

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el autor ha autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

Análisis de la información sobre la disponibilidad y las metodologías para determinar las propiedades de pavimento asfáltico recuperado (RAP) para ser utilizado como insumo en la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente, en el área Metropolitana de Bucaramanga

Yeison Enrique Jaramillo Bedoya

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Paalo Andrea Moreno Yáñez

Dra. en Ingeniería Química

Codirector

Vladimir Plata Chávez

Dr. en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomás

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2021

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi familia, pero en especial a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad. Gracias a ellos este proceso de formación profesional fue posible y sin el apoyo moral y económico que me brindaron nada de esto hubiera sido realidad.

Agradecimientos

Primero que todo, darle las gracias a Dios por darme la sabiduría durante la realización de este trabajo, y brindarme la salud y la vida para poder culminar esta idea de investigación.

A mis padres, pero en especial a mi madre que estuvo conmigo en los momentos más difíciles de este proceso formativo, y gracias a su apoyo y comprensión todo esto fue posible.

A mis amigos y compañeros que hicieron parte del proceso, y me ayudaron cuando más lo necesite y que siempre estuvieron conmigo durante el desarrollo de la carrera.

A los profesores por los conocimientos compartidos, y por cada una de las exigencias que me hicieron para que la calidad de mi trabajo mejorara día a día, y este es el resultado de eso.

A la doctora Paolo Moreno, porque gracias a su conocimiento, su apoyo y sus críticas constructivas, fue posible desarrollar este trabajo de investigación. Su ayuda fue sumamente fundamental en el inicio, desarrollo y conclusión de este proyecto.

Al doctor Vladimir Plata porque también hizo parte del desarrollo de la idea investigativa y sus aportes constructivos en los hitos del proyecto fueron pieza fundamental.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2. Marco Referencial	13
2.1 El asfalto y su Composición	13
2.1.1. Asfalto	13
2.1.2. Composición Física y Química del Asfalto	14
2.2 Normatividad Aplicable	15
2.2.1. Acopio del Material por Reciclar	15
2.2.2. Tratamiento del Material por Reciclar	16
2.2.3. Caracterización y Acopio del Material por Reciclar, Después de Tratado	16
2.2.4. Extracción Cuantitativa del Asfalto	17
2.2.4.1 Objeto.	17
2.2.4.2 Método.	18
2.2.5. Análisis Granulométrico de los Agregados Extraídos de Mezclas Asfálticas	18
2.2.5.1 Objeto.	18
2.2.5.2 Importancia y uso	18
2.2.6. Penetración	18
2.2.6.1 Definición.	18
2.2.6.2 Objeto.	18
2.2.6.3 Método.	19
2.2.7. Índice de Penetración	19

2.2.7.1 Definición.....	19
2.2.7.2 Método.	19
2.2.8 Punto de Ablandamiento del Ligante Recuperado.....	19
2.2.8.1 Definición.....	19
2.2.8.2 Método.	19
2.2.9 Viscosidad.....	20
2.2.9.1 Objeto.	20
2.2.9.2 Método.	20
2.2.10 Diseño de la Mezcla y Obtención de la Fórmula de Trabajo.....	20
2.2.10.1 Definición.....	20
2.2.10.2 Método	20
2.3 Experiencia del Uso de RAP en otros Países	21
2.3.1 Experiencia en la Utilización de Mezclas Bituminosas Recicladas.....	21
2.3.2. Ventajas y Desventajas de Usar RAP	26
3. Método.....	27
4. Resultados.....	32
4.1 Recolección de Información de Obras de Construcción y Rehabilitación Vial	32
4.2 Revisión Bibliográfica en la Base de Datos SCOPUS y la Norma INVIAS.....	38
4.3 Identificación de las Metodologías Apropriadas	45
4.3.1 Recolección y Almacenamiento del RAP	46
4.3.2 Caracterización del RAP	50
4.4 Incorporación del RAP en la Preparación de Nuevas Mezclas Asfálticas	59
5. Conclusiones.....	67
Referencias.....	69

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Tolerancias en el material por reciclar para considerarlo homogéneo.....</i>	17
Tabla 2. <i>Porcentajes de RAP permitidos en cada estado de los Estados Unidos.....</i>	22
Tabla 3. <i>Experiencia en el reciclado de pavimentos asfálticos en Canadá.....</i>	24
Tabla 4. <i>Generación de RAP y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de Europa.....</i>	25
Tabla 5. <i>Fecha y estado de los proyectos INVIAS en el AMB</i>	32
Tabla 6. <i>Dimensiones Proyecto 1</i>	34
Tabla 7. <i>Dimensiones proyecto 2</i>	35
Tabla 8. <i>Dimensiones proyecto 3</i>	36
Tabla 9. <i>Dimensiones proyecto 4</i>	37
Tabla 10. <i>Términos incluidos y excluidos de la ecuación de búsqueda.</i>	39
Tabla 11. <i>Títulos del Invias seleccionados.</i>	43
Tabla 12. <i>Método de reciclaje del RAP.</i>	46
Tabla 13. <i>Parámetros de reciclaje INVIAS.....</i>	48
Tabla 14. <i>Análisis metodológico comparativo.....</i>	49
Tabla 15. <i>Método global para la caracterización del RAP</i>	51
Tabla 16. <i>Clasificación de los ensayos aplicados.....</i>	53
Tabla 17. <i>Tolerancias en el material por reciclar para considerarlo homogéneo.....</i>	54
Tabla 18. <i>Cuadro comparativo, método de caracterización del RAP.</i>	55
Tabla 19. <i>Metodología para la incorporación del RAP.</i>	60
Tabla 20. <i>Análisis comparativo del método de incorporación del RAP.</i>	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Composición del asfalto.</i>	14
Figura 2. <i>Fases de la metodología</i>	27
Figura 3. <i>Ubicación Proyecto 1.</i>	33
Figura 4. <i>Ubicación proyecto 2</i>	34
Figura 5. <i>Ubicación proyecto 3</i>	35
Figura 6. <i>Ubicación proyecto 4</i>	37
Figura 7. <i>Territorio vs No. De artículos publicados</i>	41
Figura 8. <i>Número de documentos publicados por año (2015-2020).</i>	42
Figura 9. <i>Metodología para el reciclaje y caracterización del RAP.</i>	56
Figura 10. <i>Metodología para la extracción cuantitativa del asfalto.</i>	56
Figura 11. <i>Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.</i>	57
Figura 12. <i>Metodología para penetración del pavimento asfáltico extraído.</i>	58
Figura 13. <i>Metodología para determinar el punto de ablandamiento del asfalto.</i>	59
Figura 14. <i>Procedimiento para caracterizar el RAP previo a su incorporación en la preparación de nuevas mezclas asfálticas.</i>	65
Figura 15. <i>Fórmulas para hallar el porcentaje de RAP y agregado virgen necesarios para la mezcla asfáltica.</i>	65
Figura 16. <i>Procedimiento para la aplicación del ensayo de Marshall.</i>	66

Resumen

La utilización de pavimento asfáltico recuperado (RAP) para la elaboración de mezclas asfálticas nuevas está ganando gran interés debido a factores como la reducción en costos de producción, espacios de vertedero y el ahorro de recursos naturales que acarrea la implementación de esta técnica. Este estudio analizo las metodologías que tienen tanto a nivel global como a nivel nacional (Colombia) para el proceso de reciclaje, acopio, caracterización e incorporación del RAP en la preparación de nuevas mezclas asfálticas. Esto con el fin de poder verificar si el procedimiento que se lleva a cabo para realizar cada una de estas etapas es congruente con el proceso que se realiza aquí en Colombia, y de acuerdo con esto poder generar la metodología apropiada para llevar a cabo cada uno de estos procesos.

Palabras clave: Pavimento asfáltico reciclado (RAP), caracterización fisicoquímica del RAP, incorporación del RAP, pavimentos sostenibles, reciclaje.

Abstract

The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) for the preparation of new asphalt mixtures is gaining great interest due to factors such as the reduction in production costs, landfill spaces and the saving of natural resources that the implementation of this technique entails. This study analyzed the methodologies they have both at a global level and at a national level (Colombia) for the recycling, collection, characterization and incorporation of RAP in the preparation of new asphalt mixtures. This in order to be able to verify if the procedure that is carried out to carry out each of these stages is congruent with the process that is carried out here in Colombia, and accordingly to be able to generate the appropriate methodology to carry out an each of these processes.

Keywords: Recycled asphalt pavement (RAP), physicochemical characterization of RAP, incorporation of RAP, sustainable pavements, recycling.

Introducción

La infraestructura vial es un elemento de vital importancia para el desarrollo de un país. Es por esto que es pertinente que la red vial esté siempre en el mejor estado; por lo tanto, es adecuado generar conciencia sobre la importancia de alargar el ciclo de vida de los materiales que forman parte del pavimento. Sin embargo, actualmente, la construcción de nuevas carreteras y acondicionamiento de las ya existentes está siendo llevado a cabo mayoritariamente con nuevos áridos y material virgen. [1]

Esta práctica requiere la explotación de nuevas canteras o la sobre explotación de las ya existentes, así como el consumo de grandes cantidades de betún nuevo lo que genera un impacto ambiental negativo. Como una alternativa a este sobre consumo y a este impacto ambiental nace la idea del aprovechamiento del pavimento recuperado, ya que, son altamente beneficiosos porque disminuyen los costos a la hora de una construcción vial y su vez se evidencia una disminución de los impactos ambientales. [2]

El proceso de reciclado de pavimentos asfálticos en caliente consiste en retirar las capas bituminosas, envejecidas mediante el fresado, con el fin de transportar dicho material para ser acopiado, caracterizado hasta cumplir con ciertas condiciones de tamaño y humedad. Posteriormente es mezclado en caliente con áridos nuevos, betún virgen para obtener una mezcla bituminosa con un porcentaje de pavimento reciclado, la cual es adecuada para reestablecer la malla vial. [3]

Con el fin de incentivar el uso de materiales reciclados para la preparación de nuevas mezclas asfálticas en el área metropolitana de Bucaramanga, este proyecto pretende analizar la información sobre las metodologías para el reciclaje y la inclusión de pavimento asfáltico, con el fin de evidenciar el método apropiado para la implementación de esta técnica.

Para esto, primero se buscó información a nivel global acerca del proceso de reciclaje y preparación de pavimento con RAP, posteriormente se revisó el manual de vías (INVIAS) para verificar los procesos que la entidad recomienda para la realización de cada una de estas actividades y finalmente se hizo una comparación, entre el método aplicado tanto a nivel mundial como nacional, y de acuerdo con eso poder generar el procedimiento adecuado para el reciclaje, acopio, caracterización e inclusión del pavimento asfáltico recuperado, teniendo en cuenta la congruencia de los procesos analizados.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la información sobre la disponibilidad y las propiedades de pavimento asfáltico recuperado (RAP) para ser utilizado como insumo en la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente, en el área metropolitana de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar la disponibilidad del RAP en el área metropolitana de Bucaramanga.

Identificar las metodologías adecuadas para la recolección y caracterización física y química del RAP.

Identificar la metodología adecuada para la incorporación de pavimento asfáltico recuperado en mezclas asfálticas en caliente en el área metropolitana de Bucaramanga.

2. Marco Referencial

Con el fin de poder conocer y analizar el proceso de reciclaje, caracterización e implementación de pavimento asfáltico reciclado en la elaboración de mezclas asfálticas nuevas, es necesario conocer, la composición del asfalto, el método que se lleva a cabo a nivel nacional para la ejecución de estos procesos, y además evidenciar las experiencias que han tenido en otros países con respecto a la implementación de esta técnica de reciclaje.

2.1 El asfalto y su Composición

A continuación, se presenta la definición de asfalto, su proceso de producción, de donde proviene, las propiedades fisicoquímicas y la importancia de caracterizarlo una vez se recicla con el fin de conocer el estado en el que se encuentra, y así generarle un tratamiento adecuado previo a su incorporación en la generación de mezclas asfálticas nuevas.

2.1.1. Asfalto

Un asfalto es un betún sólido, derivado del petróleo, que resulta de la destilación del mismo, el cual posee propiedades mecánicas y reológicas que dependen del tipo de procesamiento realizado, ya sea por destilación en aire o por vapor. Siendo los obtenidos a través de la destilación por vapor los más utilizados en pavimentación. [4, p. 189]

El asfalto refinado en forma que satisfaga las especificaciones para la pavimentación se le llama cemento asfáltico, que se abrevia C.A. A temperaturas ordinarias tiene la forma de un semisólido, en el que el grado de solidez se mide por la prueba de penetración. Se calienta hasta que se funde antes de mezclarse con los agregados en las mezclas para pavimentación. [4]

2.1.2. Composición Física y Química del Asfalto

El asfalto posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que le proveen todas sus particularidades y hacen de éste el producto esencial que es hoy en la industria de la construcción. Este cementante contiene tres importantes propiedades: consistencia, pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, disminuye su viscosidad cuando se expone a altas temperaturas. La segunda define la composición química del asfalto, donde las impurezas de este son prácticamente inertes. La tercera precisa el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. De la misma manera, dentro de su composición química contiene características de aglutinación, esto debido a su constitución principalmente de asfaltenos y maltenos, que son los elementos que le proporcionan dichas particularidades; este último define la capacidad del asfalto para ser manejado a altas temperaturas con seguridad. [5]

Figura 1. Composición del asfalto.



Nota: [5]

Las características físicas, químicas y mecánicas del pavimento asfáltico pueden ser muy variables debido a las condiciones climáticas y las cargas de servicio a las que se somete la carpeta asfáltica, lo cual causa un envejecimiento en el pavimento. Debido a esto es indispensable hacer

una caracterización del pavimento con el objetivo de poder observar las características que presenta el asfalto recuperado.

2.2 Normatividad Aplicable

EL INVIAS es una agencia de la Rama Ejecutiva del Gobierno de Colombia a cargo de la asignación, regulación y supervisión de los contratos para la construcción de autopistas y carreteras y el mantenimiento de las vías. Por esto, es necesario conocer el procedimiento que en este manual se propone, con el fin de poder conocer el procedimiento adecuado para actividades como el reciclaje, el acopio, la caracterización, y elaboración de mezclas asfálticas con la inclusión de materiales reciclados.

