

RECICLAJE DE PAVIMENTOS
ESTUDIO DE LAS VENTAJAS ECONÓMICAS DEL RECICLAJE EN FRÍO *IN SITU* DE
PAVIMENTOS ASFALTICOS

MONOGRAFÍA
PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN VÍAS Y TRANSPORTE

POR
HÉCTOR ALBEIRO RESTREPO SIERRA
STEVE ALEXANDER STEPHENS ZAPATA

ASESOR METODOLOGICO
CESAR AUGUSTO HIDALGO MONTOYA

ASESOR TEMÁTICO
HECTOR ENRIQUE CORTÉS PÉREZ

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE
MEDELLÍN

2015

DEDICATORIA

A MI MADRE:

Con todo mi cariño y respeto le dedico esta monografía a la persona que me enseñó que en la vida todo se logra a base de sacrificio y perseverancia.

Gloria Fanny Sierra Restrepo

A MI HIJA:

Por ser el motor que impulsa mi existencia, y me motiva a seguir con entusiasmo en la consecución de mis metas, todos mis logros se cimentan en el amor a mi pequeña y dulce niña.

Salomé Restrepo Roldán

HÉCTOR

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a:

Dr CESAR AUGUSTO HIDALGO MONTOYA

ING. HÉCTOR ENRIQUE CORTÉS PEREZ

Por todas esas horas de lucidez y dedicación en las que me guiaron durante la ejecución de este trabajo.

HÉCTOR

CONTENIDO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

1	INTRODUCCIÓN	15
2	ANTECEDENTES	21
2.1	MANTENIMIENTO Y REHABILITACION DE PAVIMENTOS	21
2.2	CONCEPTO DEL RECICLAJE DE PAVIMENTOS	23
2.3	TIPOS DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS	25
2.4	ANTECEDENTES EN EL MUNDO	27
2.5	ANTECEDENTES EN COLOMBIA	30
2.6	NORMATIVIDAD VIGENTE	31
3	TÉCNICAS DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS	33
3.1	RECICLAJE EN CALIENTE	33
3.1.1	En Planta	34
3.1.2	En vía (o in situ).	36
3.2	RECICLAJE EN FRIO	37
3.2.1	En planta	38
3.2.2	En vía (o in situ).	39
4	TOMA DE DECISIONES	46
4.1	ÁRBOL DE DECISIÓN:	46
4.1.1	Descipción detallada	47
4.1.2	Pasos para la elaboración de un árbol de decisión	48
4.1.3	Asignación de probabilidades	50
4.1.4	Criterios de decisión bajo incertidumbre	50
5	PROCESO DE RECICLAJE EN FRÍO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFALTICOS UTILIZADO EN LA VIA SOPETRÁN – PUENTE DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA	52

5.1	DESCRIPCIÓN DETALLADA	52
5.1.1	Localización del proyecto.	52
5.1.2	Estado del Pavimento Existente.....	55
5.1.3	Alternativas para la rehabilitación de la estructura de pavimento.	56
5.1.4	Proceso constructivo del reciclaje en frío in situ con estabilización con cemento. .	62
5.2	CÁLCULO DE LOS COSTOS "RECICLAJE EN FRÍO" IN SITU.....	72
5.3	CÁLCULO DE LOS COSTOS "MANTENIMIENTO CONVENCIONAL"	73
5.4	CÁLCULO DE LOS COSTOS "REFUERZO CON CARPETA MDC-2"	75
5.5	HERRAMIENTA DE DECISIÓN.....	77
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Generación de RAP y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de Europa.....	29
Tabla 2. Proyección del tránsito para un periodo de 4 años.....	58
Tabla 3. Proyección del tránsito para un periodo de 5 años.....	58
Tabla 4. Proyección del tránsito para un periodo de 6 años.....	59
Tabla 5. Cargas máximas usadas para el diseño.	59
Tabla 6. Ejes equivalentes para cada periodo de diseño.....	60
Tabla 7. Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA A)	72
Tabla 8. Presupuesto Alternativa A (Reciclaje en frío in situ).....	73
Tabla 9. Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA B)	74
Tabla 10. Presupuesto Alternativa B (Mantenimiento Convencional)	74
Tabla 11. Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA C).....	75
Tabla 12. Presupuesto Alternativa C (Refuerzo con Carpeta MDC-2)	76
Tabla 13. Costo directo por kilómetro de vía recuperado.....	77
Tabla 14. Criterios de incertidumbre para la toma de decisiones de las alternativas estudiadas.....	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Principales ventajas de las técnicas de reciclado.....	26
Cuadro 2. Especificaciones generales de construcción de carreteras.	32
Cuadro 3. Fallas tratadas con esta tecnología.	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipo utilizado para reciclado en frío “in situ”	44
Figura 2. Esquema de árbol de decisión	49
Figura 3. Localización general del proyecto	54
Figura 4. Estructura de pavimento tipo A	61
Figura 5. Estructura de pavimento tipo B	61
Figura 6. Estructura de pavimento tipo C	62
Figura 7. Disgregación de materiales Vía Sopetrán- Puente de Occidente.....	64
Figura 8. Distribución homogénea del cemento.....	65
Figura 9. Homogenización del cemento en el área intervenida.....	66
Figura 10. Mezclado del material reciclado con el cemento aplicado.	67
Figura 11. Conformación de calzada con RAP.	68
Figura 12. Aplicación de agua de preenvuelta.	69
Figura 13. Compactación del material conformado.	70
Figura 14. Curado mediante el riego de emulsión	71
Figura 15. Esquema de decisión para el Mantenimiento y reparación de vías secundarias.....	78
Figura 16. Árbol de decisiones para la elección del mantenimiento y reparación de vías secundarias.....	79

GLOSARIO

- **Capa de refuerzo:** Consiste en la colocación de capas de pavimento que proporcionan capacidad estructural adicional o mejoran la serviciabilidad de la vía intervenida.
- **Disgregación:** Procedimiento mediante el cual se separan los agregados pétreos que componen una mezcla asfáltica.
- **Fallas estructurales:** Son fallas cuyo origen es la degradación de una o más capas del pavimento, en una magnitud tal, que se puede considerar que se ha vencido el periodo de diseño en las zonas afectadas.
- **Fallas funcionales:** Fallas asociadas fundamentalmente a la capa asfáltica superficial.
- **Mantenimiento de vías:** Medidas rutinarias y/o periódicas que ayudan al pavimento a llegar a su vida útil, manteniendo en óptimas condiciones la movilidad del tránsito vehicular.
- **N:** Número acumulado de ejes equivalentes a 8.2 ton. en el carril de diseño durante el periodo de diseño
- **Rap (Reclaimed Asphalt Pavement):** Materiales procedentes del fresado o a demolición de mezclas asfáltica.
- **Reciclaje:** Consiste en la reutilización de parte de las capas de la estructura existente, para mejorar su capacidad estructural.
- **Reconstrucción:** Consiste en la remoción de capas y reemplazo parcial o total del pavimento, para mejorar su capacidad estructural.

- **Rehabilitación:** Mejoramiento funcional o estructural del pavimento, que da lugar tanto a una extensión de su vida de servicio, como a la provisión de una superficie de rodamiento más cómoda y segura y a reducciones en los costos de operación vehicular.

- **Restauración:** Consiste en la ejecución de trabajos que mejoran la condición superficial del pavimento, pero no aumentan su capacidad portante.

- **TSD:** Tratamiento superficial doble.

RESUMEN

En los procesos de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, se deben definir los objetivos, bien sea para realizar unas reparaciones superficiales sobre daños generados por el agua como consecuencia de fallas en los drenajes, o bien realizar una intervención sobre la estructura buscando recuperarla a sus condiciones de diseño originales, la cual se realiza con el proceso de reciclaje el cual tiene en cuenta las características físico-químicas de los materiales existentes los cuales se consideran sufrieron el adecuado proceso que les permitió hacer parte de la estructura.

Existiendo cuatro tipos de reciclaje de los cuales se realiza una descripción general de cada proceso, el presente trabajo se concentra en el análisis técnico – económico del proceso “In situ” en frío, método utilizado en la rehabilitación de la vía Sopetrán - Puente de Occidente, en el Departamento de Antioquia, en una longitud de 13 Km.

El presente estudio se realiza verificando el cumplimiento de las especificaciones a nivel nacional que para estos procesos estableció el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y verificando el cumplimiento de las normas IDU ET-2005.

El reciclaje “in situ” en frío tiene ventajas ecológicas (no necesita afectar las eventuales fuentes de materiales de la zona), económico (bajos costos comparados con reconstrucción) y técnico (los equipos para este proceso han presentado importantes avances tecnológicos) lo cual permitió su aplicación en la vía mencionada, lo cual con la adición de un agente estabilizador (cemento para el presente estudio) permite recuperar las condiciones iniciales de diseño de la estructura intervenida.

El árbol de decisiones es una herramienta utilizada para el análisis y selección de la mejor opción de estructura a realizar teniendo en cuenta calidad y costos.

El presente trabajo termina con un análisis detallado de las condiciones existentes, revisión de las diferentes opciones de intervención y el estudio económico de las diferentes alternativas de estructura de pavimento para la rehabilitación de la vía referida.

PALABRAS CLAVES

Reciclaje de pavimentos, Mantenimiento de vías, rehabilitación, técnicas de reciclaje.

ABSTRACT

In the processes of maintenance and rehabilitation of the pavement, it is required to define the objectives according to them. These targets must not only be associated with fixing damages on pavement surface because of water as a consequence of failed water drainage, but also repair the pavement infrastructure making it to its original design conditions.

Those objectives involve making a pavement recycling process taking into account the physical-chemical characteristics of already existing relevant materials and from which it is considered they were subjected by changes within a suitable process enabling them to be part of the structure.

On the other hand, there are four kinds of pavement recycling. As a result, it is made a general description from them according to each process.

This thesis is focused on financial and technical analysis of the cold recycling 'In Situ' process applied to rehabilitate the vía Sopetrán—Puente de Occidente-- located in Antioquia, Department, in a length of 13 kilometers.

This study is verifying compliance with the existing Colombian standards set out for this type of pavement recycling processes according to Instituto Nacional de Vías (INVIAS), and checking the compliance of IDU ET-2005 standards, as well.

The cold recycling 'In-Situ' offers ecological advantages: --The possible source of local materials in the area is not affected by this process, it is more economical than rebuild the

pavement--. And Technical advantages: --The machinery for these recycling processes is high-performance--. In fact, it was used in the rehabilitation of the above-mentioned route.

In addition to, a stabilising agent was used --cement in this case for this study-- to recover the original design in the repaired infrastructure.

The decision tree or influence diagram is a useful tool to analyze and select the best option of making the structure taking into account its costs and quality.

This study is concluded on analysis of detailed existing conditions; different options of pavement intervention, and the economics study about different alternatives of pavement structures to rehabilitate the above-mentioned road were reviewed.

KEYWORDS

Pavement Recycling, road maintenance, rehabilitation, recycling techniques.

1 INTRODUCCIÓN

El proceso de reciclar los productos ya utilizados, es decir, volver a usar materiales que ya prestaron un servicio, comenzó a tener importancia desde que el hombre, agrupado en grandes centros urbanos, fue consciente de la gran cantidad y volumen de desechos que se producía día a día y la dificultad que podría generar su disposición final.

Los efectos sobre la salud, en primer lugar, los impactos que se producían contra el ambiente, en un segundo lugar y de manera muy reciente (después de la década de los 60's) y el valor económico, en tercer lugar, motivaron desarrollos encaminados a re-utilizar los materiales básicos que, aunque degradados y transformados, aún se encontraban presentes en los productos desechados y aparentemente inservibles. (O deficientes para su uso).

De esta forma, se desarrollaron equipos y procesos para el reciclaje de vidrio, plástico y papel, pues estos tres elementos constituyen, en el caso de Colombia, aproximadamente el 40% del volumen total de residuos sólidos urbanos. Con la producción masiva de productos enlatados, a partir de la década de los 60's, también se generaron mecanismos para la obtención de nuevos recipientes a partir de latas recicladas. (Acurio, 1997) afirma:

En la Región se generan más de 360,000 toneladas diariamente de residuos domiciliarios, con un contenido cada vez menor de biodegradables y más contaminantes peligrosos (insecticidas, pinturas, tintas, desinfectantes, pilas, etc.) y la cobertura de recolección en la mayoría de ciudades medianas fluctúa entre el 50 y el 70%, mientras que en muchas zonas peri urbanas de las grandes y pequeñas ciudades, así como en los poblados rurales, los servicios de recolección son aún más deficientes o en muchos casos inexistentes.

Se estima que más del 70% de los residuos son dispuestos en vertederos a cielo abierto, en cursos de agua, en vías públicas o se emplea como alimento de

porcinos, entre otros y menos del 30% de residuos es dispuesto en rellenos sanitarios o rellenos controlados.

En la mayoría de las ciudades los residuos peligrosos (hospitalarios e industriales) son manejados de manera conjunta con los residuos municipales y su disposición final se efectúa en vertederos a cielo abierto (se estima que se generan 3.600 t/d de residuos hospitalarios, de los cuales más de 600 toneladas son peligrosas).

Más de 100.000 familias se dedican al reciclaje informal de residuos en vertederos a cielo abierto, en condiciones totalmente insalubres; lo cual representa más de 300 mil personas, de las cuales cerca del 30% son niños.

Otra cara de los residuos que no impacta de manera tan directa y drástica en el diario vivir, pero no por ello menos importante, la constituyen los desechos o sobrantes de construcción tanto de edificios y viviendas como los que corresponden y resultan de los procesos y actividades viales.

En varias ocasiones se dificulta el reciclaje total de materiales bien por costos o por la dificultad del proceso, de manera que el material se puede reutilizar para producir otros materiales, o bien podemos lograr recuperar parte del producto especialmente en casos que generen riesgo.

