

MONOGRAFÍA
ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS: REVISIÓN TEÓRICA.



José Manuel Rondón Mogollón



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2021

MONOGRAFÍA

ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS: REVISIÓN TEÓRICA.

Por:

José Manuel Rondón Mogollón

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de
Ingeniero Civil

Aprobado por:

I.C. Juan Manuel Salgado Díaz, M. Sc

Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2021

Autoridades Académicas

P. José Gabriel Mesa Angulo, O. P.

Rector General

P. Eduardo González Gil, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo García Jara, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. Julieth Andrea Sierra Tobón

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón.

Decano Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, mi familia y mi novia por ser mi motor y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, por su amor, paciencia y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí, convertirme en lo que soy y mucho más. Tengo el privilegio de ser su hijo gracias por todo.

Agradecimientos

Agradezco a mis docentes de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, al Ingeniero Juan Manuel Salgado Diaz tutor de mi proyecto de investigación quien ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente.

Contenido

Pág.

Resumen.....	10
Abstract.....	11
Glosario.....	12
1. Introducción	13
2. Planteamiento del Problema	15
2.1. Formulación del problema	15
3. Objetivos.....	16
3.1. Objetivo General	16
3.2. Objetivos Específicos.....	16
4. Justificación	17
5. Marco de referencia	18
5.1. Marco conceptual y teórico	18
5.1.1. Asfalto.....	18
5.1.2. Propiedades físicas del asfalto.	18
5.1.3. Fenómeno del envejecimiento.	18
5.1.4. Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento.	19
6. Metodología.....	22
7. Desarrollo de la Metodología	23
7.1. Estado del arte	23
7.2. Ensayos realizados a los asfaltos y a las mezclas asfálticas envejecidos.....	32

8. Cronograma o Flugograma	35
9. Recursos.....	36
9.1. Recursos Humanos.....	36
9.2. Recursos Técnicos y operativos	36
9.3. Recursos Financieros	37
10. Conclusiones.....	38
11. Bibliografía	40

Lista de Tablas

Tabla 1. Relación de ensayos realizados a los asfaltos y mezclas asfálticas envejecidos.	32
Tabla 2. Cronograma.	32
Tabla 3. Perfil del personal que elabora la monografía.	36
Tabla 4. Recurso operativo.	36
Tabla 5. Presupuesto.	37

Lista de Figuras

Figura 1. Metodología de la monografía, etapas y tareas.	22
---	----

Resumen

Esta monografía presenta una revisión bibliográfica del fenómeno de envejecimiento que experimentan los asfaltos y las mezclas asfálticas. El envejecimiento afecta el desempeño de los pavimentos flexibles y la magnitud de sus efectos se debe a la combinación de las características de los materiales (variables intrínsecas) y los efectos ambientales (variables extrínsecas) que actúan sobre ellos. Las variables intrínsecas incluyen las propiedades del asfalto y los agregados, el contenido de asfalto en la mezcla, el espesor de la película de asfalto y el contenido de vacíos. Las variables extrínsecas corresponden a dos momentos de la mezcla asfáltica; el primero, conocido como envejecimiento a corto plazo, se asocia al proceso de producción y colocación de la mezcla, y el segundo, conocido como envejecimiento a largo plazo, se asocia a la exposición a condiciones ambientales en el campo durante el tiempo de servicio. El proceso de envejecimiento ocurre por medio de tres mecanismos: volatilización, oxidación y endurecimiento estérico. Esta revisión sistemática busca compilar investigaciones publicadas en los últimos once años, las cuales tienen como objetivo analizar múltiples condiciones de envejecimiento y determinar las variables más estudiadas por parte de los autores. El propósito del documento es ser un punto de inicio como parte del estado del arte para futuros proyectos de tipo experimental, a partir de los hallazgos que se han sintetizado.

Palabras Clave: envejecimiento, asfaltos, mezcla asfáltica, oxidación, volatilización, endurecimiento estérico, pruebas de envejecimiento.

