

PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DE LA
VÍA PUENTE DE PIEDRA - COLÓN - VARIANTE MADRID, CUNDINAMARCA

ANGELA MARÍA SIERRA GARZÓN

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2017

PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DE LA
VÍA PUENTE DE PIEDRA - COLÓN - VARIANTE MADRID, CUNDINAMARCA

ANGELA MARÍA SIERRA GARZÓN

Proyecto de grado

Director

Prof. Ing. Juan Miguel Sánchez Durán

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2017

DEDICATORIA

*A Dios por guiarme en cada paso que di para culminar mi carrera, a mis padres:
Jorge Enrique Sierra y Maria Aurora Garzón, a mi esposo Oscar Alejandro
González, a mi hermoso hijo Juan Sebastián que es el motor de mi vida, a mis
hermanos, a mi padrastro; y a cada una de las personas que siempre me
apoyaron y creyeron en mí.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi director de proyecto de grado; Ingeniero Juan Miguel Sánchez, quien me apoyo desde el inicio, por su dedicación y compromiso hacia el proyecto, también quiero agradecer a mis jurados de sustentación, Ingeniero Livaniel Viveros e Ingeniero Humberto Valbuena, a la Universidad Santo Tomás por abrirme sus puertas, y a Sandra Rodríguez, Secretaria de la Facultad de Ingeniería Civil.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
JUSTIFICACIÓN	15
OBJETIVOS	16
Objetivo general	16
Objetivos específicos	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Pavimento.....	17
1.2 Estudio de tránsito	18
1.3 Estudio geotécnico	18
1.3.1 Subrasante	18
1.3.2 Penetrómetro dinámico de cono (PDC).....	19
1.3.3 Relación de soporte del suelo CBR.....	19
1.3.4 Módulo resiliente	19
1.4 Método INVIAS.....	20
1.5 Método SHELL 1978	20
1.6 Método AASHTO 1986.....	21
1.7 Método racional	21
1.8 Programa DEPAV.....	22
2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO	23
2.1 Localización.....	23
2.2 Caracterización del corredor de estudio	25
2.3 Caracterización geológica del corredor	28
2.4 Factores ambientales y climáticos.....	29
3. ESTUDIO GEOTÉCNICO	33
3.1 Trabajos realizados	33

3.2	Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio.....	33
3.3	Estratigrafía, parámetros geomecánicos y estabilidad del corredor	36
3.4	Características geotécnicas de la subrasante	38
3.5	Zonificación geotécnica del corredor.	39
4.	ESTUDIO DE FUENTES DE MATERIALES.....	41
4.1	Diseño de mezclas	41
4.1.1	Bases y subbases granulares	42
4.1.2	Bases estabilizadas.....	45
4.1.3	Concretos asfálticos	45
5.	TRÁNSITO.....	47
5.1	Análisis del tránsito.....	49
5.1.1	Tránsito atraído	61
5.1.2	Tránsito generado	62
5.2	Aforos	63
5.2.1	Resultados conteo 12 horas (6 a.m. - 6 p.m.)	63
5.2.2	Tránsito promedio diario semanal	64
5.2.3	TPD estimado.....	66
5.2.4	Tránsito equivalente	67
6.	DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	69
6.1	Método INVIAS.....	69
6.1.1	Tramo 1 (K0+000 - K5+075).....	70
6.1.2	Tramo 2 (K5+075 - K9+500).....	71
6.1.3	Análisis y resultados.....	73
6.2	Método AASHTO	74
6.3	Método racional	77
6.3.1	SHELL - Modelos estructurales.....	79
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	89

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Rangos de resistencia.....	40
Tabla 2. Requisitos de los materiales para bases granulares.....	42
Tabla 3. Requisitos de los materiales para subbases granulares	43
Tabla 4. Granulometrías para bases granulares.....	44
Tabla 5. Granulometrías para subbases granulares	44
Tabla 6. Especificaciones del cemento asfáltico	45
Tabla 7. Granulometrías para mezclas asfálticas	46
Tabla 8. Factor de distribución por carril.....	49
Tabla 9. Estimación NESE Estación N° 772	51
Tabla 10. TPDS y NESE. Estación N° 772	51
Tabla 11. Análisis de regresión. Estación N° 772	52
Tabla 12. Estimación NESE. Estación N° 773	53
Tabla 13. TPDS y NESE. Estación N° 773	53
Tabla 14. Análisis de regresión. Estación N° 773	54
Tabla 15. Estimación NESE. Estación N° 876	55
Tabla 16. TPDS y NESE. Estación N° 876	55
Tabla 17. Análisis de regresión. Estación N° 876	56
Tabla 18. Estimación NESE. Estación N° 39	57
Tabla 19. TPDS y NESE. Estación N° 39	57
Tabla 20. Análisis de regresión. Estación N° 39	58
Tabla 21. Estimación NESE. Estación N° 40	59
Tabla 22. TPDS y NESE. Estación N° 40	59
Tabla 23. Análisis de regresión. Estación N° 40	60
Tabla 24. Total conteo vehicular. Movimiento 1.....	63
Tabla 25. Total conteo vehicular. Movimiento 2.....	63
Tabla 26. Total conteo vehicular. Movimiento 5.....	63
Tabla 27. Total conteo vehicular. Movimiento 8.....	64
Tabla 28. Total conteo vehicular. Movimiento 9(2)	64
Tabla 29. Total conteo vehicular. Movimiento 9(4)	64
Tabla 30. TPDS Movimiento 1	65
Tabla 31. TPDS Movimiento 2	65
Tabla 32. TPDS Movimiento 5	65
Tabla 33. TPDS Movimiento 8	66
Tabla 34. TPDS Movimiento 9(2).....	66

Tabla 35. TPDS Movimiento 9(4).....	66
Tabla 36. TPD estimado por tramo	67
Tabla 37. Tránsito equivalente diario por tramo.....	67
Tabla 38. CBR tramo 1	70
Tabla 39. CBR tramo 2	71

LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1. Regiones climáticas según temperatura y precipitación.....	32
Cuadro 2. Ensayos de laboratorio ejecutados por Sierra Laboratorio de Suelos y Pavimentos S.A.S.	33
Cuadro 3. Localización de apiques	34
Cuadro 4. Resumen perfil geotécnico	37
Cuadro 5. Ensayo de cono dinámico. Resultados de CBR	38
Cuadro 6. Ensayo de penetración de CBR. Resultados de CBR	39
Cuadro 7. Clasificación vehicular	47
Cuadro 8. Movimientos y descripción de giros.....	48
Cuadro 9. Estaciones e índice de crecimiento	61
Cuadro 10. Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal	62
Cuadro 11. Cálculos de ejes equivalentes para el periodo de diseño.....	68
Cuadro 12. Clases de tránsito en función del número de ejes equivalentes.....	68
Cuadro 13. Parámetros de diseño estructura del pavimento tramo 1	70
Cuadro 14. Categorías de diseño para el tramo 1	71
Cuadro 15. Parámetros de diseño estructura del pavimento tramo 2	72
Cuadro 16. Categorías de diseño para el tramo 2	72
Cuadro 17. Estructura de pavimento flexible Manual INVIAS - Alternativa 1	73
Cuadro 18. Estructura de pavimento flexible Manual INVIAS - Alternativa 2	74
Cuadro 19. Coeficientes estructurales para diseño AASHTO - Tramo 1	76
Cuadro 20. Estructura de pavimento diseño AASHTO Tramo 1 (K0+000 - K5+075) Período de Diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d= 2,0\%$	76
Cuadro 21. Coeficientes estructurales para diseño AASHTO - Tramo 2	76
Cuadro 22. Estructura de pavimento diseño AASHTO Tramo 2 (K5+075 - K9+500) Período de Diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d= 4,1\%$	77
Cuadro 23. Parámetros de diseño racional Shell. Tramo 1.....	80
Cuadro 24. Modelo racional estructura de pavimento. Tramo 1.	80
Cuadro 25. Deformaciones actuantes calculadas con DEPAV. Tramo 1.....	82
Cuadro 26. Parámetros de diseño racional Shell. Tramo 2.....	82
Cuadro 27. Modelo racional estructura de pavimento. Tramo 2.	83
Cuadro 28. Deformaciones actuantes calculadas con DEPAV. Tramo 2.....	85
Cuadro 29. Estructura de pavimento tramo 1 (K0+000 - K5+075) Período de diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d= 2,0\%$	87

Cuadro 30. Estructura de pavimento tramo 2 (K5+075 - K9+500)	
Período de diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d= 4,1\%$	88

LISTA DE IMÁGENES

Pág.

Imagen 1. Localización del municipio de Madrid, Cundinamarca	23
Imagen 2. Vía Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid, Cundinamarca.....	24
Imagen 3. Vías alternas Puente de Piedra - Madrid, Cundinamarca	25
Imagen 4. Caracterización de la vía.....	26
Imagen 5. Caracterización de la vía.....	26
Imagen 6. Caracterización de la vía.....	27
Imagen 7. Caracterización de la vía.....	27
Imagen 8. Caracterización de la vía.....	28
Imagen 9. Geología del corredor de estudio	29
Imagen 10. Temperatura media anual (°C) - Departamento de Cundinamarca.....	30
Imagen 11. Precipitación total anual (mm) - Departamento de Cundinamarca.....	31
Imagen 12. Localización exploración del subsuelo (apiques cada 500 metros).....	36
Imagen 13. Estaciones de conteo vehicular.....	50
Imagen 14. DEPAV. Tramo 1.....	81
Imagen 15. Deformaciones capas de la estructura del pavimento. Tramo 1.	81
Imagen 16. Deformaciones capa remanente de afirmado y subrasante. Tramo 1.	82
Imagen 17. DEPAV. Tramo 2.....	83
Imagen 18. Deformaciones capas de la estructura del pavimento. Tramo 2.	84
Imagen 19. Deformaciones subrasante. Tramo 2.	84

LISTA DE GRÁFICOS

Pág.

Gráfico 1. Proyección NESE. Estación N° 772	52
Gráfico 2. Proyección NESE. Estación N° 773	54
Gráfico 3. Proyección NESE. Estación N° 876	56
Gráfico 4. Proyección NESE. Estación N° 39	58
Gráfico 5. Proyección NESE. Estación N° 40	60
Gráfico 6. CBR percentil 87,5% Tramo 1	70
Gráfico 7. CBR percentil 87,5% Tramo 2	72

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Perfiles estratigráficos
- Anexo B. Resultados ensayos de laboratorio
- Anexo C. Registro de aforos vehiculares
- Anexo D. Memorias de cálculo

INTRODUCCIÓN

Actualmente las vías rurales juegan un papel muy importante en el sostenimiento de un municipio, ya que estas vías de acceso son determinantes para que el comercio entre veredas sea eficiente. El municipio de Madrid con sus diversos productos agrícolas, floricultura y ganadería específicamente en la producción de leche y sus derivados, se está viendo afectado en una de sus vías de acceso ya que no se encuentra pavimentada, en épocas de invierno se dificulta el acceso y es necesario estar renovando periódicamente la capa de afirmado.

El tramo de vía Puente Piedra - Colón - Variante Madrid, en Cundinamarca, no cuenta actualmente con las condiciones aptas para el desarrollo económico del municipio de Puente de Piedra, teniendo en cuenta que esta vía nunca ha sido pavimentada y contiene mucho material grueso que genera daños a los vehículos, así mismo causa retrasos en los desplazamientos de los habitantes y comerciantes de estas veredas.

Con el fin de mitigar el impacto y promover el desarrollo vial y económico de municipio de Madrid, se propone realizar el estudio geotécnico y de tránsito para el diseño de la estructura del pavimento de la vía Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid en Cundinamarca, que será realizado bajo los lineamientos y conocimientos adquiridos en la Universidad Santo Tomás.

Este proyecto académico podrá servir de apoyo en la planeación de la construcción del corredor, permitiendo a la población que comprende las veredas de La Cuesta, Los Bebedores y Puente Piedra, mejorar su entorno socio-económico, permitiendo así que el tránsito de vehículos y de personas se efectué de una forma segura y a sus habitantes mejorar su calidad de vida.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de las vías rurales en el país se ha visto afectado por la asignación limitada de recursos económicos a cada cabecera municipal, generando un estancamiento económico. Para el municipio de Madrid es de gran importancia contar con vías que estén en buenas condiciones y que le permitan tener un desarrollo sostenible de su economía. El estado actual de la vía que comprende Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid Cundinamarca, está generando demoras en el transporte de productos florales, agrícolas, cárnicos entre otros, que aumentan el precio de estos alimentos en el comercio municipal. Por otro lado existe la necesidad de conectar la población rural con la urbana con el fin de realizar diversos trámites que sólo se pueden llevar a cabo en la cabecera municipal como son: financieros, legales y tributarios.

El suelo del corredor de estudio está compuesto por materiales de afirmado gruesos e irregulares, que no se encuentran suficientemente compactados; la época de invierno aumenta los empozamientos de agua por los baches que posee y la falta de un diseño y nivelación estructural.

El estudio geotécnico y de tránsito será parte fundamental para proponer un diseño de la estructura del pavimento del corredor, que dé garantías y cumpla con las necesidades de la población que habita estas veredas del municipio de Madrid, mejorando su calidad de vida, generando un crecimiento socio-económico y desarrollo de sus actividades agropecuarias de una manera competitiva.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar la estructura del pavimento para el tramo de la vía Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid, Cundinamarca usando diferentes metodologías de cálculo.

Objetivos específicos

- Establecer las condiciones generales en las que se encuentra actualmente el corredor.
- Realizar un estudio de tránsito para estimar el volumen de tráfico futuro en el corredor definido.
- Realizar un estudio geotécnico para diseño de la estructura del pavimento.
- Diseñar la estructura del pavimento mediante diferentes metodologías (INVIAS, AASHTO y Racional SHELL).

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Pavimento

El pavimento es una estructura que está compuesta por una serie de capas que contienen materiales adecuados para cumplir con especificaciones técnicas permitiendo garantizar su resistencia y durabilidad; la estructura de apoyo de estas capas es la subrasante que a su vez sirve como fundación y soporta las cargas y esfuerzos continuos del tránsito durante el periodo de diseño, esta estructura puede ser natural o estar compuesta por diferentes materiales de relleno que deben ser compactados y tener con una resistencia al esfuerzo cortante apropiada para el proyecto a desarrollar.

Un pavimento debe cumplir con unos requisitos para que cumpla adecuadamente sus funciones como son:

- Ser resistente a la acción de las diferentes cargas que el tránsito ejerce sobre este
- Ser resistente a los diferentes procesos climáticos, biológicos y atmosféricos a los cuales está sometida continuamente
- Presentar una textura superficial homogénea que adapte las velocidades previstas de circulación.
- La sección transversal como longitudinal debe presentar una regularidad que permita una adecuada comodidad a los usuarios en función de la velocidad de circulación y longitudes de onda de las deformaciones que garantice la seguridad vial en todo su recorrido.
- La durabilidad del pavimento debe ser acorde al diseño planteado según los estudios realizados
- El drenaje debe presentar condiciones adecuadas que complementen el funcionamiento del pavimento

Los pavimentos flexibles se caracterizan por estar compuestos por un revestimiento bituminoso que es apoyado sobre dos capas; una de estas es la subbase granular, que tiene como principal función servir de capa de transición entre la subrasante y la base granular impidiendo que los finos que componen la subrasante se filtren a la base granular afectando su calidad; ya que la subrasante está expuesta a cambios de expansión relacionados al contenido de agua y

cambios de temperatura, la subbase absorbe esto para evitar que las deformaciones afecten la carpeta asfáltica. En cuanto a resistencia, la subbase se encarga de soportar los esfuerzos que transmiten las cargas de los vehículos a las capas superiores, distribuyéndola de forma apropiada a la subrasante; la segunda capa es la base granular que recibe en un mayor grado los esfuerzos transmitidos por el tránsito de vehículos; dependiendo del tipo de obra y características geomecánicas de la subrasante se puede prescindir de una de estas, según especificaciones del proyecto. (Higuera, 2010)

1.2 Estudio de tránsito

El tránsito es un parámetro fundamental para determinar las cargas a las que va a estar sometido el pavimento durante el periodo de diseño, que normalmente es de 10 a 20 años, ya que a la hora de establecer los espesores de las capas es necesario tener en cuenta las repeticiones de ejes sencillos equivalentes de 8,2 toneladas, que se pueden determinar a partir del tránsito promedio diario, la clasificación de vehículos, el factor de equivalencia de carga para cada tipo de vehículo, la distribución direccional, la distribución por carril y por último la proyección de las variables en la vida de diseño. (Vargas, 2010)

1.3 Estudio geotécnico

El estudio geotécnico permite caracterizar el suelo natural (subrasante) donde se desarrolla el proyecto, por medio de ensayos de laboratorio como lo son clasificación (límites y gradación), humedad, materia orgánica, CBR (a humedad natural y sumergido) y compresión inconfiada (capacidad portante); ya que este es el encargado de recibir los esfuerzos producidos por el tránsito. (Fonseca, 1998)

1.3.1 Subrasante

Es la capa en la que va soportada la estructura del pavimento y por ello se debe evaluar su capacidad de soporte debido a las cargas de tránsito. Para un buen diseño es necesario conocer las características de la subrasante en cuanto a humedad, volumen y clasificación ya que estos parámetros permiten conocer los posibles problemas que pueda presentar al momento de estar en funcionamiento el pavimento. (Fonseca, 1998)

1.3.2 Penetrómetro dinámico de cono (PDC)

El penetrómetro dinámico de cono (PDC) es un método de ensayo estandarizado, el INVIAS muestra este ensayo bajo la norma INV-E 172-13, en la cual se busca evaluar la resistencia de los suelos a partir de sus esfuerzos cortantes y la resistencia a ser penetrados, también es usado para evaluar estas características en materiales granulares previamente han sido compactados, bajo este método se busca encontrar un valor aproximado del CBR en campo.

El instrumento de medición consta de un martillo de 8 Kg y una varilla milimetrada en la cual se deja caer libremente sobre un yunque de acople con el fin de penetrar el suelo o el material a ensayar.

