quad (3)$$

Los coeficientes de la ecuación (2) varían dependiendo del tipo de mezcla, en este caso se trabajará con los valores de una mezcla modificada con nanofibras y nanotubos de carbono sin purificar, los cuales son:

Tabla 2. Coeficientes de la expresión de la curva maestra

Coeficiente	Sin purificar
y0	-3770.83
x0	-5.4211
A1	3906.90893
t1	6.97627

Fuente: Desempeño mecánico de una mezcla HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono con proceso y sin proceso de purificación. [7]

Teniendo en cuenta la temperatura de la región de El Picacho (17.4°C) que será la temperatura absoluta en la prueba (T) y una frecuencia (f) seleccionada de 10 hertz, se procederá ingresar estos datos en la ecuación que describe la curva maestra para una mezcla modificada con NFTC sin purificar junto con los coeficientes presentados anteriormente, para así obtener el valor de el módulo Resiliente (Mpa).

Primero se calculará el factor de modificación en función de la Temperatura (α_T):

$$\alpha_T = 2,52 * 10^4 \left[\left(\frac{1}{4770,21} \right) - \left(\frac{1}{4112,25} \right) \right] \quad (4)$$

$$\alpha_T = -0.85195$$

Con dicho factor se procede a calcular la superposición de los factores frecuencia-temperatura (X):

$$X = -0,85195 + \ln(10) \quad (5)$$

$$X = 1,4506$$

Con los anteriores valores se puede obtener el valor del modulo resiliente (Mpa):

$$y = -3770,83 + 3906,908 * \exp\left(\frac{1,4506 - (-5,4211)}{6,97627}\right) \quad (6)$$

$$y = 6688.695 \text{ Mpa}$$

Éste módulo será el dato base para ingresar en la herramienta CEDEM (Cálculo de esfuerzos y deformaciones en estructura multicapa) y obtener de él los valores de los espesores del pavimento con capa asfáltica modificada.

El programa CEDEM es un programa desarrollado para la solución de ecuaciones simultáneas en un sistema elástico multicapa, bajo la acción de una carga de diseño, el cual emplea los siguientes parámetros[1]:

D: Distancia de separación entre llantas.

q: Presión de contacto ejercida por las ruedas.

- a: Radio de la carga.
- H_i: Espesor de la capa *i*.
- E_i: Módulo dinámico de la capa *i*.
- μ_i: Relación de Poisson de la capa *i*.

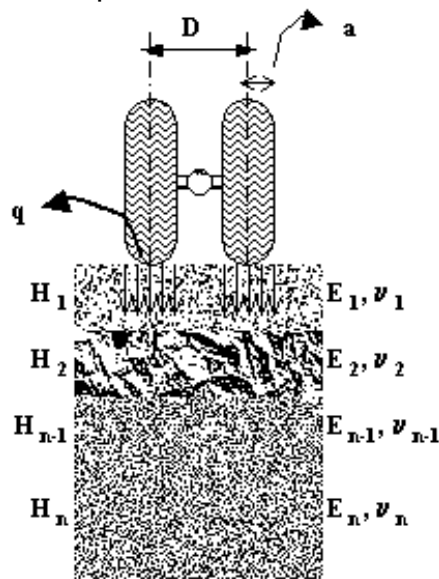


Fig. 4. Parámetros del sistema multicapa.
Fuente: Diseño Racional de pavimentos. [1].

Como se había mencionado anteriormente, para el cálculo del espesor de la capa asfáltica se conservarán los valores de espesores, módulos dinámicos y relaciones de poisson tanto de las capas granulares como para la subrasante.

A continuación se relacionan los parámetros de cada tramo de tercer carril y otros datos de la estructura, incluido el módulo resiliente (mezcla HMA-2 modificada) obtenido mediante la curva maestra del modelo de Nottingham [7], que se utilizarán en el cálculo del espesor de la capa asfáltica mediante el programa CEDEM:

Tabla 3. Parámetros de diseño estructura pavimento flexible Tercer Carril 1.

Capa No.	Módulo (Mpa)	R. Poisson
1	6688.695	0.35
2	205.939	0.4
3	117.679	0.4
4	65.998	0.45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Parámetros de diseño estructura pavimento flexible Tercer Carril 2, 3 y 4.

Capa No.	Módulo (Mpa)	R. Poisson
1	6688.695	0.35
2	205.939	0.4
3	117.679	0.4
4	29.228	0.45

Fuente: Elaboración propia.

Se hará uso de los siguientes parámetros seleccionados en el Estudio de Pavimentos de la Unidad Funcional 2 de la Concesión Bucaramanga-Pamplona:

Tabla 5. Información de la estructura de pavimento asfáltico.