2.2.1. Acopio del Material por Reciclar

El material disgregado por reciclar podrá provenir de la misma obra o encontrarse almacenado por haber sido extraído en otro lugar. Los acopios del material para reciclar deberán estar cubiertos y el tiempo de almacenamiento se deberá reducir al mínimo posible para evitar que absorban una cantidad de agua excesiva de la atmósfera. En el instante de ser descargados en el acopio los materiales por reciclar, se deberán descartar todos aquellos que, a simple vista, presenten contaminaciones. En las regiones donde la temperatura ambiente exceda de treinta grados Celsius (30°C), los acopios del material por reciclar no podrán tener una altura mayor de tres metros (3 m) para evitar que el material se aglomere. Se deberá llevar un registro de la procedencia de todas las mezclas bituminosas por reciclar, identificando y acopiando por separado las provenientes de mezclas de los tipos denso (D), semidenso (S) y grueso (G), definidas en el Artículo 450 de estas especificaciones. También, se deberán acopiar por separado aquellos

materiales para los cuales sea necesario realizar el estudio específico citado en el numeral 462.2.1.2, hasta que se tome la decisión sobre su aceptación o rechazo. [6]

2.2.2. Tratamiento del Material por Reciclar

El material disgregado por reciclar se deberá tratar y mezclar para su homogeneización y descontaminación. Para ello, será necesario triturar todos los bloques, de manera que todo el material pase por el tamiz de 25 mm (1”) de abertura. Se deberá proceder, también, a la eliminación de cualquier contaminante y, en especial, se usará un procedimiento adecuado para la detección y retiro de elementos metálicos. Posteriormente, el material deberá ser mezclado hasta obtener un producto homogéneo y sin segregaciones. [6]

2.2.3. Caracterización y Acopio del Material por Reciclar, Después de Tratado

Una vez tratado el material disgregado por reciclar, se deberá disponer en acopios homogéneos. Para que se considere que un acopio es uniforme, muestras de él se deberán someter a los ensayos de extracción del asfalto, granulometría del agregado y penetración del ligante recuperado, y sus resultados, respecto de los valores promedio encontrados, se deberán hallar dentro de los rangos indicados en la Tabla 1. Los diferentes materiales tratados, que cumplan los requisitos de homogeneidad, se podrán acopiar juntos. Cada acopio homogéneo quedará identificado y caracterizado por los resultados de los ensayos citados en el párrafo anterior y se podrá emplear en la fabricación de la mezcla asfáltica reciclada en caliente con una misma fórmula de trabajo, siempre y cuando los agregados vírgenes también sean homogéneos. Los acopios del material por reciclar, después de tratado, se deberán situar en una zona bien drenada y, en caso de que la superficie no sea pavimentada, no se podrán emplear los quince centímetros (15 cm)

inferiores de ellos. En las regiones donde la temperatura ambiente exceda de treinta grados Celsius (30°C), los acopios del material por reciclar, después de tratado, no podrán tener una altura mayor de tres metros (3 m) para evitar su aglomeración.

Tabla 1. *Tolerancias en el material por reciclar para considerarlo homogéneo.*

Característica	Tolerancia Respecto De La Masa Total Del Material Por Reciclar.
Porcentaje que pasa tamiz 2 mm y mayores (No 10 y mayores).	± 5
Porcentaje que pasa tamices de 425 y 180 μm (No 40 y No 80).	± 5
Porcentaje que pasa tamiz de 75 μm .	± 2
Contenido de asfalto (%).	± 0.5
Penetración del asfalto recuperado (0.1 mm).	± 5

Nota: [6]

Los acopios del material tratado deberán estar cubiertos. El tiempo de almacenamiento del material se deberá reducir al mínimo posible para evitar que su contenido de humedad aumente excesivamente.

2.2.4. Extracción Cuantitativa del Asfalto

2.2.4.1 Objeto. Esta norma describe métodos para la determinación cuantitativa del asfalto en mezclas asfálticas en caliente y en muestra tomadas de pavimentos. A los agregados obtenidos mediante estos métodos se les puede realizar un análisis granulométrico, empleando la norma de ensayo INV E-782.

2.2.4.2 Método. El ligante de la mezcla se extrae con tricloroetileno, bromuro de n-propilo (nPB) o cloruro de metileno, empleando el equipo de extracción aplicable al método particular. El contenido de asfalto se calcula por diferencia a partir de la masa del agregado extraído, del contenido de humedad, y el material mineral en extracto. El contenido de asfalto se expresa como porcentaje en masa de la mezcla asfáltica libre de humedad. [7]

2.2.5. Análisis Granulométrico de los Agregados Extraídos de Mezclas Asfálticas

2.2.5.1 Objeto. Esta norma describe un procedimiento para determinar la granulometría de los agregados gruesos y finos recuperados de las mezclas asfálticas, empleando tamices con malla de abertura cuadrada.

2.2.5.2 Importancia y uso. Esta norma se utiliza para determinar la gradación de los agregados extraídos de una mezcla asfáltica. Los resultados del ensayo permiten la conformidad de la granulometría con la especificación aplicable y suministra datos útiles para el control de la producción de los diferentes agregados usados en la fabricación de mezclas asfálticas. [8]

2.2.6. Penetración

2.2.6.1 Definición. Consistencia de un material bituminoso expresada por medio de la distancia, en decimas de milímetro, hasta la cual penetra verticalmente una aguja normalizada en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C, durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g; se pueden emplear otras condiciones previamente definidas.

2.2.6.2 Objeto. Determinación de la consistencia de los materiales bituminosos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.

2.2.6.3 Método. Se derrite una muestra del producto bituminoso (si al inicio se encontraba a temperatura ambiente) y se deja enfriar de manera controlada. Posteriormente, empleando un penetrómetro con una aguja normalizada se penetra la muestra bajo unas condiciones especificadas. [9]

2.2.7. Índice de Penetración

2.2.7.1 Definición. Se calcula a partir de los valores de la penetración a 25°C y del punto de ablandamiento con anillo y bola y proporciona un problema de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales y de su comportamiento reológico.

2.2.7.2 Método. Se basa en aceptar que, a la temperatura del punto de ablandamiento, la penetración de un cemento asfáltico es de 800 y que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, si se elige en ordenadas una escala logarítmica para la penetración. [10]

2.2.8 Punto de Ablandamiento del Ligante Recuperado

2.2.8.1 Definición. Esta norma se refiere a la determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157 °C, implementado el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada entre 30 y 80 °C.

2.2.8.2 Método. Dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de latón, se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor medio de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan lo suficiente para que la bola de acero envuelta en el ligante asfáltico caiga a una distancia de 25 mm. [11]

2.2.9 Viscosidad

2.2.9.1 Objeto. procedimiento que se debe seguir para medir la viscosidad aparente del asfalto a elevadas temperaturas, desde 60° a 200°C, usando un viscosímetro rotacional equipado con un sistema termosel.

2.2.9.2 Método. Este método de ensayo ha sido usado para medir la viscosidad aparente de asfaltos al aplicar temperatura. La medida de viscosidad a altas temperaturas ha sido usada para determinar la manejabilidad y facilidad de bombeo en la refinería, terminal o planta asfáltica. Los valores medidos mediante este procedimiento se pueden utilizar para desarrollar diagramas de temperatura contra viscosidad, los cuales se utilizan para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar durante el diseño y construcción de mezclas asfálticas en caliente. [12]

2.2.10 Diseño de la Mezcla y Obtención de la Fórmula de Trabajo

La mezcla se deberá diseñar por el método Marshall y los criterios de diseño y demás comprobaciones respecto de la susceptibilidad al ahuellamiento y a la humedad, son los mismos que se indican en el numeral 450.4.2 del Artículo 450 de las presentes especificaciones para las mezclas asfálticas en caliente. En ningún caso se permitirá que el material por reciclar constituya más de cuarenta por ciento (40 %) de la masa total de la mezcla.

2.2.10.1 Definición. Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje y el grado del agente de reciclado requerido para la elaboración de mezclas de concreto asfáltico fabricadas en planta y en caliente

2.2.10.2 Método. El proceso consiste en la evaluación del pavimento asfáltico recuperado (RAP), la caracterización del asfalto extraído de este; la evaluación del agregado recuperado (RAM) cuando se vaya a utilizar y la determinación del grado y la proporción del agente reciclado

que debe ser añadido al asfalto presente en el RAP y el asfalto nuevo, con el fin de conseguir la viscosidad adecuada para la elaboración de la mezcla. [13]

2.3 Experiencia del Uso de RAP en otros Países

En países como Canadá y USA que son pilares en la implementación de la tecnología de reciclaje desde hace varias décadas, con esto, han tenido muy buenas experiencias y excelentes resultados con el uso del RAP en la rehabilitación y construcción de sus carreteras y autopistas, logrando así la obtención de una malla vial en condiciones óptimas para su uso, y ayudando al medio ambiente con la disminución de sobrantes, y el reemplazo de recursos naturales por materiales reciclados.

2.3.1 Experiencia en la Utilización de Mezclas Bituminosas Recicladas

En el estado de Washington se han utilizado mezclas bituminosas con RAP para la construcción y rehabilitación de pavimento nuevo desde el año 1977, lográndose reutilizar entre 1977 y 1981 más de 23.000 toneladas de RAP. [14]

En 1991 el WSDOT (Washington State Department of Transportation) [15] comenzó a estudiar el material recuperado de las carreteras que rehabilitaban para su reutilización y cinco años más tarde publicó una serie de recomendaciones para el uso de material reciclado en mezclas bituminosas, entre las cuales se destacan las siguientes:

- Se permite la utilización de hasta un 20% de RAP en la fabricación de mezclas nuevas sin necesidad de un diseño específico.

- Se permite la utilización de hasta un 80% de RAP en la fabricación de mezclas nuevas siempre que se cumplan con los mismos criterios de diseño empleados para las mezclas convencionales.

Tabla 2. *Porcentajes de RAP permitidos en cada estado de los Estados Unidos*

Estado.	% máx. de MBR-Plantas discontinuas.			% máx. de MBR-Plantas continuas			Tamaño máximo de MBR
	Base	Intermedia	Rodadura	Base	Intermedia	Rodadura	
Alabama	40	40	15	50	50	15	2 in
Alaska	-	-	-	-	-	-	-
Arizona	30	30	30	30	30	30	1.5 in
Arkansas	70	70	70	70	70	70	3 in
California	50	50	50	50	50	50	2 in
Colorado	15	15	15	15	15	15	1.5 in
Connecticut	40	40	40	40	40	40	2 in
Delaware	35	35	25	50	50	30	2 in
Florida	60	50	0	60	50	0	-
Georgia	25	25	25	40	40	40	2 in
Hawaii	30	0	0	40	0	0	1.5 in
Idaho	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Illinois	50	25	15	50	25	15	-
Indiana	50	50	20	50	50	20	2 in
Iowa	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	1.5 in
Kansas	50	50	50	50	50	50	2 in
Kentucky	30	30	30	30	30	30	-
Louisiana	30	30	0	30	30	0	2 in
Maine	40	40	0	40	40	0	1 in
Maryland	Abierto	Abierto	Limitado	Abierto	Abierto	Limitado	-

Estado.	% máx. de MBR-Plantas discontinuas.			% máx. de MBR-Plantas continuas			Tamaño máximo de MBR
	Base	Intermedia	Rodadura	Base	Intermedia	Rodadura	
Massachusetts	20	20	10	40	40	10	0.75 in
Michigan	50	50	50	50	50	50	-
Minnesota	59	50	30	50	50	30	3 in
Mississippi	30	30	15	30	30	15	2 in
Missouri	50	50	50	50	50	50	1.5 in
Montana	50	50	10	50	50	10	2 in
Nebraska	No usado	No usado	No usado	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Nevada	50	50	15	50	50	15	1.5 in
New Hampshire	35	35	15	50	50	15	-
New jersey	25	25	10	25	25	10	2 in
New México	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	1.5 in
New York	50	50	0	70	70	0	2 in
North Carolina	60	60	60	60	60	60	2 in
North Dakota	50	50	50	50	50	50	1 in
Ohio	50	35	20	50	35	20	2 in
Oklahoma	25	25	0	25	25	0	2 in
Oregon	30	20	20	30	20	20	1 in
Pennsylvania	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Rhode Island	30	30	0	30	30	0	1.25 in
South Carolina	30	25	20	30	25	20	2 in
South Dakota	No usado	No usado	No usado	50	50	50	1.5 in
Tennessee	15	Abierto	0	Abierto	Abierto	0	Abierto
Texas	15	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	2 in
Utah	No usado	No usado	No usado	25	25	25	2 in
Vermont	-	-	-	-	-	-	-
Virginia	25	25	25	25	25	25	2 in
Washington	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
West Virginia	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Wisconsin	Abierto	35	20	Abierto	35	20	Abierto
Wyoming	50	50	50	50	50	50	2 in

Nota: [16]

Casi todas las administraciones de los estados unidos presentan una situación similar en cuanto a la utilización de RAP para la fabricación de mezclas recicladas en caliente en planta, sin embargo, cada estado cuenta con sus especificaciones en cuanto al porcentaje de RAP permitido dependiendo del tipo de planta que se utilice para su fabricación tal como se muestra en la tabla 2. [17]

Al igual que los Estados Unidos, Canadá empezó a trabajar con el reciclado de pavimentos asfálticos hace varias décadas y por tanto es uno de los países punteros en la utilización de estas técnicas. Las administraciones canadienses han llegado a establecer una serie de especificaciones para el uso de RAP en la fabricación de mezclas nuevas, y el Ministerio de Transportes de Ontario ha definido parámetros que debe cumplir el RAP y la mezcla final mediante ensayo Marshall.

Tabla 3. *Experiencia en el reciclado de pavimentos asfálticos en Canadá*

Provincia o territorio	Experiencia de reciclado en situ.	Experiencia de reciclado en planta.	Años de experiencia.	Porcentajes de MBR.
British columbia	Si	Si	11	20-40
Alberta	Si	Si	9	>40
Saskatchewan	Si	Si	10	30-70
Manitoba	No	Si	3	30-50
Ontario	Si	Si	13	15-50
Quebec	Si	Si	13	15-30
PEI	No	No	No aplicable	No aplicable
New Brunswick	No	Si	10	>45
Nova Scotia	No	Si	6	>35
Newfoundland	No	No	No aplicable	No aplicable
Yukón	No	Si	Se desconoce	Se desconoce
NWT	No	No	No aplicable	No aplicable

Nota: [18, pp. 38-46]

Los técnicos canadienses han dejado de considerar el RAP como un residuo, ya que trabajado correctamente puede sustituir grandes porcentajes de material nuevo. [18]

Las técnicas de reciclado de mezclas en caliente desarrolladas en Estados Unidos a comienzos de los años 70's llegaron a Europa a finales de esta década, y hay numerosos países europeos, especialmente Alemania, Austria, Holanda y Dinamarca, que las han utilizado con regularidad logrando mezclas recicladas con un comportamiento equivalente al de las mezclas convencionales fabricadas en caliente. [17]

En la tabla 4 se puede observar la cantidad de material fresado de pavimentos que generaron algunos países europeos en el año 2001, los porcentajes que reciclaban en caliente y el porcentaje de mezclas recicladas generadas sobre el total que fabricaron. [17]

Tabla 4. *Generación de RAP y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de Europa*

País	Material fresado generado (x 100 t).	Fresado en mezclas recicladas en caliente.	Mezclas recicladas sobre el total fabricado (%).
Alemania	15000	15-80	60-65
Austria	-	-	3
Bélgica	1500	20-45	25
Croacia	20000	0	10
Dinamarca	220	57	31
Eslovenia	50	60	15
Finlandia	200	40	5-10
Francia	<5000	10-45	<10
Holanda	30000	70	60
Hungría	1200	0.3	-
Italia	13000	15	5
Noruega	520	6	4
Polonia	750	15-30	0.3
Reino Unido	5000	-	-
Republica checa	710	10-40	16

País	Material fresado generado (x 100 t).	Fresado en mezclas recicladas en caliente.	Mezclas recicladas sobre el total fabricado (%).
Rumania	80	20-40	40
Suecia	1000	15	19
Suiza	1750	15	-

Nota: [17]

2.3.2. *Ventajas y Desventajas de Usar RAP*

El uso de RAP en la construcción de los nuevos pavimentos tiene beneficios económicos y ambientales. Los materiales RAP han sido utilizado en muchos tipos de mezclas de asfalto, incluido el asfalto de mezcla fría (CMA), Asfalto de mezcla ambiente (WMA) y Asfalto de mezcla caliente (HMA). Zaumanis, Mallick y Frank [19] analizaron los beneficios de costos asociados con el uso de varios porcentajes de RAP en mezclas de asfalto. Dependiendo de la disponibilidad de RAP, la mezcla de asfalto que contiene 100% RAP podría ahorrar aproximadamente entre 50-70% en el costo total de los materiales en comparación con la mezcla convencional [19]. la cantidad de ahorro también depende significativamente del costo de la carpeta ya que es el material más caro usado en la mezcla [20].