El problema del que se ocupará la presente monografía será el que tiene que ver directamente con el costo que genera la reutilización de los escombros o residuos de la actividad del mantenimiento y construcción de vías urbanas y carreteras, y de manera específica, aquellos que provienen de pavimentos asfálticos o pavimentos flexibles Vs. el costo de una estructura nueva sin la reutilización del pavimento asfáltico. El tema de reciclar los residuos de vías en concreto o en adoquines no es del alcance del presente trabajo.

La gran concentración de población que tienen las grandes ciudades exige una permanente extensión de su red vial para mantener la conexión con las zonas periféricas que van desarrollándose y obliga también a la ampliación de las vías existentes que intentan servir al crecimiento en altura de las edificaciones y al mejoramiento de la movilidad interna. El mantenimiento tiene que cubrir, entonces, cada día más kilómetros.

Además el deterioro de los pavimentos debido a su uso, hacen que estos pavimentos agotados sean objeto de renovación.

Así mismo, el continuo crecimiento y expansión de una urbe moderna requiere que las redes públicas de servicio, trazadas generalmente por los ejes viales, sufran reposición y expansión para mantener el nivel de servicios públicos con los estándares de calidad reglamentarios.

Estos factores sumados a las restricciones en el tema minero y ambiental que se ha generado para la explotación de materiales y su alto costo de producción por estar dentro o cerca de la zona urbana, lo cual genera mayores distancias de desplazamiento de los materiales producidos aumentando los costos finales de las nuevas estructuras.

Según entrevista realizada al ingeniero Jorge Humberto Cuartas, quien afirma que estas situaciones hacen que, por ejemplo, en una ciudad como Medellín que tiene una red vial pavimentada entre 2.200 y 2.300 km, se generen cada día una cantidad mayor a 500 toneladas de escombros de pavimento, tanto por los trabajos de reposición y expansión de redes de servicio como por las labores propias del mantenimiento vial rutinario. De forma similar, Bogotá que posee una red vial aproximadamente 5 veces el tamaño de la de Medellín, producirá, guardadas

las proporciones, una cantidad aproximada a las 2.500 toneladas diarias de escombros de pavimento.

Estos volúmenes son de una representatividad alarmante si se piensa en su efecto sobre los lotes disponibles para el depósito de escombros y el valor actual de la tierra para disponerlos, pues no se han contabilizado aquí las cantidades diarias que se generan por la actividad constructiva y de remodelación de casas, edificios e industrias.

Como si esto fuera poco, el otro golpe fuerte lo constituye el hecho de que las cantidades diarias de escombros de pavimentos son reutilizables, sus técnicas ya se conocen y son de prácticas relativamente sencillas. Reciclar estos volúmenes evita que una cantidad parecida de materiales no se explote, es decir, se puede preservar en una forma más prolongada la reserva de materiales para construcción de bases granulares y mezclas asfálticas si se acude al reciclaje de los residuos que se generan en el diario accionar de la ciudad.

El manejo de los residuos de pavimento asfáltico constituye uno de los problemas que enfrentan las ciudades medianas y grandes, pues el volumen generado obliga a las Administraciones a encontrar las soluciones más convenientes desde los puntos de vista social, económico y ambiental, con el fin de evitar los efectos contraproducentes ante la imperiosa necesidad de la continua extensión de las redes de servicio público, del crecimiento de la red vial urbana y del mantenimiento adecuado de la existente.

En el tema del reciclaje de pavimentos asfálticos es importante acopiar el conocimiento actual respecto a este tema con el fin de que la Administración Pública tenga una herramienta adicional en el establecimiento de sus programas, a la vez que se avanza sobre la importante necesidad de que la ejecución de las obras viales afecte lo menos posible al medio ambiente,

aprovechando los recursos existentes en el sitio y así desarrollar infraestructura con un costo económico inferior.

La conciencia ambiental, basada en la posibilidad de evitar el agotamiento de los recursos naturales, la reducción del consumo de energía, el aprovechamiento de los materiales existentes y la necesidad de reducción de costos entre otros, ha hecho que el reciclaje de pavimentos asfálticos con adición de cemento sea una alternativa tecnológica que tenga cada vez mayor aceptación a nivel mundial.

Surgen entonces como interrogante principal: **¿Es viable el reciclaje de pavimentos asfáltico con adición de cemento?**

Propendiendo por resolver el anterior interrogante durante la realización de este trabajo, se fija como objetivo general, Evaluar el reciclaje de pavimentos asfálticos con adición de cemento como una alternativa técnica y económica para el mejoramiento de vías existentes con problemas estructurales y de fatiga de los asfaltos. Soportado en alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Conocer las diferentes técnicas utilizadas a nivel mundial para el reciclaje de pavimentos asfálticos.
- Identificar el beneficio ambiental al reutilizar la carpeta asfáltica existente fatigada en un alto porcentaje.
- Generar los datos básicos que sirvan para cuantificar la disminución en costos de materiales y transporte de estos al sitio.
- Evaluar un caso específico calculando el porcentaje de dinero que se ahorra mediante la utilización de la técnica del reciclaje de asfalto con adición de cemento.

- Evaluar el riesgo económico mediante la utilización de la técnica de “árbol de decisiones”.

2 ANTECEDENTES

2.1 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION DE PAVIMENTOS

Las acciones que se toman para la rehabilitación de pavimentos consisten en mantener alejada el agua fuera de la estructura, garantizando la impermeabilidad de la estructura y las medidas de drenaje efectivas, de manera tal que la estructura se mantenga en condiciones de diseño.

El agua ingresa a la estructura por la superficie bien por las grietas o por el estancamiento, lo cual se debe evitar con un oportuno y adecuado sello de grietas y un permanente drenaje lateral. Los efectos que genere el envejecimiento de la estructura deben ser tratados oportunamente con la adición de nuevas capas, las cuales se definen según el tipo de tráfico que presente la vía.

Todas estas acciones apuntan a mantener una adecuada superficie de rodadura y están encaminadas solo a reparar los efectos causados por el medio ambiente. Los efectos generados por la fatiga de materiales como consecuencia de la continuidad de las cargas del tráfico sobre la estructura, no pueden ser tratadas con reparaciones superficiales sino con acciones de rehabilitación.

Este deterioro de la estructura es un proceso lento que debe ser monitoreado por las autoridades de carreteras de cada país, definiendo oportunamente la necesidad de mantenimiento y rehabilitación que se requiera en cada estructura de pavimento.

La decisión del tipo de mantenimiento y/o rehabilitación, se condiciona normalmente por la cantidad de recursos disponibles para ello; normalmente se toman decisiones de mantenimientos con costo bajo obteniendo buenos resultados para realizar a largo plazo una rehabilitación que implique mejoras en alineamiento horizontal y vertical y mejorar la comodidad del desplazamiento de los vehículos. No se deben alargar los periodos de mantenimiento rutinario ya que en vías sin mantenimiento el avance del deterioro estructural se vuelve progresivo con el paso del tiempo.

Para definir la mejor opción de rehabilitación, se debe tener claro primero cual es el real problema que presenta la estructura mediante un inspección y ensayos preliminares que permitan definir si el daño es superficial o estructural; a partir de allí se deben definir que recursos se tienen, bien para mantener en el mediano plazo las condiciones de transitabilidad o para realizar una recuperación en un periodo de diseño a definir. La aplicación de los métodos de rehabilitación, el tráfico existente y atraído, las condiciones del clima y los recursos disponibles también afectan la decisión del tipo de intervención a realizar.

Se pueden realizar dos tipos de rehabilitación de pavimentos: la rehabilitación superficial que está encaminada al asfalto y a las grietas superficiales, y la rehabilitación estructural que es la utilizada para eliminar los problemas estructurales y lograr una solución a largo plazo. En esta última se tiene como opción el proceso de Reciclado profundo hasta encontrar y solucionar el problema que presente la estructura.

2.2 CONCEPTO DEL RECICLAJE DE PAVIMENTOS

Según Montejo, (2005), se entiende por reciclaje de pavimentos, la reutilización de materiales que forman parte de alguna de las capas estructurales de pavimentos existentes y que han cumplido su finalidad inicial, mediante la transformación de un pavimento degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar.

Las técnicas y metodologías que se han desarrollado para el reciclaje de pavimentos obedecen, tal como la evolución de la ciencia en el tema básico de la teoría general de pavimentos, a conceptos empíricos y a comprobaciones de campo por medio de experimentaciones directas, es decir, que los postulados principales se han obtenido a raíz de procedimientos de ensayo y error.

Los tratamientos utilizados parten de un principio físico-mecánico esencial que consiste en la buena gradación del material existente como residuo, puesto que ese material ya sufrió los procesos de selección, clasificación y trituración, que lo hicieron apto para la producción de materiales que conforman las estructuras de pavimento (bases granulares y mezclas asfálticas). Por otra parte, se fundamentan en principios químicos que trabajan sobre el ligante asfáltico presente en los residuos o escombros de pavimentos, que aunque envejecido y de cantidad variable, puede ser reutilizado con la ayuda de aditivos químicos, agentes rejuvenecedores o complementado con la acción de emulsiones asfálticas o crudos pesados tratados.

El primer paso, consiste en la disgregación de los escombros o residuos de pavimento asfáltico (no trituración, pues el material, como se dijo antes, ya fue triturado cuando se usó en la elaboración de la mezcla asfáltica que originó el residuo que se pretende reciclar). Para el caso de los reciclajes en planta se tendría que haber hecho previamente la demolición, el cargue y

transporte, y el acopio en el sitio de planta. El proceso de disgregación pretende separar los agregados pétreos gruesos y de fracturar los pedazos de fracción fina que permanecen ligados por la acción del asfalto viejo, con el fin de que esas partículas tengan de nuevo la capacidad de adherirse entre ellas. El reciclaje en vía toma los materiales de residuo directamente en la vía que se está recuperando, mediante el fresado o molienda de las carpetas asfálticas existentes con o sin inclusión de las capas de base subyacentes a la rodadura.

Una segunda fase se dirige a recuperar o rejuvenecer el asfalto residual presente en los escombros de pavimento ya disgregados, con el fin de otorgarle de nuevo sus propiedades estructurales de resistencia y bituminosas de ligante. En el caso de reciclajes en caliente, se debe seleccionar muy bien el agente rejuvenecedor de tal forma que no afecte las otras propiedades del asfalto y no actúe de manera contraproducente en el asfalto nuevo que se adiciona, cuando el residual asfáltico presente en los escombros es menor que el porcentaje óptimo de asfalto que debe llevar la mezcla reciclada. Para los reciclajes en frío, generalmente se reutiliza el residual asfáltico tal como se encuentra, y se adiciona asfalto nuevo bajo la forma de emulsiones o de crudos pesados. Recientemente, se han realizado algunos trabajos en Bogotá, en Medellín y en algunas carreteras de la Red Troncal Nacional, en donde han adicionado también cemento Portland para conseguir bases granulares estabilizadas a partir de mezclas asfálticas recicladas.

El procedimiento final consiste en la mezcla de los materiales provenientes de la disgregación de los escombros con los agentes o aditivos para obtener un nuevo material, que puede trabajar como mezcla asfáltica para carpetas de rodadura, o como base estabilizada para utilizarla en reemplazo de las capas intermedias de la estructura de un pavimento. En el caso de reciclajes in situ, o en vía, la capa reciclada, es decir, disgregada, aditivada y mezclada, se nivela y compacta para colocar sobre ella una nueva carpeta de rodadura. Mientras que, por el lado de

los reciclajes en planta, se acopia el material reciclado obtenido en los casos en frío, o se despacha inmediatamente como mezcla asfáltica cuando se obtuvo bajo procedimientos térmicos.

Los materiales obtenidos, que reciben el nombre de reciclados, se chequean con especificaciones tan exigentes como las que se utilizan para el control de calidad de los productos normales.

El marco teórico y conceptual que se aplica para las técnicas de reciclaje envuelve pues las etapas descritas y aplica los conceptos básicos de gradación, pesos específicos, contenidos residuales de asfalto, reología del asfalto, resistencias mecánicas y dinámicas, temperaturas de mezcla y de compactación, porcentajes de densidad, porcentajes de vacíos, humedad optima de compactación etc.

Así mismo, los equipos utilizados en estas técnicas poseen avances en sistemas que permiten el monitoreo oportuno y directo, como también las dosificaciones controladas por computador. (GRUOP, 2004)

2.3 TIPOS DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS

Según VALLEJO, (2004), las técnicas que hacen posible el reciclaje de los pavimentos asfálticos se basan en dos tipos de procesos generales: en planta o in situ. A su vez, cada uno de estos sistemas puede clasificarse en dos categorías, de acuerdo con la temperatura bajo la cual se ejecute el procedimiento: en frío o en caliente. De esta forma, los procesos de reciclaje de pavimentos se sitúan dentro de los cuatro tipos que se señalan a continuación:

- Reciclaje en planta en caliente
- Reciclaje en vía (in situ) en caliente
- Reciclaje en planta en frío
- Reciclaje en vía (in situ) en frío

Para el caso presente será el reciclaje “In situ” en frío.

Cuadro 1. Principales ventajas de las técnicas de reciclado.

PRINCIPALES VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS DE RECICLADO	
TECNICA DE RECICLADO	VENTAJAS
Reciclado superficial	Mejora la resistencia al deslizamiento
	Corrige las deficiencias de origen superficial
	Mejora el perfil geométrico de la calzada
	Permite eliminar la capa de restitución de gálibo en refuerzos del pavimento
Reciclado "IN SITU"	Mejora la resistencia al deslizamiento
	Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural
	Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural del pavimento
	Elimina temporalmente las fisuras reflejas
	Permite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales (6 a 7 cm) con deformaciones plásticas
	Mejora el perfil geométrico de la calzada
Reciclado en Planta	Refuerza estructuralmente al pavimento de acuerdo con las necesidades del proyecto
	Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural
	Produce mezclas asfálticas de mejor calidad
	Permite eliminar o corregir las capas intermedias de deficiente comportamiento
	Elimina las fisuras reflejas
	Mejora la resistencia al deslizamiento
	Corrige el perfil geométrico de la calzada

Fuente: Rafael Menéndez, 2015

2.4 ANTECEDENTES EN EL MUNDO

En el tema específico de los pavimentos, el desarrollo vial que tuvieron países como Estados Unidos, Alemania de la posguerra, Inglaterra, España y Francia, desde los años 50's, ejerció una presión muy fuerte sobre las fuentes de agregados pétreos obligando a pensar en su reutilización, primero, como alternativa de mantenimiento y luego, con investigaciones más específicas, como materia prima de nuevos pavimentos.