Radio de las ruedas de carga (m)	0.108
Distancia entre los centros de rueda de carga (m)	0.324
Presión de contacto de las ruedas (Mpa)	0.548

Fuente: Informe de Pavimentos Unidad Funcional 2 Versión 1 [6].

Con los recursos mencionados anteriormente se procederán a utilizarlos en el programa de diseño racional, para así obtener los valores del espesor de la capa asfáltica deseada, siendo necesario realizar la verificación mediante las leyes de fatiga definidas por la Universidad de Nottingham mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Nf = K_1 \left(\frac{10^6}{\epsilon t} \right)^{K_2} \quad (7)$$

$$Nr = K_4 \left(\frac{10^6}{\epsilon z} \right)^{K_5} \quad (8)$$

Donde:

N: Número de repeticiones

ϵt : Deformación a tracción en la fibra inferior de la base asfáltica

ϵz : Deformación vertical de la subrasante

Para el cumplimiento de los criterios de agrietamiento y ahuellamiento de la estructura se requieren definir los valores de los coeficientes K1, K2 y K4, K5, los cuales determinarán el Número de ejes equivalentes (NESE) admisibles para la capa 1 y 4 del pavimento correspondientemente. Se debe garantizar que el valor obtenido sea mayor al NESE de diseño, es decir, asegurar que durante el periodo de diseño la estructura de pavimento flexible resista más de lo esperado a través de los años.

Tabla 6. Factores para verificación Leyes de Fatiga Nottingham.

Capa	Criterio	Coefficientes	NESE Diseño
1	Agrietamiento	K1=8.89030E-13 K2= 4.9020	8.06E+05
4	Ahuellamiento	K4=1.1262E-06 K5=3.571	8.06E+06

Fuente: Informe de Pavimentos Unidad Funcional 2 Versión 1 [6].

1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la simulación mediante el programa CEDEM, en el cual se escogió como alternativa de diseño para el tercer carril No. 1 un espesor de base asfáltica modificada $h_{BA} = 15$ cm, base granular $h_{BG} = 20$ cm, subbase granular $h_{SBG} = 20$ cm, y para los terceros carriles No. 2, No. 3 y No. 4 un espesor de base asfáltica modificada $h_{BA} = 15$ cm, base granular $h_{BG} = 30$ cm, subbase granular $h_{SBG} = 30$ cm.

Los datos necesarios para las simulaciones se introdujeron en el programa y se obtuvieron los resultados correspondientes como lo muestran las Fig. 5 - 8:

CEDEM - Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones en Estructura Mult...

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos | Información de la Estructura | Resultados

Número de Capas : 4

Radio de la Carga (a) : 0,108 [m]

Presión de Contacto (q) : 0,548 [MPa]

Distancia entre Ejes de Llantas (D) : 0,324 [m]

Capa N°	E [MPa]	μ []	H [m]	Ligada / No ligada	
1	6688.695	0.35	0.15	L	Calcular...
2	205.939	0.4	0.2	N	Insertar capa...
3	117.679	0.4	0.2	N	Eliminar capa...
4	65.998	0.45			
5					
6					

Fig. 5. Información de la estructura Tercer Carril No. 1.
Fuente: CEDEM. [12].

CEDEM - Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones en Estructura Mult...

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos | Información de la Estructura | Resultados

Capa N°	Z [m]	Epsilon T	Sigma T [MPa]	Epsilon Z	Sigma Z [MPa]
1	0.00	132.0E-6	1.5296	-104.0E-6	0.5476
	0.15	-136.0E-6	-1.2542	129.0E-6	0.0534
2	0.15	-136.0E-6	-0.0076	274.0E-6	0.0534
	0.35	-230.0E-6	-0.0567	340.0E-6	0.0270
3	0.35	24.3E-6	0.0223	80.4E-6	0.0270
	0.55	-144.0E-6	-0.0111	276.0E-6	0.0243
4	0.55	27.9E-6	0.0231	53.3E-6	0.0243
5					
6					

Deflexión : 46.24 [mm/100]

Radio de Curvatura : 431.41 [m]

Fig. 6. Resultados estructura Tercer Carril No. 1.
Fuente: CEDEM. [12].