Los principales beneficios ambientales asociados con el uso de RAP incluyen [21]; [19]: (a) reducción de emisiones y uso de energía, (b) reducir los costos de producción, (c) preservar recursos no renovables, y (d) conservar valiosos vertederos. Las mezclas de asfalto que contienen RAP también podrían proporcionar algunos beneficios técnicos y de ingeniería, como resistencia mejorada en la capa de rodadura.

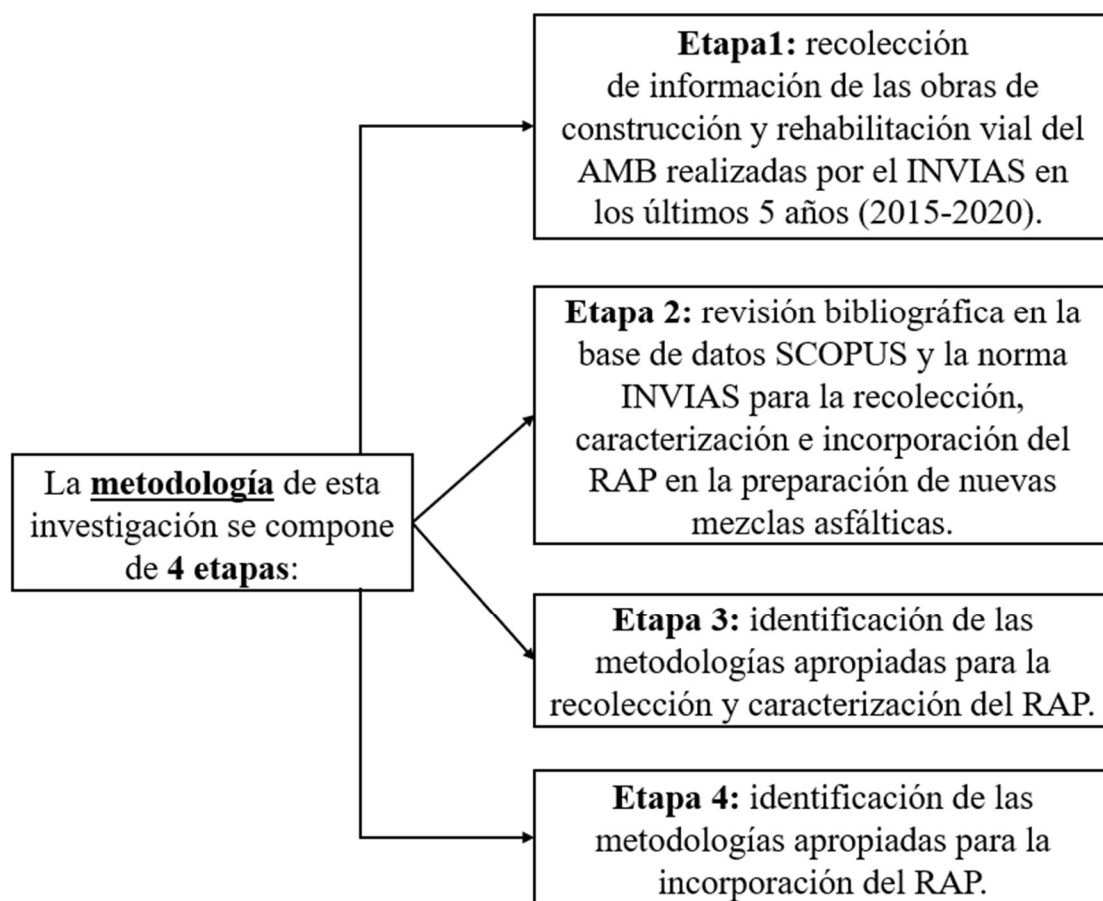
El uso de materiales RAP en mezclas de asfalto también podría tener algunas desventajas relacionadas principalmente con el rendimiento de ingeniería de las mezclas que contienen RAP. Un diseño deficiente puede provocar problemas prematuros en el pavimento (por ejemplo, fatiga

y grietas por bajas temperaturas) y una menor vida útil, que a su vez puede aumentar los costos de mantenimiento, consumo de energía y emisiones [22].

3. Método

La metodología de este trabajo consistió en una búsqueda de datos distribuida en 4 secciones como se ilustra en la figura 2.

Figura 2. *Fases de la metodología*



A continuación, se describe en detalle cómo se realizó cada etapa:

1. Recolección de información de las obras de construcción y rehabilitación vial en el AMB realizadas por el INVIAS en los últimos 5 años (2015-2020). Se seleccionó como única fuente de información el INVIAS puesto que para determinar la cantidad de RAP disponible es necesario tener información sobre las dimensiones de la vía. Para conocer la información de cada uno de los proyectos del INVIAS, se realizó el siguiente proceso:

Se seleccionó el estado de la obra en terminado y en construcción, posteriormente se ingresó automáticamente a la base de datos del INVIAS y se limitó la búsqueda al departamento de SANTANDER. Seguido de esto, se buscó manualmente los proyectos que estaban inmersos en el área metropolitana de Bucaramanga, o que en su longitud comprendieron el AMB. De cada proyecto se registró la ubicación de la vía y la longitud. Una vez seleccionados los proyectos, se calculó la cantidad de RAP de acuerdo con las dimensiones de la vía teniendo en cuenta las siguientes formulas:

Ecuación 1:

Volumen de RAP generado= $L * a * e$ (m^3).

Donde:

-L: longitud de la vía (m).

-A: ancho de la vía (m).

-E: espesor de la vía (m).

De acuerdo con el artículo 442P-17 titulado “Mezcla asfáltica natural” el espesor de la capa de rodadura varía entre 4-7,5 cm de acuerdo a las especificaciones de la vía y la densidad de la mezcla. Para el desarrollo de este proyecto se escogió un espesor de carpeta asfáltica compactada de 5 cm, porque se consideró que cada uno de los proyectos estudiados estaban condiciones normales y no contaban con problemas de gálibo o de sobrecargas estructurales [23, p. 38]

Se supuso que todas las obras realizadas son rehabilitaciones y toda la vía estaba previamente pavimentada.

En las vías donde no se especifica el ancho, este se supuso de acuerdo con lo que se explica en cada caso.

Para poder determinar el peso del pavimento asfáltico recuperado en toneladas, se utilizó la ecuación 2. La densidad del pavimento se toma como $1,5 \text{ t/m}^3$ [24].

Ecuación 2:

$$m=D*V$$

Donde:

-D: densidad

-M: masa.

-V: volumen.

Por último, para determinar la cantidad de RAP total estimada se hizo una sumatoria de los datos arrojados en cada uno de los proyectos considerados.

2. Revisión bibliográfica en la base de datos SCOPUS y la norma INVIAS para la recolección, caracterización e incorporación del RAP en la preparación de nuevas mezclas asfálticas. Para la búsqueda en SCOPUS se realizó el siguiente procedimiento.

1. En la parte superior se generó la búsqueda con palabras relacionadas con el tema.
2. Se refinó la búsqueda con parámetros tales como lapso de tiempo, áreas de estudio, entre otras.
3. Una vez filtrada la información, se generó la bibliometría con el fin de analizar mejor los resultados.

4. Se seleccionaron manualmente los artículos con mayor relevancia en el tema estudiado.

Por otro lado, respecto a la búsqueda realizada en la norma INVIAS se seleccionaron los artículos y las secciones que contenían la siguiente información:

1. Estado que debe presentar el pavimento previo al reciclaje.
2. Procedimiento para la recolección del pavimento a reciclar.
3. Almacenamiento y tratamiento que se le debe dar al RAP posterior al reciclaje.
4. Ensayos que se le realizan al pavimento reciclado para verificar el estado en el que se encuentra y así poder conocer qué tanto porcentaje se puede incluir de acuerdo a los valores que recomienda el instituto nacional de vías.

3. Identificación de las metodologías apropiadas para la recolección y caracterización del RAP. Con los artículos y las normas seleccionadas previamente se organizó la información en tablas de Excel y se tuvieron en cuenta los parámetros que se muestran a continuación:

1. Para tabular la información de recolección del RAP se tuvieron en cuenta parámetros como: El lugar de recolección, método de recolección, tamaño de molienda, y porcentaje de RAP presente en la muestra reciclada, debido a que, dichos aspectos fueron relevantes en cada uno de los artículos analizados.

2. Para tabular la información de la caracterización del RAP se tuvieron en cuenta los ensayos realizados por cada uno de los documentos para la caracterización del pavimento reciclado, y se seleccionaron los ensayos generalizados o más utilizados en los artículos obtenidos mediante la base de datos SCOPUS.

Una vez se obtuvo esto, se compararon los resultados obtenidos con los ensayos realizados por el INVIAS para verificar si hay similitud en el pretratamiento del RAP, tanto a nivel mundial

como nacional. Y de acuerdo con esto, se determinaron las metodologías apropiadas para la recolección y caracterización del pavimento asfáltico recuperado.

4. Identificación de las metodologías apropiadas para la incorporación del RAP en la preparación de nuevas mezclas asfálticas. A partir de los documentos seleccionados en el ítem 2, se determinaron las metodologías apropiadas para la incorporación del pavimento asfáltico recuperado en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas.

La metodología de cada una de estas investigaciones fue analizada teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

1. Porcentaje de RAP incorporado en la mezcla.
2. Tamaño de partícula virgen que se añadió a la mezcla.
3. Porcentaje óptimo de asfalto.
4. Temperatura de la mezcla.
5. Tipo de la mezcla.
6. Tiempo de la mezcla.

De igual manera se revisó en la norma INV E-748-13 “Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall” donde se describe el procedimiento que se debe llevar a cabo para la elaboración de pavimento asfáltico con la inclusión de RAP y así poder comparar y conocer si los resultados arrojados en la revisión de documentos son congruentes con el proceso que se describe en el manual de vías.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología que se realizó para cada uno de los objetivos específicos propuestos para el desarrollo de este trabajo.

4.1 Recolección de Información de las Obras de Construcción y Rehabilitación Vial del AMB Realizadas por el INVIAS en los Últimos 5 Años

Esta sección se realizó mediante una búsqueda electrónica en la página del INVIAS se obtuvo información sobre las obras de construcción y rehabilitación vial del AMB durante los últimos 5 años. Se obtuvieron los siguientes resultados:

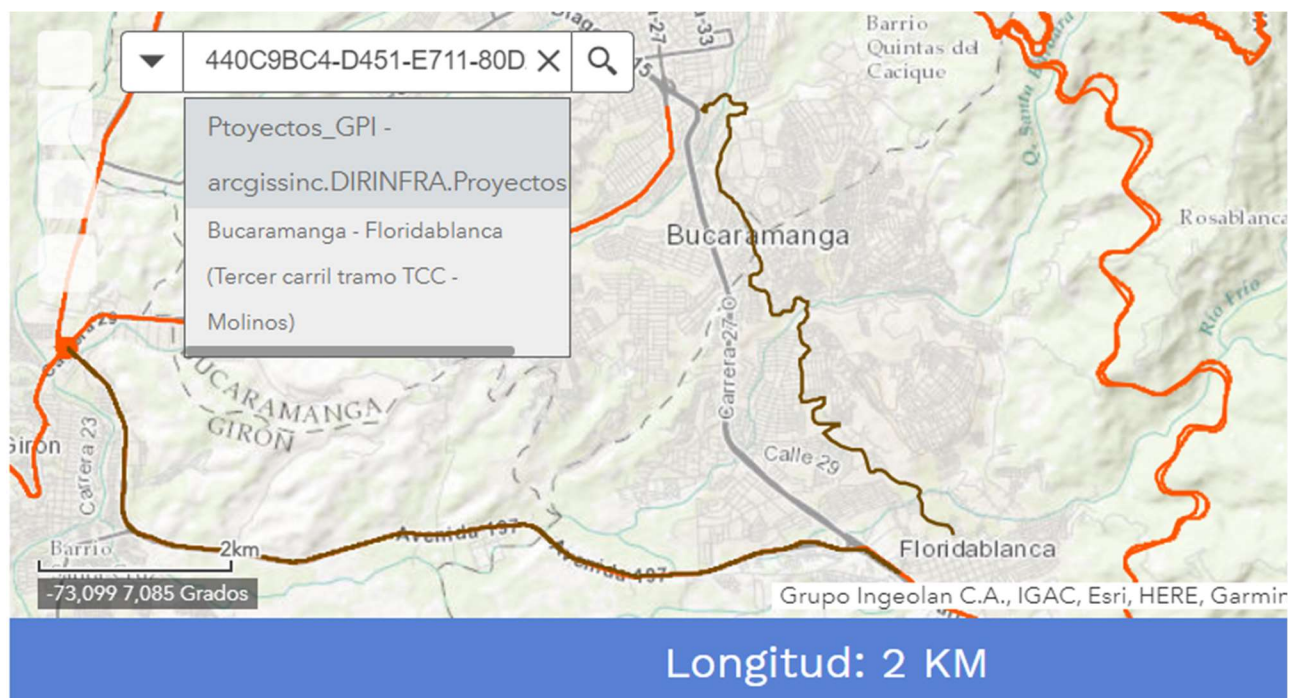
Tabla 5. *Fecha y estado de los proyectos INVIAS en el AMB*

No.	Título	Vía	Fecha inicio	Fecha final	Estado
1	Prolongación De La Paralela Oriental De La Autopista Floridablanca-Bucaramanga (Tramo Tcc Molinos)	Floridablanca - Bucaramanga	07-mar-17	10-jul-19	Terminado
2	Proyecto Retornos Anillo Vial Girón – Floridablanca	Girón - Floridablanca	12-ene-17	28-dic-17	Terminado
3	Bucaramanga - Barrancabermeja - Yondó	Bucaramanga - Barrancabermeja - Yondó	08-nov-16	12-oct-40	Construcción
4	Bucaramanga - Pamplona	Bucaramanga - Pamplona	20-ago-19	20-jul-41	Construcción

A continuación, se presenta la ubicación de cada uno de los proyectos y un estimado de las cantidades en volumen y peso del RAP generado.