Teniendo en cuenta que el las cargas del tránsito se pueden disipar a partir de los 80 cm de profundidad es recomendable tener en cuenta las lecturas hasta dicha profundidad. (INVIAS, 2013)

1.3.3 Relación de soporte del suelo CBR

El ensayo de CBR o California Bearing Ratio, principalmente es usado para diseño de pavimentos flexibles, y se realiza en suelos granulares y/o cohesivos con el fin de determinar la resistencia al esfuerzo de dicho suelo; cuando la muestra es sometida a una determinada carga por medio de un pistón estandarizado y a una velocidad constante, se puede establecer la relación de esfuerzo para que el pistón penetre dicha muestra en 0,1" y 0,2" y el esfuerzo que requirió para esta penetración en una muestra patrón bien gradada. (INVIAS, 2013)

Este ensayo se puede desarrollar bajo los siguientes métodos

- CBR in-situ o de campo
- CBR de laboratorio
- CBR con muestras inalteradas

1.3.4 Módulo resiliente

El módulo resiliente busca evaluar en el suelo la acción de las deformaciones causadas por la carga que emiten los vehículos en las diferentes capas del pavimento y este parámetro es de gran ayuda para determinar en los diseños de pavimento flexible. Se recomienda realizar el ensayo de módulo resiliente bajo la norma AASHTO T724, homologado por el INVIAS con la norma INV E-749-13, ya que este ensayo se debe realizar con un equipo especial en donde se toma una muestra del tramo que sea representativa y es sometida a cargas con una duración definida y con esfuerzos y humedades controladas, las deformaciones

permanentes que el pavimento sufre debido a estas cargas se denominan plásticas y la deformación que tiene un porcentaje de recuperación es la deformación resiliente. (Higuera, 2010)

1.4 Método INVIAS

Metodología que el instituto nacional de vías con la asesoría del ingeniero Alejandro Tanco, de nacionalidad argentina y con apoyo de profesionales de la Universidad del Cauca, desarrollaron para uso nacional este manual, con el fin de estandarizar el método de diseño y los criterios para clasificar las condiciones particulares de cada proyecto, este manual tiene como base el método AASTHO-93; este método realiza un detallado estudio a las diferentes condiciones climáticas, cargas vehiculares y suelos que caracterizan las diferentes zonas del país.

Por medio de diversas cartas de diseño, proponen condiciones económicas acordes al desarrollo vial y económico del país y en un lineamiento con las especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo vigentes. (INVIAS, Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998)

1.5 Método SHELL 1978

Este método tiene sus inicios en el año 1963 con el fin de obtener cálculos para el diseño de pavimentos que fuesen más prácticos y fácil de aplicar, fue publicado en forma de cartas y hacia el año 1978 este método fue actualizado con el fin de incluir aspectos de los cuales se podía evidenciar afectaban directamente los diseños, como la temperatura y el uso de diversas mezclas asfálticas en un diseño, por otro lado se buscaba obtener un procedimiento el cual permitiera calcular las deformaciones permanentes o la afectación de las capas asfálticas en la vida útil del pavimento.

Este método parte de la idea de plantear como estructura de pavimento un sistema multicapa que es elástico a las acciones de carga del tránsito, en la estructura del pavimento es calculado los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que se pueden producir en cualquier parte de la estructura.

Las capas que propone este método son tres, distribuidas de la siguiente manera, la subrasante que es considerada la capa infinita en el estrato vertical ya que corresponde a la fracción natural que soporta o sirve de fundación de la estructura, una siguiente capa que está compuesta por un conjunto de materiales granulares denominados base y subbase granular las cuales pueden ser estabilizadas con

diferentes aditivos; finalmente se encuentra la última capa que está conformada por los diferentes capas de ligante que hacen parte del espesor asfáltico.

Este método tiene en cuenta que el diseño que se pueda escoger en las diferentes cartas que contienen diferentes combinaciones de espesores y materiales granulares sean acordes a las especificaciones particulares del periodo de diseño y sus requerimientos de tránsito previamente estudiados. (Higuera, Nociones sobre metodos de diseño de estructura de pavimentos para carreteras. Teoria, metodos de diseño y ejemplos de aplicación, 2010)

1.6 Método AASHTO 1986

Con el fin de estudiar el comportamiento de los pavimentos flexibles y rígidos, en el año 1951 inicia las pruebas de ensayo AASHTO en Ottawa, Illinois; que permitirían consolidar el método de diseño hacia el año 1961, este método tiene como premisas los siguientes parámetros de cálculo (Higuera, Nociones sobre metodos de diseño de estructura de pavimentos para carreteras. Teoria, metodos de diseño y ejemplos de aplicación, 2010):

- El tránsito, especificado como el número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- El nivel de confianza con que se desea calcular el pavimento.
- El error normal combinado.
- El nivel de serviciabilidad.
- El módulo resiliente de la subrasante.
- El numero estructural del pavimento.
- La calidad del drenaje.
- Los módulos dinámicos de las diferentes capas de la estructura del pavimento.

1.7 Método racional

La metodología racional caracteriza cada capa de la estructura del pavimento, asumiendo un espesor por cada capa.

Para este método se determinan las deformaciones de la estructura del pavimento ante las cargas de diseño, por medio de modelos computacionales (DEPAV), luego se comparan los resultados con las leyes de fatiga (Higuera, Nociones sobre metodos de diseño de estructura de pavimentos para carreteras. Teoria, metodos de diseño y ejemplos de aplicación, 2010).

Esté método considera los siguientes parámetros:

- Estimación del tránsito de diseño.
- Velocidad de operación y tiempo de aplicación de las cargas.
- Evaluación de las condiciones climáticas y regionales.
- Característica de los materiales.
- Determinación del módulo resiliente mediante ensayos triaxiales dinámicos.
- Determinación del módulo resiliente de los suelos por correlación.
- Capas asfálticas.
- Relación de Poisson de los materiales viales.
- Definición de los criterios de comportamiento o modelos de falla de los materiales.
- Modelización de la estructura.
- Calculo de esfuerzos y deformaciones.
- Definición de esfuerzos y deformaciones admisibles.
- Comparación de solicitaciones calculadas con las admisibles.
- Diseño definitivo de la estructura.

1.8 Programa DEPAV

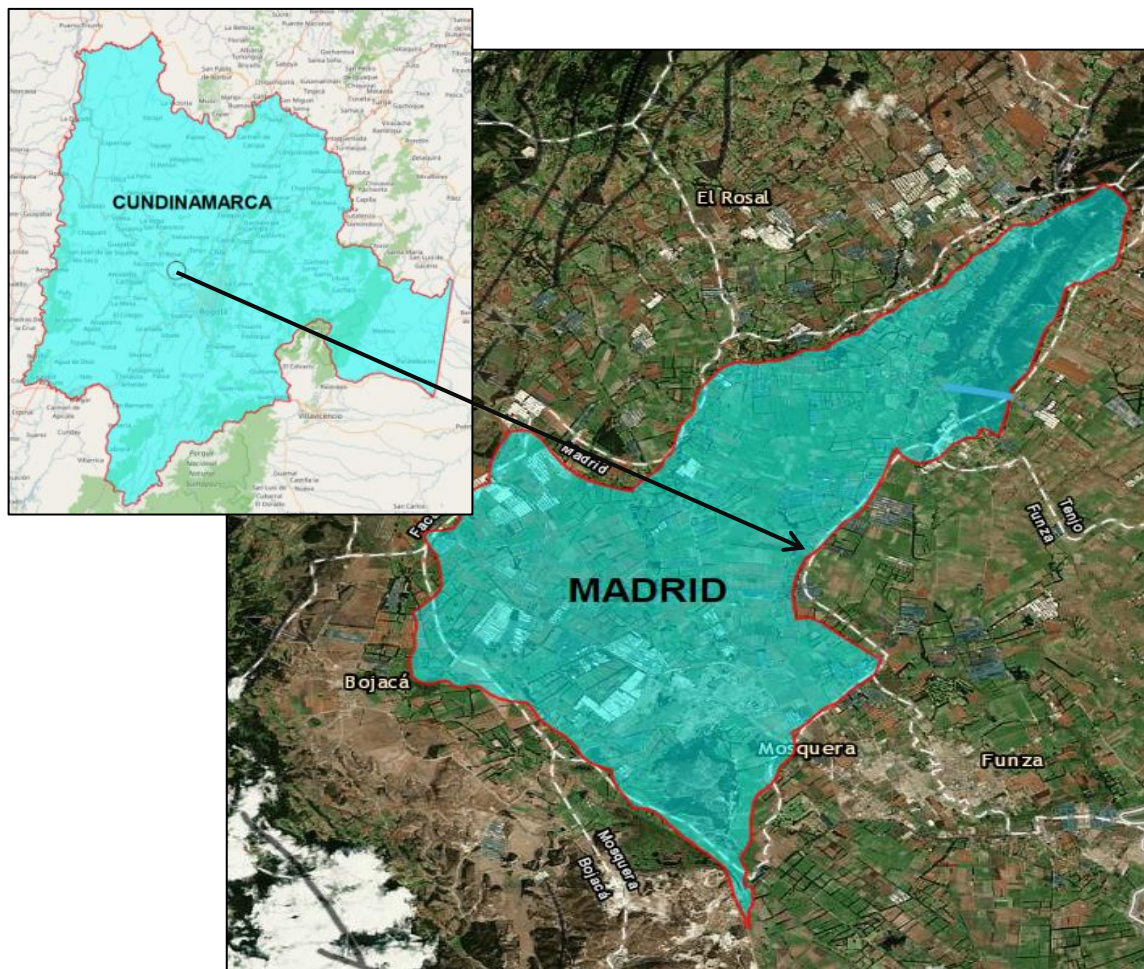
Es un programa que calcula los esfuerzos y las deformaciones máximas producidas en las interfaces de un sistema elástico multicapa que puede estar constituido entre dos a seis capas caracterizadas por el espesor, el módulo resiliente y la relación de Poisson. Fue escrito por los ingenieros Alfonso Murgueitio Valencia y Efraín de Jesús Solano Fajardo, en el Instituto de Vías de la Universidad del Cauca en la investigación nacional de pavimentos en 1994. (INGEPAV, 2016)

2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

2.1 Localización

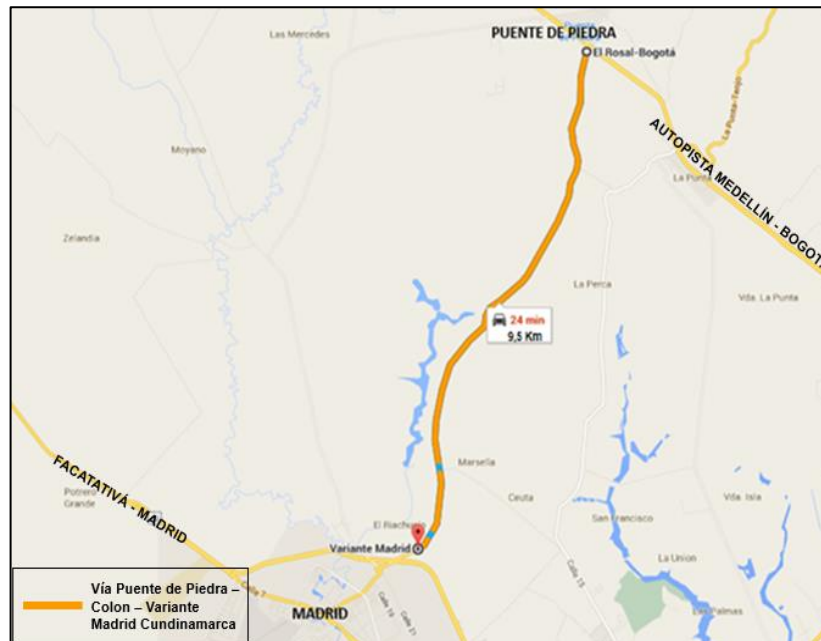
La vía Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid se encuentra ubicada al noroccidente del municipio de Madrid en el departamento de Cundinamarca (Imagen 1), a lo largo de los 9,5 kilómetros que componen el corredor (Imagen 2), colindan las veredas Puente de Piedra, Los Bebedores, Los Arboles, Marsella, fincas y haciendas ganaderas como también diversas empresas de floricultura e industriales, que representan la economía de este sector.

Imagen 1. Localización del municipio de Madrid, Cundinamarca



Fuente: <https://goo.gl/TzQQSk>

Imagen 2. Vía Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid, Cundinamarca



Fuente: <http://goo.gl/n8XdyF>, 2016

Actualmente existen dos vías alternas que comunican el sector de puente de piedra con Madrid como se puede observar en la imagen 3. Las cuáles son:

- Vía Vereda Puente Piedra - Madrid con un recorrido aproximado de 17 kilómetros en 35 minutos movilizándose en vehículo.
- Vía Bogotá - La Vega / El Rosal - Bogotá - La Punta con un recorrido de 18 kilómetros en 50 minutos movilizándose en vehículo, teniendo en cuenta que es una vía parcialmente pavimentada.

La comunicación de Puente de Piedra con el municipio de Madrid a pie, se realiza a través del corredor de estudio en un tiempo de recorrido aproximado de 2 horas y 30 minutos.

Imagen 3. Vías alternas Puente de Piedra - Madrid, Cundinamarca



Fuente: <http://goo.gl/x2HANw>, 2016

2.2 Caracterización del corredor de estudio

Para determinar las condiciones actuales de la vía se realizó un recorrido en el cual se pudo establecer que la VÍA PUENTE DE PIEDRA-COLÓN-VARIANTE MADRID CUNDINAMARCA tiene una longitud aproximada de 9,5 kilómetros y un ancho variable entre 6,0 y 9,0 metros. Ver imágenes 4, 5 y 6.

El corredor se caracteriza por una morfología o un relieve plano, el cual actualmente está constituido desde el K0+000 por un material de fresado suelto y un segmento pavimentado que presenta una falla por fatiga (piel de cocodrilo); del K0+575 al K9+075 está compuesto superficialmente por un material granular que ha sido extendido y compactado con un cilindro vibro-compactador y por el tránsito continuo de automóviles y vehículos de carga que circulan diariamente por este corredor.

En entrevista con habitantes de la zona expresan que el clima es muy variable y que no hay una conformidad con respecto al estado actual del corredor, ya que en épocas de lluvia se producen empozamientos que dificultan el tránsito normal y en verano se genera mucho material particulado que se desprende de la vía. Ver imágenes 7 y 8. Las zonas de mercado están ubicadas en los extremos del corredor, es decir en Puente de Piedra y Madrid, situación que obliga a los habitantes a tener que realizar largos desplazamientos caminando por un corredor que no les brinda seguridad y que por su estado puede generar afecciones respiratorias por material suelto que permanece en el corredor de estudio.

Imagen 4. Caracterización de la vía



Imagen 5. Caracterización de la vía



Imagen 6. Caracterización de la vía



Imagen 7. Caracterización de la vía



Imagen 8. Caracterización de la vía

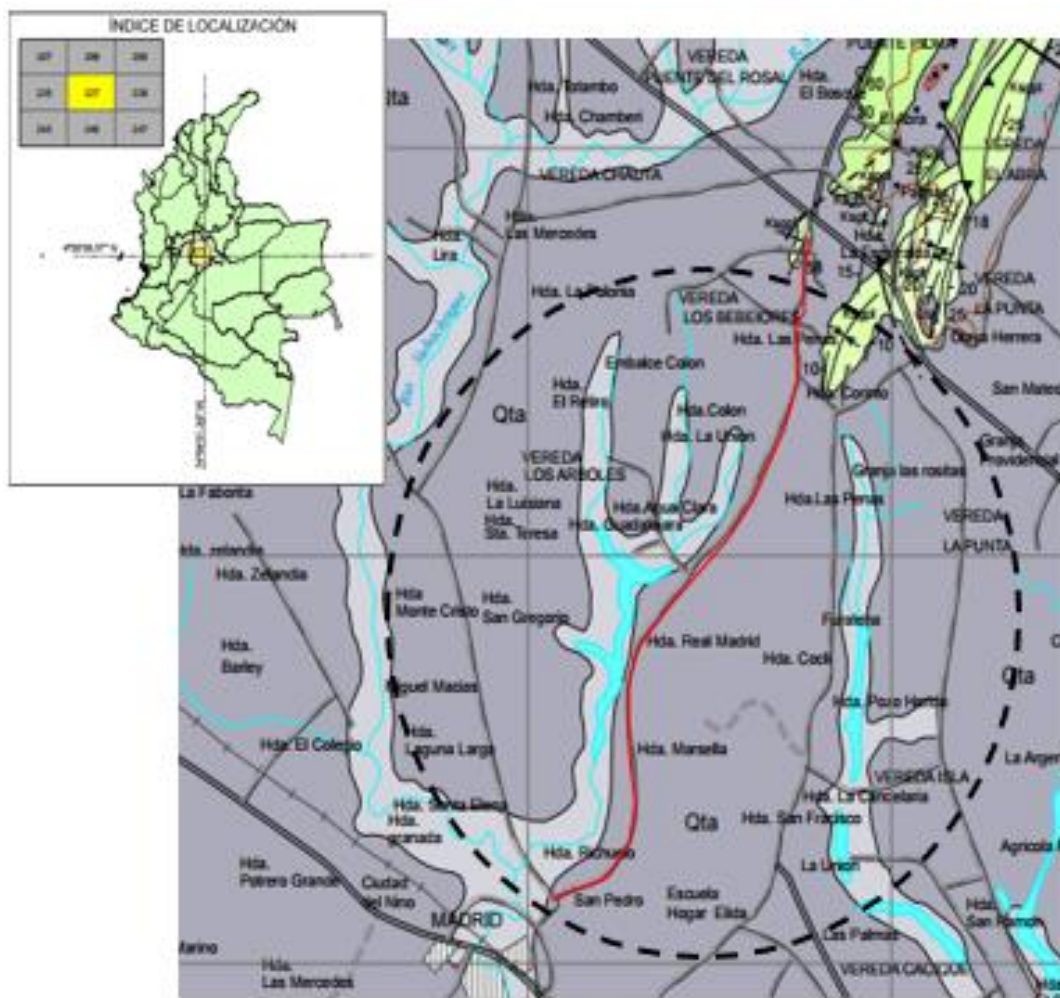


2.3 Caracterización geológica del corredor

Con el objeto de obtener información de referencia de las características geológicas en el corredor de diseño se realiza una descripción general de la litología que compone la longitud de corredor a intervenir teniendo en cuenta la “Geología de la Plancha 227 la Mesa” del Servicio Geológico Colombiano. Imagen 9.