En países desarrollados, como Australia y Nueva Zelanda, se han implementado prácticas que han ido mejorando mediante la aplicación de los desarrollos tecnológicos y a través de los avances en el conocimiento de las propiedades y comportamiento de los materiales.

En entrevista con el ingeniero Jorge Humberto Cuartas, este afirma que, la mayoría de las ciudades grandes, con poblaciones mayores a 1.500.000 habitantes, en América Latina, principalmente en Chile, Argentina y Brasil, desarrollan y sostienen programas de mantenimiento vial donde el reciclaje en vía es una componente importante. De igual manera, ocurre en las principales ciudades de México, Canadá y Estados Unidos.

Se dice que fue a principios de los 70's el reciclaje de pavimentos asfálticos tuvo un auge importante, debido a la crisis mundial del petróleo, al aumento descomunal del precio del asfalto y la creciente necesidad de conservar el medio ambiente.

De acuerdo con ALARCON (2003), como grandes impulsores de estas técnicas se tiene a países como Estados Unidos y Canadá en el continente Americano, mientras que en Europa la tendencia fue generalizada teniendo como pioneros a Alemania, Austria, Holanda y Dinamarca quienes adoptaron los avances tecnológicos logrados por Estados Unidos a finales de los 70's.

Se estima que el auge del reciclaje de mezclas asfálticas en Europa se dio en el año de 1989 motivado por el incremento desproporcionado en el concepto de derechos de botadero, y desde entonces la práctica del reciclaje de pavimentos asfálticos no ha dejado de ser atractiva económicamente hablando. (ALARCON, 2003)

En la Tabla 1 se evidencia la masificación de la técnica del reciclaje en caliente en Europa durante el año del 2006, comparando directamente la cantidad de material reciclable disponible con el porcentaje del mismo utilizado en mezclas recicladas tanto en caliente como en frío, además, del porcentaje de las mezclas asfálticas nuevas que involucran en su producción material reciclado.

Es de anotar que tanto en Alemania como en Holanda se ha dado mayor importancia a la técnica, a tal punto que incorporan a las mezclas nuevas un 60% y 65% respectivamente del material reciclado. Caso contrario ocurre en Italia donde solo reutilizan el 20% del asfalto reciclable disponible y no incorporan RAP a las mezclas nuevas. En contraste con Alemania y Holanda, se observa que países como Suecia y Suiza que generan bajas cantidades de material asfáltico reciclable, y lo reutilizan todo, no es empleado en la producción de mezclas nuevas que contengan RAP.

Tabla 1. Generación de RAP y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de Europa.

PAIS	(t) MATERIAL ASFALTICO RECICLABLE DISPONIBLE	(%) REALMENTE USADO EN RECICLAJE EN CALIENTE	(%) REALMENTE USADO EN RECICLAJE EN FRIO	(%) DE LA PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS NUEVAS EN CALIENTE QUE CONTENGAN MATERIAL RECICALDO
Alemania	14.000.000	82	18	60
Austria	600.000	10	10	5
Bélgica	13.000.000	50	0	36
Irlanda	48.000	38	0	2,1
Dinamarca	240.000	>80	0	53
Eslovenia	22.000	50	10	15
Eslovaquia	1.250	0	0	0
Francia	6.500.000	13	<2	<10
Holanda	3.400.000	80	20	65
Hungría	-	15	0	0,6
Italia	14.000.000	18	2	0
Noruega	590.000	7	26	8
Polonia	1.000.000	4	55	0,2
Reino Unido	5.000.000	0	0	0
Republica Checa	604.400	30	50	10
España	690.000	30	15	5
Suecia	650.000	50	50	0
Suiza	945.000	50	50	0

Fuente: EAPA, 2006

Teniendo en cuenta que durante los últimos años más gobiernos adoptan el reciclaje de pavimentos dentro de sus políticas de estado, tendiendo a disminuir la utilización de materiales nuevos o vírgenes, esta técnica se afianza y avanza en pro de preservar las condiciones ambientales. Sin dejar de lado que los avances tecnológicos en esta materia ayudan a masificar la utilización del recurso.

2.5 ANTECEDENTES EN COLOMBIA

A continuación se presenta un breve recuento histórico de los desarrollos conocidos, de manera básica en Colombia, sobre esta materia.

Los primeros intentos para reciclar los residuos producto de las labores de mantenimiento del pavimento asfáltico en nuestro país, se llevaron a cabo en Medellín y en Bogotá, mediante la disposición de un lote de terreno para acopiar los escombros o cuescos de pavimentos que resultaban de las tareas de parcheo de huecos y de la apertura de zanjas o brechas para la reposición de redes de servicio.

Según entrevista verbal con el Ingeniero Jorge Humberto Cuartas, fue a comienzos de 1992 que en Colombia se empezó a intensificar la técnica del reciclaje en frío utilizando emulsiones asfálticas como ligante. A partir de esto se ha venido ganando experiencia y conocimiento sobre la importancia del reciclado de pavimentos.

En la actualidad, el tratamiento *in-situ* de los materiales de pavimentos es de uso generalizado, debido a la llegada de potentes máquinas recicladoras que pueden rehabilitar pavimentos a un costo muy inferior de los métodos de reconstrucción convencionales. Además, considerando la situación de los pavimentos a nivel mundial, la rehabilitación de pavimentos existentes excede ampliamente la demanda de construcción de nuevas carreteras. Como consecuencia de esto, el reciclado *in-situ* ha sido adoptado en muchos países como el método recomendado para abordar el enorme trabajo pendiente en términos de rehabilitación de pavimentos. (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, FHWA, 2011)

En Colombia se ha implantado el sistema de reciclaje de pavimentos en frío para diversos proyectos, se pueden nombrar algunas experiencias al respecto como: la vía Puertos López – Puerto Gaitán (Meta), Quibdó – Yuto (Choco), Medellín – Santuario (Antioquia), Cali - Loboquerrero (Valle del Cauca), Manizales - Mesones (Caldas), Autopista Bogotá – Villavicencio (Cundinamarca), entre otras. En la ciudad de Bogotá se ha llevado a cabo algunos trabajos de reciclaje en frío en vías principales, como: Av. Américas, Av. 68, Av. Boyacá, Av. Lara Bonilla. Cll 127 y en algunas vías de las localidades de: Engativá, Los Mártires, Kennedy, Usme, Bosa, entre otras. (CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA, 2007)

En el departamento de Antioquia también se ha llevado a cabo en la vía al mar destacándose los tramos: Uramita – Dabeiba – Mutatá – Chigorodó y El Tres – Turbo. En lo que respecta al área metropolitana del valle de aburrá es generalizada la utilización de la técnica en cada uno de sus municipios.

2.6 *NORMATIVIDAD VIGENTE*

Las Normas para construcción de pavimentos en el Área Metropolitana, que son una regulación emanada de la Secretaría de Obras Públicas del municipio de Medellín, se originaron en el año 1985 y posteriormente fueron actualizadas en 1994. A nivel nacional la normatividad concerniente al reciclaje de pavimentos asfálticos está enmarcada dentro de las especificaciones del IDU ET-2005 en sus secciones 450-05 y 454-05, además de las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en sus artículos 461-07 y 462-07. Siendo estas últimas las de mayor importancia y las más utilizadas a nivel nacional.

Cuadro 2. Especificaciones generales de construcción de carreteras.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Artículo 461-07	"Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos"
Artículo 462-07	"Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente"

Fuente: Adaptado por el autor de Normas INVIAS, 2015

Se trabajará con base en dichas Normas cuando se tengan que tocar los puntos correspondientes a sus estipulaciones.

3 TÉCNICAS DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS

Durante el desarrollo de este capítulo, se tocara de manera clara todos y cada uno de los fundamentos teóricos necesarios para una buena interpretación y comprensión de las diferentes técnicas utilizadas en la actualidad para el reciclaje de pavimentos asfálticos, haciendo énfasis en el reciclaje en vía (in situ) en frío dado que esta técnica es la de mayor utilización en nuestro medio.

3.1 *RECICLAJE EN CALIENTE*

Los procesos denominados “en caliente” son aquellos compuestos por actividades que implican variaciones drásticas y/o considerables de temperatura. Se define como el proceso mediante el cual los materiales del pavimento asfáltico disgregado se combina con materiales pétreos nuevos, adicionando ligantes bituminosos y en casos específicos agentes rejuvenecedores que garanticen la homogenización de la mezcla y la calidad de la misma después del reproceso.

Según J.Aviles (2015), la utilización de mezclas recicladas en caliente puede llevar a ahorros económicos debido a la menor utilización de betún y de materiales nuevos, así como al ahorro producido en el vertido. No obstante, debe hacerse un balance económico de estos ahorros con los gastos relativos al proceso de fresado, el traslado, tratamiento y almacenamiento del RAP, el sobrecalentamiento de los materiales pétreos y el del ligante especial (en caso de ser utilizado), además de la amortización de los equipos necesarios. Los resultados dependerán esencialmente del precio del betún y de los materiales pétreos existentes en la zona del proyecto.

3.1.1 En Planta.

Se entiende por reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente la reutilización de mezclas bituminosas retiradas de capas envejecidas mediante un tratamiento en una central de fabricación en caliente. En este tratamiento se añaden a las mezclas antiguas otros materiales pétreos y ligante nuevos y, a veces, un agente rejuvenecedor del ligante. (J.Aviles, “Reciclaje de mezclas bituminosas en caliente” , 2015)

Como principales actividades se tiene la demolición del pavimento existente, lo cual hace necesario la utilización de martillos neumáticos que generarán grandes bloques de pavimento o una maquina fresadora que disgregue los agregados y a su vez vaya realizando el cargue en las respectivas volquetas. Una vez el RAP sea transportado a la central se procede a realizar las actividades tendientes a reutilizar el material reciclado (Machaqueo o molienda, clasificación y homogenización).

Las técnicas existentes en la actualidad se basan en la utilización de equipos que permitan el reciclado tanto en centrales continuas como discontinuas:

Técnica del calentamiento indirecto, empleada en las centrales continuas de tambor-secador-mezclador. En la parte frontal del tambor se introducen los áridos, que se secan y calientan; en medio del tambor se introduce la mezcla que se va a reciclar, y en la parte posterior del mismo se añade el betún. Los áridos actúan como una pantalla para evitar la acción directa de la llama sobre el material reciclado. La mezcla antigua se calienta por transferencia del calor de los áridos. Los materiales se van moviendo a lo largo del tambor por el giro de éste, produciéndose un flujo continuo de material durante todo el proceso. La necesidad de mantener una pantalla de áridos delante de la mezcla reciclada limita de nuevo la proporción de material

reciclado en la mezcla final. En la práctica suele irse a proporciones del 10-30%. La temperatura empleada en el proceso es la usual en estas centrales (160 °C).

Técnica del sobrecalentamiento del material pétreo virgen de préstamo, utilizada en las centrales discontinuas, en la que éste se calienta a temperaturas elevadas (200-275 °C, según la tasa de reciclado) para que, al entrar en contacto con el material reciclado no calentado, la temperatura del conjunto sea la deseada. En el mezclador se añade el ligante que se vaya a utilizar. Dentro de esta técnica existen varias posibilidades, según dónde se introduzca el material reciclado (en el mezclador o en las tolvas en caliente). El procedimiento convencional tiene una limitación en la proporción del material reciclado sobre el total de la mezcla fabricada (25-30%), para que la temperatura inicial de los materiales pétreos no sea excesiva (<220 °C), ya que, de lo contrario, se podría producir una degradación del ligante en el primer contacto. El procedimiento del sobrecalentamiento de los materiales pétreos fue el más utilizado en los primeros tiempos, hasta que surgieron y se generalizaron las centrales de tambor-secador-mezclador. (CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PUBLICAS, 2011)

Este tipo de reciclaje logra reutilizaciones del RAP hasta de un 40% en la elaboración de mezclas nuevas, sin embargo, esto dependerá del tipo de carretera en el que se vaya a utilizar la mezcla resultante.

Este método de reciclaje será atractivo siempre y cuando las distancias de acarreo para los materiales (RAP y Mezcla Nueva) no generen sobrecostos que afecten directamente al presupuesto de la obra.

3.1.2 En vía (o in situ).

Según J.Aviles (2015), consiste en la conservación de pavimentos bituminosos degradados que se reutilizan directamente, con o sin aportación de materiales nuevos, mezclándolos in situ y posteriormente extendiendo y compactando la mezcla para constituir una nueva capa de pavimento.

Generalmente la aplicación de este tipo de reciclaje de pavimentos va encaminada a corregir problemas de orden superficial, es decir, los que están derivados del envejecimiento del ligante, pérdida de textura o pulimiento de los materiales pétreos. No se busca con esta técnica mejorar la capacidad estructural del pavimento.

Se mencionó anteriormente que la aplicación de esta técnica está encaminada a mejorar las características superficiales del pavimento, por lo tanto su campo de acción se limita a espesores inferiores a 8 cm.

En el siguiente cuadro se visualiza cada uno de los síntomas y la posible solución que brinda esta técnica de reciclaje.

Cuadro 3. Fallas tratadas con esta tecnología.