Abstract

This monograph presents an extensive review of the pertinent literature regarding asphalt and asphalt mixture Aging. Aging affects flexible pavement performance and is produced by intrinsic and extrinsic variables as well as exposure time. Intrinsic variables include asphalt and aggregate properties, a mixture's asphalt content, binder film thickness and air void content; extrinsic variables are associated with production (shortterm aging) and exposure to environmental field conditions (long-term aging). Taken together, both variables demonstrate that aging results from three distinct mechanisms: volatilisation, oxidation and steric hardening. This systematic review seeks to compile research published in the last 10 years that aims to analyze multiple aging conditions and determine the variables most studied by the authors. The purpose of the document is to be a starting point as part of the state of the art for future experimental projects, based on the findings that have been synthesized.

Key Word- Asphalt aging, asphalt mixture aging, oxidation, volatilization, steric hardening, aging models.

Glosario

Anillo y bola: método de ensayo donde se mide la temperatura a la cual los betunes y ligantes bituminosos alcanzan una determinada consistencia en las condiciones normalizadas del ensayo.

Asfalto: material producto derivado del petróleo con una gran cantidad de componentes hidrocarburos.

Ductilidad: es una propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfálticos, los cuales, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse.

FTIR (Fourier Transform Infrared): Infrarrojo Transformado de Fourier, es una técnica de análisis espectroscópica que utiliza una parte del espectro electromagnético

Mezcla asfáltica: es el resultado de combinar material asfáltico con agregados pétreos en proporciones exactas, o bien, en distribución uniforme.

Oxidación: reacción del oxígeno con el ligante y principal factor que contribuye al endurecimiento y fragilización de asfaltos.

PAV (Pressure Aging Vessel): Ensayo de envejecimiento de ligantes asfálticos utilizando el recipiente de envejecimiento presurizado.

Penetración: permite determinar la dureza o consistencia relativa de los cementos asfálticos, midiendo la distancia en décimas de milímetros que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto, en unas condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo.

RTFO (Rotating Thin Film Oven Test): es un método que simula el comportamiento al envejecimiento a corto plazo de los betunes bituminosos usados para las mezclas bituminosas en caliente

Sinéresis: reacción de exudación en la cual los líquidos de aceites delgados son exudados a la superficie de la lámina de ligante.

TFOT (Thin Film Oven Test): es un ensayo de envejecimiento termo-oxidativo utilizado para simular el envejecimiento a corto plazo que se da en el asfalto durante el proceso de mezcla en caliente, transporte y proceso de aplicación en la vía.

Volatilización: evaporación de los componentes livianos del ligante.

1. Introducción

El proceso de envejecimiento es un fenómeno que contribuye en el tiempo al deterioro superficial de las mezclas asfálticas. Este fenómeno es atribuible a diferentes causas y en él intervienen diferentes variables. Las causas están asociadas a variables intrínsecas o sea las características propias de la mezcla asfáltica a saber: el cemento asfáltico, los agregados, el contenido de vacíos y la película de asfalto que recubre los agregados. De otro lado también influyen las variables externas que ofrecen algún tipo de alteración en el proceso de producción de la mezcla, el almacenamiento y transporte y la construcción de la capa asfáltica, ellas se reconocen como variables extrínsecas y son la temperatura de producción de la mezcla, la humedad, la radiación ultra violeta y la temperatura ambiente. (Fernández-Gómez, W., Rondón, H., & Reyes, F., 2011)

Los mecanismos que interviene en el proceso están asociados a cambios de orden químico, físico, mecánico y reológico. (Guerrero, W.M.C., & Pabón, S.B.C., 2020) En general las alteraciones de orden químico como la volatilización, la oxidación y la polimerización producen un reajuste en la estructura molecular del asfalto y la manifestación de respuesta a estos cambios radica en el endurecimiento de las mezclas y por consiguiente la mezcla se convierte lentamente en un material frágil susceptible a agrietarse. La consecuencia de estos cambios es la aparición de grietas por donde se inicia un proceso de ingreso de agua y vapor al interior de la mezcla lo que conlleva a otros procesos de pérdida de cohesión y daños por humedad, lo que reduce el desempeño del pavimento asfáltico. (Rondón-Quintana, H.A., & Moreno-Anselmi, L.Á., 2015)