Se puede establecer que la litología para el tramo de 9,5 kilómetros del corredor Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid, Cundinamarca corresponde en general a depósitos recientes del cuaternario tipo terraza alta (Qta) que incluye depósitos de holoceno conformados por suelos con gravas, cantos angulares de rocas sedimentarias, alternando con limos y arcillas.

Imagen 9. Geología del corredor de estudio



Fuente: Plancha 227 - La Mesa, Cundinamarca. SGC (1998)

2.4 Factores ambientales y climáticos

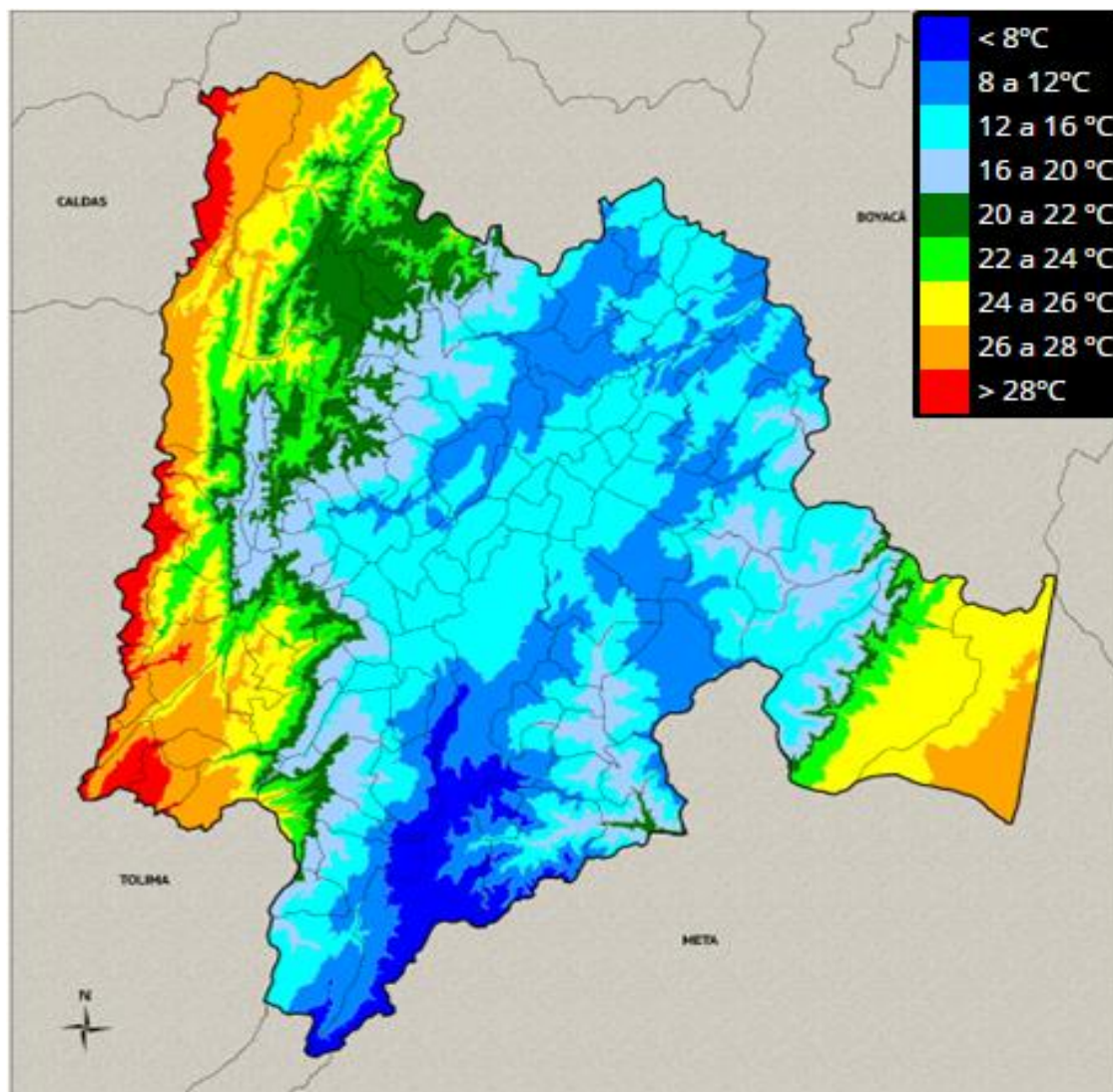
Como factores de diseño está el relacionado con las condiciones climáticas, las que son consideradas por el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito para determinar las respectivas Cartas de Diseño.

Con base en el Atlas de Colombia (IGAC) y los promedios climatológicos del IDEAM, se tomó como referencia la estación N° 21205770 (base aérea de Madrid), para el corredor de estudio Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid

Cundinamarca, dentro de las condiciones climáticas se enmarca en un piso frío semihúmedo (temperatura media de 13,8° C).

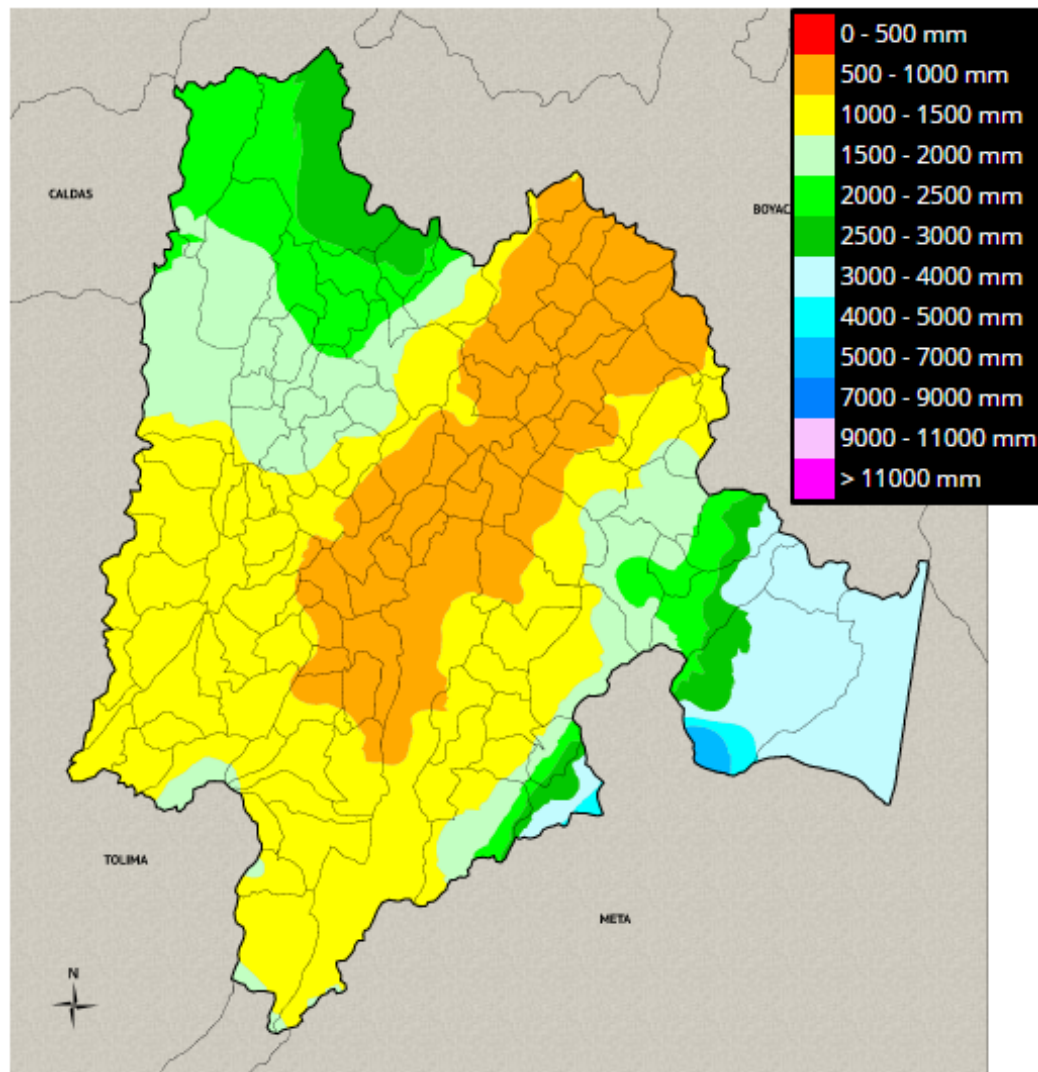
En las imágenes 10 y 11 se muestra la distribución geográfica de la Temperatura Media Anual (°C) y la Precipitación Total Anual (mm).

Imagen 10. Temperatura media anual (°C) - Departamento de Cundinamarca



Fuente: <https://goo.gl/OYkoEw>

Imagen 11. Precipitación total anual (mm) - Departamento de Cundinamarca



Fuente: <https://goo.gl/OYkoEw>

En cuanto a pluviosidad se enmarca dentro de una región con pluviosidad media anual entre 500 a 1000 mm/año. En concordancia con el cuadro 1 donde se presentan las regiones climáticas establecidas en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS, considerando la temperatura y precipitación de la zona, la región climática para efectos de diseño del pavimento se definió como R2 - Región Templado seco y semihúmedo (Temperatura media entre 13 y 20°C y precipitación media anual menor a 2.000 mm).

Cuadro 1. Regiones climáticas según temperatura y precipitación

No.	Región	Temperatura TMAP (°C)	Precipitación media anual (mm)
R1	Fría seca y semihúmeda	< 13	< 2000
R2	Templado seco y semihúmedo	13 - 20	< 2000
R3	Cálido seco y semihúmedo	20 - 30	< 2000
R4	Templado húmedo	13 - 20	2000 - 4000
R5	Cálido húmedo	20 - 30	2000 - 4000
R6	Cálido muy húmedo	20 - 30	> 4000

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito

3. ESTUDIO GEOTÉCNICO

3.1 Trabajos realizados

Para determinar las condiciones geotécnicas se estableció un plan de trabajo el cual incluyó visita al corredor de estudio para su caracterización general, programación de exploraciones geotécnica, selección de muestras y ensayos de laboratorio para su respectivo análisis que permitan determinar las alternativas y propuestas de la estructura del pavimento.

3.2 Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio

El perfil estratigráfico del corredor de estudio se identificó y caracterizo a partir de la exploración geotécnica por medio de apiques los cuales se distribuyeron cada 500 m a lo largo del tramo con profundidad de 1,50 m.

Se realizó muestreo de materiales cada cambio de estrato tanto del afirmado existente, la cual aparentemente presenta una buena compactación, se muestrea también el material de subrasante, para ser llevadas a laboratorio y sometidas a los siguientes ensayos:

Cuadro 2. Ensayos de laboratorio ejecutados por Sierra Laboratorio de Suelos y Pavimentos S.A.S.

Ensayo	Norma INVIAS 2013
Apique 1,00 x 1,00 x 1,50m (mínimo), incluye toma de muestras (mínimo 3 por apique)	--
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos	INV E-123-13
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado	INV E-122-13
Determinación del límite líquido de los suelos	INV E-125-13

Ensayo	Norma INVIAS 2013
Límite plástico e índice de plasticidad	INV E-126-13
CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada	INV E-148-13
CBR método I (Materiales Granulares)	INV E-148-13
Uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad	INV E-172-13
Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición	INV E-121-13

Se estableció un abscisado para dar una ubicación a las exploraciones anteriormente definidas, en la imagen 12 se muestra la ubicación de los apiques a lo largo del corredor.

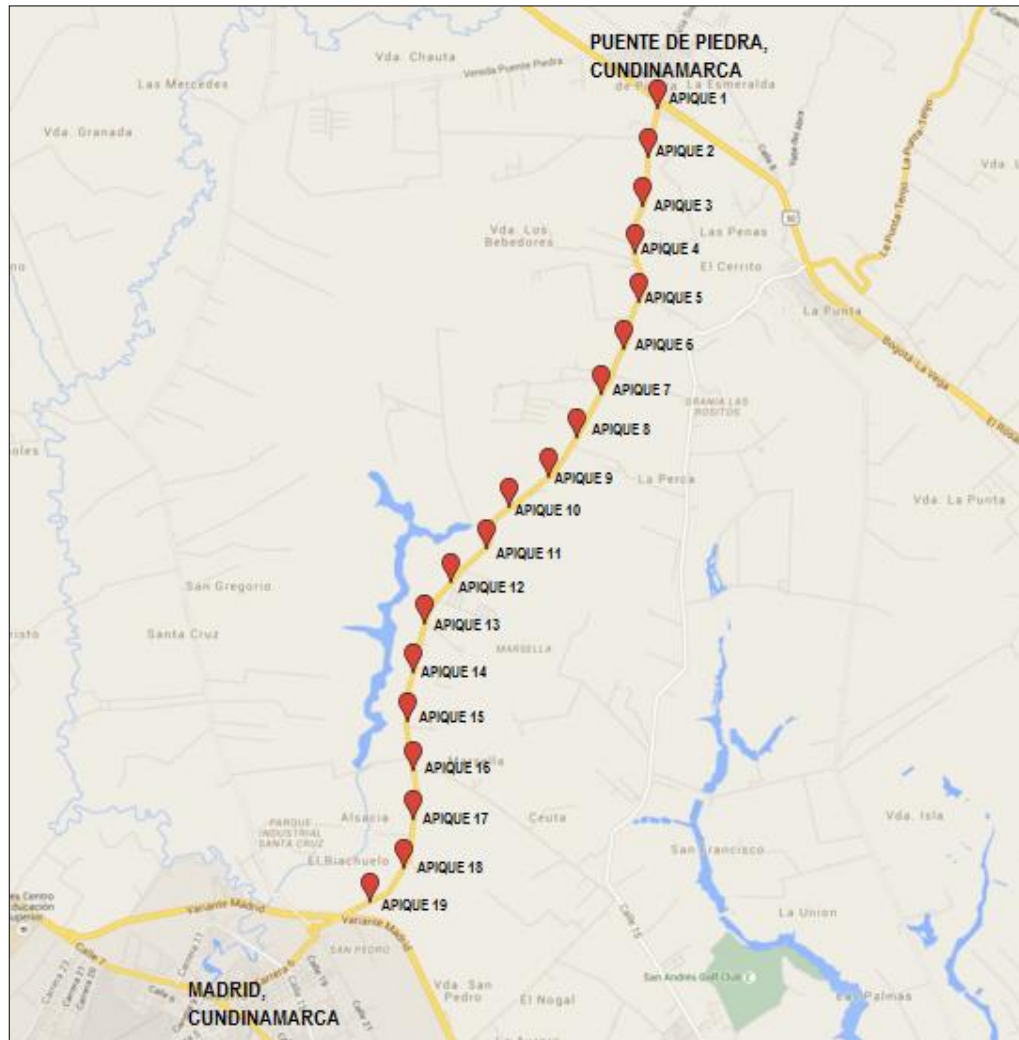
Cuadro 3. Localización de apiques

CORREDOR PUENTE DE PIEDRA - COLÓN - VARIANTE MADRID, CUNDINAMARCA		
Abscisa	Apique	Profundidad (m)
K0 + 075 (DERECHO)	AP-1	0,00 - 1,50
K0 + 575 (IZQUIERDO)	AP-2	0,00 - 1,50
K1 + 075 (DERECHO)	AP-3	0,00 - 1,50
K1 + 575 (IZQUIERDO)	AP-4	0,00 - 1,50
K2 + 075 (DERECHO)	AP-5	0,00 - 1,00
K2 + 575 (IZQUIERDO)	AP-6	0,00 - 1,50
K3 + 075 (DERECHO)	AP-7	0,00 - 1,50
K3 + 575 (IZQUIERDO)	AP-8	0,00 - 1,50
K4 + 075 (DERECHO)	AP-9	0,00 - 1,00
K4 + 575 (IZQUIERDO)	AP-10	0,00 - 1,50

CORREDOR PUENTE DE PIEDRA - COLÓN - VARIANTE MADRID, CUNDINAMARCA		
Abscisa	Apique	Profundidad (m)
K5 + 075 (DERECHO)	AP-11	0,00 - 1,50
K5 + 575 (IZQUIERDO)	AP-12	0,00 - 1,50
K6 + 075 (DERECHO)	AP-13	0,00 - 1,50
K6 + 575 (IZQUIERDO)	AP-14	0,00 - 1,50
K7 + 075 (DERECHO)	AP-15	0,00 - 1,50
K7 + 575 (IZQUIERDO)	AP-16	0,00 - 1,50
K8 + 075 (DERECHO)	AP-17	0,00 - 1,50
K8 + 575 (IZQUIERDO)	AP-18	0,00 - 1,50
K9 + 075 (DERECHO)	AP-19	0,00 - 1,50

En el Anexo A se presentan los registros estratigráficos y en el Anexo B se relacionan los resultados de los ensayos de laboratorio. En total se realizaron 19 apiques cuya localización y distribución se presenta en la imagen 12.

Imagen 12. Localización exploración del subsuelo (apiques cada 500 metros)



Fuente: <http://goo.gl/I8NNp2>, 2016

3.3 Estratigrafía, parámetros geomecánicos y estabilidad del corredor

Luego de tener los perfiles estratigráficos y la relación de muestras recuperadas en los apiques realizados, se generó al laboratorio la orden de servicio para ser analizados; teniendo en cuenta los reportes de resultados de laboratorio se pudo evidenciar que el suelo encontrado cuenta con las siguientes características:

- Al inicio corredor se observa una capa de asfalto de 5 metros de longitud y 0,05 metros de espesor y de los cuales 3 metros presentan falla por fatiga o piel de cocodrilo.

- La capa de afirmado tiene un espesor que varía entre los 0,15 metros y 0,60 metros, se compone principalmente por gravas arcillo limosas color habano oscuro de plasticidad baja, representa un 90% del corredor y en algunos sectores por arena gravosa de color café claro con plasticidad baja.
- La subrasante está compuesta por un limo con algo de arena de plasticidad alta a media de color café oscuro y en promedio se encuentra a una profundidad de 0,36 metros

El corredor presenta un relieve plano con una variación representativa en cuanto a su ancho entre 6,0 metros y 9,0 metros, el tramo se encuentra prácticamente al mismo nivel con respecto a las fincas o haciendas aledañas sin presentar zonas que estén con problemas de deslizamientos que generen inestabilidad. Durante todo el recorrido se pudo evidenciar diversos hundimientos que obedecen a los esfuerzos que son transmitidos al terreno de fundación natural (actual) por el tránsito de vehículos en la zona.