SÍNTOMAS	SOLUCIÓN CON EL RECICLADO
Fisuras en la carpeta asfáltica	Las fisuras son eliminadas
Perdida de adherencia en el agregado pétreo	Mezclado y recubierto con ligante
Desniveles y resaltos hasta 6cm en la carpeta asfáltica	Escarificación y renivelación de la carpeta asfáltica
Perdida del drenaje superficial	El bombeo y las mezclas drenantes son reacondicionadas
Perdida de viscoelasticidad del asfalto	Restablecida por medio de rejuvenecedores
Cambio en la granulometría	La gradación es restablecida
Perdida de transitabilidad y confort	Mejora la resistencia al deslizamiento

Fuente: Repaving Cutler, 2010

El reciclado en caliente in situ se realiza con unos equipos especiales provistos de calefactores que elevan la temperatura de la superficie del pavimento y facilitan la disgregación del material, siendo el elemento básico del equipo el escarificador o fresador-calentador.

Según J.Aviles (2015), el material disgregado se mezcla con un asfalto blando o un agente rejuvenecedor, pudiendo llevarse a cabo la técnica con o sin aporte de material pétreo nuevo y realizando la operación de mezcla con el mismo equipo. La extensión y compactación se realiza mediante equipos convencionales (terminadora de asfalto y vibrocompactador) y debe realizarse lo más rápidamente posible ya que es el punto crítico de toda la operación, dado que la temperatura de aplicación debe estar entre los 115°C y los 135°C.

3.2 RECICLAJE EN FRIO

Los procesos denominados “en frío” son aquellos compuestos por actividades que no involucran variaciones drásticas o considerables de temperatura. Esto es, que se consiguen a través de la utilización de equipos e insumos, agentes o aditivos, que se integran para reutilizar el producto asfáltico existente, con el fin de generar un nuevo material que posea unas condiciones mecánicas identificables, manejables y utilizables.

El reciclaje en frío constituye un procedimiento de construcción internacionalmente reconocido desde el punto de vista ecológico, económico y técnico, pues posee, por una parte, características de rapidez en su ejecución debido al avance tecnológico de las máquinas disponibles en la actualidad y, por otro lado, contribuye significativamente en el manejo ambiental al reducir la explotación de canteras fuentes de agregados pétreos. Además, disminuye el ítem del transporte de materiales y permite conseguir un material nuevo de características

muy similares al material original, es decir, aquél que se reutiliza, permitiendo también la reducción de los costos finales del mantenimiento.

Los procedimientos para reciclar el pavimento en frío se diferencian de acuerdo con el sitio en donde se ejecuten las actividades.

3.2.1 En planta.

El reciclaje en frío en planta comprende todas aquellas tareas o ejercicios que se llevan a cabo en un lugar predeterminado, acopio, en donde se almacenan los residuos provenientes de pavimentos asfálticos existentes demolidos y transportados hasta el sitio donde se producirá el nuevo material reciclado.

Como principales beneficios del reciclado en planta se tiene:

- Control de los materiales de entrada. El reciclado en planta permite obtener un producto final específico al mezclar distintos tipos de agregados. Dichos materiales se pueden someter a ensayos en cualquier momento siendo posible cambiar la proporción de estos en la mezcla.

- Calidad de mezclado. Es posible realizar modificaciones en la operación de mezclado continuo para variar el tiempo en que el material es retenido dentro de la cámara de mezclado, cambiando la calidad de la mezcla.

- Posibilidades de acopiar el material. Para WIRTGEN GRUOP (2004) Particularmente en los materiales tratados con asfalto espumado, el producto obtenido puede ser almacenado y ser utilizado cuando sea requerido, y de ese modo evitar la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma.

3.2.2 En vía (o in situ).

Según Del Val (1998), el reciclado en frío “in situ”, es una técnica de rehabilitación de carreteras, que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de las capas del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría, etc), pero que mezclados homogéneamente con un nuevo ligante (emulsión bituminosa) y ciertos porcentajes de agua y aditivos (cemento o cal), tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas del mismo pavimento. Esta técnica es generalmente utilizada en pavimentos viejos o con avanzado deterioro.

Del Val (1998), Afirma que Uno de los campos más atractivos dentro del reciclado es el que corresponde al reciclado en frío in situ, tanto en su variante con ligantes bituminosos como con conglomerantes hidráulicos. En efecto, frente a otras posibilidades de reciclado, el reciclado en frío in situ permite obtener considerables economías y minimizar el impacto ambiental.

A continuación en primer lugar, se tratarán los aspectos relacionados con el procedimiento como tal, es decir, la forma en que el proceso de reciclaje en frío in situ se ejecuta. Más adelante se detallarán las consideraciones de orden técnico, ambiental y económico que deben contemplarse antes de emprender los trabajos.

El reciclaje de pavimentos en frío, “in situ”, o en el mismo lugar, o en vía, consiste en un procedimiento que se ejecuta en varios pasos o fases a saber:

- a) Disgregación de los materiales del pavimento existente mediante el fresado del espesor recomendado por el diseño del tratamiento. Este espesor puede involucrar o no las capas de material granular que subyacen las capas asfálticas, o con contenido de bitumen,

superiores. La programación de este fresado inicial debe tener en cuenta el ancho efectivo de corte de la máquina y la capacidad del equipo en cuanto a profundidad de fresado. De acuerdo a DelVal (1998), en general, el ancho de los rotores de las máquinas recicladoras es de 2,44 m, pero este tipo de máquinas son mayormente utilizadas en trabajos de estabilización de suelos o de afirmados y han sido desplazadas por las perfiladoras o fresadoras. Estas últimas, poseen rotores que van desde los 0,35 m hasta los 4,20 m.

- b) Detección y extracción de sobretamaños. El proceso de disgregación no alcanza, ni está concebido para ello, a triturar el agregado pétreo presente en las capas asfálticas que se están fresando. En algunos casos el espesor total fresado involucra capas de materiales granulares de construcción muy antigua que poseen granulometrías con tamaños superiores a las 2". Este tipo de material, para el caso de interés en materiales de buenas especificaciones es inadecuado y debe retirarse para que no afecte las propiedades mecánicas del material reciclado resultante. Podrá haber situaciones en las que no se requiera retirar las partículas de sobretamaño porque sólo interesa obtener un material de condiciones netamente granulares, sin aprovechar la cantidad de ligante residual presente en la matriz disgregada. Es una práctica generalizada utilizar el escarificador de la motoniveladora sobre la matriz suelta disgregada con el fin de que los sobretamaños se expongan y puedan ser retirados más rápida y fácilmente.
- c) Adición y mezclado de agente estabilizador. Después de haber seleccionado el agente estabilizador más conveniente (de acuerdo al diseño), se procede a la adición del mismo según lo especificado en el diseño y se efectúa el mezclado hasta lograr una mezcla

homogénea, si es necesario se adiciona el agua para la preenvuelta (algunos agentes necesitan el agua para su dilución y como vehículo para su reacción química). Este proceso se ejecuta al interior de la recicladora.

- d) Extendido, nivelación y compactación. Una vez obtenida la mezcla homogénea se procede a realizar el extendido, teniendo en cuenta que si las características del material reciclado son similares a la de una capa de rodadura se podrá llevar a cabo mediante la utilización de una finisher, de lo contrario el equipo a utilizar será una motoniveladora. En lo que respecta a la compactación generalmente se ubica un rodillo vibrocompactador adelante del compactador neumático, pues de esta manera se logra un mejor acabado en la nueva capa.

- e) Curado. Algunos de los agentes estabilizadores requieren de un curado especial, el cual puede lograrse con la apertura del tramo de vía al tráfico. En general se estima que el tiempo de curado está dado por el contenido de humedad en el material reciclado, cuyo valor no debe ser inferior al 7.0%.

- f) Colocación de la capa superficial nueva o cubrimiento del material reciclado. Por último se realiza la extensión de una capa de rodadura que bien puede ser a base de mezcla asfáltica en caliente o un tratamiento superficial, según esté contemplado en el diseño. Para la vía objeto de estudio se estimó instalar como rodadura un tratamiento superficial

doble (TDS), compuesto por una primera capa de triturado tamaño máximo $\frac{3}{4}$ ” y una segunda capa de triturado tamaño máximo $\frac{3}{8}$ ”.

Antes de iniciar el reciclaje se debe identificar cual es el espesor de cada una de las capas del pavimento y su naturaleza, que tipo de subrasante se tiene y qué tipo de fallo se ha producido.

Además de la identificación de los materiales existentes, es muy importante que se conozcan las condiciones de trabajo. Para ello se debe identificar con exactitud cuál es el tráfico que soporta la carretera en el momento presente y cuál es su evolución previsible (especialmente en lo que respecta a los vehículos pesados). No se debe olvidar que estos proyectos tienen un período de diseño de 5 a 10 años. El análisis de las deflexiones y las técnicas de cálculo inverso, nos aportan muchos datos para una mejor comprensión del comportamiento mecánico de las capas.

Con el objetivo de lograr identificar claramente las características del pavimento anteriormente descritas es conveniente realizar una caracterización de pavimento existente mediante el reconocimiento previo de la vía a intervenir el cual consiste en:

1. Inspección visual. Este paso brinda la posibilidad de definir tramos homogéneos (preferiblemente inferiores a 10 km), tipos y niveles de deterioro (piel de cocodrilo, baches, exudaciones, etc) los cuales infieran directamente en la sectorización de la vía. Una vez establecidos los tramos se procede a tomar muestras que permitan identificar entre otras cosas los espesores de las capas del pavimento a reciclar, contenidos de asfalto residual y densidad de las capas. Con el fin de determinar la fórmula de trabajo a utilizar.

2. Formula de trabajo. El parámetro de aceptación de la fórmula de trabajo está dado por el ensayo de inmersión-compresión, el cual establece que el porcentaje óptimo de ligante será aquel que cumpliendo con las especificaciones dadas consiga el máximo de la resistencia a la compresión de las probetas en húmedo. Ensayos que deben ser realizados en laboratorio y dentro de la fórmula de trabajo se hará constar:

- Granulometría de material fresado.
- Porcentaje de agua de envuelta (referente al árido seco).
- Correcciones necesarias para el agregado en su caso.
- Tipo y cantidad de aditivos (cal y/o cemento) en su caso.
- Tipo de la emulsión bituminosa y porcentaje respecto al agregado seco que satisfagan las especificaciones para el ensayo de inmersión – compresión.
- Ensayo de Próctor Modificado, que se realizará sobre la mezcla del material fresado más la emulsión.

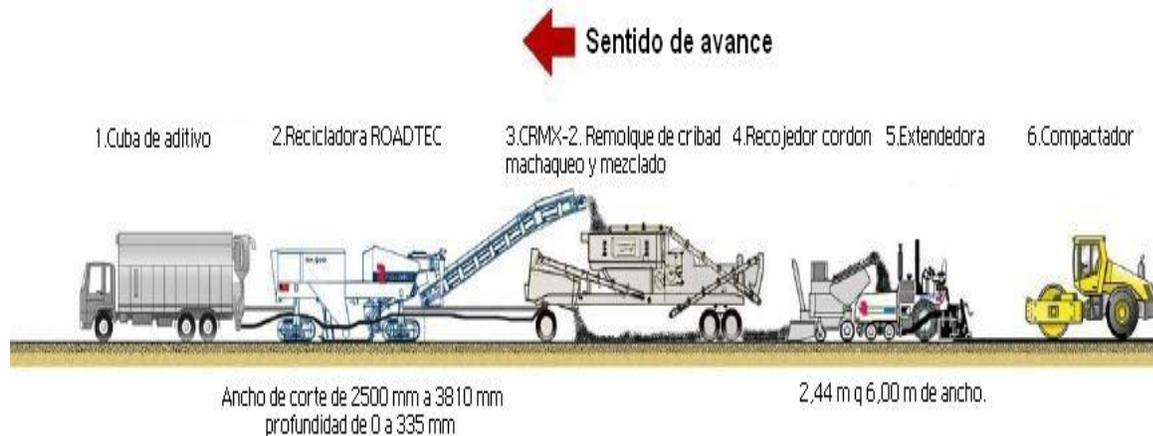
3. Tramos de prueba. Se deben realizar tramos de prueba para cada tramo homogéneo, utilizando los equipos con los que se ejecutará el trabajo. Aprobando definitivamente la fórmula de trabajo y evaluando de paso:

- Fresado del material a tratar: Se verificarán las relaciones entre la velocidad de avance del equipo fresador y la granulometría y calidad de envuelta alcanzadas. Se fijará el número y cambio de piezas. Se verificará la profundidad de fresado estipulado en el diseño.
- Mezclado: Se comprobará la exactitud de los sistemas de dosificación del agua, emulsión y en su caso de los aditivos y agregados correctores.

- Compactación: La humedad óptima de compactación se fijará en este tramo de prueba y será aquella que consiguiendo una buena envuelta, optimice la compactación, teniendo como punto de partida la humedad determinada mediante el ensayo de Próctor modificado.
- Acabado de la superficie: Se observará el aspecto de forma tal que cumpla con las condiciones de regularidad indicadas en las especificaciones.
- Juntas: Se determina los aspectos y perfiles del solape de las juntas transversales y longitudinales.
- Tiempos de curado: Se decidirán los plazos de apertura al tráfico de la capa reciclada y el de su tapado con una capa superior.

Asegura Fumadó (2007). En lo que concierne al equipo a utilizar para llevar a cabo la actividad del reciclaje de pavimentos en frío "in situ" La técnica actual aboga por separar las funciones en diferentes elementos. Una tolva de aditivo, una fresadora que frese marcha atrás y que arrastre un remolque sobre el que deposita el material. Este remolque criba, desmenuza, pesa y mezcla. Además de un recogedor de cordón, una extendedora y un equipo compactador.

Figura 1. Equipo utilizado para reciclado en frío "in situ".



Fuente: Juan Luis Fumadó. 2015

La evidente ventaja de este sistema es que cada uno de sus elementos puede usarse por separado. La fresadora puede fresar a elevados rendimientos y el remolque puede usarse para la fabricación de suelo-cemento en planta. Sin mencionar que la extendedora puede trabajar en trenes de colocación tradicional de mezcla asfáltica en caliente al igual que el equipo de compactación.