Con ayuda de una amplia revisión bibliográfica, en este documento se explica el fenómeno de envejecimiento y se describen las variables intrínsecas y extrínsecas que intervienen en el proceso. En una segunda parte se mencionan las pruebas de laboratorio que se han utilizado para simular procesos de envejecimiento. En la tercera parte se presentan los efectos que el envejecimiento produce en el desempeño de los pavimentos.

Con base en esta premisa, se exponen los hallazgos que se han recopilado en artículos investigativos a partir del 2010 y hasta el 2021, donde se analizan los comportamientos de las mezclas asfálticas y el asfalto con diferentes características en escenarios específicos.

2. Planteamiento del Problema

El envejecimiento en las mezclas asfálticas, es un fenómeno que se presenta inicialmente en el asfalto, causado principalmente por efectos de oxidación o endurecimiento de la mezcla, alterando las propiedades fisicomecánicas del material y por ende la vida útil de los pavimentos asfálticos (Vargas, X., & Reyes, F., 2010)

En Colombia, las mezclas asfálticas son sometidas a diversas variables que ocasionan su envejecimiento a corto o largo plazo, evidenciándose en fisuramiento o fatiga o deformación permanente. Rondón et. al. (2015), afirma que el envejecimiento a corto plazo se debe principalmente a la oxidación y volatilización del ligante dentro de la mezcla asfáltica durante su proceso de fabricación y/o colocación en obra. El envejecimiento a largo plazo, se debe principalmente a agentes ambientales y endurecimiento que experimenta la mezcla en su periodo de servicio (p.243).

Hoy, se han realizado diversas investigaciones que demuestran la evolución del estudio del envejecimiento de los asfaltos, intentando inicialmente estimarlo indirectamente a partir del cambio de propiedades fisicoquímicas hasta llegar a las determinaciones reológicas, así mismo se han estudiado diferentes modificantes aplicados a las mezclas asfálticas, con el fin de mejorar estas propiedades y lograr una mayor durabilidad de las mismas (Vargas, X., & Reyes, F. , 2010, pág. 14)

2.1. Formulación del problema

¿Cuál es el alcance de las investigaciones que se han adelantado sobre el envejecimiento en los pavimentos flexibles?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Elaborar un estado del arte del desarrollo de investigaciones realizadas al asfalto y a las mezclas asfálticas para el fenómeno de envejecimiento.

3.2. Objetivos Específicos

- Examinar las investigaciones que se han desarrollado hasta la fecha con el fin de clarificar las ideas con respecto al tema de interés.
- Determinar las producciones intelectuales sobre el tema objeto de estudio.
- Mostrar sistemáticamente los avances existentes de carácter cualitativo acerca del tema, donde se detallen los resultados y enfoques.

4. Justificación

La infraestructura vial del país es clave para el desarrollo económico. Una vía nueva o el mantenimiento de la misma, es una obra capaz de aportar a la calidad de vida de poblaciones enteras y mejorar relaciones comerciales entre ciudades y provincias. Al mismo tiempo, durante su construcción es una fuente de empleo directo e indirecto para personas cercanas al proyecto. Sin embargo, todo esto representa una valiosa inversión para el estado, municipios y directamente a los ciudadanos en casos de concesiones. Pero en todo esto, lo que realmente se torna preocupante, es el rápido deterioro de las vías si nos referimos a pavimentos flexibles, dado que una de las causas más usuales es el envejecimiento del asfalto y por ende el de las mezclas asfálticas. Es de anotar, que este rápido deterioro, no depende 100% del tráfico, siendo este último un agente que acelera su ritmo. Llor (2021), afirma que el envejecimiento se debe principalmente a la reacción química entre el asfalto y el oxígeno que se encuentra en el ambiente, también denominado proceso de oxidación. A la vez, se considera que existen otras causas importantes que serían las razones por lo que países desarrollados han invertido cantidades de dinero en investigaciones para mitigar y resolver este problema. Las cuales se explicarán en la presente monografía. De la misma manera que en otras ramas de la Ingeniería Civil, nuestro país ha adoptado diversos procedimientos y ensayos elaborados en otros países en sus normas, cuyas bases e hipótesis no refleja adecuadamente nuestro medio, donde las condiciones de los materiales y del ambiente varían. Esto quiere decir que cuando seguimos los procedimientos de la norma, podría existir un deterioro significativamente más acelerado en el campo del que se ha determinado en laboratorio.