Cuadro 4. Resumen perfil geotécnico

PROF.	AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	AP-6	AP-7	AP-8	AP-9	AP-10	AP-11	AP-12	AP-13	AP-14	AP-15	AP-16	AP-17	AP-18	AP-19
0,00																			
0,05																			
0,10	GC-GM		SM						GM		GC-GM	SC	GC		GP		GM		SC-SM
0,15																			
0,20					SC	GC-GM	GM	GC-GM		GC				GC				GM	
0,25				GC															
0,30		SC																	
0,35															GM	GC-GM			
0,40	MH																		MH
0,45			MH																
0,50						ML		MH			MH	MH					ML	MH	
0,55									MH	MH			MH						
0,60																			
0,65					MH														
0,70																			
0,75	MH																		
0,80																			
0,85							MH												
0,90																			MH
0,95																			
1,00				CH															
1,05		MH				MH									ML			MH	
1,10																			
1,15			MH																
1,20																			
1,25	SM							MH											
1,30																			
1,35																			
1,40																			
1,45																			
1,50																			CH

Convenciones:

GC-GM: Gravas areno arcillo limosas

MH: Limos de plasticidad alta

SM: Arenas limosas de plasticidad alta

SC: Arenas arcillosas de plasticidad baja

GC: Gravas arcillosas de plasticidad baja

CH: Arcillas inorgánicas de plasticidad alta

ML: Limos de plasticidad baja

GM: Gravas limosas de plasticidad baja

GP: Gravas pobremente gradadas

SC-SM: Arenas gravillo arcillo limosas

3.4 Características geotécnicas de la subrasante

Para hacer una descripción de las características geo-mecánicas del corredor de estudio se debe tener en cuenta el reconocimiento de campo, el registro estratigráfico de cada apique y los resultados de ensayos de laboratorio, así mismo las condiciones de estabilidad de la vía y los parámetros geotécnicos para diseño.

A continuación se muestran en el cuadro 5 los resultados obtenidos del ensayo de cono dinámico ejecutado en campo, en el cual se puede observar bajos valores de capacidad de soporte CBR, que indican la necesidad de hacer un mejoramiento de la subrasante o como mínimo de dejar el afirmado existente como capa remanente de plataforma y colocar encima suyo la nueva estructura del pavimento.

Cuadro 5. Ensayo de cono dinámico. Resultados de CBR

Apique No.	Localización	CBR (%) obtenido a partir del Penetrómetro dinámico de cono
AP-2	K0 + 575	0,5
AP-4	K1 + 575	0,5
AP-5	K2 + 075	2,2
AP-7	K3 + 075	0,9
AP-9	K4 + 075	1,1
AP-11	K5 + 075	1,0
AP-13	K6 + 075	1,9
AP-15	K7 + 075	1,3
AP-17	K8 + 075	3,2
AP-19	K9 + 075	0,7

Según los resultados del ensayo de CBR sumergido, se determinó que tiene un promedio de 3,6% de la capacidad soporte del suelo, el cual se encuentra dentro del intervalo de CBR, que recomienda el manual de INVIAS de medios y altos volúmenes de tránsito (Tabla 1), correspondiente a la categoría S1, por tanto se tendrán en cuenta como parámetros para diseño los resultados de este ensayo observados en el cuadro 6.

Cuadro 6. Ensayo de penetración de CBR. Resultados de CBR

Apique No.	Localización	CBR (%) sumergido
AP-1	K0 + 075	1,7
AP-3	K1 + 075	2,9
AP-6	K2 + 575	1,7
AP-8	K3 + 575	4,6
AP-10	K4 + 575	2,5
AP-12	K5 + 575	5,1
AP-14	K6 + 575	3,7
AP-16	K7 + 575	5,6
AP-18	K8 + 575	4,5

3.5 Zonificación geotécnica del corredor

Con el fin de proponer un diseño de pavimento que técnicamente sea el más adecuado, se establecen dos zonas representativas del corredor teniendo en cuenta la estratigrafía y el comportamiento de la subrasante con respecto a su resistencia al esfuerzo cortante expresada como capacidad de soporte CBR.

En una primera zona delimitada entre el K0+000 al K5+075 (Tramo 1), existe un afirmado que tiene espesores en promedio de 0,35 metros, compuesto principalmente por gravas areno arcillosas de plasticidad entre 3% y 15%, su límite líquido está entre 20% y 33% y la humedad promedio es de 4,7%.

A profundidades entre 0,40 y 1,50 metros se encontraron estratos compuestos por limos orgánicos con algo de arena (MH) de alta plasticidad y humedad promedio de 112,2%. Las características de resistencia se tomaron a una profundidad de

0,60 metros con toma de muestra inalterada, donde el CBR de laboratorio arrojó valores en promedio de 2,7% (CBR<3%).

La segunda zona definida entre el K5+075 al K9+500 (Tramo 2), presenta en su primer capa un material granular compuesto por grava y arena de plasticidad media a baja, humedad máxima 6,7% y mínima de 1,87%, con un promedio de desgaste del 22,25% y densidad máxima de 2,019 g/cm³.

A profundidades de 0,10 m a 1,50 m se encontraron en su mayoría suelos limosos de plasticidad media a alta, con un promedio de materia orgánica de 20,7% y humedad promedio de 45,65%. Las características de resistencia se tomaron a una profundidad de 0,40 metros con toma de muestra inalterada, donde el CBR de laboratorio arrojó valores en promedio de 4,7%.

Tabla 1. Rangos de resistencia

Categoría	Intervalos módulo resiliente (Kg/cm²)	Intervalo C.B.R (%)
S1	300 - 500	3 ≥ CBR > 5
S2	500 - 700	5 ≥ CBR > 7
S3	700 - 1000	7 ≥ CBR > 10
S4	1000 - 1500	10 ≥ CBR > 15
S5	> 1500	≥ 15

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito

4. ESTUDIO DE FUENTES DE MATERIALES

Con el fin de determinar las posibles fuentes de materiales para el corredor de estudio Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid, Cundinamarca, se investigó en las diferentes entidades oficiales y en la zona de influencia del proyecto, logrando determinar la existencia de la planta Asfaltos y Triturados de la Sabana que es la unión de varias empresas donde ofrecen materiales de alta calidad.

Esta planta se encuentra ubicada aproximadamente a 3 km del (k0+045) del proyecto, produce materiales como bases y subbases granulares, gravas de 1 ½" y 3/8", piedra filtro entre 1" y 3"; tiene una capacidad de 250 toneladas por hora, garantizando un alto volumen de material procesado.

Para la pavimentación se requiere la adquisición de mezclas asfálticas bien sea para ser usadas como capa de rodadura (tipo MDC-19), o como intermedia asfáltica (tipo MDC-25 o MSC-25). Estos materiales y mezclas se obtendrán de la Planta de ICEIN con más de 60 años de experiencia en la ejecución de proyectos de infraestructura vial, cuyos materiales, producción y procesos tienen la respectiva certificación ambiental y de calidad. Con esta planta se obtendrían los materiales requeridos para construcción de la estructura convencional del pavimento y que comprende concreto asfáltico para rodadura y para base asfáltica.

Para presentar la respectiva caracterización y calidad de los materiales de las canteras consideradas, se relaciona en la tabla 2 los requisitos de calidad exigidos por el INVIAS para estos materiales, los cuales deberán ser cumplidos y certificados por el fabricante.

4.1 Diseño de mezclas

Para el desarrollo del proyecto, es necesario producir las diferentes mezclas que cumplan con las Especificaciones Técnicas de Construcción expedidas por el Instituto Nacional de Vías INVIAS en el año 1996 y actualizadas al 2013, conocidas y difundidas en el ámbito nacional y que de alguna forma sea posible producir en la región del mencionado proyecto.

De hecho, si las fuentes de materiales no cumplen las especificaciones establecidas por el INVIAS, el constructor deberá tener la capacidad y los medios para transformar los materiales obtenidos en las diferentes fuentes y hacer que éstos, luego de su proceso de explotación y producción de mezclas, cumplan con los requisitos exigidos por la entidad contratante.

4.1.1 Bases y subbases granulares

Los materiales granulares para las capas de base y subbase del pavimento nuevo deberán cumplir con los requisitos establecidos en los Artículos INV 300-13, INV 320-13 e INV 330-13 según aplique para cada caso.

En las tablas 2 y 3 se describen los requisitos de los materiales para bases y subbases granulares. Las granulometrías para bases granulares estarán de acuerdo a las descritas en la tabla 4 y las granulometrías para subbases granulares se deberán ajustar a las curvas granulométricas descritas en la tabla 5.

Tabla 2. Requisitos de los materiales para bases granulares

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8	40 8	35 7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	30	25
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	- -	70 75	90 75
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2

Nota 1: El ensayo de Valor de azul de metileno solo será exigido cuando el equivalente de arena del material de base granular sea inferior a treinta (30), pero igual o superior a veinticinco (25)

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Geometría de las Partículas (F)				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara - Dos caras	E-227	50 -	70 50	100 70
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Fuente: Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS 2013

Tabla 3. Requisitos de los materiales para subbases granulares

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUB-BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%)	E-218	50	50	50
- 500 revoluciones (%)				
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	35	30
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	12	12	12
- Sulfato de sodio		18	18	18
- Sulfato de magnesio				
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	E-148	30	30	40

Fuente: Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS 2013

Tabla 4. Granulometrías para bases granulares

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	⅜"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
	% PASA							
BASES GRANULARES DE GRACACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Fuente: Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS 2013

Tabla 5. Granulometrías para subbases granulares

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
	50.0	37.5	25.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	2"	1 ½"	1"	1/2"	⅜"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
	% PASA								
SBG-50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG-38	-	100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Fuente: Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS 2013

4.1.2 Bases estabilizadas

En cuanto a las bases estabilizadas, en caso de que se adopte una estructura diferente a la recomendada que incluya estos materiales, se deberá cumplir con las especificaciones INV 300-13, INV 340-13 e INV 341-13.

4.1.3 Concretos asfálticos

De acuerdo con las investigaciones realizadas se verificó que en la zona próxima al proyecto se encuentran materiales aptos para producir mezclas asfálticas. Principalmente, se estudiaron las fuentes que producen agregados para las mezclas asfálticas que se colocan en las diferentes vías pavimentadas de la zona.

Sin embargo, antes de iniciar la obra, el Constructor deberá presentar el diseño por el método Marshall de las mezclas asfálticas (MDC-19, MDC-25 y/o MSC-25) que va a colocar con sus respectivos soportes y características de los materiales, cumpliendo con las especificaciones establecidas por el INVIAS en el año 1997 y actualizadas al 2013.

Los agregados para las mezclas elaboradas en el proyecto deberán cumplir con los requisitos descritos en las tablas 450-3, 450-4 y 450-5 del artículo INV 450-13.

El cemento asfáltico utilizado en la producción de las mezclas asfálticas debe ser de penetración 80-100, para una región climática con temperatura media de 13,8°C, y deberá cumplir con las especificaciones de cemento asfáltico incluidas en el Artículo INV 410-13 (Tabla 6).

La curva granulométrica deberá ajustarse de acuerdo con la mezcla diseñada y deberá cumplir los requisitos de gradación descritos en la tabla 7

Tabla 6. Especificaciones del cemento asfáltico

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
Asfalto original							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60° C), P	E-716 o E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E -720							
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	-	0.8	-	0.8	-	1.0
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original	E-716 o E-717	-	4	-	4	-	4

Fuente: Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS 2013

Tabla 7. Granulometrías para mezclas asfálticas

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 ½"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSE	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSE	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MÓDULO	MAM -25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)		-	4 %					3 %			2 %

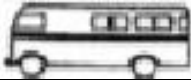
Fuente: Especificaciones Técnicas de Construcción INVIAS 2013

5. TRÁNSITO

Con el fin de determinar el volumen y el tipo de vehículos que transita por la vía Puente de Piedra-Colon-Variante Madrid, Cundinamarca, se programaron dos fechas para dicho conteo: sábado 13 de febrero de 2016 (día de mercado) y miércoles 24 de febrero de 2016 (día entre semana). El conteo se efectuó de forma continua en los horarios comprendidos de 6:00 a.m. a 6:00 p.m., totalizando en intervalos de 1 hora.

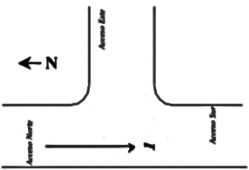
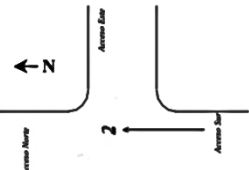
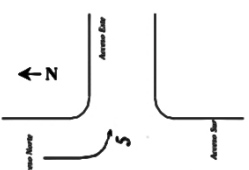
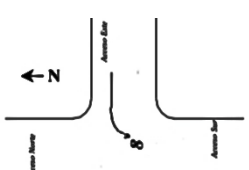
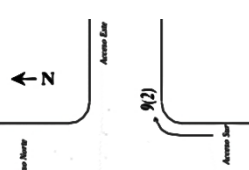
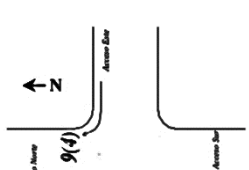
Para el conteo se consideraron los siguientes tipos de vehículos.

Cuadro 7. Clasificación vehicular

Autos	
Bus	
Busetas	
Camión C2	
Camión C3	
Camión C4	
Camión C5	
Camión >C6	

Fuente: Ingeniería de tránsito y transporte, 2010

Cuadro 8. Movimientos y descripción de giros

REPRESENTACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS	MOVIMIENTO N°	DESCRIPCIÓN
	1	ORIGEN: Puente de Piedra DESTINO: Madrid
	2	ORIGEN: Madrid DESTINO: Puente de Piedra
	5	ORIGEN: Puente de Piedra DESTINO: Funza
	8	ORIGEN: Funza DESTINO: Madrid
	9(2)	ORIGEN: Madrid DESTINO: Funza
	9(4)	ORIGEN: Funza DESTINO: Puente de Piedra

Fuente: Ingeniería de tránsito y transporte, 2010

5.1 Análisis del tránsito

Para calcular el número de ejes equivalentes (NESE) de 8,2 Toneladas, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Distribución direccional (DC): Para la vía Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid Cundinamarca, se considera como tránsito de diseño la mitad del total (0,50), ya que esta tiene un ancho variable entre 6,0 a 9,0 metros.

Tabla 8. Factor de distribución por carril

NÚMERO TOTAL DE CARRILES EN CADA DIRECCIÓN	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA EL CARRIL DE DISEÑO (FCA)
1	1,00
2	0,90
3	0,75

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998

- Factor camión o de daño (FC): Para el cálculo de los ejes equivalentes se aplican los valores de la tabla 8 recomendados por el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito

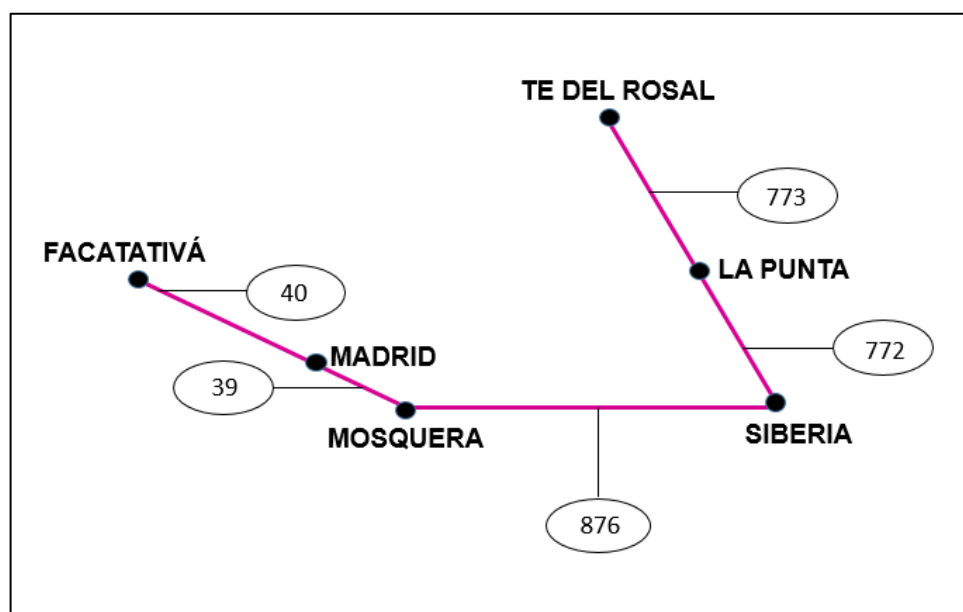
Tabla 9. Factor de equivalencia de carga por tipo de vehículo

Tipo de vehículo		Factor de equivalencia
BUSES	Bus	0,40
	Bus Metropolitano	1,00
C2P	C2P	1,14
C2G	C2G	3,44
C3 Y C4	C3	3,76
	C2 S1	3,37
	C4	6,73
	C3 S1	2,22
	C2 S2	3,42
C5	C3 S2	4,40
>C5	>C5	4,72

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, 1998

- Serie histórica del tránsito promedio diario semanal (TPDS) desde el año 2006 al año 2013 y tasa de crecimiento anual para la proyección exponencial del tránsito de las estaciones de conteo que intervienen en el estudio.