1. Prolongación de la paralela oriental de la Autopista Floridablanca-Bucaramanga (TRAMO TCC MOLINOS). En la figura 3 se muestra la ubicación del proyecto, este se encuentra localizado en su totalidad en el municipio de Floridablanca. La prolongación de la Paralela Oriental de la autopista, Floridablanca – Bucaramanga, desde T.C.C., hasta la Calle 20 de Molinos Altos, ofrece continuidad vehicular al flujo Sur-Norte desde “papi quiero piña” hasta Provenza, aumentando el número de carriles en ese sentido de circulación. [25]

Figura 3. *Ubicación Proyecto 1.*



Nota: (INVIAS 2017)

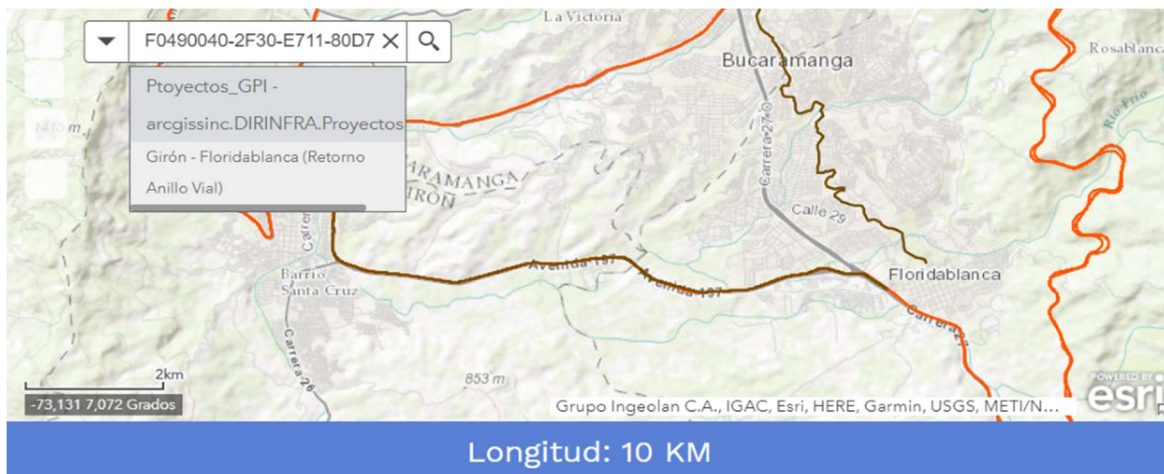
En la tabla 6 se presentan las dimensiones de la vía; el volumen y peso de RAP fueron obtenidos mediante la ecuación 1 y 2 respectivamente. El ancho de la vía fue extraído de la base de datos del AMB [25]

Tabla 6. Dimensiones Proyecto 1

Longitud (km)	Ancho (m)	Espesor(cm)	Volumen de RAP generado (m3)	Peso del RAP (t) (D=1,5 t/m3)
2	7	5	700	1050

2. Proyecto retornos anillo vial Girón – Floridablanca. En la figura 4 se muestra la ubicación del proyecto el cual consta de la construcción de una glorieta en el kilómetro 3 y un retorno en el kilómetro 5, vía Girón – Floridablanca con el fin de favorecer la movilidad y transitabilidad de los habitantes de los municipios de Girón, Floridablanca y Bucaramanga al desviar el tráfico de vehículos livianos y de carga pesada del área metropolitana. [26]

Figura 4. Ubicación proyecto 2.



Nota: Invias (2017).

En la tabla 7 se presentan las dimensiones del proyecto retornos anillo vial Girón – Floridablanca, y con ayuda de la ecuación 1 y 2 se obtuvo el volumen y el peso del RAP respectivamente.

El ancho de este proyecto se supone que es de 7 m, ya que, de acuerdo con la resolución de 2017 del Ministerio de Transporte, las vías secundarias son aquellas que comunican a 2 o más municipios como lo es el caso del anillo vial que comunica a Girón – Floridablanca y Piedecuesta y el ancho de la calzada de este tipo de vía no debe ser superior a 7,30 m. [26]

Tabla 7. Dimensiones proyecto 2

Longitud (km)	Ancho (m)	Espesor (cm)	Volumen de RAP generado (m3)	Peso del RAP (t) (D=1,5 t/m3)
10	7	5	3500	5250

3. Bucaramanga - Barrancabermeja - Yondó

En la figura 5 se muestra el corredor vial que contempla la vía actual conformada por los tramos Lebrija – La Fortuna y La Lizama – Barrancabermeja, tramos viales a cargo de la Nación.

Figura 5. Ubicación proyecto 3.



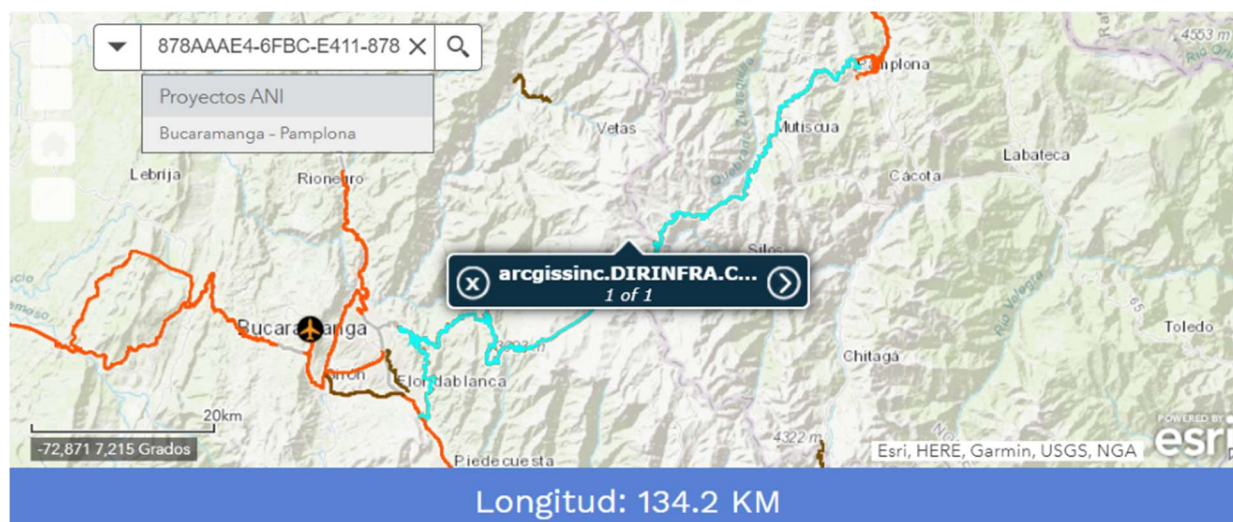
En la tabla 8 se muestran las dimensiones de la ruta del cacao, y se obtuvieron los valores de volumen y peso del RAP con la ayuda de la ecuación 1 y 2 respectivamente. El proyecto como tal consta de 151.6 km, pero para este estimado se tomó una longitud de 12,4 km, que es un aproximado de la distancia que pertenece al AMB. Además, debido a que la ruta del cacao es vía primaria, y de acuerdo con el Manual vigente de *Diseño Geométrico de Carreteras del INVIA* [27] y el Ministerio de Transporte el ancho mínimo de calzada correspondiente a una vía de primer orden es de 7,30 m y con una berma externa de 2 m y una interna de 1 m el ancho total de la calzada es de 10,3 m.

Tabla 8. *Dimensiones proyecto 3*

Longitud (km)	Ancho (m)	Espesor (cm)	Volumen de RAP generado (m ³)	Peso del RAP (t) (D=1,5 t/m ³)
12,4	10,30	5	6386	9579

4. Bucaramanga – Pamplona

El proyecto consta de 4 tramos de los cuales solo 2 pertenecen al AMB, el primer tramo es de 13, 5 km. Este tramo, está ubicado en el anillo vial oriental Floridablanca–Bucaramanga, teniendo como punto de partida el km 86+500 de la vía San gil-Bucaramanga y finaliza en el km 8+500 de la vía Bucaramanga-Pamplona. El tramo 2 que se divide en 2 sectores: El primero consta de 4,9 km que están ubicados en la zona suburbana de Bucaramanga (Sector de Morro rico) entre el km 3+400 y el km 8+300 y el segundo que consta de 10,1 km empezando en el km 8+300 y finalizando en el km 18+400 para una longitud total de 28,5 km que red vial que pertenecen al área metropolitana de Bucaramanga. [28]

Figura 6. *Ubicación proyecto 4.*

Nota: Invias (2016).

En la tabla 9 se muestran las dimensiones de la vía Bucaramanga - Pamplona, y se obtuvieron los valores de volumen y peso del RAP con la ayuda de la ecuación 1 y 2 respectivamente. El proyecto tiene una longitud total de 134,2 km, pero 48 km es un valor aproximado de la distancia que pertenece y está más cercana al AMB. Y el ancho es de 7,3 m debido a que es el ancho mínimo que debe tener una calzada de primer orden según el INVIAS, en este caso se supone esa medida debido a que entre las especificaciones del proyecto no se encuentra el ancho exacto de la vía.

Tabla 9. *Dimensiones proyecto 4*

Longitud (km)	Ancho (m)	Espesor (cm)	Volumen de RAP generado (m3)	Peso del RAP (t) (D=1,5 t/m3)
28,5	7,3	5	10402,5	15603,75

Teniendo en cuenta la información anterior, en un lapso de tiempo comprendido desde el año 2015 hasta el año 2020, se tiene un estimado hasta el momento de 6300 toneladas de pavimento asfáltico recuperado, y cuando se hayan culminado los dos proyectos que aún se encuentran en estado de construcción se tendrá una cantidad total estimada de 31482,75 toneladas de RAP, que podrían ser aprovechadas en la construcción y rehabilitación de nuevas carpetas asfálticas y así obtener una red vial que genere más confianza y seguridad a los usuarios.

4.2 Revisión Bibliográfica en la Base de Datos SCOPUS y la Norma INVIAS para la Recolección, Caracterización e Incorporación del RAP en la Preparación de Nuevas Mezclas Asfálticas.

La revisión literaria se llevó a cabo con ayuda de la base de datos bibliográfica SCOPUS. Además, se completó la búsqueda realizando una revisión normativa en el manual del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), con el fin de poder obtener un panorama tanto a nivel mundial como nacional sobre el proceso de reciclaje, caracterización e incorporación del pavimento asfáltico reciclado (RAP).

La ecuación de búsqueda fue generada por medio de conectores lógicos y con ayuda de palabras claves como: “RAP” reclaimed asphalt pavement, “RECYCLED”, “ASPHALT” y “PAVEMENT”. A continuación, en la tabla 10 se presentan los términos de inclusión y exclusión que se ingresaron en la ecuación de búsqueda generada.

Tabla 10. *Términos incluidos y excluidos de la ecuación de búsqueda.*

Aspecto	Tipo	Términos ingresados	Numero de resultados
Título/ palabras clave	Limitado a	"rap" AND "recycled" AND "asphalt" AND "pavement"	97
Año	Excluyente	2014-1981	
Sub área	Excluyente	Earth and Planetary Sciences, Energy, Social Sciences, Business, Management and Accounting, Computer Science, Psychology, Chemical Engineering, Chemistry, Agricultural and Biological Sciences, Decision Sciences, Medicine	
Idioma	Limitado a	Inglés - español	
País	Limitado a	Estados unidos, China, Canadá, Italia, Brasil, Colombia, Australia, Alemania, India	
Tipo de documento	Limitado a	Artículo, documento de sesión, revisión de conferencia, capítulo de libro	
Revista	Limitado a	"Construction and Building Materials", "Journal of Materials in Civil Engineering", "Road Materials and Pavement Design", "International Journal of Pavement Engineering", "International Journal of Pavement Research and Technology"	

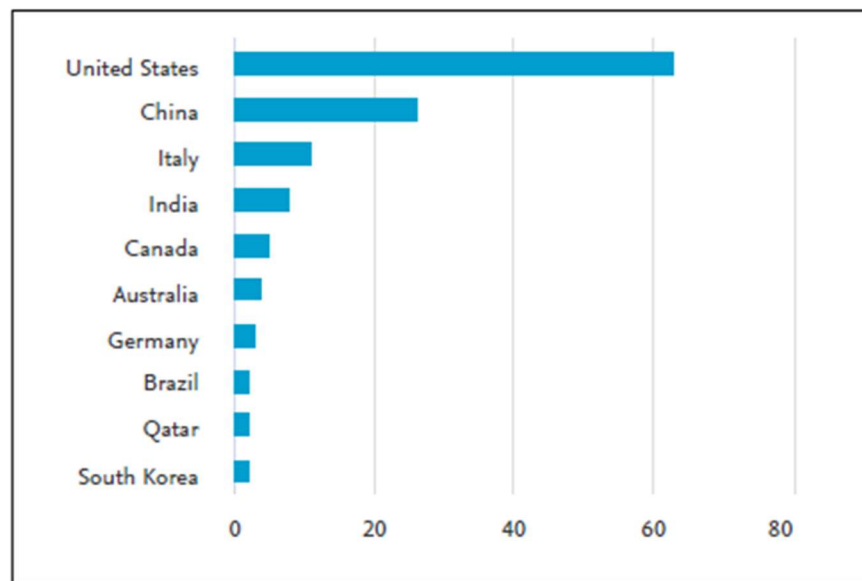
Aspecto	Tipo	Términos ingresados	Numero de resultados
Palabras clave	Excluyente	"Rejuvenecedor", "Cementos", "Concretos", "Agregados de concreto", "Aditivos", "Asfalto de concreto", " Cenizas volantes ", " Portland Cement ", "Agregados de concreto reciclado", "Mezclas de concreto", "Geo polímero", "Polímeros", "Concreto"	
Revista	Limitado a	"Construction and Building Materials", "Journal of Materials in Civil Engineering", "Road Materials and Pavement Design", "International Journal of Pavement Engineering", "International Journal of Pavement Research and Technology"	97
Palabras clave	Excluyente	"Rejuvenecedor", "Cementos", "Concretos", "Agregados de concreto", "Aditivos", "Asfalto de concreto", " Cenizas volantes ", " Portland Cement ", "Agregados de concreto reciclado", "Mezclas de concreto", "Geo polímero", "Polímeros", "Concreto"	

Como se puede observar en la tabla 10, a partir de los criterios que se tuvieron en cuenta para generar esta búsqueda se obtuvieron 97 documentos. Conforme a la búsqueda generada se realizó un análisis bibliométrico por medio de graficas generadas en la base de datos SCOPUS, las cuales proporcionaron un análisis más completo de los resultados obtenidos mediante la ecuación de búsqueda aplicada.

Con respecto al criterio de país se seleccionaron los países que presentaban más publicaciones de documentos por continente en torno al tema de reciclaje, caracterización e

incorporación del pavimento asfáltico recuperado. De acuerdo con esto, en la figura 7 se presenta gráficamente el número de publicaciones de cada territorio.

Figura 7. *Territorio vs No. De artículos publicados*



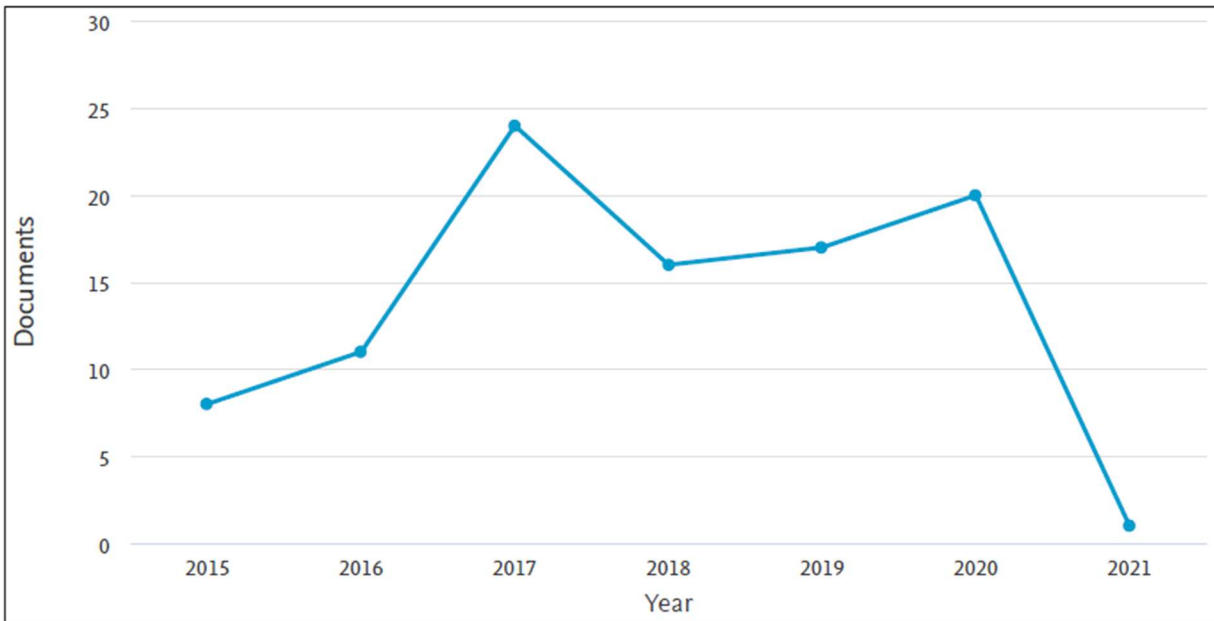
Nota: Scopus.