La importancia de esta monografía, reside en hacer precisiones respecto al envejecimiento del asfalto y las mezclas asfálticas, tomando como referencia las condiciones reales del medio, empleando bibliografía actualizada. De esta manera se intenta establecer procedimientos en el laboratorio que representen de una forma más cercana la realidad del asfalto y mezclas asfálticas.

5. Marco de referencia

5.1. Marco conceptual y teórico

5.1.1. *Asfalto.*

De acuerdo a (García Melo, W., 2013). El asfalto es un material aglomerante de color que varía de negro a pardo oscuro, orgánico, de alto peso molecular, que puede tener consistencia líquida, semisólida o sólida, dependiendo de la temperatura, y compuesto principalmente por hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono. El asfalto proviene de yacimientos naturales o se obtiene como un residuo de la refinación de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción; estos últimos representan más del 90% de la producción total de asfaltos.

5.1.2. *Propiedades físicas del asfalto.*

Entre las propiedades físicas más importantes del cemento asfáltico se destacan la durabilidad, definida como la capacidad de mantener las características físicas y mecánicas con el tiempo, a pesar de que el asfalto sea expuesto a condiciones normales de degradación y envejecimiento; la adhesión y la cohesión, que hacen referencia, la primera, a la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación y, la segunda, a la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado. La susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento, fenómenos que son causados por una combinación de factores físicos y químicos entre los que se destacan la acción del oxígeno (oxidación) y la volatilización. (Arega, Z.A., Bashin, A., & De Kesel, T., 2013)

5.1.3. *Fenómeno del envejecimiento.*

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es un proceso complejo el cual ocurre durante el mezclado en la planta, la construcción de la carretera y la vida de servicio. En el mundo es

ampliamente aceptado que el mecanismo de funcionamiento del envejecimiento se clasifica en dos grandes tipos: corto y largo plazo. El envejecimiento a corto plazo es debido principalmente a la oxidación y volatilización del ligante dentro de la mezcla asfáltica durante su fabricación en la planta de asfaltos, desde el almacenamiento hasta la construcción en obra, extensión y compactación. El envejecimiento a largo plazo se debe a la oxidación y endurecimiento in situ que experimenta la mezcla durante su vida en servicio en el pavimento. (Fernández-Gómez, W., Rondón, H., & Reyes, F., 2011).

5.1.4. Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento.

5.1.4.1 Factores Intrínsecos

- **Oxidación**

El asfalto es una mezcla orgánica, compuesta principalmente por hidrocarburos y componentes minoritarios con pequeñas cantidades de heteroátomos y metales, susceptible de reaccionar con el oxígeno del aire. Los procesos de absorción y de difusión del oxígeno se afectan por el calentamiento y alcanzan condiciones estacionarias que en definitiva aceleran las reacciones que ocurren con los distintos componentes en función del tipo de asfalto, de la temperatura y la presión de la fase gaseosa (Betancourt Cardozo, F., 2018). Así se producen especies polares oxigenadas que propician la asociación y del aumento del tamaño, y de la masa de las moléculas presentes en el asfalto desde un comienzo y durante el proceso. El proceso de oxidación en la formación de estas especies sigue probablemente la siguiente secuencia: primero se forman compuestos cicloaromáticos, por reacciones del oxígeno con hidrocarburos altamente reactivos, y luego cetonas y sulfóxidos, por oxidación lenta de los carbonos bencílicos, menos reactivos seguramente mediante mecanismos en los que intervienen radicales libres (alquilo, arilo, alcoxilo, fenoxilo, sulfurilo, hidroxilo, etc.). (Qin, Q., Schabron, J.F., Boysen, R.B., & Farrar, M.J., 2014)