Imagen 13. Estaciones de conteo vehicular



Fuente: Instituto Nacional de Vías, 2010

ESTACIÓN N° 772 (SIBERIA - LA PUNTA)

Tabla 9. Estimación NESE Estación N° 772

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES A PARTIR DE LA SERIE HISTÓRICA											
FD (INVIAS)			0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72		
AÑO	TPDS	%AUTOS	%BUSES	%CAMIONES	%C2P	%C2G	%C3-4	%C5	%>C5	FC	NESE
2006	9427	68	15	17	45,94	36,8	8,59	7,16	1,51	1,66	823.528
2007	10901	70	13	17	49,51	34,32	8,46	4,14	3,57	1,68	901.254
2008	10206	69	12	19	45,55	33,93	9,69	5,56	5,27	1,84	955.467
2009	12472	72	13	15	34,71	43,48	10,54	5,82	5,45	1,83	1.051.647
2010	12997	67	12	20	39,12	37,48	12,69	5,33	5,36	1,96	1.339.646
2011	14359	70	11	19	36,55	43,63	13,17	3,58	3,08	1,99	1.406.761
2012	14793	69	13	18	36,79	41,53	12,13	4,91	4,63	1,89	1.426.393
2013	16096	69	11	20	36,79	41,53	12,13	4,91	4,63	2,03	1.660.737

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 10. TPDS y NESE. Estación N° 772

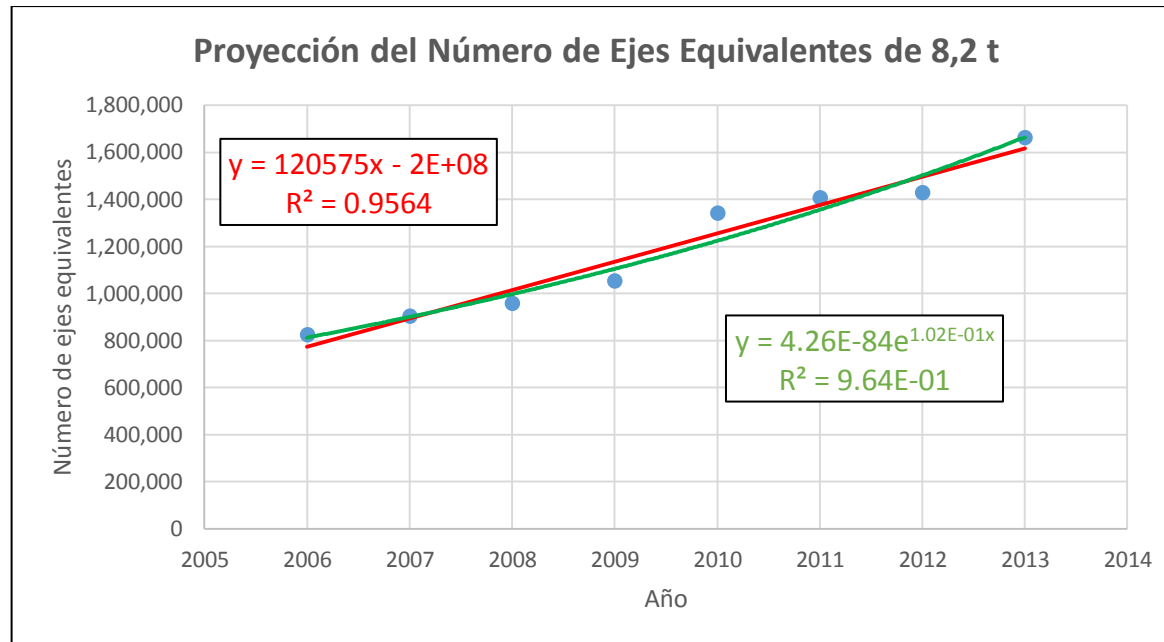
TRÁNSITOS PROMEDIOS DIARIOS Y NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES ESTIMADO PARA CADA AÑO												
AÑO	TPDS	TPD-A	TPD-B	TPD-C	TPD C2P	TPD C2G	TPD C3-4	TPD C5	TPD->C5	FC	NESE	LN NESE
FD (INVIAS)		0	0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72			
2006	9427	6410	1414	1603	736	590	138	115	24	1,66	823.528	13,62
2007	10901	7631	1417	1853	918	636	157	77	66	1,68	901.254	13,71
2008	10206	7042	1225	1939	883	658	188	108	102	1,84	955.467	13,77
2009	12472	8980	1621	1871	649	813	197	109	102	1,83	1.051.647	13,87
2010	12997	8708	1560	2599	1017	974	330	139	139	1,96	1.339.814	14,11
2011	14359	10051	1579	2728	997	1190	359	98	84	1,99	1.406.672	14,16
2012	14793	10207	1923	2663	980	1106	323	131	123	1,89	1.426.421	14,17
2013	16096	11106	1771	3219	1184	1337	391	158	149	2,03	1.660.773	14,32

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 11. Análisis de regresión. Estación N° 772

ANÁLISIS DE REGRESIÓN		
	LINEAL	EXPONENCIAL
m	120.575	1,02E-01
b	-241.100.294	4,26E-84
r^2	0,956	0,964
i		10,8%

Gráfico 1. Proyección NESE. Estación N° 772



ESTACIÓN N° 773 (LA PUNTA - TE DEL ROSAL)

Tabla 12. Estimación NESE. Estación N° 773

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES A PARTIR DE LA SERIE HISTÓRICA											
FD (INVIAS)			0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72		
AÑO	TPDS	%AUTOS	%BUSES	%CAMIONES	%C2P	%C2G	%C3-4	%C5	%>C5	FC	NESE
2006	8159	69	12	19	30,23	58,33	5,99	3,24	2,21	2,01	833.572
2007	10178	69	11	20	46,09	38,83	8,13	4,2	2,75	1,86	962.201
2008	12630	72	10	18	33,53	49,02	18,37	2,19	3,83	2,22	1.288.618
2009	10918	71	10	20	38,37	47,11	6,11	4,09	4,32	2,02	1.086.785
2010	10424	66	12	22	34,82	47,26	6,59	5,84	5,49	2,06	1.196.914
2011	12150	69	12	19	37,14	49,28	7,32	3,39	3,88	1,95	1.205.199
2012	13051	69	10	21	36,78	47,88	6,67	4,44	4,56	2,08	1.382.349
2013	15016	69	11	20	36,78	47,88	6,67	4,44	4,56	2,01	1.540.228

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 13. TPDS y NESE. Estación N° 773

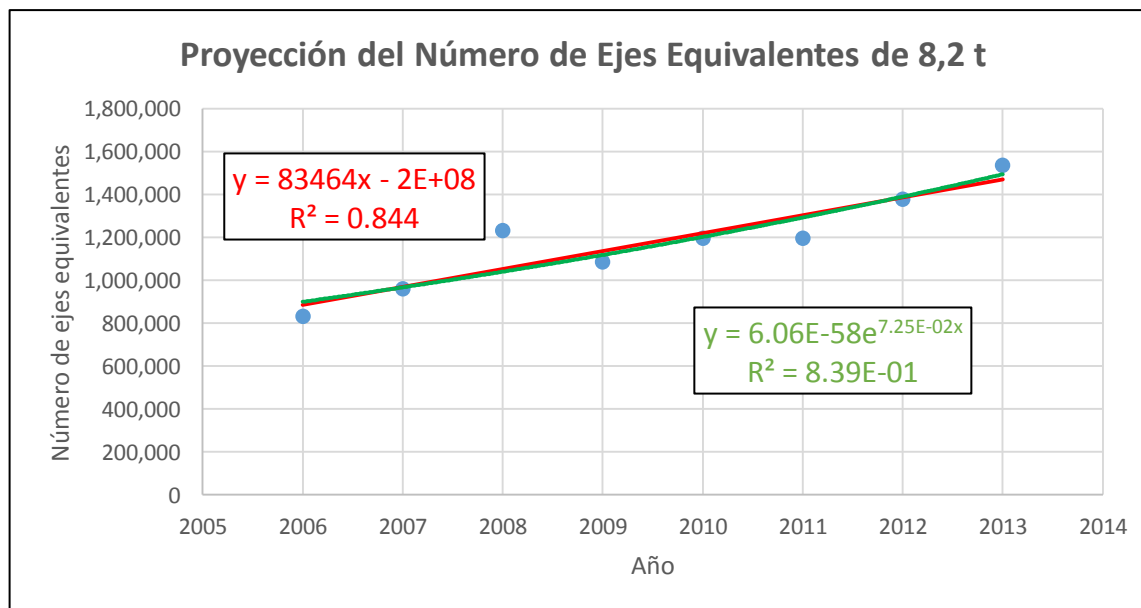
TRÁNSITOS PROMEDIOS DIARIOS Y NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES ESTIMADO PARA CADA AÑO												
AÑO	TPDS	TPD-A	TPD-B	TPD-C	TPD C2P	TPD C2G	TPD C3-4	TPD C5	TPD->C5	FC	NESE	LN NESE
FD (INVIAS)		0	0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72			
2006	8159	5630	979	1550	469	904	93	50	34	2,01	833.572	13,63
2007	10178	7023	1120	2036	938	790	165	85	56	1,86	962.201	13,78
2008	12630	9094	1263	2273	762	1114	418	50	87	2,12	1.233.583	14,03
2009	10918	7752	1092	2184	838	1029	133	89	94	2,02	1.086.785	13,90
2010	10424	6880	1251	2293	799	1084	151	134	126	2,06	1.196.914	14,00
2011	12150	8384	1458	2309	857	1138	169	78	90	1,94	1.197.784	14,00
2012	13051	9005	1305	2741	1008	1312	183	122	125	2,08	1.379.203	14,14
2013	15016	10361	1652	3003	1104	1438	200	133	137	2,01	1.536.890	14,25

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 14. Análisis de regresión. Estación N° 773

ANÁLISIS DE REGRESIÓN		
	LINEAL	EXPONENCIAL
m	83.464	7,25E-02
b	-166.542.552	6,06E-58
r ²	0,844	0,839
i		7,5%

Gráfico 2. Proyección NESE. Estación N° 773



ESTACIÓN N° 876 (MOSQUERA - SIBERIA)

Tabla 15. Estimación NESE. Estación N° 876

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES A PARTIR DE LA SERIE HISTÓRICA											
FD (INVIAS)			0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72		
AÑO	TPDS	%AUTOS	%BUSES	%CAMIONES	%C2P	%C2G	%C3-4	%C5	%>C5	FC	NESE
2006	6409	51	23	26	14,85	58,02	10,97	4,63	11,54	2,10	1.084.015
2007	10811	53	19	28	32,57	38,91	10,62	6,5	11,39	2,04	1.701.705
2008	10630	56	15	28	30,25	37,76	13,43	9,1	9,47	2,21	1.657.256
2009	10052	57	20	24	44,24	26,39	11,34	6,29	11,74	1,78	1.295.195
2010	12737	60	16	24	24,33	46,55	11,52	5,81	11,79	2,16	1.810.926
2011	13721	56	17	27	35,76	38,95	11,66	4,62	9	2,01	1.990.441
2012	15386	57	14	29	34,78	37,30	11,51	5,57	10,84	2,17	2.362.185
2013	20588	52	19	29	34,78	37,30	11,51	5,57	10,84	2,02	3.279.195

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 16. TPDS y NESE. Estación N° 876

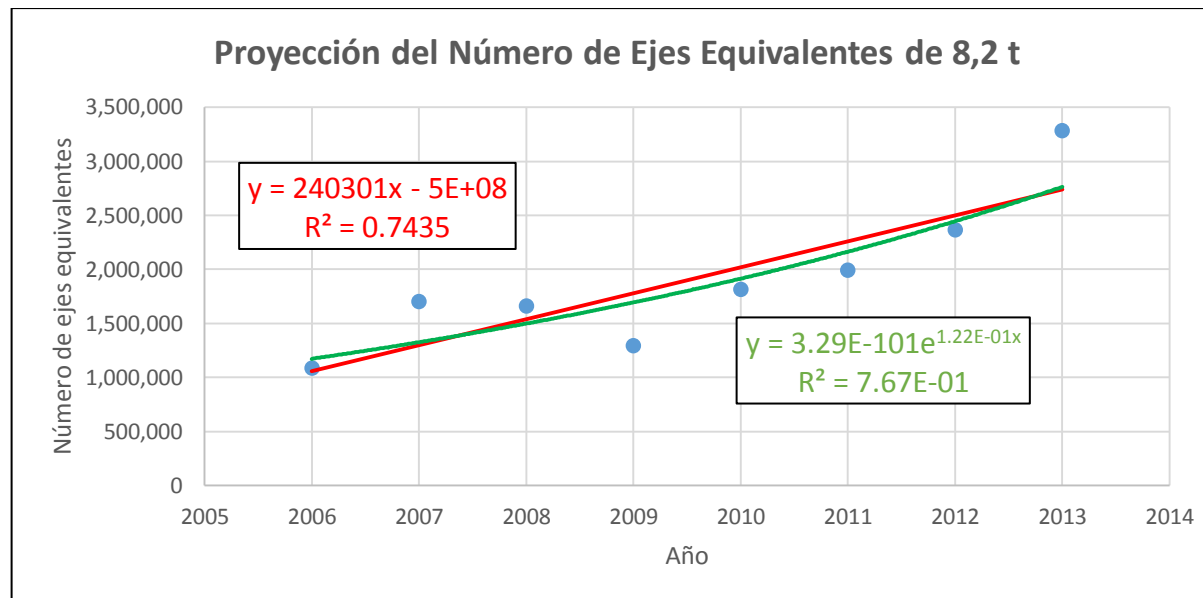
TRÁNSITOS PROMEDIOS DIARIOS Y NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES ESTIMADO PARA CADA AÑO												
AÑO	TPDS	TPD-A	TPD-B	TPD-C	TPD C2P	TPD C2G	TPD C3-4	TPD C5	TPD->C5	FC	NESE	LN NESE
FD (INVIAS)		0	0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72			
2006	6409	3269	1474	1666	247	967	183	77	192	2,10	1.083.957	13,90
2007	10811	5730	2054	3027	986	1178	321	197	345	2,04	1.701.806	14,35
2008	10630	5953	1595	2976	900	1124	400	271	282	2,21	1.657.149	14,32
2009	10052	5730	2010	2412	1067	637	274	152	283	1,78	1.295.195	14,07
2010	12737	7642	2038	3057	744	1423	352	178	360	2,16	1.810.926	14,41
2011	13721	7684	2333	3705	1325	1443	432	171	333	2,01	1.990.563	14,50
2012	15386	8770	2154	4462	1552	1664	513	249	484	2,17	2.362.239	14,68
2013	20588	10706	3912	5971	2076	2227	687	333	647	2,02	3.279.261	15,00

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 17. Análisis de regresión. Estación N° 876

ANÁLISIS DE REGRESIÓN		
	LINEAL	EXPONENCIAL
m	240.301	1,22E-01
b	-480.986.713	3,29E-101
r²	0,743	0,767
i		13,0%

Gráfico 3. Proyección NESE. Estación N° 876



ESTACIÓN N° 39 (MADRID - MOSQUERA)

Tabla 18. Estimación NESE. Estación N° 39

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES A PARTIR DE LA SERIE HISTÓRICA											
FD (INVIAS)			0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72		
AÑO	TPDS	%AUTOS	%BUSES	%CAMIONES	%C2P	%C2G	%C3-4	%C5	%>C5	FC	NESE
2006	23204	54	20	26	30,77	33,98	12,01	16,53	6,72	2,02	3.931.828
2007	25315	57	16	26	32,15	29,79	21,82	13,03	3,22	2,10	4.082.074
2008	21189	67	12	21	13,56	46,93	26,69	9,79	3,04	2,41	3.072.976
2009	10378	62	25	13	54,38	29,59	7,35	1,37	7,31	1,26	905.084
2010	10963	57	23	20	34,14	48,73	10,45	2,12	4,56	1,67	1.435.164
2011	10172	58	22	21	50,22	36,89	4,5	2,26	6,13	1,53	1.223.766
2012	12276	63	20	17	46,25	38,40	7,43	1,92	6,00	1,53	1.267.988
2013	9601	55	27	18	46,25	38,40	7,43	1,92	6,00	1,42	1.121.449

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 19. TPDS y NESE. Estación N° 39

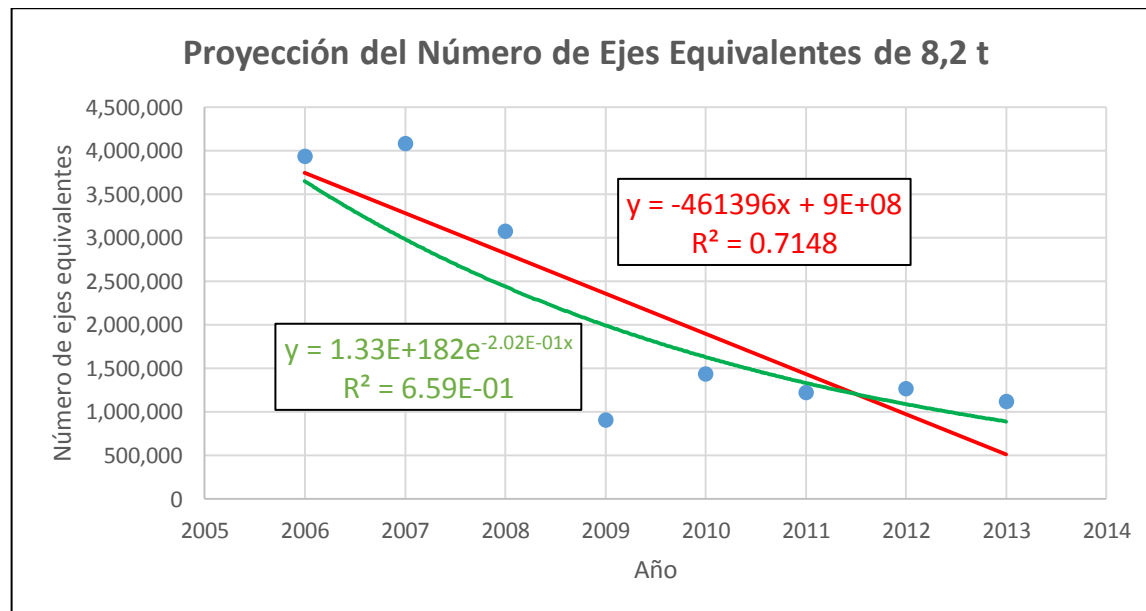
TRÁNSITOS PROMEDIOS DIARIOS Y NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES ESTIMADO PARA CADA AÑO												
AÑO	TPDS	TPD-A	TPD-B	TPD-C	TPD C2P	TPD C2G	TPD C3-4	TPD C5	TPD->C5	FC	NESE	LN NESE
FD (INVIAS)		0	0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72			
2006	23204	12530	4641	6033	1856	2050	725	997	405	2,02	3.931.605	15,18
2007	25315	14430	4050	6582	2116	1961	1436	858	212	2,10	4.081.821	15,22
2008	21189	14197	2543	4450	603	2088	1188	436	135	2,41	3.072.780	14,94
2009	10378	6434	2595	1349	734	399	99	18	99	1,26	905.084	13,72
2010	10963	6249	2521	2193	749	1068	229	46	100	1,67	1.435.164	14,18
2011	10172	5900	2238	2136	1073	788	96	48	131	1,53	1.223.766	14,02
2012	12276	7734	2455	2087	965	801	155	40	125	1,53	1.267.988	14,05
2013	9601	5281	2592	1728	799	664	128	33	104	1,42	1.121.449	13,93