Para el caso de estudio el equipo utilizado estaba compuesto por:

- Recicladora CAT o similar
- Motoniveladora CAT 120K
- Carrotanque
- Vibrocompactador VOLVO SD 110
- Compactador neumático de 12 ton.

4 TOMA DE DECISIONES

Tanto en las empresas como en las entidades del estado todo el tiempo se toman decisiones, la gran mayoría bajo una estrategia que tome en cuenta la complejidad de las situaciones, siendo de vital importancia el factor económico. Para facilitarlos, los expertos han creado metodologías que les permitan tomar el camino más adecuado, en beneficio de todos, llámese organización y personal o población en general. Con el ánimo de ayudar al decisor en su elección, se han documentado varios modelos que dependen de la naturaleza de la decisión, entre los cuales se destacan; modelos de certidumbre, modelos de incertidumbre, modelos de riesgo y modelos de conflicto

La toma de decisiones básicamente es una resolución de problemas, y como tal, se debe indagar la mejor alternativa, aplicar un diagnóstico adecuado y realizar una búsqueda minuciosa que considere todas las variables posibles, puede realizarse mediante un proceso de ramificación. Este proceso de ramificación es el **árbol de decisiones**.

4.1 ÁRBOL DE DECISIÓN:

Como lo menciona MORENO (2011), algunos problemas son muy complejos para presentarlos en términos de una tabla de pagos, puesto que surgen dificultades cuando los mismos eventos no se adaptan a todas las acciones. Con frecuencia, las decisiones deben adoptarse en dos o más momentos, con eventos inciertos que se presentan entre una y otra decisión.

Con el objetivo de resolver este inconveniente, a continuación presentamos un árbol de decisiones que nos permite arreglar los elementos de una decisión compleja, además tiene la ventaja de servir como medio efectivo de comunicación por que se hace fácil observar cada curso que toma una acción y todos los resultados posibles.

4.1.1 Descripción detallada

De acuerdo con MORENO (2011), un árbol de decisión es simplemente un diagrama del problema que tiene el decisor en el cual se representa de forma analítica todos los eventos que pueden surgir a partir de una decisión asumida en un momento determinado.

Su objetivo fundamental es brindar la ayuda necesaria para tomar la decisión más acertada desde el punto de vista de las probabilidades, sin dejar de lado ninguna de las posibles soluciones al problema planteado inicialmente.

Para la elaboración se ha adoptado la siguiente terminología:

Nodo de decisión: Indica que una decisión necesita tomarse en ese punto del proceso. Está representado por un cuadrado. 

Nodo de probabilidad: Indica que en ese punto del proceso ocurre un evento aleatorio. Está representado por un círculo. 

Rama: Nos muestra los distintos caminos que se pueden emprender cuando tomamos una decisión o bien ocurre algún evento aleatorio. 

Como principales características se tiene:

Impacto visual: Muestra el despliegue de todos los factores o elementos que contribuyen a un efecto u objetivo de forma ordenada, clara, precisa y de un solo golpe de vista.

Enfoque estructurado: Sistematiza el análisis de una situación, o la planificación para alcanzar un objetivo facilitando su desarrollo incluso en casos muy complejos.

Concreción: Desglosa conceptos generales hasta un grado idóneo de detalle, que permite traducirlos directamente en acciones o elementos básicos y operativos.

Las principales ventajas que brinda la elaboración de árboles de decisión son:

- Hace más explícito e intuitivo el proceso de toma de decisión.
- Plantea el problema desde distintas perspectivas de acción.
- Permite analizar de manera completa todas las posibles soluciones.
- Provee de un esquema para cuantificar el costo del resultado y su probabilidad de uso.
- Ayuda a realizar las mejores decisiones con base a la información existente y a las mejores suposiciones.
- Su estructura permite analizar las alternativas, los eventos, las probabilidades y los resultados.

4.1.2 Pasos para la elaboración de un árbol de decisión

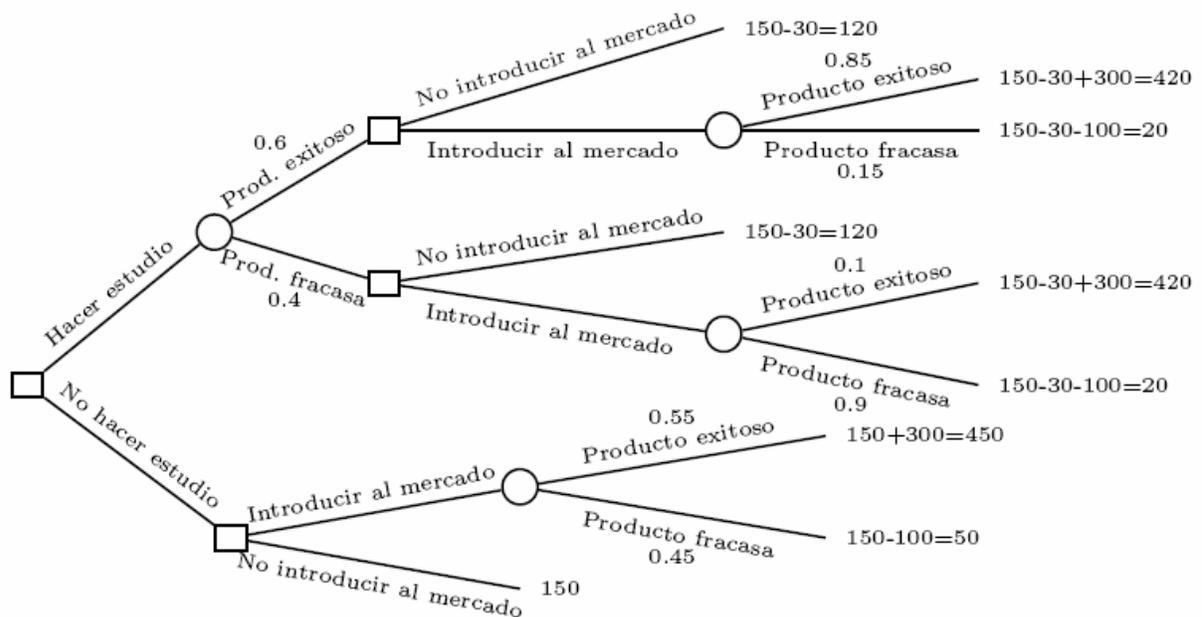
Según MORENO (2011), una pauta para construir el diagrama de árbol de decisión es que el flujo debe ser cronológico de izquierda a derecha, empezando con un nodo de decisión. El resultado proveniente de una combinación de los nodos de decisión y de incertidumbre se muestra al final de la trayectoria correspondiente, a partir de la base del árbol.

A continuación se enumeran los pasos necesarios para poner en práctica esta herramienta:

- ✓ identificar todas las variables del problema central.
- ✓ Priorizar los criterios de decisión.
- ✓ Identificar la importancia de los criterios
- ✓ Observar las diferentes alternativas para cada criterio.
- ✓ Selección objetiva de una alternativa.
- ✓ Implementación de la alternativa
- ✓ Evaluación de la efectividad de la decisión.

A modo de ilustración en la figura 2. se muestra un esquema básico de árbol de decisión.

Figura 2. Esquema de árbol de decisión



Fuente: Luis G. Moreno. 2011

4.1.3 Asignación de probabilidades

De acuerdo con MORENO (2011), las probabilidades se colocan entre paréntesis en las ramificaciones que corresponden a los nodos de incertidumbre. Las probabilidades pueden ser frecuencias observadas, que miden el grado subjetivo de credibilidad de un decisor con respecto a los estados posibles de la naturaleza. Dos decisores pueden asignar probabilidades distintas al mismo árbol, puesto que ellos han podido tener experiencias diferentes o han empleado procedimientos distintos de razonamiento. No obstante, las probabilidades subjetivas han sido útiles en la transmisión de juicios, dentro de una organización donde numerosas personas contribuyen en la toma de decisiones.

En caso de no poseer información debidamente documentada, las probabilidades se pueden adoptar a partir del conocimiento de expertos en el tema. Sin que por esto la decisión tomada pierda valor.

4.1.4 Criterios de decisión bajo incertidumbre

En los procesos de decisión bajo incertidumbre, el decisor conoce cuáles son los posibles estados de la naturaleza, aunque no dispone de información alguna sobre cuál de ellos ocurrirá. No sólo es incapaz de predecir el estado real que se presentará, sino que además no puede cuantificar de ninguna forma esta incertidumbre. En particular, esto excluye el conocimiento de información de tipo probabilístico sobre las posibilidades de ocurrencia de cada estado.

A continuación se describen algunos criterios de decisión bajo el ambiente de incertidumbre:

- Criterio de Plunger (GUILLERMO LÓPEZ G, 2012): criterio optimista. Realizar aquella acción que en el mejor de los casos proporcione el que más beneficie la decisión (elegir el

menor costo). Para obtenerlo se escoge el máximo valor de los máximos que hayan por fila.

- Criterio de Wald (GUILLERMO LÓPEZ G, 2012): criterio pesimista. Realizar aquella acción que en el peor de los casos proporcione el que más beneficie la decisión (elegir el menor costo). Escoger el máximo de los mínimos por filas.
- Criterio de Laplace (GUILLERMO LÓPEZ G, 2012): criterio de equiprobabilidad. Todos los estados son equiprobables. Sumar las utilidades por filas y dividir por el número de estados, escoger el que más beneficie la decisión (elegir el menor costo).

5 PROCESO DE RECICLAJE EN FRÍO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFALTICOS UTILIZADO EN LA VIA SOPETRÁN – PUENTE DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

5.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA

Con el ánimo de definir recomendaciones técnicas para el mantenimiento del corredor vial Sopetrán – Puente de Occidente, se realizará un estudio geotécnico que permita formular alternativas con periodos de diseño cortos, de tal manera que se adapten a los criterios de diseño definidos por la Gobernación de Antioquia, lo anterior con el ánimo de obtener estructuras de pavimento que de la misma manera se acomoden al presupuesto con el que cuenta la entidad gubernamental.

5.1.1 Localización del proyecto.

Como se observa en la figura 3, el proyecto se localiza en el corredor vial comprendido entre el paraje conocido como el puente de occidente y la intersección de la vía al municipio de San Jerónimo y la ruta 62. EL proyecto beneficia principalmente a dos Municipios del occidente antioqueño, San Jerónimo y Sopetrán, sin embargo, el beneficio se hace extensivo a los municipios de Liborina, Olaya y Sabanalarga dado que ésta es su principal vía de acceso.

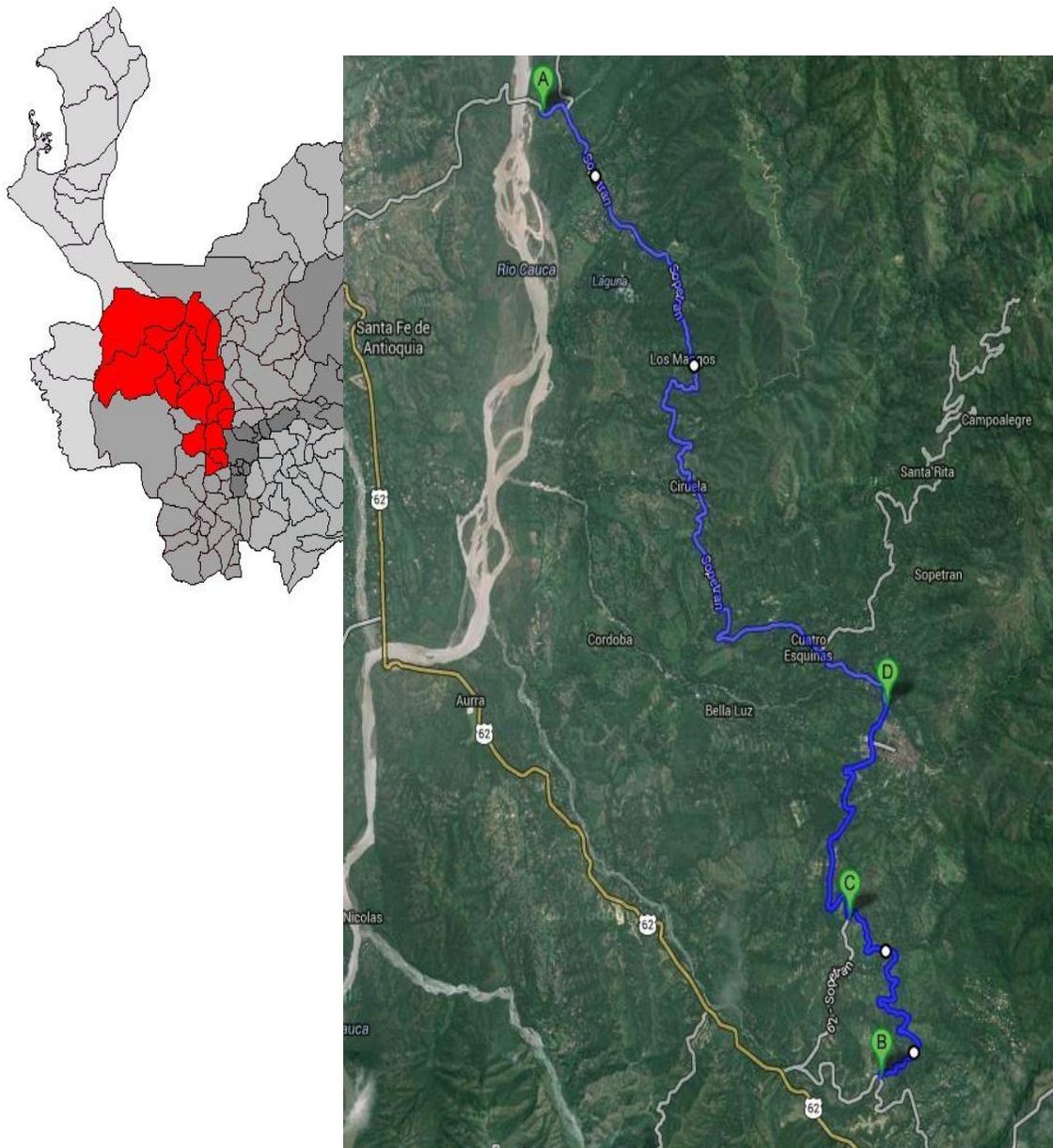
San Jerónimo y Sopetrán, son dos municipios de Antioquia, localizados en la subregión Occidente del departamento. El municipio de San Jerónimo limita por el norte con los municipios de Sopetrán y Belmira, por el este con los municipios de San Pedro de los Milagros, Bello y Medellín, por el sur con Bello, Medellín y Ebéjico y por el oeste con Ebéjico y Sopetrán.