- **Volatilización**

La pérdida de compuestos ligeros, aceites y resinas en los asfaltos depende principalmente de la temperatura, entre otras condiciones a las que el material se expone ordinariamente. Tal volatilización se favorece con las altas temperaturas que emplean las plantas en la producción de las mezclas asfálticas o en el frente de obra para la construcción en caliente, o esas otras impuestas por la exposición de los pavimentos a la radiación en climas cálidos durante su vida útil de servicio. El aumento de temperatura durante la producción, almacenamiento, transporte y colocación del asfalto conduce a la volatilización que lo vincula al envejecimiento a corto plazo de la mezcla asfáltica calentada. Las temperaturas alcanzan y superan los 150 ° C, momento en el que las fracciones de asfalto comienzan a evaporarse. Unos 10 a 12 ° C adicionales podrían duplicar las emisiones volátiles. (Fernández-Gómez, W.D., Rondón Quintana, H.A., & Reyes-Lizcano, F., 2013)

- **Tixotropía y sinéresis**

El endurecimiento estérico o tixotropía, se relaciona con la formación de una estructura interna en el sistema coloidal del asfalto durante el reposo, la cual se observa incluso en pavimentos con bajo volumen de tránsito, y se atribuye a una reorientación de las moléculas y a una cristalización lenta de componentes de la fracción de resinas, que sucede aún a temperatura ambiente. En el laboratorio este fenómeno se evidencia como un aumento gradual de la viscosidad en función del tiempo; este proceso se considera reversible por vía de calentamiento del material.

La sinéresis se presenta como una reacción de exudación a consecuencia de la formación de la estructura tixotrópica, en simultáneo con una notable separación de fases en el sistema coloidal (dispersa y dispersante). La sinéresis opera como una migración de componentes más livianos (de menor densidad) del asfalto hacia la superficie, lo cual facilita y acelera el proceso de endurecimiento. (Carrizales, A.R., Gonzales, Y.T., Garavito. M.P., & Benavides, R.H., 2021)