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 20. Análisis de regresión. Estación N° 39

ANÁLISIS DE REGRESIÓN		
	LINEAL	EXPONENCIAL
m	-461.396	-2,02E-01
b	929.304.371	1,33E+182
r ²	0,715	0,659
i		-18,3%

Gráfico 4. Proyección NESE. Estación N° 39



ESTACIÓN N° 40 (FACATATIVÁ - MADRID)

Tabla 21. Estimación NESE. Estación N° 40

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES A PARTIR DE LA SERIE HISTÓRICA											
FD (INVIAS)			0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72		
AÑO	TPDS	%AUTOS	%BUSES	%CAMIONES	%C2P	%C2G	%C3-4	%C5	%>C5	FC	NESE
2006	10690	47	31	22	40,13	31,51	7,65	11,13	9,58	1,56	1.617.254
2007	12887	45	20	34	16,18	33,81	11,8	17,34	20,86	2,50	3.172.191
2008	13962	45	20	35	19,86	31,43	12,54	18,22	17,95	2,45	3.429.572
2009	14384	53	16	31	28,05	25,6	12,58	16,7	17,07	2,37	2.923.750
2010	15329	53	17	30	27,21	25,21	8,79	18,85	19,94	2,35	3.094.750
2011	16417	59	17	24	40,12	33,34	8,01	10,4	8,12	1,90	2.339.370
2012	16336	52	17	31	31,79	28,05	9,79	15,32	15,04	2,25	3.213.617
2013	16477	48	14	38	31,79	28,05	9,79	15,32	15,04	2,45	3.829.323

Fuente: Propia, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 22. TPDS y NESE. Estación N° 40

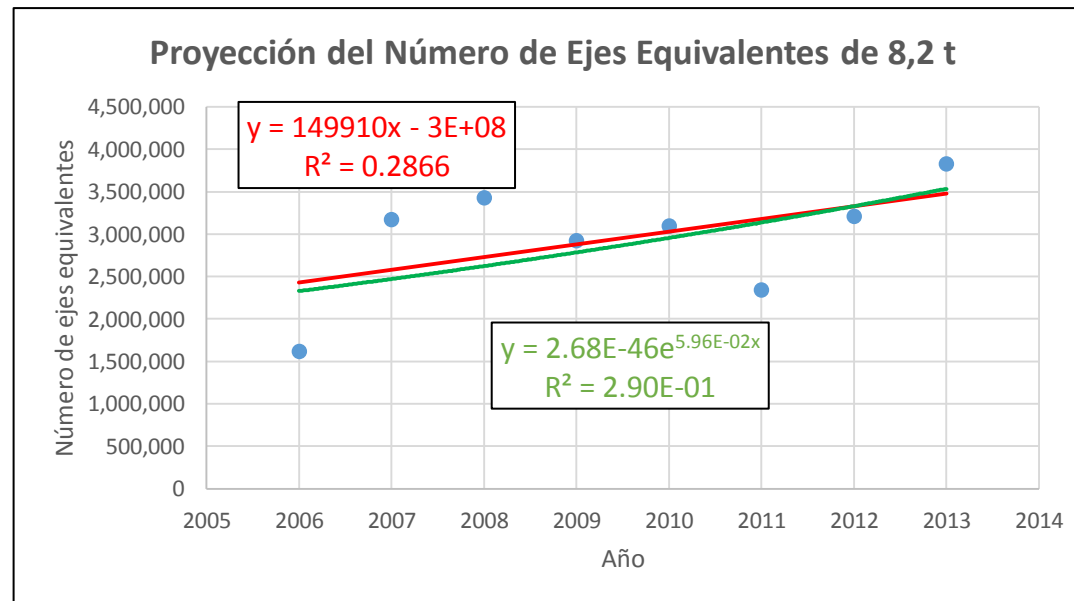
TRÁNSITOS PROMEDIOS DIARIOS Y NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES ESTIMADO PARA CADA AÑO												
AÑO	TPDS	TPD-A	TPD-B	TPD-C	TPD C2P	TPD C2G	TPD C3-4	TPD C5	TPD->C5	FC	NESE	LN NESE
FD (INVIAS)		0	0,70		1,14	3,44	3,90	4,40	4,72			
2006	10690	5024	3314	2352	944	741	180	262	225	1,56	1.617.254	14,30
2007	12887	5799	2577	4382	709	1481	517	760	914	2,50	3.172.391	14,97
2008	13962	6283	2792	4887	970	1536	613	890	877	2,45	3.429.572	15,05
2009	14384	7624	2301	4459	1251	1142	561	745	761	2,37	2.923.750	14,89
2010	15329	8124	2606	4599	1251	1159	404	867	917	2,35	3.094.750	14,95
2011	16417	9686	2791	3940	1581	1314	316	410	320	1,90	2.339.507	14,67
2012	16336	8495	2777	5064	1610	1420	496	776	762	2,25	3.213.687	14,98
2013	16477	7909	2307	6261	1991	1756	613	959	942	2,45	3.829.417	15,16

Fuente: Propia de autora, a partir de volúmenes de tránsito 2010 - 2011

Tabla 23. Análisis de regresión. Estación N° 40

ANÁLISIS DE REGRESIÓN		
	LINEAL	EXPONENCIAL
m	149.910	5,96E-02
b	-298.291.065	2,68E-46
r ²	0,287	0,290
i		6,1%

Gráfico 5. Proyección NESE. Estación N° 40



- La tasa de crecimiento es la rata de crecimiento anual del tráfico de vehículos comerciales. Para el proyecto se tomó el promedio de las tasas de crecimiento de las estaciones de conteo: 3,82% anual ($i=0,0382$).

Cuadro 9. Estaciones e índice de crecimiento

Estacion N°	772
Sector	Siberia - La Punta
Longitud	8 Km
i (%)	10,8

Estacion N°	773
Sector	La Punta - Te del Rosal
Longitud	14 Km
i (%)	7,5

Estacion N°	876
Sector	Mosquera - Siberia
Longitud	11 Km
i (%)	13,0

Estacion N°	39
Sector	Madrid - Mosquera
Longitud	5 Km
i (%)	-18,3

Estacion N°	40
Sector	Facatativa - Madrid
Longitud	62 Km
i (%)	6,1

5.1.1 Tránsito atraído

Para establecer el tránsito atraído se aplicó el criterio del Instituto de Ingenieros de Estados Unidos, que señala que al tránsito atraído se le asignan porcentajes entre el 5% y el 25% de tránsito normal; tomando para este diseño el 15% del tránsito normal

5.1.2 Tránsito generado

El porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal, se determina teniendo en cuenta la clasificación del potencial de actividad económica en el área del proyecto y su población beneficiada como se puede ver en el cuadro 10.

Según Plan De Desarrollo Municipal de Madrid Cundinamarca 2008-2012 el sector agrícola, cuenta con una alta producción de cultivos transitorios (arveja, lechuga, maíz, papa, repollo y zanahoria) y permanentes (fresa) de Sabana Occidente, en lo relacionado al área pecuaria, cuenta con una excelente producción de ganado bovino y porcino en la provincia, motivo por el cual es uno de los entes territoriales productores de Leche en la provincia.

La potencialidad agrícola más importante es el cultivo de cebada (425 hectáreas), el cultivo de papa mixto (1077 hectáreas), los cultivos de flores (597 Hectáreas) y el cultivo de hortalizas (88 hectáreas).

Cuadro 10. Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal

Clasificación del área del proyecto	Población beneficiada, hab	Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal
Área con potencial minero alto	Menos de 5000	3.0
	5000 o más	6.0
Área con potencial agrícola alto	Menos de 5000	2.5
	5000 o más	5.5
Área con potencial turístico alto	Menos de 5000	2.0
	5000 o más	3.5
Área de bajo potencial de desarrollo		1.5

Fuente: Ministerio de Transporte, 2010

5.2 Aforos

5.2.1 Resultados conteo 12 horas (6 a.m. - 6 p.m.)

MOVIMIENTO 1: PUENTE DE PIEDRA - MADRID, CUNDINAMARCA

Tabla 24. Total conteo vehicular. Movimiento 1

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	115	6	0	46	9	0	9	7	44
MIERCOLES	114	5	12	74	18	0	11	4	68
TOTAL	229	11	12	120	27	0	20	11	112

MOVIMIENTO 2: MADRID, CUNDINAMARCA - PUENTE DE PIEDRA

Tabla 25. Total conteo vehicular. Movimiento 2

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SÁBADO	127	12	2	58	14	0	5	4	72
MIÉRCOLES	150	9	10	83	33	1	5	1	68
TOTAL	277	21	12	141	47	1	10	5	140

MOVIMIENTO 5: PUENTE DE PIEDRA - FUNZA, CUNDINAMARCA

Tabla 26. Total conteo vehicular. Movimiento 5

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	31	2	0	15	0	0	0	10	15
MIERCOLES	32	3	1	34	0	0	0	1	13
TOTAL	63	5	1	49	0	0	0	11	28

MOVIMIENTO 8: FUNZA, CUNDINAMARCA - MADRID CUNDINAMARCA

Tabla 27. Total conteo vehicular. Movimiento 8

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	11	2	0	8	0	0	0	0	17
MIERCOLES	22	3	1	18	1	0	0	1	20
TOTAL	33	5	1	26	1	0	0	1	37

MOVIMIENTO 9(2): MADRID CUNDINAMARCA - FUNZA, CUNDINAMARCA

Tabla 28. Total conteo vehicular. Movimiento 9(2)

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	28	2	4	5	0	0	0	0	20
MIERCOLES	26	1	0	17	5	0	0	0	20
TOTAL	54	3	4	22	5	0	0	0	40

MOVIMIENTO 9(4): FUNZA, CUNDINAMARCA - PUENTE DE PIEDRA

Tabla 29. Total conteo vehicular. Movimiento 9(4)

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	29	0	1	12	0	0	0	0	17
MIERCOLES	23	3	0	19	0	0	0	0	15
TOTAL	52	3	1	31	0	0	0	0	32

5.2.2 Tránsito promedio diario semanal

Para el cálculo del volumen diario de vehículos se realizaron conteos vehiculares a lo largo de dos días, uno en día normal y otro en día de mercado. Se tuvo en cuenta un factor de 1,5 para expandir los volúmenes de las 12 horas de conteo (6 a.m. - 6 p.m.) a las 24 horas del día. El tránsito promedio diario semanal se calculó ponderando el volumen expandido para el día entre semana por 6/7 más el volumen expandido para el día de mercado por 1/7 (ver Ecuación 1).

$$TPDS = \frac{Mc * 6 + Sa * 1}{7} \text{ (Ecuación 1)}$$

MOVIMIENTO 1: PUENTE DE PIEDRA - MADRID, CUNDINAMARCA

Tabla 30. TPDS Movimiento 1

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	173	9	0	69	14	0	14	11	66
MIERCOLES	171	8	18	111	27	0	17	6	102
TPDS	171	8	15	105	25	0	16	7	97

MOVIMIENTO 2: MADRID, CUNDINAMARCA - PUENTE DE PIEDRA

Tabla 31. TPDS Movimiento 2

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	191	18	3	87	21	0	8	6	108
MIERCOLES	225	14	15	125	50	2	8	2	102
TPDS	220	14	13	119	45	1	8	2	103

MOVIMIENTO 5: PUENTE DE PIEDRA - FUNZA, CUNDINAMARCA

Tabla 32. TPDS Movimiento 5

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SABADO	47	3	0	23	0	0	0	15	23
MIERCOLES	48	5	2	51	0	0	0	2	20
TPDS	48	4	1	47	0	0	0	3	20

MOVIMIENTO 8: FUNZA, CUNDINAMARCA - MADRID CUNDINAMARCA

Tabla 33. TPDS Movimiento 8

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SÁBADO	17	3	0	12	0	0	0	0	26
MIÉRCOLES	33	5	2	27	2	0	0	2	30
TPDS	31	4	1	25	1	0	0	1	29

MOVIMIENTO 9(2): MADRID CUNDINAMARCA - FUNZA, CUNDINAMARCA

Tabla 34. TPDS Movimiento 9(2)

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SÁBADO	42	3	6	8	0	0	0	0	30
MIÉRCOLES	39	2	0	26	8	0	0	0	30
TPDS	39	2	1	23	6	0	0	0	30

MOVIMIENTO 9(4): FUNZA, CUNDINAMARCA - PUENTE DE PIEDRA

Tabla 35. TPDS Movimiento 9(4)

	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
				C2	C3	C4	C5	C6	
SÁBADO	44	0	2	18	0	0	0	0	26
MIÉRCOLES	35	5	0	29	0	0	0	0	23
TPDS	36	4	0	27	0	0	0	0	23

5.2.3 TPD estimado

Finalmente, se sumaron y restaron los volúmenes acumulados por tipo de vehículo en cada movimiento para hallar los tránsitos promedio diarios (TPD) acumulados en cada tramo y dirección de la vía. Así por ejemplo, para el tramo desde la intersección hacia Madrid el TPD corresponde a los vehículos que venían desde Puente de Piedra (1), más los que ingresaron a la vía por la intersección

provenientes de Funza (8) y menos los que se desviaron en la intersección hacía Funza (5).

Tabla 36. TPD estimado por tramo

Tramo	Movimientos	Autos	Buses	Busetas	Camiones					Motos
					C2	C3	C4	C5	C6	
Puente de Piedra - Intersección	1	171	8	15	105	25	0	16	7	97
Intersección - Madrid, Cundinamarca	1 + 8 - 5	154	8	15	83	26	0	16	5	89
Madrid, Cundinamarca - Intersección	2	220	14	13	119	45	1	8	2	103
Intersección - Puente de Piedra	2 + 9(4) - 9(2)	216	16	13	123	39	1	8	2	96

5.2.4 Tránsito equivalente

Con los TPD estimados y los factores camión promedio establecidos por la Universidad del Cauca en 1996 y adoptados por INVIAS en su Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes, se calculó el tránsito equivalente diario en ejes de 8,2 toneladas para cada carril y tramo de la vía, así como el correspondiente factor camión promedio.

Tabla 37. Tránsito equivalente diario por tramo

	Buses	Camiones					Total Vehículos Pesados	Tránsito equivalente diario	Fcamión
		C2	C3	C4	C5	C6			
FACTORES CAMIÓN INVIAS 2006	0,70	2,29	3,76	6,73	4,40	4,72			
Puente de Piedra - Intersección	23	105	25	0	16	7	176	453	2,57
Intersección - Madrid, Cundinamarca	23	83	26	0	16	5	153	397	2,60
Madrid, Cundinamarca - Intersección	27	119	45	1	8	2	203	515	2,54
Intersección - Puente de Piedra	29	123	39	1	8	2	202	501	2,48

Según lo anterior, se proyectaron los tránsitos estimados en el carril de diseño (se escogió el que corresponde a la dirección de mayor tránsito equivalente diario) durante el período de diseño correspondiente a 10 años, empezando desde el año 2018, y utilizando la tasa de crecimiento anual hallada, para calcular el número ejes equivalentes de 8,2 toneladas para diseño.

Cuadro 11. Cálculos de ejes equivalentes para el periodo de diseño

PERIODO CONSIDERADO	EJES EQUIVALENTES PAVIMENTO FLEXIBLE
2018	236.596
2019	245.634
2020	255.017
2021	264.759
2022	274.873
2023	285.373
2024	296.274
2025	307.592
2026	319.342
2027	331.540
TOTAL EJES EQUIVALENTES	2.816.998

De acuerdo con el cálculo de ejes equivalentes del área de influencia directa del proyecto se obtuvo un valor de 2.816.998 ($2,82 \times 10^6$).

El manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, propone las siguientes clases de tránsito de diseño que se relacionan en el cuadro 12, según las cuales el corredor clasifica en una clase T3.

Cuadro 12. Clases de tránsito en función del número de ejes equivalentes

Clases	Rango (10^6 ejes equivalentes de 8,2 toneladas)
T1	0,5 – 1
T2	1 - 2
T3	2 - 4
T4	4 - 6
T5	6 - 10

FUENTE: INVIAS Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tráfico.

6. DISEÑO DE PAVIMENTOS

6.1 Método INVIAS

Con el fin de establecer una estructura que cumpla con las especificaciones y que responda adecuadamente tanto a las condiciones climáticas como a las cargas y otros factores que afecten la vida útil y el desempeño del pavimento en el corredor de estudio; se tienen en cuenta las diferentes características de la subrasante y el valor de ejes equivalentes de 8,2 toneladas que transitarán por el carril de estudio.

Se plantea evaluar la metodología que plantea el Instituto Nacional de Vías en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito, que para este tipo de vía proyecta un periodo de 10 años de diseño teniendo en cuenta, el volumen, tipo de tránsito y el comportamiento geo-mecánico de la subrasante, que por medio de una variedad de cartas de diseño (tipo catálogo), considera un gran número de ejes equivalentes los cuales permiten tener diferentes alternativas de diseño

Lo que se busca con este método es obtener una estructura de pavimento equivalente en todo el corredor, por medio de las cartas de diseño y teniendo en cuenta el catálogo con los materiales más convenientes y los espesores constructivos mínimos pero que respondan a la necesidad y servicios del corredor generando un patrón de diseño

Con la información establecida para el corredor de estudio Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid Cundinamarca, se pueden establecer los espesores requeridos para el pavimento.

La región climática del proyecto se definió en el numeral 3.4. Templado Seco y semihúmedo (R2), de acuerdo con su temperatura media de 13,8°C y su precipitación promedio anual entre 500 y 1.000 mm/año (Ver tabla 5.8 del manual).