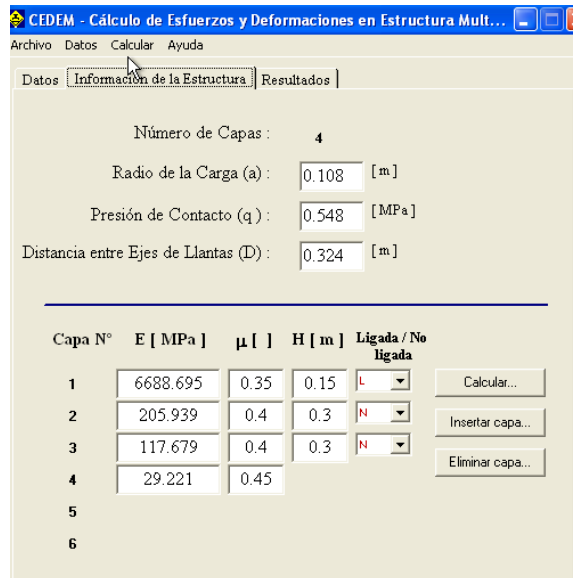


Fig. 7. Información de la estructura Tercer Carril No. 2, 3 y 4.
Fuente: CEDEM. [12].

Capa N°	Z [m]	Epsilon T [MPa]	Sigma T [MPa]	Epsilon Z [MPa]	Sigma Z [MPa]
1	0.00	136.0E-6	1.5703	-108.0E-6	0.5476
Ligada	0.15	-136.0E-6	-1.2440	129.0E-6	0.0567
2	0.15	-136.0E-6	-0.0046	282.0E-6	0.0567
No Ligada	0.45	-230.0E-6	-0.0650	330.0E-6	0.0174
3	0.45	67.3E-6	0.0244	-15.8E-6	0.0174
No Ligada	0.75	-132.0E-6	-0.0170	219.0E-6	0.0124
4	0.75	31.7E-6	0.0118	61.8E-6	0.0124
5					
6					

Deflexión : 69.54 [mm/100]
Radio de Curvatura : 428.68 [m]

Fig. 8. Resultados estructura Tercer Carril No. 2, 3 y 4.
Fuente: CEDEM. [12].

De las simulaciones anteriores se extrajeron los valores de la deformación a tracción en la fibra inferior de la base asfáltica (Epsilon T) y la deformación vertical en la subrasante (Epsilon Z), los cuales se introdujeron en las ecuaciones de Nottingham descritas anteriormente.

- **Tercer Carril No. 1:**

Criterio Agrietamiento:

$$Nf = 8.89030E - 13 \left(\frac{10^6}{136} \right)^{4.902} \quad (9)$$

$$Nf = 7.99E06 \quad (10)$$

Criterio Ahuellamiento:

$$Nr = 1.1262E - 06 \left(\frac{10^6}{53.3} \right)^{3.571} \quad (11)$$

$$Nr = 2.05E09 \quad (12)$$

▪ **Terceros Carriles No. 2, No. 3 y No. 4:**

Criterio Agrietamiento:

$$Nf = 8.89030E - 13 \left(\frac{10^6}{136} \right)^{4.902} \quad (13)$$

$$Nf = 7.99E06 \quad (14)$$

Criterio Ahuellamiento:

$$Nr = 1.1262E - 06 \left(\frac{10^6}{61.8} \right)^{3.571} \quad (15)$$

$$Nr = 1.21E09 \quad (16)$$

Con los anteriores resultados se realizó el chequeo de los criterios de Agrietamiento y Ahuellamiento para corroborar que dicho Número de ejes equivalentes admisibles sean mayores al Número de ejes equivalentes de diseño.

Tabla 7. Verificación Leyes de Fatiga Nottingham- Tercer carril 1

Capa	Criterio	NESE Admisible Calculado	NESE Diseño	Factor daño	NESE Admisible + Factor	CUMPLE?
1	Agrietamiento	7.99E+06	8.06E+05	9.98E-01	7.97E+06	CUMPLE
4	Ahuellamiento	2.05E+09	8.06E+06	6.26E-03	1.28E+07	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8. Verificación Leyes de Fatiga Nottingham- Terceros carriles 2, 3 y 4

Capa	Criterio	NESE Admisible	NESE Diseño	Factor daño	NESE Admisible + Factor	CUMPLE?
1	Agrietamiento	7.99E+06	8.06E+05	8.11E-01	6.48E+06	CUMPLE
4	Ahuellamiento	1.21E+09	8.06E+06	9.00E-03	1.09E+07	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

Se puede identificar que en las verificaciones, los criterios de agrietamiento y ahuellamiento CUMPLEN en todos los terceros carriles para un espesor de capa asfáltica modificada con NFTC de 15 cm, es decir los espesores de las capas propuestas son suficientes para evitar el agrietamiento por fatiga y el ahuellamiento, ya que las deformaciones que padecerá la base asfáltica y la subrasante son menores a aquellas que admiten.