En la gráfica *territorio vs número de artículos publicados* se presentan 10 países los cuales fueron seleccionados porque como se nombraba anteriormente son los principales exponentes de la investigación por continente en torno al tema de interés. Haciendo un análisis gráfico, se observa que Estados Unidos ocupa el primer puesto con más de 60 publicaciones en torno al tema del reciclaje, caracterización e incorporación del RAP. Seguido de china con alrededor de 30 publicaciones. Finalmente se destaca, Brasil como país latinoamericano líder en la investigación del tema de interés.

Por otro lado, el criterio para la selección de revista se dio entre los años 2015-2020 con el fin de poder tener acceso a investigaciones más recientes con referencia al reciclaje, pretratamiento

e inclusión del RAP y de esta forma poder conocer las metodologías más actualizadas que se realizan a nivel global para llevar a cabo cada uno de estos procedimientos y verificar si dichos procesos, presentan similitud con los empleados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Figura 8. *Número de documentos publicados por año (2015-2020).*



Nota: Scopus

En la figura 8 se observa que en el año 2015 se registraron 8 artículos publicados lo cual es un número considerable y a su vez, en el año 2016 también se generaron alrededor de 11 publicaciones en torno al tema de estudio. Además, se puede observar que el pico máximo de documentos cargados en la base de datos SCOPUS se alcanzó en el año 2017 con un total de 24 documentos, posteriormente descendió a un número de 17 artículos durante los años 2018 y 2019 y finalmente el 2020 cerró con una cantidad de 20 documentos lo cual es positivo ya que, pese a las dificultades presentadas por la pandemia, no se presentó una disminución notoria en la

publicación de estos artículos. Cabe resaltar que es válido que se presente solo 1 documento publicado en el año 2021, ya que, solo han transcurrido 2 meses.

Posteriormente, se filtró la información obtenida realizando una revisión minuciosa de cada uno de los documentos y seleccionando manualmente los artículos con mayor relevancia en el tema estudiado para finalmente obtener una cantidad total de 37 documentos.

Finalmente, para completar la búsqueda literaria, fue necesario revisar la normativa del instituto nacional de vías, con el fin de poder encontrar las normas que hablan del proceso de reciclaje, pretratamiento, e inclusión de RAP en la fabricación de pavimento asfáltico.

Tabla 11. *Títulos del Invias seleccionados.*

No.	Año	Título	Referencia	Descripción
1	2013	“Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos”.	Artículo 400	Esta especificación presenta las disposiciones generales de imprimación, riegos de liga y de curado; tratamientos superficiales, y lechadas asfálticas; bases, capas de mezcla asfáltica, reciclados con productos bituminosos
2	2013	“Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)”	Artículo 450	Consiste en la elaboración, transporte, colocación y compactación, de una o más capas de mezcla asfáltica de gradación continua, preparada y colocada en caliente

No.	Año	Titulo	Referencia	Descripción
3	2013	“Fresado de pavimento asfáltico”.	Articulo 460	Consiste en el fresado en frío parcial o total de las capas asfálticas de un pavimento
4	2013	“Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente”.	Articulo 462	Consiste en el acopio y utilización de materiales disgregados de capas asfálticas de pavimentos en servicio o excedentes de una mezcla asfáltica no utilizada
5	2013	“Penetración de los materiales bituminosos”.	INV E-706	Determinación de la consistencia de los materiales bituminosos sólidos en los cuales el único o principal componente es un asfalto
6	2013	“Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional”.	INV E-717	Procedimiento a seguir para determinar la viscosidad de un ligante asfáltico entre 60-200 °C mediante un viscosímetro rotacional
7	2013	“Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos”.	INV E-732	Métodos para la determinación cuantitativa del asfalto en mezclas asfálticas en caliente y en muestras tomadas de pavimentos
8	2013	“Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas”.	INV E-782	Procedimiento para determinar la granulometría de agregados gruesos y finos recuperados de las mezclas asfálticas

No.	Año	Titulo	Referencia	Descripción
9	2013	"Determinación de la proporción y del grado del agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado"	INV E-812	Procedimiento para determinar el porcentaje y el grado del agente reciclado requerido para la elaboración de mezclas de concreto asfáltico en planta y en caliente

En la tabla 11 se pueden observar algunos títulos seleccionados del manual del instituto nacional de vías (INVIAS), los artículos y las normativas tienen fechas del 2013, debido a que es la versión más reciente de este manual de carreteras. En cada uno de estos documentos, se presenta una breve descripción del ensayo/trabajo, materiales necesarios para la realización del trabajo y el procedimiento junto con los títulos antecesores que se deben tener en cuenta para la realización del trabajo.

4.3 Identificación de las Metodologías Apropriadas para la Recolección y Caracterización del RAP

Una vez se obtuvo la información mediante la ecuación de búsqueda generada, se procedió a tabular la información en archivos de Excel con el fin de poder tener la información de una forma más ordenada y a su vez poder identificar los datos que contenía cada uno de los artículos analizados.

La organización de las tablas de Excel para el desarrollo de este ítem se dividió en 2 grupos.

4.3.1 Recolección y Almacenamiento del RAP

Para tabular la información acerca de recolección del RAP se tuvieron en cuenta parámetros como: El lugar de recolección, método de recolección, tamaño de molienda, y porcentaje de RAP presente en la muestra reciclada.

En 10 de los 37 artículos obtenidos se obtuvo información acerca de la metodología aplicada para el reciclaje de pavimento asfáltico. De los cuales 4 investigaciones realizaron su proceso de reciclaje en planta y los 6 restantes efectuaron el proceso de obtención por medio de la técnica de fresado. Dichos artículos se presentan a continuación:

Tabla 12. *Método de reciclaje del RAP.*

Autores	Titulo	Método de recolección	Tamaño de molienda (mm)	% asfalto en el RAP	Lugar de recolección
[29]	Evaluating Recycling Efficiency of Plant-Asphalt Mixtures Containing RAP/RAS	Planta	9,5-19	3,6-6	Tennessee (USA)
[30]	Application and validation of the cohesion test to characterise reclaimed asphalt pavement	Fresado	10 - 30	3,6 - 5,2	Parma (Italia) y Montreal (Canadá)
[31]	Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling	Planta	13-20	4,45-5,16	China
[32]	Hydraulic and environmental impacts of using recycled asphalt pavement on highway shoulders	Fresado	N.R.	N.R.	Maryland (USA)

Autores	Título	Método de recolección	Tamaño de molienda (mm)	% asfalto en el RAP	Lugar de recolección
[33]	Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage	Planta	0,075-19	3,45- 6,93	China
[34]	Effects of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures	Fresado	0,075-16	N.R.	Provincia de Shaanxi (China)
[35]	Relationship between Chemistry and Mechanical Properties of RAP Binder Blends	Planta	N.R.	3,60	Kulpi (Bengala Occidental, India).
[36]	Nanoscale and Macroscale Characterization of the Influence of RAP and RAS on Cracking Resistance of Asphalt Mixes	Fresado	19 mm	N.R.	Interestatal 270 en Columbus, Ohio (USA)
[37]	Properties of Mixtures with High Percentages of Reclaimed SBS–Modified Asphalt Pavement	Fresado	N.R.	N.R.	Beijing (China)
[38]	New method to estimate the “re-activated” binder amount in recycled hot-mix asphalt	Fresado	N.R.	N.R.	Red italiana de autopista

Nota: N.R: No reportan.

En la tabla 12 se observa que de acuerdo a los documentos seleccionados hay dos métodos de recolección. El fresado y planta, el fresado se refiere al proceso que se realiza *in situ*, con la ayuda de una fresadora donde se levanta la carpeta asfáltica y el tamaño de molienda obtenido no supera 1 pulgada o los 2,54 cm de diámetro [3]. Y el reciclaje en planta consiste en la obtención

de materiales disgregados de capas asfálticas de pavimento en servicio o las muestras que se recolectan son sobrantes de producción o mezclas que no son utilizadas porque no presentan las condiciones estándares de fabricación para poder realizar su comercialización [6]

Además, los resultados obtenidos sobre los países que más generan conocimiento en torno al tema de interés son congruentes con los datos mencionados en el ítem 2.1, debido a que países como Usa y Canadá, son pioneros en la implementación de la técnica de reciclaje asfáltico, sin dejar de lado a China que también ha presentado gran número de artículos publicados en torno al reciclaje y pretratamiento del pavimento asfáltico reciclado (RAP).

Por otro lado, de acuerdo con el INVIAS la norma que se tuvo en cuenta para la recolección y el acopio del material reciclado fue la INV E 462-13 “Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente”. A continuación, se presente el procedimiento que se debe llevar a cabo para el reciclaje y almacenamiento del pavimento asfáltico:

Tabla 13. *Parámetros de reciclaje INVIAS.*

Ejecución del trabajo	
Reciclaje del Rap	El material disgregado por reciclar podrá provenir de la misma obra o encontrarse almacenado por haber sido extraído en otro lugar
	1. Los acopios del material para reciclar deberán estar cubiertos y el tiempo de almacenamiento se deberá reducir al mínimo posible para evitar que absorban una cantidad de agua excesiva
Acopio del material por reciclar	2. En el momento de descargar el pavimento reciclado se deberán descartar los pavimentos asfálticos reciclados que, a simple vista, presenten contaminaciones.
	3. En las regiones donde la temperatura ambiente exceda de treinta grados Celsius (30° C), los acopios del material por reciclar no podrán tener una altura mayor de tres metros (3 m) para evitar que el material se aglomere

Ejecución del trabajo	
Acopio del material por reciclar	4. Clasificar y acopiar por separado las provenientes de mezclas de los tipos denso (D), semidenso (S) y grueso (G) 1. será necesario garantizar que todo el material reciclado, pase por el tamiz de 25 mm (1”) de abertura.
Tratamiento del material por reciclar	2. Se deberá proceder, también, a la eliminación de cualquier contaminante y, en especial, se usará un procedimiento adecuado para la detección y el retiro de elementos metálicos. 3. Posteriormente, el material deberá ser mezclado hasta obtener un producto homogéneo y sin segregaciones.

Como se observa en la tabla 13, de acuerdo con las especificaciones que propone el instituto nacional de vías (INVIAS) para el reciclaje y acopio del material, los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de recuperar y almacenar es que este se almacene en lugares secos y el tiempo de almacenamiento sea el menor posible, que el tamaño de molienda no supere los 25 mm de diámetro y que el lote o la muestra no tenga presencia de contaminantes.

Para finalizar, se realizó una comparación entre la metodología realizada en los artículos consultados y el procedimiento que propone el Invias para el reciclaje y el almacenamiento del pavimento asfáltico. A continuación, se presenta el análisis comparativo.

Tabla 14. *Análisis metodológico comparativo.*

Aspecto	Artículos analizados	INVIAS	Condición
Método de recolección	En los resultados obtenidos se observa que en artículos analizados y en el INVIAS, la muestra de RAP reciclada puede provenir tanto del fresado (<i>in situ</i>), como del sobrante de algún lote producido que nunca fue utilizado.		Cumple
Aspecto	Artículos analizados	INVIAS	Condición

Tamaño de molienda	≤ 20 mm	$< 25,4$ mm o 1 pulgada.	Cumple
% de asfalto en el RAP	entre 3,6 y 6,93%	En la norma de vías no se especifica un valor recomendable para el porcentaje de asfalto presente en el RAP, solo menciona que, a la hora de analizar un lote, la variación de los resultados no debe ser superior a 0,5%	Cumple

En la tabla 14 se observa que el procedimiento llevado a cabo a nivel global para la recuperación y almacenamiento del RAP previo a su incorporación en la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente, sí es congruente con el método propuesto por el Instituto Nacional de Vías para realizar dicho protocolo.

Por otro lado, posterior a la recolección y almacenamiento del RAP es necesario caracterizar la muestra para observar el estado en el que se encuentra y verificar si cumple con los parámetros mínimos para efectuar su reutilización. A continuación, se presenta la metodología adecuada para la caracterización del RAP:

4.3.2 Caracterización del RAP

De acuerdo con la información obtenida mediante la ecuación de búsqueda generada, fue necesario tabular en formatos de Excel, los resultados obtenidos con respecto al método de caracterización del pavimento asfáltico a nivel global, con el fin de conocer los diferentes ensayos propuestos por cada una de estas investigaciones.

De los 37 documentos analizados solo 10 presentaron ensayos para la caracterización del RAP. A continuación, se presentan los ensayos más empleados por el caso del estudio para el análisis característico del RAP.

-P: penetración

-V: viscosidad

-E.C.A: Extracción cuantitativa del asfalto

-E.M: Ensayo Marshall

-P.A: Punto de ablandamiento

Tabla 15. *Método global para la caracterización del RAP*

Autores	Título	P	V	E.C.A	E. M	P.A
[31]	Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling			X		
[39]	Influence of RAP Dispersion Characteristics on Mixture Performance				X	
[33]	Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage	X	X	X	X	X
[34]	Effects of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures	X	X	X		X
[35]	Relationship between Chemistry and Mechanical Properties of RAP Binder Blends	X	X			X

Autores	Título	P	V	E.C.A	E. M	P.A
[37]	Properties of Mixtures with High Percentages of Reclaimed SBS–Modified Asphalt Pavement	X	X		X	
[40]	Nanoscale and Macroscale Characterization of the Influence of RAP and RAS on Cracking Resistance of Asphalt Mixes	X		X		
[41]	RAP Binder Influences on the Rheological Characteristics of Foamed Warm-Mix Recycled Asphalt	X				X
[42]	Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP	X		X		X
[43]	Laboratory and Field Evaluation of HMA with High Contents of Recycled Asphalt Pavement			X		

En la tabla 15 se observan los ensayos seleccionados que fueron realizados por el estudio de caso para la caracterización del RAP previo a su incorporación en la preparación de nuevas mezclas asfálticas. Cabe resaltar que solo se mencionaron estos ensayos de medición de las características del RAP, debido a que, como se menciona anteriormente fueron los experimentos que se repitieron con más frecuencia a la hora de analizar la información tabulada.