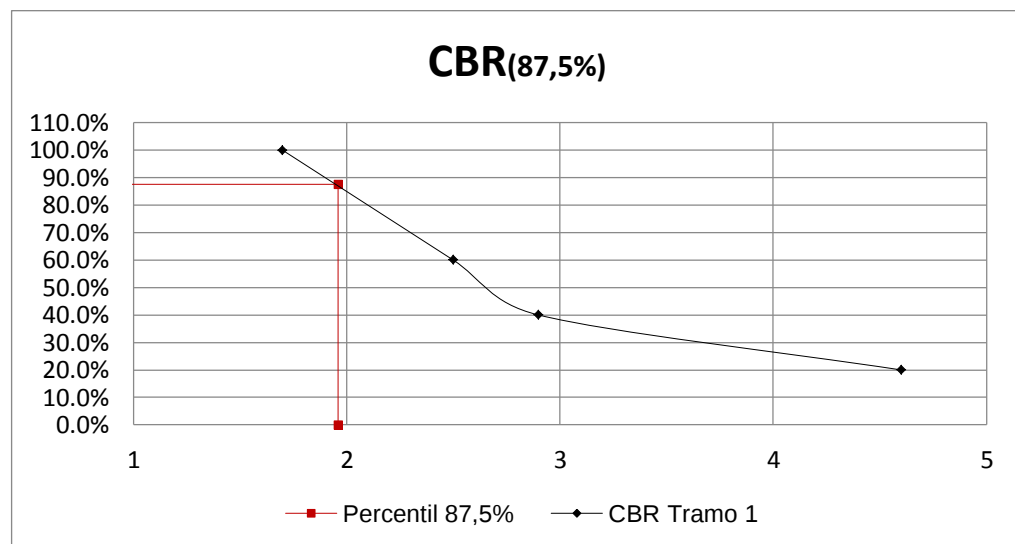
Según los parámetros de diseño de los tramos 1 y 2, se estableció la misma estructura del pavimento, haciendo la claridad que en el tramo 1 donde la capacidad de soporte es menor (CBR de diseño del 2,0%) será necesario verificar que bajo la estructura construida quedé como mínimo 10 cm de material de afirmado remanente mientras que en el tramo 2 el afirmado remanente se podrá retirar o dejar como una plataforma de soporte que dará un factor de seguridad adicional al pavimento diseñado.

6.1.1 Tramo 1 (K0+000 - K5+075)

Tabla 38. CBR tramo 1

CBR	K	F	% VALORES $\geq$
1,7	2	40%	100%
2,5	1	20%	60%
2,9	1	20%	40%
4,6	1	20%	20%
TOTAL	5	100%	0%

Gráfico 6. CBR percentil 87,5% Tramo 1



Cuadro 13. Parámetros de diseño estructura del pavimento tramo 1

Datos	Valor	Unidad
Temperatura	13,8	°C
Precipitación	570	mm/año
CBR calculado por percentil	2,0	%
Tránsito equivalente de diseño	2.816.998	NEE
Módulo resiliente promedio	196	kg/cm ²

Con base en estos parámetros se consultaron las cartas de diseño y se establecieron las siguientes estructuras de pavimento recomendadas:

Cuadro 14. Categorías de diseño para el tramo 1

Parámetros de diseño	Valor	Categoría en el manual
Módulo resiliente promedio kg/cm ²	200	S1+Mejoramiento
Tránsito equivalente de diseño	2.816.998	T3
Temperatura promedio. °C	13,8	13 – 20
Precipitación anual. mm/año	567,5	< 2000
Carta de Diseño = No. 2		

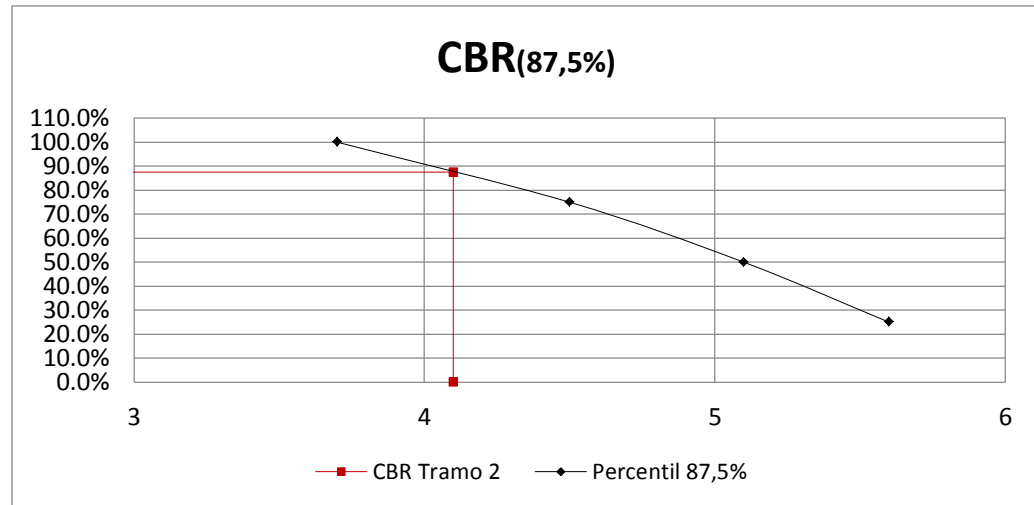
Teniendo en cuenta que el CBR de diseño es menor al 3% se decidió aprovechar el afirmado existente, el cual tiene un espesor mayor a 15 cm en toda la vía, como un mejoramiento con el que es posible considerar que se obtiene el CBR mínimo requerido de 3% para poder utilizar la estructura correspondiente a la categoría S1.

6.1.2 Tramo 2 (K5+075 - K9+500)

Tabla 39. CBR tramo 2

C.B.R	K	F	% VALORES ≥
3,7	1	25%	100%
4,5	1	25%	75%
5,1	1	25%	50%
5,6	1	25%	25%
TOTAL	4	100%	0%

Gráfico 7. CBR percentil 87,5% Tramo 2



Cuadro 15. Parámetros de diseño estructura del pavimento tramo 2

Datos	Valor	Unidad
Temperatura	13,8	°C
Precipitación	570	mm/año
CBR calculado por percentil	4,1	%
Tránsito equivalente de diseño	2.816.998	NEE
Módulo resiliente promedio	410	kg/cm ²

Con base en estos parámetros se consultaron las cartas de diseño y se establecieron las siguientes estructuras de pavimento recomendadas:

Cuadro 16. Categorías de diseño para el tramo 2

Parámetros de diseño	Valor	Categoría en el manual
Módulo resiliente promedio kg/cm ²	410	S1
Tránsito equivalente de diseño	2.816.998	T3
Temperatura promedio. °C	13,8	13 - 20
Precipitación anual. mm/año	567,5	< 2000
Carta de Diseño = No. 2		

6.1.3 Análisis y resultados

La alternativa 1 consiste en el diseño de pavimento flexible, utilizando el afirmado existente como capa de mejoramiento; para la posterior conformación completa de la estructura empleando base y subbase granulares más un acabado en concreto asfáltico (base asfáltica y rodadura asfáltica)

Se define el correspondiente diseño de espesores, los que se obtienen de las cartas de diseño del manual de INV para medios a altos volúmenes de tráfico, para el presente caso se ha considerado la Carta de Diseño No. 2, Región R2, en la que el concreto asfáltico está conformado por una capa de base asfáltica y una capa de rodadura MDC-2 (según especificaciones INVIAS 1997 que deben actualizarse). La estructura se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17. Estructura de pavimento flexible Manual INVIAS - Alternativa 1

Tramo	Abscisa	MDC-2 (m)	BG-2 (m)	SBG-1 (m)
1 y 2	K0+000 - K9+500	0,10	0,30	0,45

De acuerdo con los resultados de los apiques exploratorios, se determinó que para el corredor, la calzada actual se encuentra a nivel de afirmado cuyo espesor varía entre 0,10 y 0,60 metros.

Dentro del diseño de la estructura y atendiendo a la presencia del afirmado, se considera factible su utilización como capa de nivelación y mejoramiento de subrasante, para lo cual se cuantificaron espesores mínimos de 0,20 metros para el tramo 1 y 0,10 metros para el tramo 2, que no se tuvieron en cuenta para los análisis de este método.

Para garantizar la función y presencia de este afirmado, se recomienda una escarificación, homogenización y recompactación del afirmado existente para aquellos sitios en los cuales la densidad de este sea menor al 95%; de requerirse la adición, especialmente en sitios de fallos, estos rellenos se pueden realizar con material de subbase y/o de terraplén.

Dentro del criterio de análisis, esta capa de afirmado sólo da aporte estructural a la estructura en el tramo 1 y como tal no se considera en los cálculos y análisis, por tanto la estructura de diseño es la relacionada en el cuadro 17.

La alternativa 2 consiste en el diseño de pavimento flexible, considerando también el aporte estructural del afirmado existente, que trabajaría como material de nivelación para mejoramiento de subrasante. La estructura se determina utilizando

una subbase granular, bases estabilizadas con emulsión asfáltica y una capa de rodadura asfáltica.

Para esta alternativa se define el correspondiente diseño de espesores, obtenidos de las cartas de diseño del manual de INVIAS para medios a altos volúmenes de tráfico; se ha considerado la Carta de Diseño No. 2, Región R2, en la que se utiliza la base estabilizada (BEE). Los resultados se muestran en el cuadro 18.

Cuadro 18. Estructura de pavimento flexible Manual INVIAS - Alternativa 2

Tramo	Abscisa	MDC-2 (m)	BEE-1 (m)	BEE-2 (m)	SBG-1 (m)
1 y 2	K0+000 – K9+500	0,075	0,15	0,10	0,40

Para la construcción de esta estructura aplican las mismas recomendaciones de escarificar, reconformar y compactar la capa de afirmado existente.

6.2 Método AASHTO

Para el dimensionamiento de las diferentes capas de la estructura del pavimento a colocar sobre la vía actual como parte del diseño de las nuevas estructuras de pavimento, se utilizó el método de diseño AASHTO 1993, que dimensiona estructuras de pavimentos en función del número de ejes equivalentes en un periodo de diseño dado, definiéndose un número estructural con base en la pérdida de serviciabilidad en el tiempo y el módulo de resiliencia, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Log } W_{18} = Z_r S_0 + 9,36 \text{ Log}(SN + 1) - 0,2 + \frac{\text{Log} \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \text{ Log } M_R - 8,07 \text{ (Ecuacion 2)}$$

Donde:

N = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (80 kN).

ZR = Desviación estándar normal.

S0 = Error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

MR = Módulo resiliente de la subrasante (lb/plg²).

SN = Número estructural determinado por:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Siendo:

a_i = Coeficiente estructural de la capa granular i (1/plg).

D_i = Espesor de la capa granular i (plg).

m_i = Coeficiente de drenaje de la capa granular i .

Para el presente diseño se consideraron los siguientes parámetros:

- Nivel de confiabilidad del 90%.
 - Error estándar (S0) de 0,45 para pavimentos nuevos.
 - Índice inicial de servicio de 4,2 y final de 2,2. De acuerdo con la Guía metodológica para rehabilitación de pavimentos flexibles INVIAS.
 - Los coeficientes estructurales de los materiales asfálticos y granulares se adoptan a partir de la Metodología AASHTO para pavimentos flexibles, la tabla 8.1 del Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:
 - Para definir el coeficiente estructural de la mezcla densa en caliente se adoptó la siguiente correlación, basada en la TMAP más crítica de cada proyecto ($T = 13,8^{\circ}\text{C}$ para el tramo Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid Cundinamarca).
- $$a_1 = 0,7304 - 0,1271 \cdot \ln(T[^{\circ}\text{C}])$$
- Para los materiales granulares de base y subbase se asignaron los coeficientes estructurales especificados en la guía de acuerdo con el valor de capacidad de soporte CBR y los requerimientos de compactación mínimos requeridos en las especificaciones de estos materiales.
 - El coeficiente de drenaje para las capas granulares, según la tabla 8.2 (Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, INVIAS) es de $m=1,0$ para climas templado seco y semihúmedo, teniendo en cuenta que deberán siempre existir unas

excelentes obras de drenaje funcionando correctamente durante todo el periodo de operación de la vía.

En las tablas a continuación se resumen los parámetros definidos para las capas del pavimento:

Cuadro 19. Coeficientes estructurales para diseño AASHTO - Tramo 1

Tipo de material	Coeficiente estructural	Coeficiente de drenaje
Mezcla densa en caliente	0,40	1,00
Base granular	0,13	0,95
Subbase granular	0,11	0,90
Material granular existente	0,10	0,85

Cuadro 20. Estructura de pavimento diseño AASHTO Tramo 1 (K0+000 - K5+075)
Período de Diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d= 2,0\%$

TIPO DE MATERIAL	ESPESOR
Rodadura asfáltica MDC-19 NT2 Artículo 450-13 INV	7,0 cm
Intermedia asfáltica MDC-25 NT2 Artículo 450-13 INV	9,0 cm
Base granular Clase B NT2 Artículo 330-13 INV	20,0 cm
Subbase granular Clase B NT2 Artículo 320-13 INV	35,0 cm
Afirmado existente Artículo 311-13 INV - Verificar espesor mínimo después de reconformar *	(10,0 cm)

*Espesor mínimo considerado de acuerdo con los resultados de los apiques y los desniveles de la vía.

Cuadro 21. Coeficientes estructurales para diseño AASHTO - Tramo 2

TIPO DE MATERIAL	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE
Mezcla densa en caliente	0,40	1,00
Base granular	0,13	0,95
Subbase granular	0,11	0,90
Material granular existente	0,10	0,85

Cuadro 22. Estructura de pavimento diseño AASHTO Tramo 2 (K5+075 - K9+500)
Período de Diseño = 10 años (NEE=2,82x10⁶) - CBR_d= 4,1%

TIPO DE MATERIAL	ESPESO R
Rodadura asfáltica MDC-19 NT2 Artículo 450-13 INV	7,0 cm
Intermedia asfáltica MDC-25 NT2 Artículo 450-13 INV	9,0 cm
Base granular Clase B NT2 Artículo 330-13 INV	15,0 cm
Subbase granular Clase B NT2 Artículo 320-13 INV	20,0 cm
Afirmado existente Artículo 311-13 INV - Verificar espesor mínimo después de reconformar*	(10,0 cm)

*Espesores mínimos considerados de acuerdo con los resultados de los apiques.

Para el diseño del tramo Puente de Piedra - Colón - Variante Madrid se consideró sólo una alternativa de intervención por tramo, ambas para un período de diseño de 10 años.

6.3 Método racional

Básicamente dentro del presente estudio la modelación inicial de las estructuras de pavimento presentadas se realizó con el Método AASHTO 1993, que por su simplicidad permite evaluar en forma rápida una estructura de pavimento; pero como se mencionó anteriormente, en las estructuras recomendadas se verificaron las deformaciones admisibles obtenidas de las curvas de fatiga propuestas por SHELL para capas asfálticas y subrasante, con el criterio de diseño de los métodos racionales que aseguren que el pavimento no sufre fatiga por agrietamiento (tipo piel de cocodrilo, fatiga del concreto asfáltico) ni por ahuellamiento (fatiga de la subrasante),.

Por lo anterior la revisión del diseño consiste en controlar las deformaciones de tensión horizontal en la base del concreto asfáltico y de compresión vertical en la parte superior de la subrasante y que estos valores admisibles estén definidos por las ecuaciones de fatiga correspondientes así:

- a) Fatiga de la capa asfáltica - Agrietamiento tipo Piel de Cocodrilo: Capas asfálticas nuevas

Este tipo de falla del pavimento por fatiga de la mezcla asfáltica se analiza a partir de la deformación unitaria horizontal por tensión en la base de la carpeta asfáltica. La curva de fatiga correspondiente es:

$$\varepsilon_t = (0,856 \cdot V_b + 1,08) \cdot S_{mix}^{-0,36} \cdot N_{lab}^{-0,20}$$

$$N_{dis} = N_{lab} * (F_{dis} * F_{rec}) = 10 * N_{lab} \text{ (típico, según Shell)}$$

Donde:

ϵ_t = Deformación horizontal unitaria o específica por tensión, en la base (cara inferior) de la capa asfáltica.

V_b = Contenido en volumen de asfalto en la mezcla, %.

S_{mix} = Módulo dinámico (stiffness) del concreto asfáltico, N/m².

N_{lab} = Número de repeticiones de ϵ_t para la falla (fatiga), del concreto asfáltico, en laboratorio.

N_{dis} = Número de repeticiones de ϵ_t para la falla (fatiga), del concreto asfáltico, en el pavimento real (valor de diseño).

F_{dis} = Factor de calibración por dispersión de las cargas en el pavimento real (2 típico, según SHELL).

F_{rec} = Factor de calibración por recuperación (5 típico, según SHELL).

Para verificar los diseños del proyecto se empleó un F_{rec} de 1,0, lo que equivale a emplear una confiabilidad del 95% con respecto a la curva de fatiga SHELL. Así mismo, un contenido de asfalto en volumen de 11%.

b) Fatiga de la subrasante - Ahuellamiento

Este tipo de falla del pavimento por fatiga de la subrasante se analiza a partir de la deformación unitaria vertical por compresión en la parte superior de la subrasante. Las curvas de fatiga correspondientes son:

$$\epsilon_v = 2,8E-02 * N^{-0,25} \text{ (50\% de confiabilidad)}$$

$$\epsilon_v = 2,1E-02 * N^{-0,25} \text{ (85\% de confiabilidad)}$$

$$\epsilon_v = 1,8E-02 * N^{-0,25} \text{ (95\% de confiabilidad)}$$

Donde:

ϵ_v = Deformación vertical unitaria o específica por compresión, en la parte superior de la subrasante.

N = Número de repeticiones de ejes para la falla (fatiga) de la subrasante.

En este proyecto se utiliza una confiabilidad del 95%.

El detalle del cálculo y sus respectivos valores se pueden observar en las memorias de cálculo de las estructuras de pavimentos incluidas en el Anexo D.

6.3.1 SHELL - Modelos estructurales

El modelo estructural básico de Shell contempla 3 capas, a saber:

- Capa 1: Concreto asfáltico
- Capa 2: Granulares.
- Subrasante.

Los correspondientes parámetros estructurales del modelo se definieron así:

a) Módulo resiliente de la subrasante.

El módulo resiliente de la subrasante, E_{sr} , fue determinado a partir de la correlación propuesta por SHELL con el ensayo CBR ($E_{sr}=100 \times \text{CBR}[\%]$).

b) Módulo resiliente de las capas granulares.