A partir de esto se determinaron las duraciones que tendrán estas estructuras de pavimento con la implementación de una mezcla asfáltica HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono, para lo cual fue necesario hacer uso de los datos de los NESE acumulados durante el periodo de la Concesión del proyecto. Estos valores fueron representados como lo muestra la Figura 9. obteniéndose una curva que representa el comportamiento de los ejes equivalentes a través del tiempo.

Para determinar dichas duraciones fue necesario ingresar los valores de los NESE admisibles resultados de los cálculos anteriores bajo el criterio de ahuellamiento para cada tramo de tercer carril, la cual deriva las duraciones de las magnitudes ingresadas.

Tabla 9. Número de ejes equivalentes terceros carriles UF2.

Año	NESE Acumulado Diseño
2017	519.509
2018	1.064.281
2019	1.635.544
2020	2.234.596
2021	2.872.951
2022	3.536.645
2023	4.226.601
2024	4.943.786
2025	5.689.207
2026	6.457.095
2027	7.248.039
2028	8.062.650
2029	8.901.559
2030	9.765.419
2031	10.654.904
2032	11.570.709
2033	12.513.552
2034	13.484.175
2035	14.483.339
2036	15.511.834
2037	16.570.469
2038	17.660.081
2039	18.781.530
2040	19.935.705
2041	21.123.518
2042	22.345.910
2043	23.603.851
2044	24.898.337
2045	26.230.395
2046	27.601.082

Fuente: Informe de Pavimentos Unidad Funcional 2 Versión 1 [6].

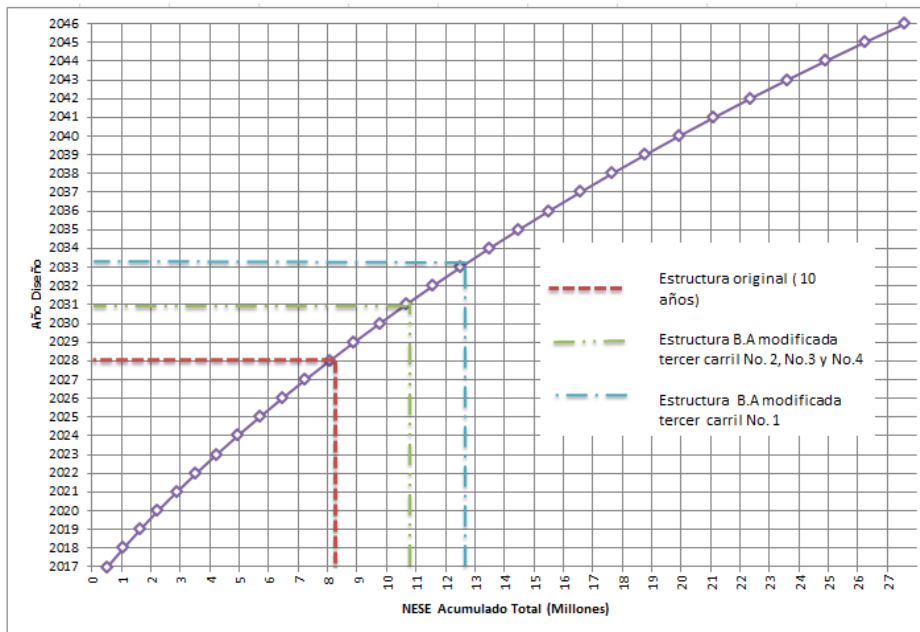


Fig. 9. Duraciones Estructura mezcla asfáltica convencional VS Estructuras mezcla asfáltica modificadas con NFTC en los tramos de tercer Carril No. 1, 2, 3 y 4.
Fuente: Elaboración Propia.

De la Figura 9. se puede deducir que se muestra una mejora representativa en cuanto a la vida útil de las estructuras de los tramos de tercer carril modificadas con NFTC sin purificar en la vía en estudio. Para el caso de la estructura de tercer carril No. 1 se identificó que el pavimento admitirá una mayor magnitud de NESE, representando un aumento de aproximadamente de 5 años adicionales al periodo de diseño de la estructura con mezcla asfáltica convencional. Así mismo para las estructuras de los tramos de tercer carril No. 2, 3 y 4 se presenta un incremento de 3 años respecto al periodo de diseño.

Es importante indicar que el pavimento del tercer carril No.1 posee un mejor comportamiento en el tiempo debido a que las características de la subrasante son mejores respecto a las de la subrasante de los tramos de tercer carril No. 2, No. 3 y No. 4.