Además, en la tabla 16, se muestran el número de veces que se repitió cada ensayo en los artículos seleccionados para la etapa de caracterización y a su vez se muestra la norma del INVIAS donde se especifica el proceso que se debe llevar a cabo para el cumplimiento de cada uno de estos procedimientos.

Tabla 16. *Clasificación de los ensayos aplicados*

Siglas	Ensayo aplicado	Norma INVIAS	Frecuencia
P	Penetración	INV E-706-13	7/10
V	Viscosidad	INV E 717-13	4/10
E.C.A	Extracción cuantitativa del asfalto	INV E-732-13	6/10
E.M	Ensayo Marshall	INV E 748-13	3/10
P.A	Punto de ablandamiento	INV E-712-13	5/10

Por otro lado, teniendo en cuenta lo que se menciona en el numeral 462.4.4 del artículo 462-13, los ensayos que recomienda el instituto nacional de vías (INVIAS) para la caracterización del RAP son los siguientes:

1. Extracción cuantitativa del asfalto.
2. Análisis granulométrico del agregado.
3. Penetración.
4. Punto de ablandamiento del ligante recuperado.

A continuación, en la tabla 17 la cual es una adaptación de la tabla 462-1 de la norma INV E 462-13 se presentan los resultados que se deben tener en cuenta una vez se apliquen cada uno de los ensayos nombrados anteriormente.

Tabla 17. *Tolerancias en el material por reciclar para considerarlo homogéneo.*

Característica	Tolerancia respecto de la masa total del material por reciclar
Porcentaje que pasa tamiz de 2 mm y mayores (No. 10 y mayores)	± 5
Porcentaje que pasa tamices de 425 y 180 μm (No. 40 y No. 80)	± 5
Porcentaje que pasa tamiz de 75 μm (No. 200)	± 2
Contenido de asfalto (%)	$\pm 0,5$
Caracterización del asfalto recuperado	
Penetración (0,1 mm)	± 5
Punto de ablandamiento ($^{\circ}\text{C}$)	± 3

Nota: Fuente INVIAS

En la tabla 17 se muestran los valores mínimos que se deben tener en cuenta para considerar que un lote es homogéneo y que el RAP obtenido si presenta las condiciones mínimas adecuadas para su reutilización. Para cada uno de los ensayos, el resultado de la muestra analizada no debe variar ni por encima ni por debajo de la cantidad explícita en la tabla, de acuerdo con los valores promedio encontrados en cada lote experimentado.

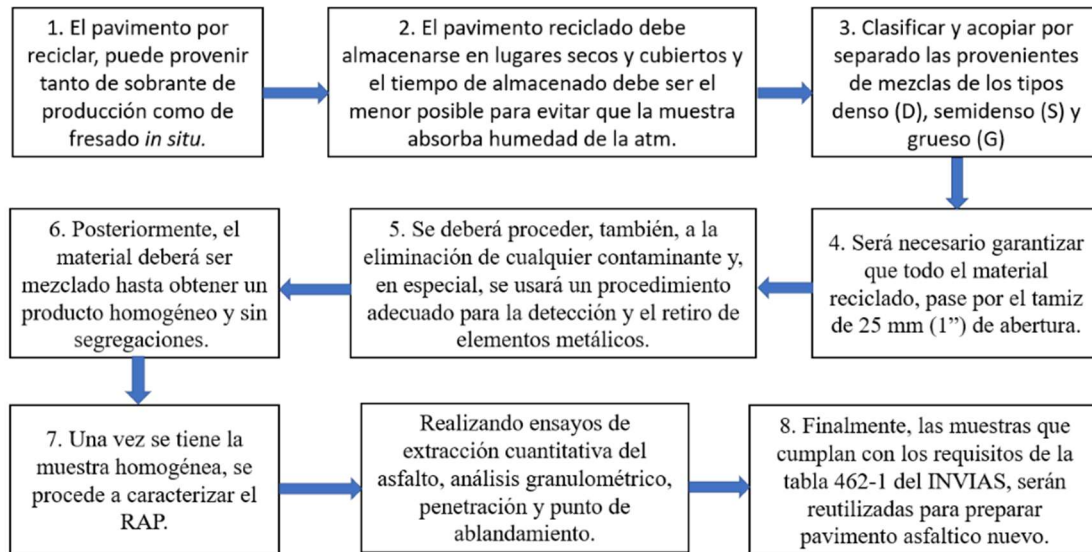
Finalmente, se realizó un cuadro comparativo para analizar los resultados entre el método de caracterización a nivel global encontrado en los artículos analizados y los ensayos mínimos recomendados por el INVIAS para la caracterización del pavimento asfáltico recuperado. A continuación, en la tabla 18 se presenta dicha información.

Tabla 18. *Cuadro comparativo, método de caracterización del RAP.*

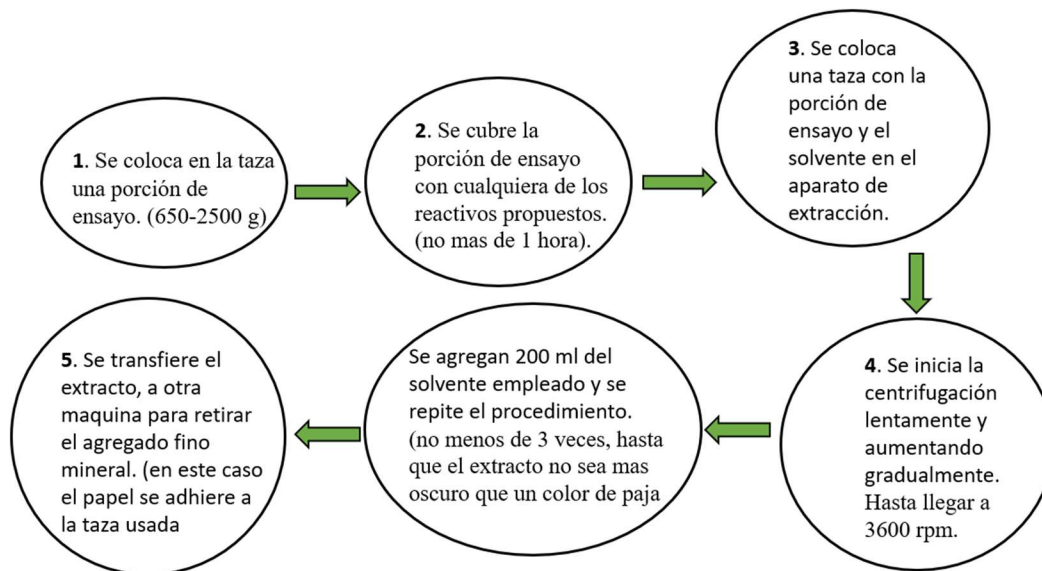
Ensayo aplicado	Artículos analizados	Recomendación INVIAS Art 462-13
Penetración	SI	SI
Viscosidad	SI	NO*
Extracción cuantitativa del asfalto	SI	SI
Ensayo Marshall	SI	SI
Punto de ablandamiento	SI	SI

Nota: *El ensayo de viscosidad sí se realiza, pero se le aplica al asfalto recuperado, y se tiene en cuenta por el INVIAS en la norma INV E 812-13 en la cual se describe el proceso de incorporación del RAP, debido a que es necesario conocer el estado del asfalto del pavimento reciclado, para determinar el grado del ligante asfáltico nuevo. Fuente propia

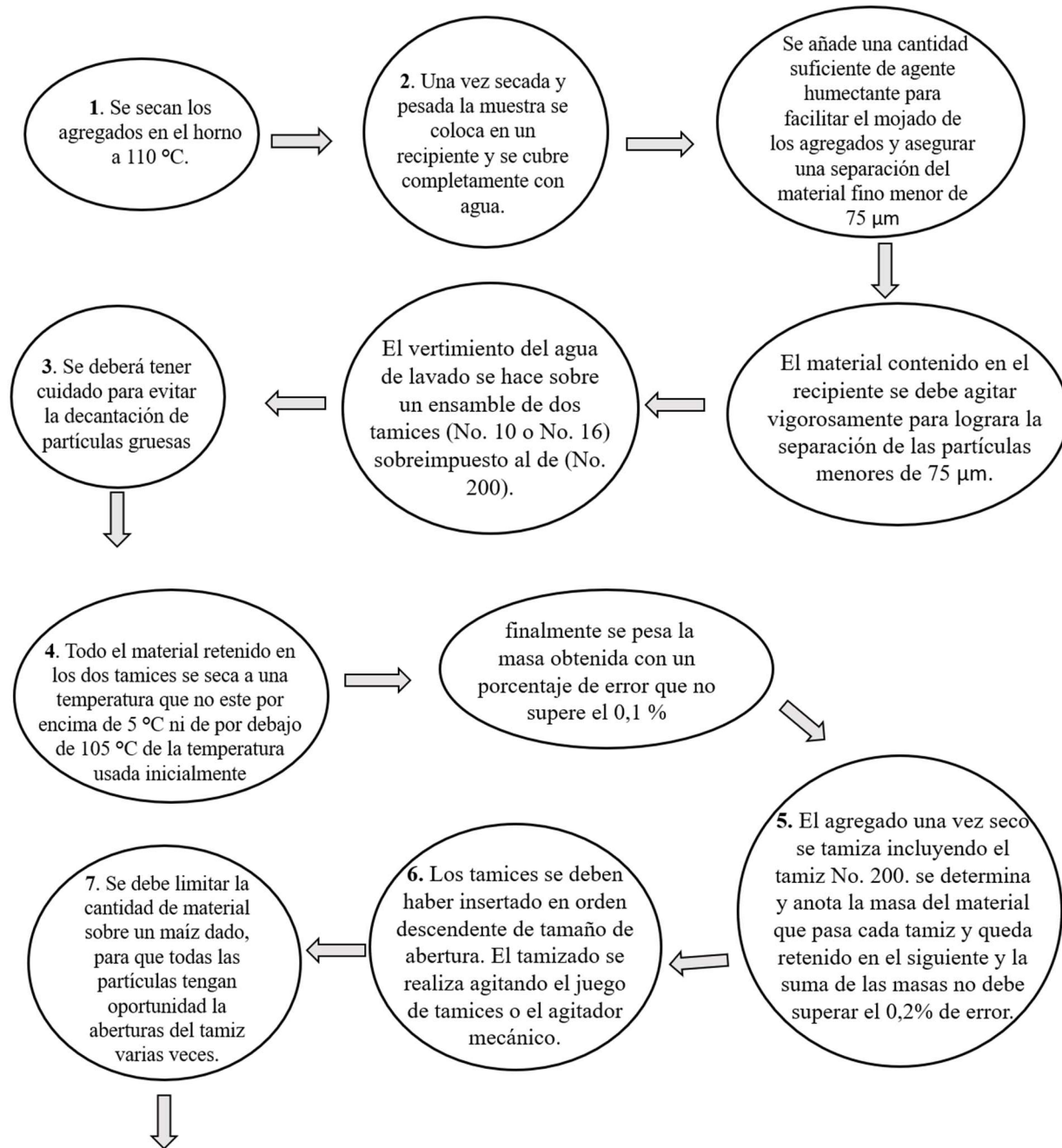
Haciendo un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los ensayos realizados tanto por el estudio de caso, como por el INVIAS se puede observar que realmente sí se presenta una similitud entre las metodologías aplicadas en cada resultado analizado. Y de acuerdo con esto, a continuación, en las figuras 9 a 13 se presenta la metodología apropiada para el proceso de reciclaje, acopio y caracterización del RAP.

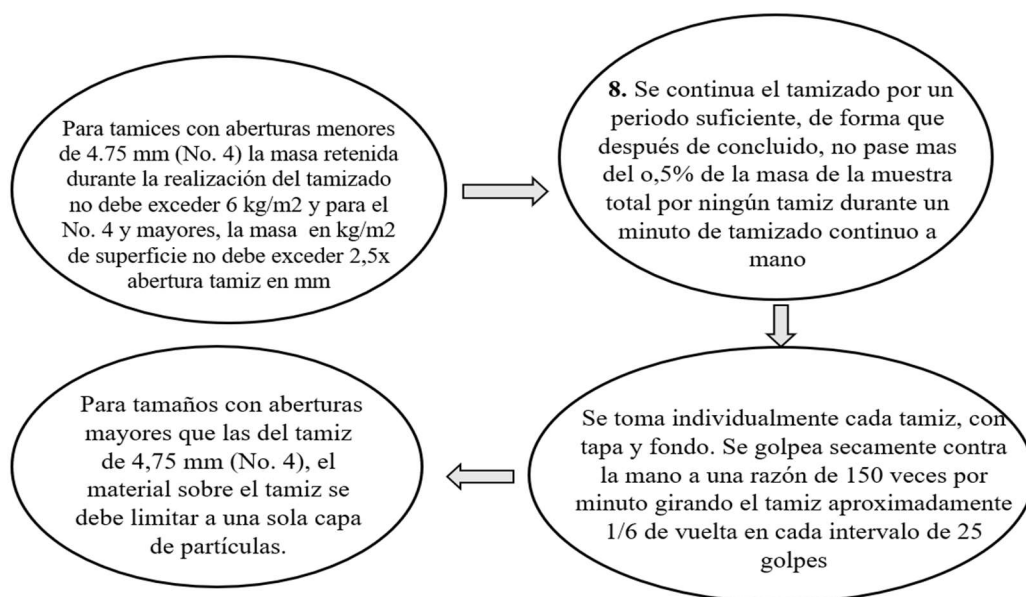
Figura 9. Metodología para el reciclaje y caracterización del RAP.

Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Figura 10. Metodología para la extracción cuantitativa del asfalto.