Sopetrán limita por el norte con el municipio de Olaya, por el este con el municipio de Belmira, por el sur con los municipios de San Jerónimo y Ebéjico y por el oeste con el municipio de Santa Fe de Antioquia.

La región donde se ubica el proyecto, está fuertemente influenciada por el Rio Cauca, tanto climática como topográficamente, las regiones por donde pasa el río son sitios montañosos y la temperatura en algunos municipios del occidente antioqueño tienen su máxima en los 33°C como lo es en el municipio de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán y San Jerónimo.

En estas regiones se encuentran tierras fértiles y por lo tanto dedicadas a la ganadería y cultivos extensivos.

Figura 3. Localización general del proyecto



Fuente: Adaptado por el autor de Geogle Earth 2015.

En la figura 2 puede observarse la localización del corredor vial. El punto B de la figura, corresponde al inicio del proyecto, La Ye, en inmediaciones del municipio de San Jerónimo, antigua ruta 62, donde se particulariza una primera intersección en dirección a la nueva ruta 62 y que continua hacia el municipio de Sopetrán. El punto C corresponde particularmente a una

segunda intersección, que viene desde la ruta 62 y que es la actual ruta de acceso para el municipio de Sopetrán.

El punto D corresponde a la entrada al municipio de Sopetrán. Y finalmente el punto A corresponde a la ubicación del Puente de Occidente.

El proyecto, según las necesidades de inversión que dispuso la Gobernación de Antioquia, se centra en el tramo Sopetrán – Puente de Occidente.

5.1.2 Estado del Pavimento Existente.

Del punto D (Sopetrán) al punto A (Puente de Occidente), se presenta un sector de vía en regulares condiciones (de acuerdo a las evaluaciones realizadas por los funcionarios de la secretaria de infraestructura de la gobernación del departamento de Antioquia) dentro del casco urbano de Sopetrán, el cual tiene una estructura de pavimento en afirmado y el resto del tramo, se encuentra con una superficie de rodadura tipo tratamiento superficial.

En las zonas donde actualmente la rodadura es un tratamiento superficial, dadas las condiciones del contrato, se dispondrá una solución enmarcada en lo referente a mantenimiento.

Debe tenerse presente que, aunque las condiciones de la estructura de pavimento actual, son regulares, se presentan alteraciones a ésta, pues se vienen ejecutando trabajos de instalación de redes de acueducto para el municipio de Sopetrán, donde se ha retirado la estructura de pavimento por la ejecución de brechas por donde va el alineamiento de las tuberías, la rodadura se encuentra algo intervenida y ha sido remplazada por una mezcla densa y en algunos puntos se observa que el tratamiento superficial está sucio por el paso de vehículos que

arrastran y pegotean suelos que provienen de las mismas excavaciones, también, en algunos puntos, se puede observar alteraciones de la estructura del pavimento, erosión por falta de elementos de drenaje como cunetas y baches que afectan la superficie de rodadura.

5.1.3 Alternativas para la rehabilitación de la estructura de pavimento.

Partiendo de la premisa de que la rehabilitación de la vía Sopetrán – Puente de Occidente (13,5 km) tendrá como capa de rodadura un tratamiento superficial doble (TSD), el cual no aporta capacidad estructural y por este motivo, toda la durabilidad se le debe dejar a las capas de materiales granulares que están subyacentes a esta rodadura.

Con el ánimo de brindarle a la entidad contratante varias soluciones al problema planteado, el consorcio constructor quien además tiene a cargo los diseños a los que haya lugar optó por presentar tres (3) alternativas de diseño para la rehabilitación de la vía en estudio, las cuales describen más adelante. Como insumo para determinar la estructura de pavimento más conveniente fue necesario realizar:

Estudio de suelos. Una etapa importante en el estudio de suelos es poder establecer un perfil estratigráfico deducido. Básicamente se obtiene por el proceso de evaluación en el campo y los resultados de laboratorio. Con estos perfiles estratigráficos y apoyados con las propiedades índices de los suelos y la consistencia de los mismos, es posible definir unidades homogéneas de diseño, con lo que se lograría plantear una o varias estructuras de pavimento con el fin de lograr una economía del proyecto sin perder el objetivo propuesto.

Diseño de mezclas para suelo-cemento. Según la Portland Cement Association (PCA) el suelo-cemento: es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas

porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos.

Regularmente, el porcentaje de cemento puede variar entre el 2 al 12% dependiendo del tipo de suelo.

Para este proyecto se requiere que, a los siete días de maduración, la mezcla de suelo cemento genere una resistencia a la compresión de mínimo 2.1 MPa y el módulo de rotura de la mezcla alcance los 0.55 MPa. Lo anterior se logra con un porcentaje de cemento del 5.0%, que en la práctica equivale a 50 Kg cada 5.0 m².

Estudio de tránsito. El estudio de esta variable de diseño esta enmarcada en determinar el TPD actual en la vía mencionada, analizar las condiciones de flujo y distribuirlas según corresponda, además de, proyectar el TPDs encontrado a partir de los conteos vehiculares.

El criterio básico empleado en la programación de los conteos efectuados dentro de los estudios realizados, fue el de obtener un conocimiento actual y real del tránsito horario y diario de todos los tipos de vehículos que solicitan actualmente a la estructura de pavimento e inferir los que pudieran hacer uso de la misma una vez se pavimente y se mejore el corredor actual.

Tabla 2. Proyección del tránsito para un periodo de 4 años

AÑO	Autos	Buses	C2P	C2G	C3-C4	C5	>C5	TPD
2014	708	59	88	99	7	0	2	963
2015	721	60	90	101	7	0	2	981
2016	735	61	91	103	7	0	2	1000
2017	749	62	93	105	7	0	2	1019
2018	763	64	95	107	8	0	2	1038
TOTAL DIA	3677	306	457	514	3	0	10	5001
Nº DE DIAS	365	365	365	365	36	365	365	365
4AÑOS	1342142	11184	16682	187672	1327	0	3791	182554
%	74%	6	9	10%	1	0%	0%	100%

Fuente: Adaptado por el Autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2014

Tabla 3. Proyección del tránsito para un periodo de 5 años

AÑO	Autos	Buses	C2P	C2G	C3-C4	C5	>C5	TPD
2014	708	59	88	99	7	0	2	963
2015	721	60	90	101	7	0	2	981
2016	735	61	91	103	7	0	2	1000
2017	749	62	93	105	7	0	2	1019
2018	763	64	95	107	8	0	2	1038
2019	778	65	97	109	8	0	2	1058
TOTAL	4455	371	554	623	44	0	13	6060
Nº DE DI	365	365	365	365	365	365	365	365
5AÑOS	1626062	13550	20210	22737	16077	0	4593	221172
%	74%	6%	9%	10%	1%	0%	0%	100%

Fuente: Adaptado por el Autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2014

Tabla 4. Proyección del tránsito para un periodo de 6 años

AÑO	Autos	Buses	C2P	C2G	C3-C4	C5	>C5	TPD
2014	708	59	88	99	7	0	2	963
2015	721	60	90	101	7	0	2	981
2016	735	61	91	103	7	0	2	1000
2017	749	62	93	105	7	0	2	1019
2018	763	64	95	107	8	0	2	1038
2019	778	65	97	109	8	0	2	1058
2020	793	66	99	111	8	0	2	1078
TOTAL	5248	437	652	734	52	0	15	7138
N° DE DI	365	365	365	365	365	365	365	365
6AÑOS	1915377	15961	23807	26782	18937	0	5411	260523
%	74%	6%	9%	10%	1%	0%	0%	100%

Fuente: Adaptado por el Autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2014

Cargas máximas legales consideradas para el diseño. Para la determinación de las magnitudes de carga por eje, requeridas para el diseño del pavimento de la vías, se consideró la siguiente distribución de cargas por eje de los diferentes tipos de vehículos, de acuerdo con las últimas reglamentaciones de peso bruto vehicular máximo autorizadas por el Ministerio de Transporte. En la Tabla--- se detalla las cargas máximas usadas y su distribución por eje.

Tabla 5. Cargas máximas usadas para el diseño.

CARGAS MAXIMAS VEHICULARES Y DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN CADA EJE							
TIPO DE VEHICULO	PESO BRUTO MAX EN (TON)	CARGA POR EJES DEL VEHICULO EN (TON)					
		EJE DELANTERO		EJE TRASERO		EJE REMOLQUE	
BUS INTERMUNICIPAL	6	2,0	SRS	4,0	SRD		
CAMION C2 PEQUEÑO C2-P	8,5	2,5	SRS	6,0	SRD		
CAMION C2 GRANDE C2-G	16	6,0	SRS	10,0	SRD		
CAMION C3-C4	28	6,0	SRS	22,0	TAMDEN		
CAMION C5	48	7,0	SRS	20,5	TAMDEN	20,5	TANDEM
CAMION C6	52	7,0	SRS	21,0	TAMDEN	24	TRIDEM

Fuente: adaptada por el autor de “Manual de diseño geométrico de vías” INVIAS.2007.

Espectro de cargas. Para el cálculo del tránsito normal acumulado se consideró un periodo de diseño de 4, 5 y 6 años para estructuras, para lo cual partiendo de la información determinada en el estudio de tránsito y la tasa de crecimiento futuro del 1.9%, se realizó la proyección para el carril de diseño, considerando que de acuerdo a la geometría de este sector, los vehículos transitan en un solo sentido por carril direccional y se concentran en una área de circulación conformada básicamente por la presencia de un único carril, asumiendo por lo tanto un 50% del tránsito total por sentido y para carril de circulación y de diseño el 100% del tránsito por sentido.

Para la estimación de ejes equivalentes, se usó la metodología propuesta por AASTHO o ley de la cuarta potencia para el cálculo, basados en el tipo de ejes de los vehículos y los pesos reglamentados por el ministerio de Transporte. Obteniendo como resultado el siguiente:

Tabla 6. Ejes equivalentes para cada periodo de diseño

PERIODO DE DISEÑO	EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO
4 Años	3.72×10^5
5 Años	4.51×10^5
6 Años	5.31×10^5

Fuente: Adaptado por el Autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2014

De acuerdo a las condiciones particulares del proyecto en estudio se definieron las siguientes alternativas de estructura de pavimento, como mantenimiento y no como recuperación de la capacidad estructural:

Alternativa tipo A. Contempla el reciclado de 20 cm de material granular existente, al cual hay que adicionarle cemento para obtener una capa mejorada de base estabilizada con cemento sobre la cual se colocará el riego superficial doble para conformar la rodadura.

Figura 4. Estructura de pavimento tipo A

ALTERNATIVA TIPO A. TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE CON SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO			
CAPA	TIPO	CARACTERISTICAS	ESPEJOR
RODADURA	TSD	Deberá cumplir con los requisitos INVIAS artículo 431	
Base estabilizada con cemento	BEC	La mezcla se obtendrá a partir del reciclado de la estructura de pavimento actual más la adición de cemento y deberá cumplir con requisitos INV341-07	20cm
Granular existente	NA	Este material corresponde al granular existente, que quedará remanente luego del reciclado de 20cm para conformar la capa superior.	20cm
SUBRASANTE		Suelos con CBR 9%	

Fuente: Adaptada por el autor.2015

Alternativa tipo B. Es una alternativa que contempla el retiro de 15 cm de material granular existente, para darle cabida a una nueva capa de material granular de base, compactada al 100% de la densidad máxima de laboratorio.

Figura 5. Estructura de pavimento tipo B

ALTERNATIVA TIPO B. TRATAMIENTO SUPERFICIAL COLOCADO SOBRE BASE GRANULAR NUEVA			
CAPA	TIPO	CARACTERISTICAS	ESPEJOR
RODADURA	TSD	Deberá cumplir con los requisitos INVIAS artículo 431	
BASE GRANULAR	BG-1 o BG2	CBRmin=80%	15cm
GRANULAR EXISTENTE	NA	Este material corresponde al granular existente, que quedará remanente luego del retiro de 15cm de cajeo para colocar la capa de base granular nueva.	25cm
SUBRASANTE		Suelos con CBR 9%	

Fuente: Adaptada por el autor.2015

Alternativa tipo C. Es una alternativa durable por un tiempo máximo de cinco (5) años, la cual corresponde a una conformación de la capa de material granular existente, nivelándola para luego colocar el riego superficial que quedará como rodadura.

Figura 6. Estructura de pavimento tipo C

ALTERNATIVA TIPO C. TRATAMIENTO SUPERFICIAL COLOCADO SOBRE EL GRANULAR EXISTENTE			
CAPA	TIPO	CARACTERISTICAS	ESPESOR
RODADURA	TSD	Deberá cumplir con los requisitos INVIAS articulo	
GRANULAR EXISTENTE	NA	Este material corresponde al granular existente, que se deberá conformar y compactar nuevamente para luego colocar sobre este, la rodadura en tratamiento superficial doble.	40cm
SUBRASANTE		Suelos con CBR 9%	

Fuente: Adaptada por el autor.2015

5.1.4 Proceso constructivo del reciclaje en frío in situ con estabilización con cemento.

A continuación se detallara todos y cada uno de los componentes inherentes al proceso constructivo de la técnica objeto de este trabajo.

Alcance. Este procedimiento aplica para todas las actividades de Reciclaje en Frio estabilizado con cemento, que el Consorcio Antioquia Vial 022 realice durante el desarrollo del contrato de obra para el Mejoramiento y Mantenimiento de la Red Vial Departamental, en las subregiones de Occidente y Urabá.