2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Realizando la comparación entre el comportamiento de una mezcla asfáltica convencional con una modificada con nanotubos y nanofibras de carbono sin proceso de purificación, se pudo identificar que el empleo de este tipo de mezcla genera un incremento en el módulo de elasticidad. La mejora de este aspecto permite la reducción del espesor de la capa de asfalto y contribuye a la disminución de la acumulación de deformaciones permanentes por el efecto de las cargas y de temperatura, este aumento en el módulo es ideal para el tratamiento de los mecanismos de falla y la prevención de patologías de la rutina.

- De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el método racional, el empleo de la mezcla HMA-2 con NFTC sin proceso de purificación para los tramos de terceros carriles en la Unidad Funcional 2 del proyecto Bucaramanga- Pamplona, produjo un aumento en la duración de las estructuras de pavimento respecto a la compuesta de mezcla asfáltica convencional, dado el alto módulo de elasticidad que presenta la mezcla en base a las condiciones climáticas del sitio. Esto posiblemente representará una reducción en las actividades de rehabilitación que beneficiará el proyecto tanto en la operación como en el ámbito financiero. Sin embargo es indispensable corroborar estas ventajas de la aplicación de este tipo de mezcla en condiciones reales de operación de la vía (clima y tránsito).

- A pesar que la mezcla HMA-2 posee una granulometría baja, se puede identificar que con las características que aporta el empleo de nanotecnología en especial su alto módulo, ayudará a la capa asfáltica a componer una estructura que resistirá más cargas a las que irá estar sometida. Sin embargo se recomienda realizar estudios más profundos respecto al uso de este tipo de mezcla como capa asfáltica en pavimentos del país. Los autores que realizaron la investigación del desempeño mecánico de la mezcla HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono reiteran la necesidad de tener un control estricto en la fabricación de la mezcla y hacer estudios adicionales.

- Es importante indicar que estos nuevos tipos de mezclas y sus aplicaciones pueden ser una puerta a desarrollar pavimentos más integrales y convenientes para los futuros proyectos que se desarrollarán en el país, por esto es necesario apostar a las nuevas tecnologías e invertir en estudios y pruebas que permitan identificar todas sus contribuciones en el campo de la ingeniería de pavimentos.

REFERENCIAS

- [1] F. A. Reyes Lizcano, Diseño Racional de Pavimentos, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.
- [2] N. e. Chile, «Nanotecnología,» [En línea]. Disponible: <http://www.nanotecnologia.cl/que-es-nanotecnologia/> .
- [3] S. G. Silva Gomez, «Nanotecnología en Colombia,» Nanotech Colombia, 2011. [En línea]. Disponible: <http://nanotech-col.blogspot.com.co/p/nanotecnologia-en-colombia.html>.
- [4] A. Gómez, L. Alber, A. Elguea, M. J. Pla, M. Bagán y S. Pérez, «Alótropos del carbono,» Universitat Jaume I. [En línea]. Disponible: <https://sites.google.com/a/uji.es/alotropos-del-carbono/nanotubos-de-carbono>
- [5] D. S. d. Rio, «Estructura y propiedades de las nanofibras de carbono. Aplicación como soporte de electrocatalizadores,» 01 mayo 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/estructura-y-propiedades-de-las-nanofibras-de-carbono-aplicacion-como-soporte-de-electrocatalizadores>.
- [6] A. B. P. S.A.S, Informe de pavimentos Unidad Funcional 2 version 1, Bogotá, 2017.
- [7] M. Rubio, D. Martinez, C. Daza y F. Reyes, «Mechanical performance of HMA-2 modified with purified and unpurified carbon nanotubes and nanofibers,» Ingeniería e Investigación, vol. 37, nº 2, pp. 99-106, 2017. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n2.58649>
- [8] C. e. Vial, «Plan Indicativo de Señalización. Corredor 2: Bucaramanga-Pamplona. Tramo 1. Bucaramanga-Cuestaboba,» 2015. [En línea]. Disponible: <ftp://ftp.ani.gov.co/Tercera%20Ola/Bucaramanga%20Pamplona/F/FII/FII2/FII21/PDF/2-2-0-G2-RE-001-3.pdf>.
- [9] . H. A. Rondón Quintana, F. A. Reyes Lizcano, L. Á. González Ortiz y S. E. Vásquez Ardila, Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas, Bogotá, D.C: Ecoe Ediciones, 2012, pp. 15-16.
- [10] G. A. Jiménez Téllez, “Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica MDC-2 con nanotubos de carbono obtenidos a partir de metano vía catalítica”, Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2012
- [11] Climate-data.org, «Clima: El Picacho» [En línea]. Disponible: <https://es.climate-data.org/location/236550/>
- [12] J. Delgado E, *Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones en la Estructura Multicapa - CEDEM* , Bogota D.C, 2000.