Para determinar el módulo resiliente de la capa granular E_{gr} se empleó la formulación de SHELL que lo relaciona con el módulo resiliente de la subrasante E_{sr} , así:

- $E_{gr} = K \cdot E_{sr}$, donde $K=0,206 \cdot H_{gr}^{0,45}$ y varía entre 2 y 4, y H_{gr} es el espesor total de los granulares en mm.

c) Módulo de las capas asfálticas nuevas

El módulo de las capas asfálticas nuevas se definió en 2.500 MPa, a partir de ensayos que se conocen de mezclas asfálticas elaboradas con las especificaciones del INVÍAS y asfalto 60/70 de ECOPETROL.

d) Relación de Poisson

Relación de Poisson: 0,35 para las capas de concreto asfáltico, 0,40 para los granulares y 0,45 para la subrasante.

e) Condición de liga entre capas

Todas las capas ligadas (modelo típico de pavimentos flexibles).

f) Modelo de Cargas para el eje estándar

- Eje Estándar de 80 kN de peso total, 40 kN por extremo del eje, 2 llantas en cada extremo.
- Radio de carga = 10,8 cm
- Separación entre llantas = 32,4 cm
- Presión de Contacto = 5,60 Kg/cm²

En el Anexo D. Memorias de Cálculo se presenta la verificación de deformaciones admisibles en las diferentes capas de la nueva estructura.

Tramo 1

Cuadro 23. Parámetros de diseño racional Shell. Tramo 1

PARÁMETROS DE DISEÑO	
N	2.816.998
Smix (N/m ²)	2.465.831.001
Vb (%)	11
K	1,0
$\epsilon_{t, adm}$	2,24E-04
$\epsilon_{3, adm}$	4,39E-04

Cuadro 24. Modelo racional estructura de pavimento. Tramo 1.

Modelo racional				
Capa	E (kg/cm ²)	μ	h (cm)	Ligada (S/N)
Concreto asfáltico	25.159	0,35	16	S
Granulares 3	1.964	0,40	20	S
Granulares 2	1.073	0,40	25	S
Granulares 1	494	0,40	25	S
Subrasante	200	0,45		

Imagen 14. DEPAV. Tramo 1

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
Programa DEPAU Vers. 1.1 – 1992

Título		Número	
Número de Capas [1..6]		5	
Radio de Carga [cm]		10.8	
Presión de Contacto [Kg/cm²]		5.60	
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		32.4	
Capa N°	E [Kg/cm²]	μ []	H [cm]
1ª	25159	0.35	16
2ª	1964	0.40	20
3ª	1073	0.40	25
4ª	494	0.40	25
5ª	200	0.45	
6ª			

Deflexión = 82.850 mm/100
Radio de Curvatura = 250.050 m

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruct 7 8 Imprim 9 10 Salir

Imagen 15. Deformaciones capas de la estructura del pavimento. Tramo 1.

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
Programa DEPAU Vers. 1.1 – 1992

Título del Trabajo : VIA PUENTE PIEDRA COLON TRAMO 1
Número de Capas : 5 Alternativa : 1

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	2.3000E-04 C	1.1217E+01 B	-1.6000E-04 C	5.5982E+00 A
	16.00	-2.1400E-04 C	7.0563E+00 B	2.1400E-04 B	9.1161E-01 B
2ª	16.00	-2.1400E-04 C	-2.8246E-02 C	4.5400E-04 B	9.1161E-01 B
	36.00	-2.0600E-04 C	-3.9768E-01 C	3.2800E-04 C	3.5078E-01 C
3ª	36.00	-2.0600E-04 C	-1.1115E-01 C	3.9700E-04 C	3.5078E-01 C
	61.00	-1.8900E-04 C	-2.3963E-01 C	3.0100E-04 C	1.3562E-01 C

Deflexión = 82.850 mm/100
Radio de Curvatura = 250.050 m

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruct 7 8 Imprim 9 10 Salir

Imagen 16. Deformaciones capa remanente de afirmado y subrasante. Tramo 1

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA - INSTITUTO DE VIAS
Programa DEPAV Vers. 1.1 - 1992

Título del Trabajo : VIA PUENTE PIEDRA COLON TRAMO 1
Número de Capas : 5 Alternativa : 1

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	61.00 86.00	-1.8900E-04 C -1.7800E-04 C	-6.1386E-02 C -9.4220E-02 C	3.7000E-04 C 3.0100E-04 C	1.3562E-01 C 7.4642E-02 C
5ª	86.00	-1.7800E-04 C	-2.4473E-03 C	3.8200E-04 C	7.4642E-02 C
6ª					

Deflexión = 82.850 mm/100
Radio de Curvatura = 250.050 m

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruc 7 8 Imprim 9 10 Salir

Cuadro 25. Deformaciones actuantes calculadas con DEPAV. Tramo 1

$\epsilon_{t,act}$	2,14E-04	Cumple
$\epsilon_{3,act}$	3,82E-04	Cumple

Dado que las deformaciones actuantes son menores que las admisibles se considera apropiada la estructura dimensionada por el Método AASHTO para el tramo 1 (K0+000 - K5+075).

Tramo 2

Cuadro 26. Parámetros de diseño racional Shell. Tramo 2

Parámetros de diseño	
N	2.816.998
Smix (N/m²)	2.465.831.001
Vb (%)	11

Parámetros de diseño	
K	1,0
$\epsilon_{t,adm}$	2,24E-04
$\epsilon_{3,adm}$	4,39E-04

Cuadro 27. Modelo racional estructura de pavimento. Tramo 2.

Modelo racional				
Capa	E (kg/cm ²)	μ	h (cm)	Ligada (S/N)
Concreto Asfáltico	25.159	0,35	16	S
Granulares 2	1.741	0,40	20	S
Granulares 1	1.013	0,40	25	S
Subrasante	410	0,45		

Imagen 17. DEPAV. Tramo 2

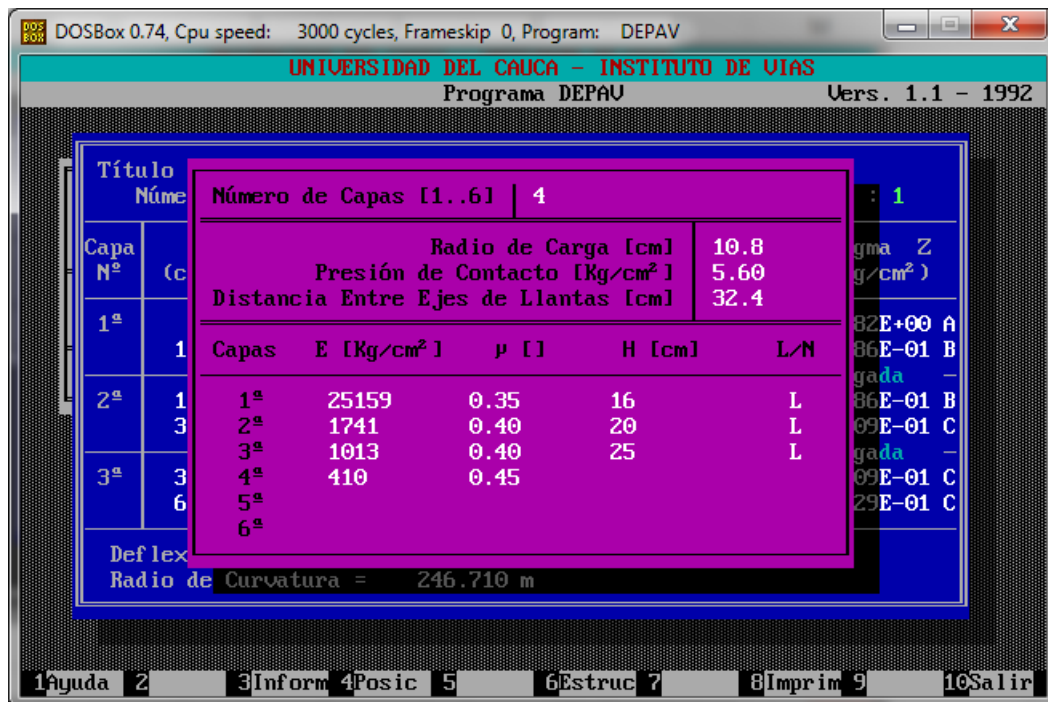


Imagen 18. Deformaciones capas de la estructura del pavimento. Tramo 2.

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
Programa DEPAU Vers. 1.1 – 1992

Título del Trabajo : VIA PUENTE PIEDRA COLON TRAMO 2
Número de Capas : 4 Alternativa : 1

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00 16.00	2.2900E-04 C -2.2200E-04 C	1.1115E+01 B 7.3520E+00 B	-1.5700E-04 C 2.2000E-04 B	5.5982E+00 A 8.7286E-01 B
2ª	16.00 36.00	-2.2200E-04 C -2.0300E-04 C	-6.4547E-04 C -3.0693E-01 C	4.8000E-04 B 3.3900E-04 C	8.7286E-01 B 3.6709E-01 C
3ª	36.00 61.00	-2.0300E-04 C -1.8700E-04 C	-7.6274E-02 C -1.9374E-01 C	4.0900E-04 C 3.1600E-04 C	3.6709E-01 C 1.7029E-01 C

Deflexión = 60.840 mm/100
Radio de Curvatura = 246.710 m

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruc 7 8 Imprim 9 10 Salir

Imagen 19. Deformaciones subrasante. Tramo 2.

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
Programa DEPAU Vers. 1.1 – 1992

Título del Trabajo : VIA PUENTE PIEDRA COLON TRAMO 2
Número de Capas : 4 Alternativa : 1

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	61.00	-1.8700E-04 C	3.7933E-03 B	4.0100E-04 C	1.7029E-01 C
5ª					
6ª					

Deflexión = 60.840 mm/100
Radio de Curvatura = 246.710 m

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruc 7 8 Imprim 9 10 Salir

Cuadro 28. Deformaciones actuantes calculadas con DEPAV. Tramo 2

$\epsilon_{t,act}$	2,22E-04	Cumple
$\epsilon_{3,act}$	4,01E-04	Cumple

Teniendo en cuenta que las deformaciones actuantes son menores que las admisibles se considera apropiada la estructura dimensionada por el Método AASHTO para el tramo 2 (K5+075 - K9+500).

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De conformidad con los resultados del plan exploratorio en el corredor de la vía se encontró superficialmente un afirmado conformado por materiales gruesos (fragmentos, guijarros y cantos) redondeados de canteras y fuentes aluviales de la zona colocados sobre la subrasante natural a manera de estabilización mecánica. El sector se caracteriza por un relieve plano y las condiciones de estabilidad son aceptables, no se identifican zonas de deslizamientos ni de inestabilidad de banca.

Estos rellenos se encuentran apoyados sobre la subrasante natural, que lo largo del corredor está conformada principalmente por limos y arcillas

Con base en los parámetros evaluados del clima en la zona, la capacidad de soporte de la subrasante y el tránsito esperado, se definieron las categorías correspondientes a la región climática, la categoría de subrasante y el rango de tránsito acumulado por carril en el periodo de diseño, de acuerdo con el Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías

Este corredor el nivel de rasante actual corresponde a un afirmado cuyo espesor varía entre 0,15 y 0,6 metros, según fue determinado con base en la ejecución de 19 apiques distribuidos cada 500 metros; excavados a profundidades que varían entre 1,0 y 1,5 metros bajo el nivel de superficie.

Las cargas vehiculares para este sector son aplicadas principalmente por volquetas (tipo camión grande C2 y tracto-camiones (doble troques, tipo C3) y buses. Para cuantificar el N (número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas) se consideró el TPD estimado mediante conteos y una rata de crecimiento promedio de 3,82% establecida a partir de la serie histórica de las carreteras primarias y secundarias de la zona. Según la práctica ingenieril en el país, el periodo de diseño (n) se estableció de 10 años.

Para el diseño de la estructura del pavimento se consideró inicialmente el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito de INVIAS; con los siguientes parámetros: CBR de subrasante de 2,0% (Tramo 1) y 4,1% (Tramo 2); un número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas esperado en el carril de diseño de $2,82 \times 10^6$. Las características climáticas de la zona de proyecto pertenecen a un clima templado seco y semihúmedo, al que le corresponde una temperatura media ambiental entre 13 y 14°C y una precipitación media anual menor a 2000 mm/año.

Con estos parámetros de diseño correspondientes a las categorías R2 de región climática, S1 de subrasante, T3 de tránsito se encontraron dos tipos de estructuras en el manual. La primera es una estructura convencional conformada por una carpeta asfáltica apoyada sobre materiales granulares de base y subbase y la segunda consiste en una estructura con capas granulares estabilizadas con una emulsión asfáltica en vez de la base granular.

Cabe anotar que en el tramo 1 donde la capacidad de soporte CBR de diseño determinada está por debajo del rango establecido para la categoría S1 del manual, es necesario que a manera de mejoramiento se garantice que en todos los sitios queden como mínimo 10 cm del afirmado existente que servirán como mejoramiento incrementando la capacidad de soporte de la plataforma.

En la medida que este método diseña con los parámetros críticos de cada rango, puede decirse que las estructuras estarán sobredimensionadas con relación a los parámetros evaluados, por esta razón como alternativa al diseño, se realizó un diseño AASHTO ajustado a las condiciones específicas del proyecto, tratando de mantener los demás parámetros recomendados en el manual INVIAS y para una estructura de pavimento apoyada sobre materiales granulares, ya que ésta se considera la alternativa más apropiada y viable teniendo en cuenta el clima y la disponibilidad de materiales en la zona.

Las estructuras de pavimento obtenidas, considerando el aporte de espesores mínimos remanentes de 15 cm de afirmado en el tramo 1 y 10 cm en el tramo 2, fueron las siguientes:

Cuadro 29. Estructura de pavimento tramo 1 (K0+000 - K5+075)
Período de diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d= 2,0\%$

TIPO DE MATERIAL	ESPESOR
Rodadura asfáltica MDC-19 NT2 Artículo 450-13 INV	7,0 cm
Intermedia asfáltica MDC-25 NT2 Artículo 450-13 INV	9,0 cm
Base granular Clase B NT2 Artículo 330-13 INV	20,0 cm
Subbase granular Clase B NT2 Artículo 320-13 INV	35,0 cm
Afirmado existente Artículo 311-13 INV - Verificar espesor mínimo después de reconformar y compactar*	(15,0 cm)

Cuadro 30. Estructura de pavimento tramo 2 (K5+075 - K9+500)
Período de diseño = 10 años ($NEE=2,82 \times 10^6$) - $CBR_d=4,1\%$

TIPO DE MATERIAL	ESPESOR
Rodadura asfáltica MDC-19 NT2 Artículo 450-13 INV	7,0 cm
Intermedia asfáltica MDC-25 NT2 Artículo 450-13 INV	9,0 cm
Base granular Clase B NT2 Artículo 330-13 INV	15,0 cm
Subbase granular Clase B NT2 Artículo 320-13 INV	20,0 cm
Afirmado existente Artículo 311-13 INV - Verificar espesor mínimo después de reconformar y compactar*	(10,0 cm)

Adicionalmente, en esta estructura se verificó siguiendo la Metodología Racional Shell que se está cumpliendo con las deformaciones admisibles por tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica (fatiga) y por compresión en la fibra superior de la subrasante (ahuellamiento). Como resultado se obtuvo que las deformaciones esperadas para el tramo1: ($\epsilon_v=3,82 \times 10^{-4}$ y $\epsilon_t=2,14 \times 10^{-4}$) son menores que las admisibles ($\epsilon_v=4,39 \times 10^{-4}$ y $\epsilon_t=2,24 \times 10^{-4}$) y así también en el tramo 2: ($\epsilon_v=4,01 \times 10^{-4}$ y $\epsilon_t=2,22 \times 10^{-4}$) son menores que las admisibles ($\epsilon_v=4,39 \times 10^{-4}$ y $\epsilon_t=2,24 \times 10^{-4}$).

Por último, se hace énfasis en que para garantizar un buen funcionamiento y la durabilidad del pavimento son necesarias buenas y suficientes obras de drenaje que protejan la estructura construida y minimicen los cambios volumétricos de la subrasante debido a variaciones en su humedad, así como el traslado previo de los árboles que puedan causar desecación o afectar el pavimento con sus raíces.

8. BIBLIOGRAFÍA

Higuera, Carlos, Nociones sobre metodos de diseño de estructura de pavimentos para carreteras. Principios fundamentales, el tránsito, factores climáticos y geotecnia - Vol. 1. Ed. UPTC. Tunja, Boyacá - Colombia, 2010.

Higuera, Carlos, Nociones sobre metodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Teoría, métodos de diseño y ejemplos de aplicación - Vol. 2. Ed. UPTC. Tunja, Boyacá - Colombia, 2010.

IDEAM. (2014). Clima. Obtenido de <https://goo.gl/WtlmNP>

INGEPAV. (24 de Diciembre de 2016). Software - Ingepav. Obtenido de <https://goo.gl/DUCJMf>

INSTITUTO NACIONAL DE INVIAS. (1998). Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Popayán, Cauca.

INSTITUTO NACIONAL DE INVIAS. (1998). Normas y especificaciones INVIAS 2013. Bogotá

Muñoz, S. G. (21 de Noviembre de 2014). Departamento Nacional de Planeación. obtenido de La infraestructura en el Plan Nacional de Desarrollo. Recuperado de: <https://goo.gl/QhY1FB>

Planeación, D. N. (27 de Marzo de 2015). Rehabilitación vías terciarias mediante el uso de placa huella. Obtenido de Problema a resolver. Recuperado de: <https://goo.gl/u1F8Mt>

TRANSPORTE, M. D. (2007). Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. Bogotá.

UMSS. (21 de Noviembre de 2015). Manual completo de diseños de pavimentos. obtenido de la infraestructura en el Plan Nacional de Desarrollo: Recuperado de: <https://goo.gl/efltv1>.

Universidad Nacional de Colombia, I. d. (2013). Guia "Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C". Bogotá.

Vargas, W. E. (2010). Ingeniería de tránsito y transporte. En W. E. Vargas, Ingeniería de Tránsito y Transporte (pág. 76). Bogotá.

Villar, L., & Ramirez, J. M. (15 de Febrero de 2014). Infraestructura regional y pobreza rural. Obtenido de Pobreza, ruralidad e infraestructura vial. Recuperado de: <https://goo.gl/JnoNKk>.