Equipo a utilizar. El equipo básico a utilizar durante el proceso y sus actividades anexas es:

- Recicladora tipo RR250

- Motoniveladora y Vibrocompactador
- Carrotanque para riego de agua
- Retroexcavadora llantas (bacheo)
- Vehículos de apoyo

Actividades previas al reciclaje.

- Topografía: Previo a los trabajos se realiza levantamiento topográfico del pavimento existente y se realiza, en caso de ser necesario, el ajuste del diseño del alineamiento vertical y horizontal del tramo a intervenir dejando la rasante definitiva.
- Bacheos: Como el material proveniente del reciclaje se va a colocar en la misma vía, se procederá a realizar los bacheos en las zonas que contengan materiales no aptos para la nueva estructura. Esta actividad se termina con la nivelación definitiva, incluyendo bombeos, peraltes y los ajustes al alineamiento vertical corregido.
- Con la nivelación definitiva de la vía, se procede luego a completar con Base Granular los faltantes de material para completar los niveles finales, realizando la conformación total del tramo a intervenir para evitar que en el proceso de reciclaje haya mezcla de materiales no aptos para la nueva estructura. En este proceso se debe mantener la humedad óptima del material.

Proceso detallado. A continuación se describe de manera clara el procedimiento que se debe llevar a cabo durante la ejecución de la actividad del reciclado en frío in situ con adición de cemento para la vía Sopetrán – Puente de Occidente.

- Escarificación con recicladora: Una vez completada la estructura con base granular hasta los niveles definitivos, se procede con el equipo de Reciclaje a escarificar toda la superficie, para luego continuar con el cemento.

Figura 7. Disgregación de materiales Vía Sopetrán- Puente de Occidente.



Fuente: Propia. 2015

- Aplicación del cemento: El cemento provee la adhesión entre las partículas de suelo, proporcionando una mejora de la resistencia mecánica que se traduce en la disminución de la deformabilidad y un incremento de la durabilidad. El cemento también ayuda a disminuir el límite líquido y a mejorar la manejabilidad de los suelos plásticos.

En las condiciones y porcentajes definidos en el diseño del contenido de cemento, se define la cantidad de cemento por m³ de material reciclado; teniendo en cuenta los pesos específicos del material, y el ancho del equipo de reciclaje, se define la cuadrícula para la distribución del cemento en cantidades proporcionales a 50 Kg (bulto cemento portland).

Calibrado previamente se aplica el cemento sobre la superficie conformada y con el uso de rastrillos se homogeniza el cemento en toda el área intervenida.

Figura 8. Distribución homogénea del cemento.



Fuente: Propia. 2015

Figura 9. Homogenización del cemento en el área intervenida.



Fuente: Propia. 2015

- Mezcla: La mezcla del suelo y el cemento se la efectúa primero en seco o con la humedad natural del suelo, porcentaje de humedad que deberá tenerse en cuenta para la humedad de compactación. La recicladora realiza el proceso en el ancho del equipo y a la profundidad del diseño de reciclaje. Durante esta actividad se realiza una homogenización del material granular existente y el cemento colocado en las proporciones de diseño.

Figura 10. Mezclado del material reciclado con el cemento aplicado.



Fuente: Propia. 2015

- Conformación: Una vez terminado el proceso de reciclaje, se inicia el de conformación final con Motoniveladora, hasta alcanzar la cota final de acabado.

Figura 11. Conformación de calzada con RAP.



Fuente: Propia. 2015

- Adición de agua: El material tratado con cemento debiera ser trabajado lo más seco posible, tanto para minimizar el agrietamiento por retracción como para prevenir problemas durante la compactación. La adición de agua se debe realizar controlando que el contenido de humedad no exceda la humedad óptima de compactación del material. El riego debe efectuarse con carro tanque irrigador.

Figura 12. Aplicación de agua de preenvuelta.



Fuente: Propia. 2015

- Compactación y perfilado final: el tiempo máximo en que debe realizarse esta operación será de dos horas (contadas a partir del momento en que el cemento entre en contacto con el agua hasta terminar la compactación). La humedad durante la compactación no deberá ser menor que 0,75 de la óptima. El máximo tiempo transcurrido desde la extensión del cemento hasta la terminación del trabajo será de seis (6) horas. La compactación deberá empezarse con rodillos lisos en modo vibratorio, la compactación se efectuará longitudinalmente, empezando por los bordes y progresando hacia el centro, se suspenderá el vibrado cuando se esté bordeando las tres (3) horas, para terminar sellando con el compactador sin vibración.

Figura 13. Compactación del material conformado.



Fuente: Propia. 2015

- Curado: La estabilización con cemento requiere un proceso especial tras la extendida y compactación que consiste en colocar un riego de curado, elaborado a partir de una emulsión catiónica que impida la evaporación prematura del agua necesaria para el fraguado.

Figura 14. Curado mediante el riego de emulsión.



Fuente: Propia. 2015

Controles durante el proceso. Para garantizar un óptimo resultado durante la ejecución de los trabajos, en campo se debe garantizar el control de las siguientes variables:

- Alineamiento del equipo: Marcar una línea guía para orientación del operador.
- Profundidad de reciclaje: Según el diseño, utilizar varillas de control del nivel.
- Uniformidad del mezclado: Controlar velocidad de la recicladora, que sea uniforme.
- Densidades: Se deben realizar mediante el ensayo de Cono de arena.
- Humedad: Se controla en obra con Speedy, buscando no exceder la humedad óptima.

5.2 CÁLCULO DE LOS COSTOS “RECICLAJE EN FRÍO” IN SITU

Para la elaboración de los costos económicos en los que se incurren con la realización de dicha técnica, se tuvo en cuenta las condiciones actuales del mercado, además, de las distancias de acarreo a las que se tiene que transportar los materiales de aporte, sin dejar de lado la ubicación de todas y cada una de las posibles fuentes de materiales que se pudieran utilizar en el proyecto.

Tabla 7. Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA A)

VIA	SOPETRAN - PUENTE DE OCCIDENTE	
	CANTIDAD	UNIDAD
DISTANCIA	13300,00	m
ANCHO DE CALZADA	6,50	m
ESPESOR DE RECICLAJE	0,20	m
DOSIFICACIÓN DEL CEMENTO	10,00	Kg/m ²
DISTANCIA DE ACARREO DE TRITURADO (Desde Conasfaltos)	65,65	Km
DOSIFICACIÓN 1er RIEGO	18,00	Kg/m ²
DOSIFICACIÓN 2do RIEGO	9,00	Kg/m ²
DENSIDAD DEL TRITURADO	1530,00	Kg/m ³

Fuente: Adaptada por el autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2015

Tabla 8. Presupuesto Alternativa A (Reciclaje en frío in situ)

CONDICIONES CONTRACTUALES INICIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	Reciclaje de base granular existente	m ³	17.290	\$ 61.918	\$ 1.070.562.220
2	Cemento como aditivo en estabilización de bases y afirmados	kg	864.500	\$ 695	\$ 600.827.500
3	Imprimación para Curado	m ²	86.450	\$ 2.300	\$ 198.835.000
4	Tratamiento superficial primera capa tamaño max 3/4, sin transporte	m ²	86.450	\$ 5.150	\$ 445.217.500
5	Tratamiento superficial segunda capa tamaño max 3/8, sin transporte	m ²	86.450	\$ 5.300	\$ 458.185.000
6	Transporte de material proveniente de la excavación de la explanación, canales, préstamos y materiales de afirmados, sub-base, base, triturado y mezcla asfáltica para distancias mayores de tres mil metros (3000). Material compacto.	m ³ -km	100.155	\$ 1.120	\$ 112.173.452
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 2.885.800.672

Fuente: Propia. 2015

5.3 CÁLCULO DE LOS COSTOS “MANTENIMIENTO CONVENCIONAL”

En lo que respecta a este tipo de intervención se tiene en cuenta todas las variables anteriores, además, de hacerse necesaria la construcción de cunetas de drenaje que garanticen la evacuación de las aguas de escorrentía y la estabilidad de la estructura del tratamiento superficial doble.

Tabla 9. Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA B)

VIA		SOPETRAN - PUENTE DE OCCIDENTE	
DATO	CANTIDAD	UNIDAD	
DISTANCIA	13300,00	m	
ANCHO DE CALZADA	6,50	m	
ESPELOR DE RECICLAJE	0,20	m	
ESPELOR DE BASE	0,15	m	
DOSIFICACIÓN DEL CEMENTO	10,00	Kg/m ²	
DISTANCIA DE ACARREO DE TRITURADO (Conasfaltos)	65,65	Km	
DISTANCIA DE ACARREO DE LA BASE (Agregados Santa Fé)	20,65	Km	
DOSIFICACIÓN 1er RIEGO	18,00	Kg/m ²	
DOSIFICACIÓN 2do RIEGO	9,00	Kg/m ²	
DENSIDAD DEL TRITURADO	1530,00	Kg/m ³	

Fuente: Adaptada por el autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2015

Tabla 10. Presupuesto Alternativa B (Mantenimiento Convencional)

CONDICIONES CONTRACTUALES INICIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	Suministro, colocación, conformación y compactación de material de Base. No incluye transporte	m ³	12.968	\$ 57.000	\$ 739.147.500
2	Reciclaje de base granular existente	m ³	17.290	\$ 61.918	\$ 1.070.562.220
3	Imprimación	m ²	86.450	\$ 2.300	\$ 198.835.000
4	Tratamiento superficial primera capa tamaño max 3/4, sin transporte	m ²	86.450	\$ 5.150	\$ 445.217.500
5	Tratamiento superficial segunda capa tamaño max 3/8, sin transporte	m ²	86.450	\$ 5.300	\$ 458.185.000

6	Transporte de material proveniente de la excavación de la explanación, canales, préstamos y materiales de afirmados, sub-base, base, triturado y mezcla asfáltica para distancias mayores de tres mil metros (3000). Material compacto.	m ³ -km	367.934	\$ 1.120	\$ 412.085.792
7	Concreto clase D (Cuneta 21 Mpa de 1.0 x 1.0 mt)	m	15.500	\$ 70.000	\$ 1.085.000.000
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 4.409.033.012

Fuente: Propia. 2015

5.4 CÁLCULO DE LOS COSTOS “REFUERZO CON CARPETA MDC-2”

En lo que respecta a este tipo de intervención se tiene en cuenta todas las variables anteriores, además, de hacerse necesaria la construcción de cunetas de drenaje que garanticen la evacuación de las aguas de escorrentía y la estabilidad del refuerzo a colocar como capa de rodadura.

Tabla 11. Descripción del proyecto de estudio (ALTERNATIVA C)

VIA	SOPETRAN - PUENTE DE OCCIDENTE	
	DATO	CANTIDAD
DISTANCIA	13300,00	m
ANCHO DE CALZADA	6,50	m
REFUERZO CON CARPETA MDC-2	0,07	m
ESPESOR DE BASE DE BACHEO	0,15	m
DISTANCIA DE ACARREO DE LA MEZCLA MDC-2 (Conasfaltos)	65,65	Km
DISTANCIA DE ACARREO DE LA BASE (Agregados Santa Fé)	20,65	Km

Fuente: Adaptada por el autor de Consorcio Antioquia Vial 022. 2015

Tabla 12. Presupuesto Alternativa C (Refuerzo con Carpeta MDC-2)

CONDICIONES CONTRACTUALES INICIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	Conformación de la calzada con motoniveladora, incluye riego, conformación, bombeo, nivelación y compactación, limpieza y reconstrucción de cunetas y todo lo necesario para la correcta ejecución de la actividad.	m ³	86.450	\$ 300	\$ 25.935.000
2	Imprimación	m ²	86.450	\$ 2.300	\$ 198.835.000
3	Suministro, colocación, conformación y compactación de material de Sub-base granular para bacheo. No incluye transporte	m ²	5.187	\$ 60.000	\$ 311.220.000
4	Suministro, colocación y compactación de Mezcla densa en caliente tipo MDC-2. No incluye transporte	m ²	6.052	\$ 485.000	\$ 3.449.355.000
5	Transporte de material proveniente de la excavación de la explanación, canales, préstamos y materiales de afirmados, sub-base, base, triturado y mezcla asfáltica para distancias mayores de tres mil metros (3000). Material compacto.	m ³ -km	504.393	\$ 1.120	\$ 564.919.628
7	Concreto clase D (Cuneta 21 Mpa de 1.0 x 1.0 mt)	m	15.500	\$ 70.000	\$ 1.085.000.000
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 5.635.264.628

Fuente: Propia. 2015

Tabla 13. Costo directo por kilómetro de vía recuperado

ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B	ALTERNATIVA C
\$ 216.977.494	\$ 331.506.242	\$ 423.704.107