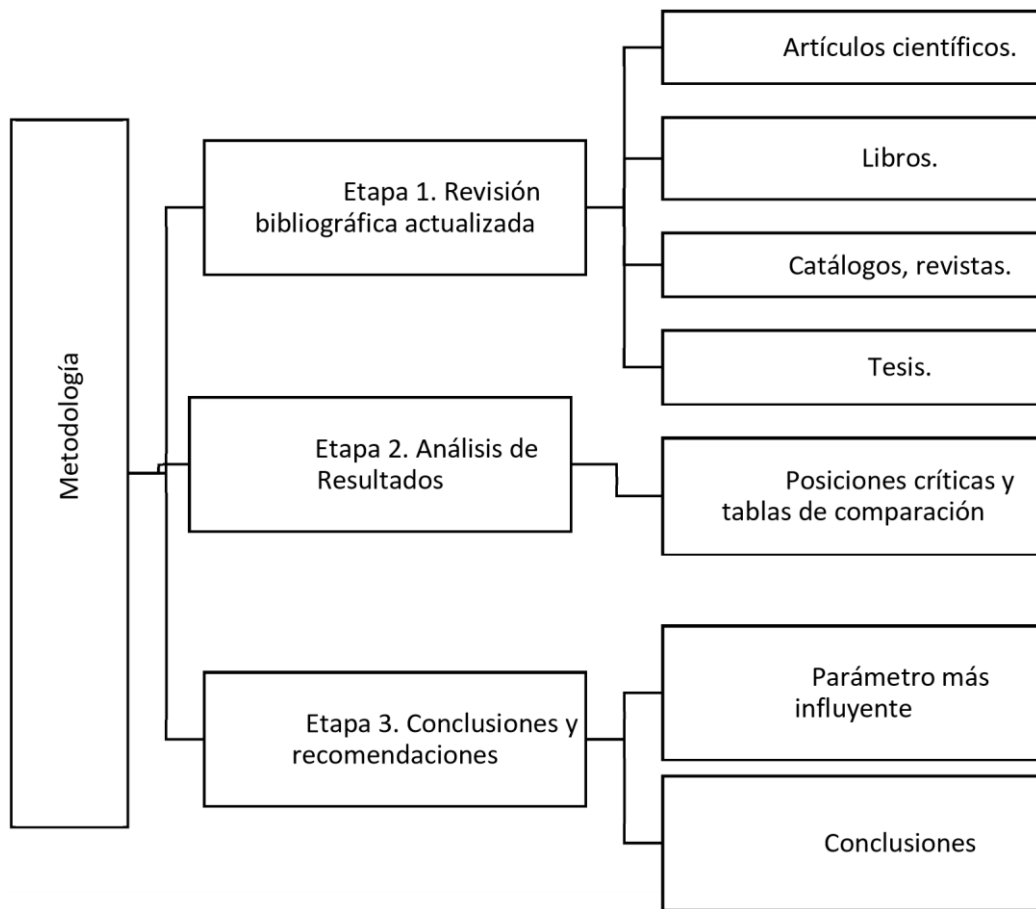
5.1.4.2 Factores extrínsecos

Los factores extrínsecos que inciden en el envejecimiento del asfalto dependen de las características de los otros materiales (agregados y llenante), de las propiedades de la mezcla (vacíos con aire y espesor de película del ligante) y de la acción del tránsito vehicular. En igualdad de condiciones y de duración del proceso, las mezclas asfálticas producidas con agregados pétreos básicos, presentan menor grado de envejecimiento del asfalto que aquellas producidas con agregados ácidos. El llenante mineral, en función de su basicidad o de su acidez tiene un efecto similar; sin embargo, la cantidad óptima de llenante que se disponga en la mezcla está limitada por la aparición de efectos rigidizantes indeseables, causados por adición de cantidades mayores. El porcentaje de vacíos, asociable a una mayor o menor área superficial del ligante expuesta a la intemperie, influye notablemente en el envejecimiento del asfalto, más en las mezclas abiertas que en las densas o cerradas. (Figuerola Infante, A.S., 2015)

6. Metodología

Cada etapa tendrá una serie de actividades que contribuirán al cumplimiento de cada objetivo planteado. A continuación, se puede evidenciar un breve esquema de la metodología de esta monografía. (Ver Figura 1)

Figura 1. Metodología de la monografía, etapas y tareas.



Nota: Descripción de la metodología a utilizar.

7. Desarrollo de la Metodología

7.1. Estado del arte

(Vargas, X., & Reyes, F. , 2010) mencionan que los antecedentes demuestran la evolución del estudio del fenómeno de envejecimiento de los asfaltos, el cual se consideraba inicialmente como un proceso de endurecimiento físico, que con el devenir de los años se ha esclarecido, reconociendo la complejidad del fenómeno, intentando inicialmente estimarlo indirectamente a partir del cambio de propiedades fisicoquímicas y ensayos empíricos como ductilidad, penetración, anillo y bola, y los índices de penetración, susceptibilidad a la temperatura, etcétera, hasta llegar a las determinaciones reológicas como las propiedades viscoelásticas del material una vez que los autores entendieron el comportamiento reológico complejo del asfalto. Los ensayos desarrollados para simular el envejecimiento oxidativo de los asfaltos, de igual modo, han venido evolucionando hasta llegar a pruebas de envejecimiento bajo agitación continua con mediciones in situ de las propiedades viscoelásticas, puesto que algunos autores han demostrado que los ensayos tradicionales no son adecuados para simular el envejecimiento de asfaltos puros ni modificados.