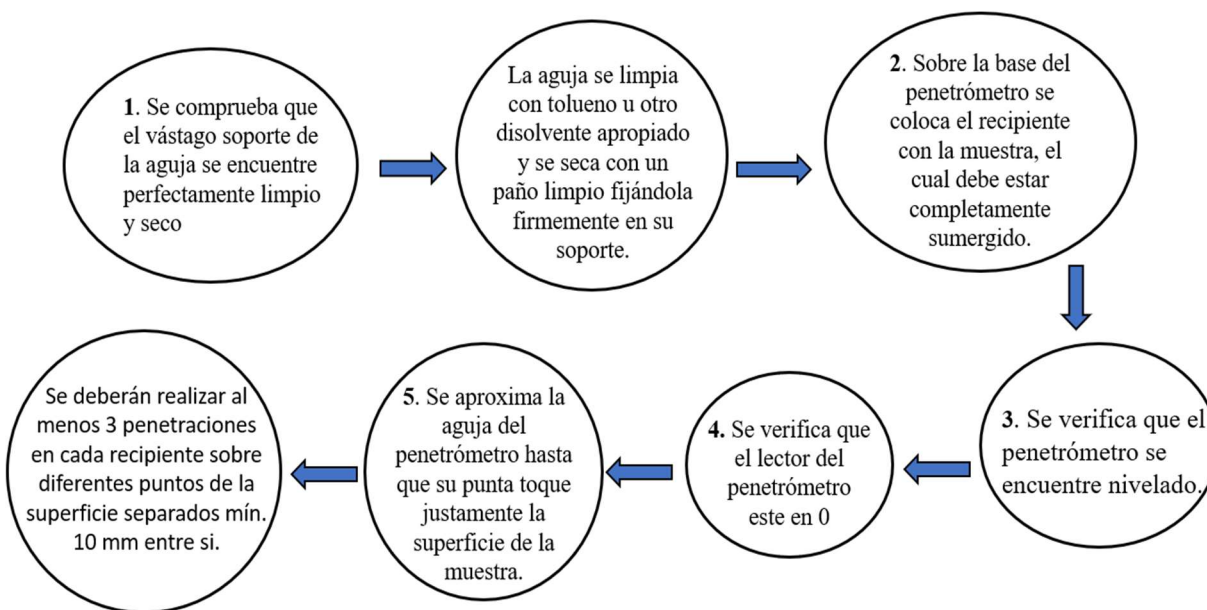
Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Figura 11. *Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.*

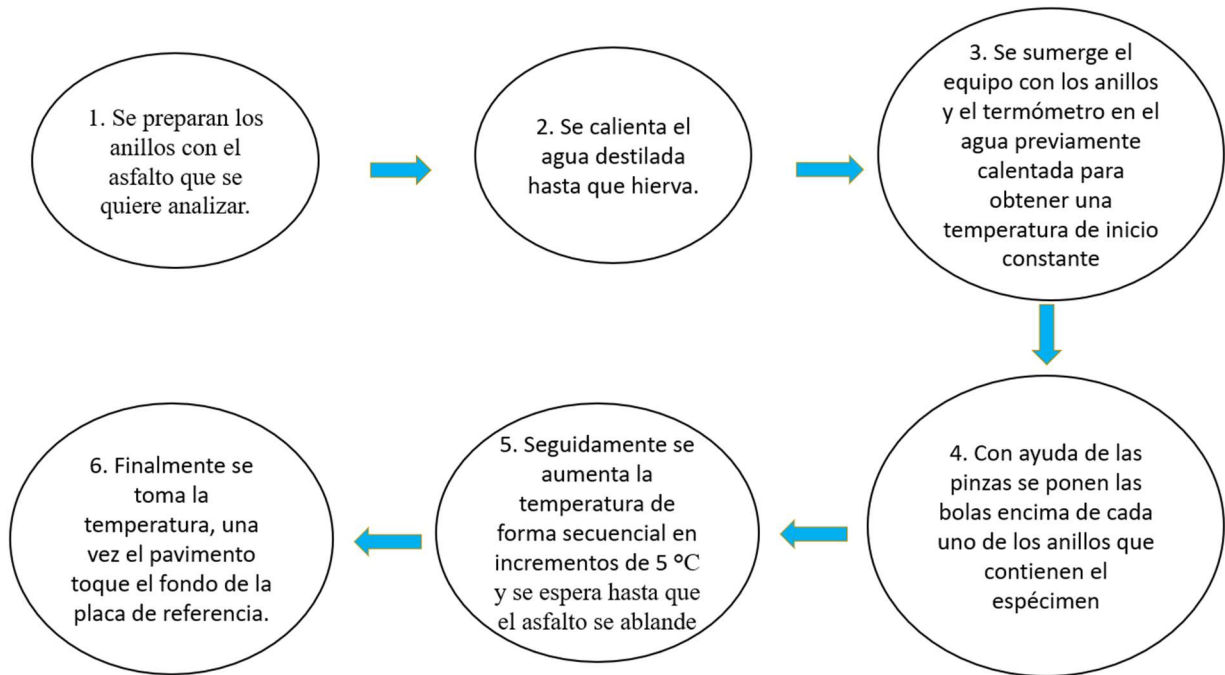


Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Figura 12. Metodología para penetración del pavimento asfáltico extraído.



Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Figura 13. Metodología para determinar el punto de ablandamiento del asfalto.

Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

4.4 Incorporación del RAP en la Preparación de Nuevas Mezclas Asfálticas

Para tabular la información del método de incorporación del pavimento asfáltico recuperado en la preparación de nuevas mezclas asfálticas a nivel global se tuvieron en cuenta parámetros como: El % de RAP incorporado en la mezcla, el tamaño de partícula del agregado virgen, % óptimo de asfalto para el balance de la mezcla y la temperatura de la mezcla.

En 26 de los 37 artículos seleccionados se presentó el proceso de incorporación del RAP en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas. A continuación, se presentan los datos obtenidos con la revisión literaria realizada:

Tabla 19. *Metodología para la incorporación del RAP.*

Autores	Título	% RAP incorporado	Tamaño de partícula Virgen (mm)	% optimo asfalto	Temperatura de la mezcla (°C)
[29]	Evaluating Recycling Efficiency of Plant-Asphalt Mixtures Containing RAP/RAS	10 - 35	N.R	4,5-6 %	150-170
[30]	Application and validation of the cohesion test to characterise reclaimed asphalt pavement	100	N.R	N.R	70-140
[39]	Influence of RAP Dispersion Characteristics on Mixture Performance	15-35	≥2,36	3,9- 4,2%	N.R
[33]	Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage	60	0,075-26,5	4,70%	N.R
[35]	Relationship between Chemistry and Mechanical Properties of RAP Binder Blends	0-45	N.R	N.R	Ambiente
[44]	A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment	40	N.R	2,4-4,5%	N.R
[40]	Nanoscale and Macroscale Characterization of the Influence of RAP and RAS on Cracking Resistance of Asphalt Mixes	30	N.R	N.R	153

Autores	Título	% RAP incorporado	Tamaño de partícula Virgen (mm)	% optimo asfalto	Temperatura de la mezcla (°C)
[45]	Chemical and rheological evaluation of asphalts incorporating RAP/RAS binders and warm-mix technologies in relation to crack resistance	20-40	N.R	N.R	N.R
[46]	Performance of asphalt mixtures with high recycled materials content and recycling agents	10	N.R	4,90%	138
[37]	Properties of Mixtures with High Percentages of Reclaimed SBS–Modified Asphalt Pavement	0-70	N.R	N.R	N.R
[47]	Performance evaluation of plant-produced warm mix asphalts containing RAP and RAS	12	N.R	4,9-6,6%	141-163
[48]	Use of performance-based testing for high RAP mix design and production monitoring	24,5-36,7	N.R	5,5-5,6%	N.R
[45]	Assessing the effects of RAP, RAS, and warm mix technologies on fatigue performance of asphalt mixtures and pavements using viscoelastic continuum damage approach	20-40	N.R	4,6-5,08%	N.R
[49]	Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents	10-28	N.R	4,9-5,8%	N.R
[50]	RAP Binder Influences on the Rheological Characteristics of Foamed Warm-Mix Recycled Asphalt	20-80	N.R	N.R	145

Autores	Título	% RAP incorporado	Tamaño de partícula Virgen (mm)	% optimo asfalto	Temperatura de la mezcla (°C)
[51]	Asphalt mixtures containing RAS and/or RAP: relationships amongst binder composition analysis and mixture intermediate temperature cracking performance	15	12,5 mm	3-5%	N.R
[51]	Laboratory Performance of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles, Reclaimed Asphalt Pavement, and Recycling Agents	15	12,5	5,50%	N.R
[42]	Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP	75-100	N.R	2-4%	N.R
[52]	Comparison of laboratory performance of asphalt mixes containing different proportions of RAS and RAP	5-30	12,5	4,3-5,3%	N.R
[53]	Proposing a solvent-free approach to evaluate the properties of blended binders in asphalt mixes containing high quantities of reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles	0-40	N.R	4,2-8,6%	N.R
[54]	Laboratory Evaluation of Workability and Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavements	0-40	12,5	5,8-6%	N.R

Autores	Título	% RAP incorporado	Tamaño de partícula Virgen (mm)	% optimo asfalto	Temperatura de la mezcla (°C)
[55]	Low temperature rheological properties of asphalt mixtures containing different recycled asphalt materials	0-30	19	N.R	N.R
[55]	Low-temperature performance of recycled asphalt mixtures under static and oscillatory loading	0-40	12,5	5,40%	N.R
[56]	3D Analysis and Modelling of Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) on Asphalt Mixes with RAP and Roofing Shingles	0-25%	12,5	5,18%	N.R
[57]	Laboratory and Field Evaluation of HMA with High Contents of Recycled Asphalt Pavement	30-39,2%	N.R	4,3-4,7%	N.R
[38]	New method to estimate the “re-activated” binder amount in recycled hot-mix asphalt	25-40%	N.R	4,5-4,8%	N.R

Nota: N.R: No reportan.

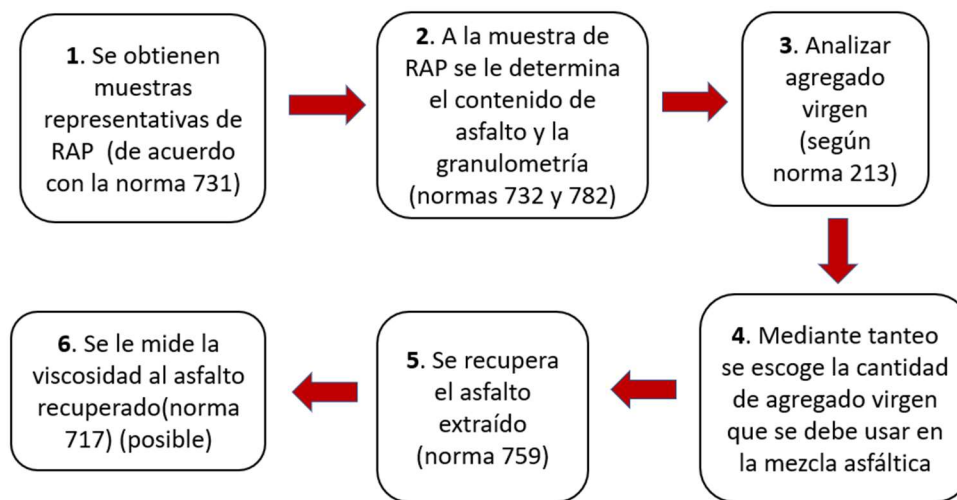
En la tabla 19 se observa que, de acuerdo a la metodología obtenida mediante la ecuación de búsqueda generada, el porcentaje de incorporación del RAP en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas varía dependiendo el país y la normativa aplicada. Por ejemplo, en países como Canadá y la mayoría de los Estados Unidos, el porcentaje máximo de inclusión del RAP es de 70 y 50% respectivamente [18]. A diferencia de Colombia, que de acuerdo a la norma [13] el porcentaje

máximo permitido es de 40% teniendo en cuenta que la varianza porcentual es dada por las características en las que se encuentren los materiales desgastados.

Es por esto, que la gran mayoría de estas investigaciones se hace con el fin de ver el comportamiento de las mezclas asfálticas cuando se agrega un porcentaje mayor al que se recomienda en la normativa que rige en su país, y en muchos casos esto es acertado, debido a que si el pavimento que se recicla se encuentra en perfectas condiciones y no está en una etapa de envejecimiento tan alta el porcentaje a incluir puede ser mayor al recomendado por las normas de diseño de pavimentos actuales.

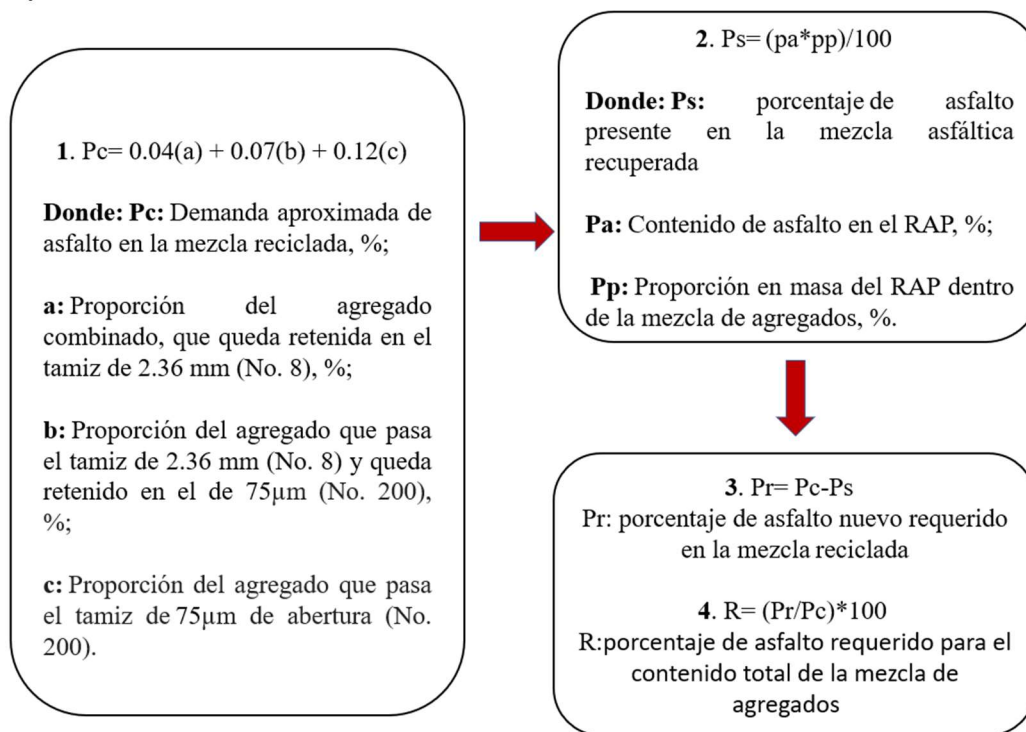
En segundo lugar, se presenta el procedimiento que propone el INVIAS para el reciclaje y la inclusión de pavimento asfáltico reciclado. Cabe resaltar que todo este procedimiento se describe en la norma INV E 812-13 “Determinación de la proporción del grado del agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado” y el proceso para la determinación del porcentaje exacto de asfalto y agregado virgen debe hacerse por medio del ensayo Marshall que se describe en la norma INV E-748-13 “Estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall”. A continuación, se presenta en la figura 14 y 16 una adaptación de este procedimiento donde se presentan los aspectos más importantes a tener en cuenta:

Figura 14. Procedimiento para caracterizar el RAP previo a su incorporación en la preparación de nuevas mezclas asfálticas.

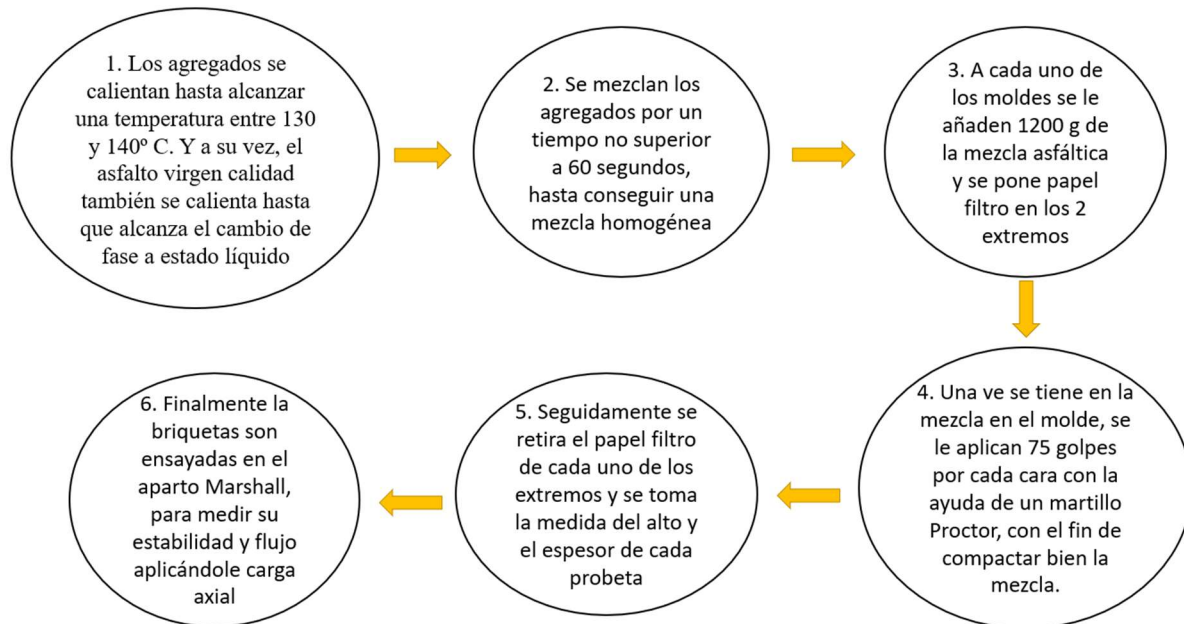


Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Figura 15. Fórmulas para hallar el porcentaje de RAP y agregado virgen necesarios para la mezcla asfáltica.



Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Figura 16. *Procedimiento para la aplicación del ensayo de Marshall.*

Nota: Fuente propia, adaptación INVIAS (2013).

Por último, a continuación, se presenta un cuadro comparativo para realizar un análisis entre el proceso de incorporación del RAP descrito en los artículos analizados y el procedimiento que se describe en el manual del instituto nacional de vías con el fin de verificar si el desarrollo de estos métodos presenta congruencia.

Tabla 20. *Análisis comparativo del método de incorporación del RAP.*

Aspecto	Artículos analizados	INVIAS	Condición	Observación
% de RAP incorporado	0-100	40	Cumple	El porcentaje varía dependiendo de la normativa que sea consultada y el estado en el que esté el pavimento por reciclar
Tamaño de partícula virgen (mm)	0,075-26,5	0,075- 25,4	Cumple	El diámetro es similar, al exigido por la norma colombiana
% Óptimo de asfalto	2,4-6	4,0-6,0	Cumple	En todos los artículos analizados se presenta un máximo de 6%, excepto uno que llegó hasta 8,4%
Temperatura de mezcla (°C)	70-170	140-160	Cumple	La mayoría de los artículos analizados presentan una temperatura promedio de 150 °C lo cual es similar a la temperatura que recomienda el INVIAS

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la base de datos del INVIAS, sí se cuenta con disponibilidad de RAP en el área metropolitana de Bucaramanga para la preparación de nuevas mezclas asfálticas y, además, el procedimiento descrito en el manual de vías presenta similitud con los procesos de reciclaje e inclusión de otros países como Estados Unidos y Canadá que han tenido buenas experiencias con el uso de pavimento reciclado para la rehabilitación y construcción de sus carreteras.

De acuerdo con la información suministrada actualmente de los proyectos que han sido construidos y los que se encuentran en etapa de ejecución por el INVIAS, se podría contar con un

peso total estimado de 31482,75 toneladas de pavimento asfáltico reciclado que podría ser reutilizado en la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente.

De acuerdo con los artículos analizados y la revisión normativa del instituto nacional de vías (INVIAS), el proceso de reciclaje se puede realizar tanto in situ por medio de la técnica de fresado como en planta de producción de mezclas asfálticas, como se describe en el artículo 460 y 462 del INVIAS respectivamente, garantizando siempre que el tamaño de molienda máximo sea de 25,4 mm de diámetro y el tiempo de almacenamiento el menor posible, para finalmente realizarle una caracterización fisicoquímica por medio de ensayos tales como: extracción cuantitativa del asfalto, análisis granulométrico del agregado, penetración, y punto de ablandamiento del ligante recuperado que se rigen por las normas INV E-732, 782, 706 y 712, respectivamente.

El método más adecuado para la incorporación del RAP es la implementación del método Marshall para la elaboración del pavimento, descrito en la norma INV E-748-13, debido a que este ensayo permite la variación de los porcentajes de cada uno de los componentes que hacen parte de la mezcla asfáltica con el fin de encontrar los porcentajes óptimos de asfalto y de agregado virgen, para garantizar una mezcla asfáltica adecuada para la construcción y rehabilitación vial.

Referencias

- [1] L. García, Diagnóstico de la infraestructura del transporte en Colombia., Artículo Electrónico, 2011.
- [2] R. E. Mineros y J. A. Rodrigues Molina, evaluacion y rehabilitacion de pavimentos flexibles por el metodo del reciclaje, 2004.
- [3] Invias, Capítulo 4 ART. 460 Fresado de pavimento asfáltico, 2013.
- [4] T. D. Larson, Concretos de cementos Portland y asfálticos. 2 ed., México: Compañía Editorial continental, 1977.
- [5] A. Institute., The Asphalt Handbook, Manual Series., Washington, D.C., 1989.
- [6] Invias, Capítulo 4 Art. 462 Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente. Numeral 462.4.2, 2013.
- [7] Invias, Norma INV E-732 Extraccion cuantitativa del asfalto, 2013.
- [8] Invias, Norma INV E-782 Analisis granulometrico de los agregados extraidos de mezclas asfálticas, 2013.
- [9] Invias, Norma INV E-706 Penetracion de los materiales bituminosos, 2013.
- [10] Invias, Norma INV E-724 Indice de penetracion de los cementos asfálticos, 2013.
- [11] Invias, Norma INV E-712 Punto de ablandamiento del ligante recuperado, 2013.
- [12] Invias, Norma INV E-732 Determinacion de la viscosidad del asfalto empleando viscosimetro rotacional, 2013.
- [13] Invias, Norma INV E-812 Determiacion de la proporcion y del grado de agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado, 2013.

- [14] K. Anderson, *Advocates y Aggregates*, TR news, Vol. 184,, Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, N.W., pp. 8-13, 1996.
- [15] Washington State Department of Transportation, 1991 Tour of modified binder pavements, 1992.
- [16] Highway Research Center, «"User guidelines} for waste and by products in pavement construction" Turner Fairbank Highway Research Center Federal Highway Administration,» [En línea]. Available: www.fhwa.dot.gov.
- [17] J. Alarcón Ibarra, *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta.*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- [18] J. Emery, *Asphalt Concrete Recycling in Canada* Transportation Research Record 1472,, Washington, D.C. : Transportation Research Board, National Research Council, N.W., pp. 38-46, 1993.
- [19] M. Zaumanis, R. Mallick y R. Frank, 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis., *Resour. Conserv. Recycl.* 92, 230e245, 2014a.
- [20] A. Behnood y M. Modiri Gharehveran, Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *Eur. Polym. J.* 112, 766e791, 2019.
- [21] Q. Aurangzeb, I. Al-Qadi, H. Ozer y R. Yang, Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content., *Resour. Conserv. Recycl.* 83, 77e86, 2014.
- [22] T. Baghaee Moghaddam y H. Baaj, The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review., *Constr. Build. Mater.* 114, 805e816, 2016.
- [23] Invias, «Especificación particular mezcla asfáltica natural. Art. 442P. Mezcla asfáltica natural,» sf. [En línea]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y->

- documentos/documentos-tecnicos/7032-mezcla-asfaltica-natural-articulo-442p-17/file.
- [24] Itomakla, «Convertidor de toneladas a metros cúbicos (t a m³),» sf. [En línea]. Available: <http://itomakla.com/descubra-mas/convertidor-de-toneladas-a-metros-cubicos-t-a-m3/>.
- [25] Área Metropolitana de Bucaramanga - AMB, «Prolongación de la paralela oriental de la autopista bucaramanga-floridablanca, desde tcc hasta molinos altos,» 7 octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.amb.gov.co/prolongacion-de-la-paralela-oriental-de-la-autopista-bucaramanga-floridablanca-desde-tcc-hasta-molinos-altos/>.
- [26] Ministerio de Transporte, «Vías S.A. construirá retornos viales en Girón-Floridablanca,» 26 10 2015. [En línea]. Available: <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/4559/vias-sa-construira-retornos-viales-en-giron-floridablanca/>.
- [27] Invias, «Manual de Diseño Geométrico de Vías,» 2013.
- [28] Agencia Nacional de Infraestructura, «Autopista Bucaramanga- Pamplona - Proyecto 4G(Cuarta Generación),» 10 nov. 2015. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=8L2hheKXuGs&ab_channel=AgenciaNacionaldeInfraestructura.
- [29] Y. Ding, X. Cao, H. Gong, B. Huang y P. Guo, «Evaluating recycling efficiency of plant-asphalt mixtures containing RAP/RAS.,» Journal of Materials in Civil Engineering, 32(11), 2020. [En línea]. Available: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003373.
- [30] F. Preti, B. Gouveia, A. Rahmanbeiki, E. Romeo, A. Carter y G. Tebaldi, «Application and validation of the cohesion test to characterise reclaimed asphalt pavement. Road Materials and Pavement Design,» 2019. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2019.1590225.
- [31] J. Zhu, T. Ma y Z. Fang, «Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement

- for cold recycling, *Construction and Building Materials*, Volume 240, 2020, 117912, ISSN 0950-0618,,» 20 April 2020. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117912>.
- [32] Z. Mijic, A. Y. Dayioglu, M. Hatipoglu y A. H. Aydilek, «Hydraulic and environmental impacts of using recycled asphalt pavement on highway shoulders,» 20 February 2020. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819326789?via%3Dihub>.
- [33] J. Zhang, X. Zhang, M. Liang, H. Jiang, J. Wei y Z. Yao, «Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage,» 30 March 2020. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117778>.
- [34] Y. Liu, H. Wang, S. Tighe, G. Zhao y Z. You, «Effects of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 226, 288-298.,» 2019. [En línea]. Available: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.277](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.277).
- [35] R. Mullapudi, K. Deepika y K. Reddy, Relationship between chemistry and mechanical properties of RAP binder blends., *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 04019124, 2019.
- [36] M. Nazzal, E. Holcombe, S. Kim, A. Abbas y S. Kaya, «Nanoscale and macroscale characterization of the influence of RAP and RAS on cracking resistance of asphalt mixes,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 2018. [En línea]. Available: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002551](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002551).

- [37] J. Wang, W. Zeng, Y. Qin, Y. Zhang, S. Huang y J. Xu, «Properties of mixtures with high percentages of reclaimed SBS-modified asphalt pavement. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(1),» 2019. [En línea]. Available: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002532.
- [38] A. Stimilli, A. Virgili y F. Canestrari, «New method to estimate the “re-activated” binder amount in recycled hot-mix asphalt. Road Materials and Pavement Design, 16, 442-459.,» 2015. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2015.1029678.
- [39] P. Li, L. Zhai, Q. Fu, Q. Yan, Z. Yu y O. Li, «Influence of RAP dispersion characteristics on mixture performance.,» Journal of Materials in Civil Engineering, 31(9), 2019. [En línea]. Available: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002790.
- [40] M. Nazzal, E. Holcombe, S. Kim, A. Abbas y S. Kaya, «Nanoscale and macroscale characterization of the influence of RAP and RAS on cracking resistance of asphalt mixes.,» Journal of Materials in Civil Engineering, 30(12), 2018. [En línea]. Available: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002551 .
- [41] X. Yu, F. Dong, B. Xu, G. Ding y P. Ding, «RAP binder influences on the rheological characteristics of foamed warm-mix recycled asphalt.,» Journal of Materials in Civil Engineering, 29(9), 04017145, 2017. [En línea].
- [42] M. Dinis-Almeida, J. Castro-Gomes, C. Sangiorgi, S. Zoorob y M. L. Afonso, «Performance of warm mix recycled asphalt containing up to 100% RAP. Construction and Building Materials, 112, 1-6,» 2016. [En línea]. Available: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.108.
- [43] C. Van Winkle, A. Mokhtari, H. Lee, R. Williams y S. Schram, «Laboratory and field

- evaluation of HMA with high contents of recycled asphalt pavement.,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 2017. [En línea]. Available: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001720 .
- [44] S. Bressi, J. Santos, O. Marko y M. Losa, «A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment.,» *International Journal of Pavement Engineering*, 2019. [En línea]. Available: 10.1080/10298436.2019.1623404 .
- [45] W. Cao, L. Mohammad y M. Elseifi, «Assessing the effects of RAP, RAS, and warm-mix technologies on fatigue performance of asphalt mixtures and pavements using viscoelastic continuum damage approach. *Road Materials and Pavement Design*, 18, 353,» 2017. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2017.1389078 .
- [46] F. Kaseer, E. Arámbula-Mercado, C. L. y A. Martin, Performance of asphalt mixtures with high recycled materials content and recycling agents., *International Journal of Pavement Engineering*, 21(7), 863-877, 2020.
- [47] A. Arshadi, R. Steger, R. Ghabchi, M. Zaman, K. Hobson y S. Commuri, «Performance evaluation of plant-produced warm mix asphalts containing RAP and RAS. *Road Materials and Pavement Design*, 18, 293-310,» 2017. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2017.1389075.
- [48] A. Hanz, E. Dukatz y G. Reinke, Use of performance-based testing for high RAP mix design and production monitoring. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup1), 284-310, 2017.
- [49] F. Yin, F. Kaseer, E. Arámbula-Mercado y A. Epps Martin, «Characterising the long-term

- rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents. *Road Materials and Pavement Design*, 18:sup4, 273-292,» 2017. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2017.1389074.
- [50] X. Yu, F. Dong, B. Xu, G. Ding y P. Ding, RAP binder influences on the rheological characteristics of foamed warm-mix recycled asphalt., *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 04017145, 2017.
- [51] S. J. Cooper, I. Negulescu, S. Balamurugan, L. Mohammad, W. Daly y G. Baumgardner, «Asphalt mixtures containing RAS and/or RAP: Relationships amongst binder composition analysis and mixture intermediate temperature cracking performa.*Road Materials and Pavement Design*, 18, 209-234,» 2017. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2016.1266758 .
- [52] R. Ghabchi, M. Barman, D. Singh, M. Zaman y M. Mubarak, «Comparison of laboratory performance of asphalt mixes containing different proportions of RAS and RAP. *Construction and Building Materials*, 124,» 2016. [En línea]. Available: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.029.
- [53] Y. He, M. Zia y H. D. J. Alavi, «Proposing a solvent-free approach to evaluate the properties of blended binders in asphalt mixes containing high quantities of reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles,» 1 July 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816303695?via%3Dihub>.
- [54] A. Kusam, H. Malladi, A. Tayebali y N. Khosla, «Laboratory evaluation of workability and moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing recycled asphalt pavements.,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 2017. [En línea]. Available:

10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001825 .

- [55] K. Hoon Moon, A. Cannone Falchetto, D. Wang, M. Wistuba y G. Tebaldi, «Low-temperature performance of recycled asphalt mixtures under static and oscillatory loading. Road Materials and Pavement Design, 18(2), 297-314,» 2017. [En línea]. Available: 10.1080/14680629.2016.1213500 .
- [56] N. Tapsoba, H. Baaj, C. Sauzéat, H. Di Benedetto y M. Ech, «3D analysis and modelling of thermal stress restrained specimen test (TSRST) on asphalt mixes with RAP and roofing shingles. Construction and Building Materials, 120, 393-402.,» 2016. [En línea]. Available: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.092 .
- [57] C. Van Winkle, A. Mokhtari, H. Lee, R. Williams y S. Schram, «Laboratory and field evaluation of HMA with high contents of recycled asphalt pavement.,» Journal of Materials in Civil Engineering, 29(2), 2017. [En línea]. Available: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001720 .