Fuente: Propia. 2015

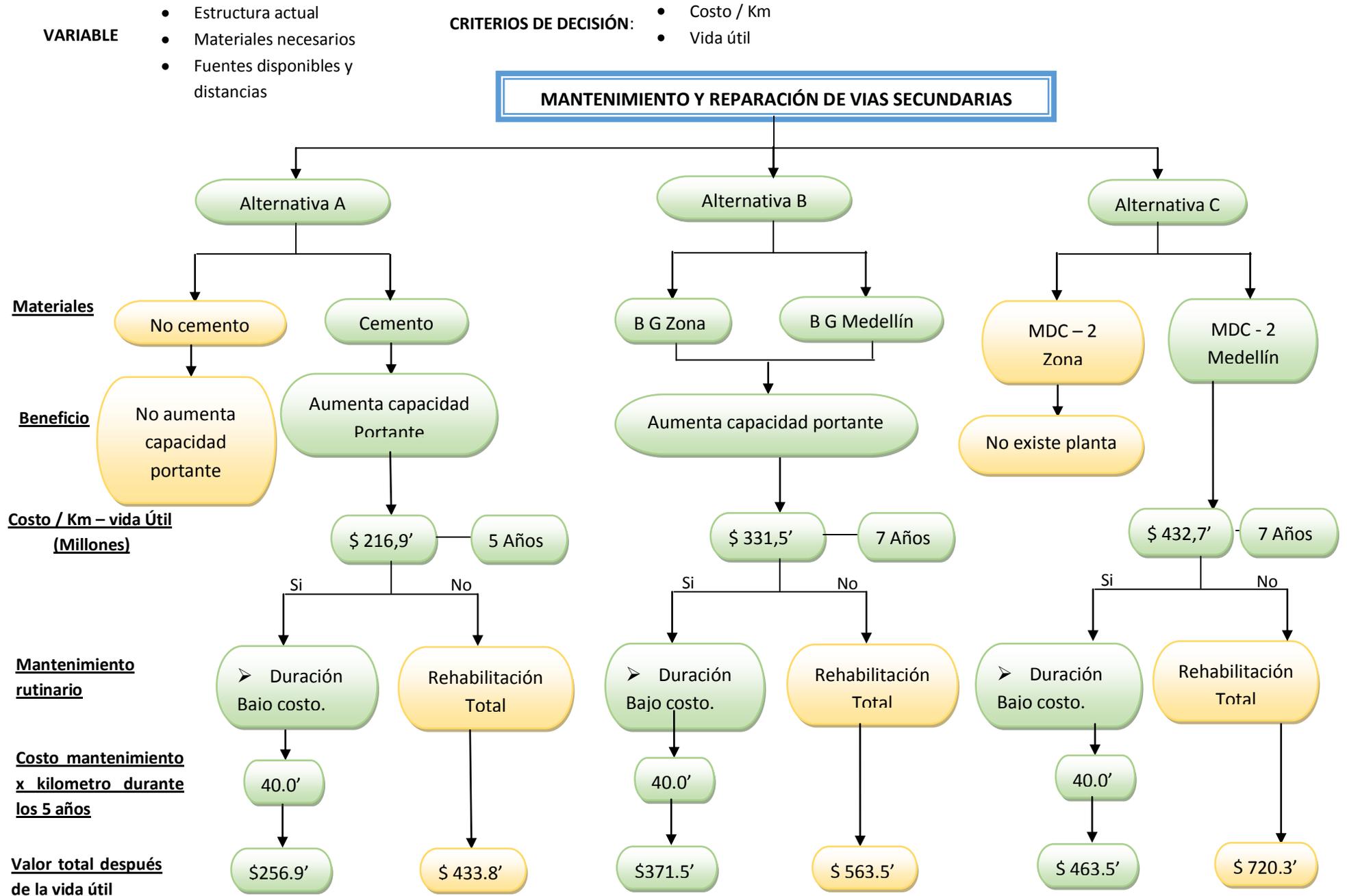
5.5 HERRAMIENTA DE DECISIÓN

En la figura 15 se observa el esquema de decisión para el Mantenimiento y reparación de vías secundarias el cual servirá como insumo fundamental para la elaboración del árbol de decisión.

Como partes fundamentales de este esquema se tienen las tres alternativas de mantenimiento, las cuales fueron descritas al inicio de este capítulo. En cada una de estas alternativas hay una ramificación de acuerdo a los materiales empleados y al beneficio que puede ofrecer éste a la misma; una vez calculado el valor inicial de cada alternativa y la vida útil aproximada de ésta, se encuentra una ramificación donde se establece si se realiza o no mantenimiento preventivo, lo que a futuro define el costo total después de agotada la vida útil esperada.

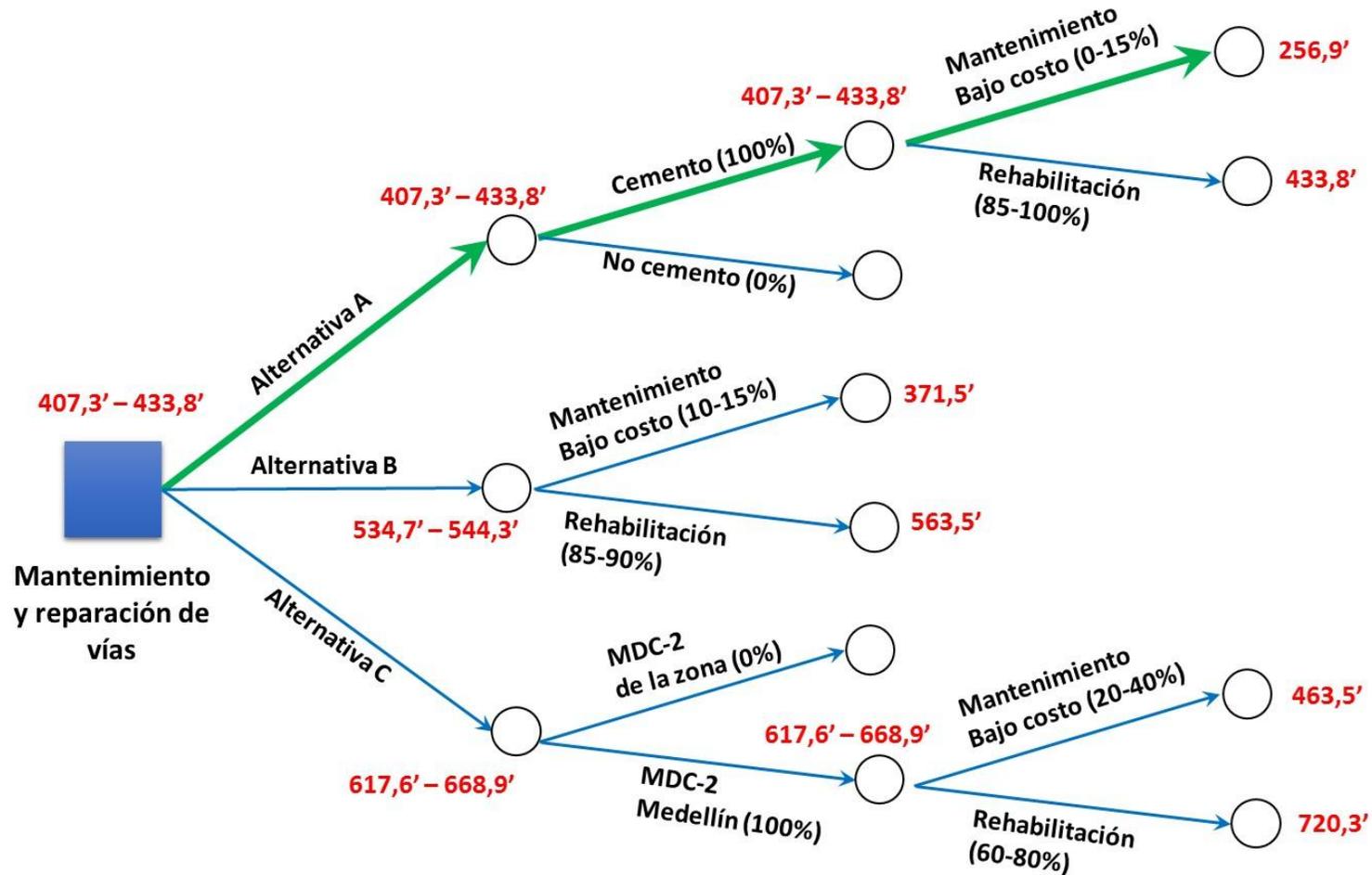
En lo que respecta a las probabilidades asignadas para la realización del árbol de decisiones ilustrado en la figura 16, es preciso mencionar que fueron adoptadas de acuerdo a la experiencia de algunos expertos consultados, por tal razón y con el grado de incertidumbre al que esto conlleva, se estableció que la mejor manera de aplicarlos era asignándole un rango. Este rango depende de la durabilidad esperada de cada una de las alternativas y el daño que puede o no sufrir la misma en el caso de que no se realice el mantenimiento preventivo adecuado.

Figura 15. Esquema de decisión para el Mantenimiento y reparación de vías secundarias.



Empleando la Figura 15 se genera el árbol de decisiones que presenta a continuación (Figura 16).

Figura 16. Árbol de decisiones para la elección del mantenimiento y reparación de vías secundarias.



Puede observarse en los nodos de incertidumbre del árbol de decisiones que las probabilidades (y por tanto los precios) se han asignado en forma de rangos. Esto se debe a que las probabilidades pueden fluctuar por influencia de condiciones incontrolables. Es decir, pueden cambiar por la ocurrencia de situaciones aleatorias como las condiciones meteorológicas de la zona (especialmente temporadas invernales) y/o la voluntad política para ordenar los mantenimientos preventivos.

De acuerdo con lo encontrado en el árbol de decisiones, puede establecerse que la mejor opción para la reparación y mantenimiento de vías secundarias corresponde a la Alternativa A dado que presenta un intervalo de menor valor en la inversión a realizar. Esta decisión es respaldada con algunos criterios de incertidumbre como:

- Criterio de Plunger
- Criterio de Wald
- Criterio de Laplace

En la Tabla 14 Se resumen los resultados de los cálculos de estos criterios.

Tabla 14. Criterios de incertidumbre para la toma de decisiones de las alternativas estudiadas.

ACCIONES	ESTADOS		CRITERIOS DE INCERTIDUMBRE		
	Mantenimiento, en millones	Rehabilitación, en millones	Plunger	Wald	Laplace
Alternativa A	256,9	433,8	433,8	256,9	345,4
Alternativa B	371,5	563,5	563,5	371,5	467,5
Alternativa C	463,5	720,3	720,3	463,5	591,9

Según los resultados de los tres criterios, todos convergen a la conclusión de que la Alternativa A es la que presenta un menor costo para el mantenimiento y la reparación de vías secundarias. Resultado consonante con lo encontrado en el árbol de decisiones anteriormente expuesto.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El reciclaje con aditivos (cemento) tiene una amplia aplicabilidad y duración, pero en nuestro medio aún se sigue diseñando con el mismo criterio de subbase, base granular y pavimento en planta y en caliente, y en algunos casos esporádicos el fresado. La decisión de reutilizar los materiales existentes no ha sido muy utilizada, pero con las actuales exigencias en el campo ambiental y el agotamiento de recursos en algunos sitios de las regiones a intervenir, dará mayor relevancia a su uso y generaran menores costos de construcción.

El uso de reciclaje y productos estabilizadores para estructuras, son alternativas viables y económicas, ya que permiten la reutilización del material existente en la vía logrando unos nuevos materiales de buena calidad para garantizar una estructura perdurable en el tiempo y que cumpla las especificaciones de diseño, además de obtener una importante reducción de costos por la disminución en los costos de transporte para nuevos materiales a colocar.

Con la implementación de la Alternativa A para el mantenimiento de vías secundarias; por cada kilómetro de via intervenido se logra un ahorro en los costos de ejecución que puede llegar a ser hasta del orden del 35%, respecto a las demás alternativas planteadas.

Después de analizar todas las alternativas posibles con y sin mantenimiento, se puede asegurar que la Alternativa A sigue teniendo ventajas económicas respecto a las demás, incluso con la suma del valor sugerido para mantenimientos rutinarios de la vía intervenida. Generando ahorros al final de la vida útil del orden del 23% en los costos económicos.

Se logró establecer tanto con la utilización del árbol de decisión como con los criterios de incertidumbre, que la mejor alternativa para realizar el mantenimiento y rehabilitación de vías secundarias es la que involucra el reciclaje de pavimentos con adición de cemento, dadas las ventajas económicas que ofrece en lo que respecta a la reutilización de materiales pétreos existentes en la vía intervenida.

Se recomienda que para la elaboración de futuros trabajos que involucren la consulta de expertos, se diseñe un formato de encuesta, que permita recolectar de manera ordenada la opinión de los mismos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Acurio, Guido et al. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. No.ENV.97-107. Publicación conjunta BID y OP. Washington, 1997

ALARCÓN, Jorge. Tesis Doctoral. Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona: Enero de 2003.

ALONSO DIAZ J 2005. “Reciclaje de firmes en frío in situ con emulsión” <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3264/3/51035-3.pdf>. Última revisión Mayo de 2015.

AVILES LORENZO J. “Reciclaje de mezclas bituminosas en caliente” <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6270/7/06.pdf>. Última revisión Junio de 2015.

CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. Escuela Colombiana de Ingeniería. Reciclaje de Pavimentos. Bogotá: 2007.

CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (Cedex). Gobierno.deEspaña.<http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/26C518BE1802480382B1FBE634B03B03/119932/RECICLADODEPAVIMENTOSASFALTICOS.pdf> diciembre/2011.

Del Val, M.A. “Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frío”, Probisa 1998.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, FHWA. Department of Transportation. Pavement Preservation. Cold In place Asphalt Recycling and Hot In place Asphalt. 2011

FUMADÓ, J.L. “Reciclado en frío in situ. Visión americana de la técnica”, temac 2007. www.concretoline.com/pdf/07construcciones/art_tec/temac01.pdf Última revisión Abril de 2015.

MONTEJO, Alfonzo. Reciclaje de Pavimentos. Primer encuentro nacional de pavimentos. <http://tycho.escuelaing.edu.co/ecinfo2/educontinuada/EncuentroPavimentos/001PresentacionINVIAS.pdf>. Última revisión Marzo de 2015.

MORENO, Luis G. Teoría de la decisión. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Junio de 2011.

QUESADA, Vallejo. Introducción al Reciclado de Pavimentos Asfálticos. 2004 <https://upcommons.upc/pfc/bitstream/2099.1/6624/7/06.pdf>. Última revisión Agosto de 2015.

REPAVING CUTLER. Asphalt recycling technology. www.cutlerrepaving.com <http://www.cutlerrepaving.com/home.html>. Estados Unidos. Última revisión Mayo de 2015.

SECRETARIA DE INFRAESTUCTURA FISICA GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA.

“Ajuste a estudios y documentos previos”, Última revisión Abril de 2013.

WIRTGEN GRUOP. Manual de Reciclado en Frío. 2 edición. Windhagen, Alemania:
Noviembre de 2004.