El proceso de envejecimiento in situ bajo condiciones de agitación controladas puede ser extendido con el fin de reemplazar las técnicas convencionales de envejecimiento, puesto que además de poder hacer Reología, in situ, es posible hacer estudios de velocidades en condiciones de agitación controladas de envejecimiento y de modificación del asfalto bajo diferentes condiciones de interés.

En cuanto a los análisis de la composición química del asfalto, en la actualidad se siguen empleando las técnicas de espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X, ultravioleta y visible, resonancia magnética nuclear, cromatografía líquida, análisis termo gravimétrico, entre otras, para estimar cambios en la composición química del asfalto antes y después del envejecimiento y de la modificación del material.

Como perspectivas de trabajo a futuro se encuentra la búsqueda de nuevos modificadores de asfaltos que permita, no solamente mejorar sus propiedades reológicas, sino lograr una mayor durabilidad. El desarrollo de asfaltos nanocompuestos está en perfeccionamiento a nivel mundial y en Colombia es una línea de investigación casi inexplorada.

(Fernández-Gómez, W., Rondón, H., & Reyes, F., 2011) Concluyen que el proceso de envejecimiento es un proceso complejo que es tratado en la actualidad como una falla funcional de los pavimentos a nivel superficial, pero por el mecanismo y evolución del fenómeno incide en el tiempo hasta generar patologías que reducen significativamente el desempeño de las mezclas asfálticas en servicio sobre todo en cuanto al agrietamiento superficial y la reducción de la vida de fatiga.

En general el envejecimiento se produce por la incidencia de las variables ambientales o externas del medio donde se encuentra el pavimento flexible, sobre los materiales o variables intrínsecas de la mezcla. Los efectos que se producen corresponden en todos los casos a modificaciones de orden químico, es decir a modificación en la estructura del asfalto y en las relaciones moleculares del mismo. Los procesos químicos que se presentan son la volatilización de las resinas y componentes livianos del asfalto por el incremento de la temperatura, la oxidación por la presencia de humedad y/o vapor de agua en la superficie de rodadura, la formación de grupos carbonilos por el rompimiento de los enlaces carbono y la polimerización.

(Fernández-Gómez, W.D., Rondón Quintana, H.A., & Reyes-Lizcano, F., 2013) El envejecimiento del asfalto es complejo y causa daño funcional al asfalto. El mecanismo de envejecimiento afecta negativamente la flexibilidad del pavimento (rendimiento) después de años de vida útil. El daño más importante generado por el envejecimiento es el agrietamiento y la reducción de la vida útil del asfalto debido a la rigidez del aglomerante del asfalto. El envejecimiento se puede entender en términos de dos etapas: envejecimiento a corto y largo plazo; el primero tiene lugar durante el mezclado en una planta, durante la producción y durante el almacenamiento, transporte y colocación de una mezcla asfáltica, volatilización y, en cierto

grado, oxidación durante el envejecimiento a corto plazo, lo que lo convierte en el tipo de envejecimiento más severo. El envejecimiento a largo plazo se produce a lo largo de la vida útil del asfalto, como resultado de la oxidación debida a la radiación UV, la humedad y la lluvia; El endurecimiento estérico ocurre durante el envejecimiento prolongado a temperatura ambiente.

Las condiciones ambientales y las características de una mezcla asfáltica caliente provocan el envejecimiento del asfalto. Las consecuencias del envejecimiento incluyen cambios químicos en el aglutinante de asfalto (es decir, modificaciones en la estructura molecular y las relaciones moleculares). Los cambios químicos provienen de la volatilización de las fracciones de resina debido a la temperatura de la mezcla, la oxidación debido a la humedad y el vapor de agua y el endurecimiento estérico debido a la temperatura ambiente; La masa del aglutinante disminuye como resultado de la volatilización. La oxidación conduce a un aumento de los grupos carbonilo y sulfóxido, ya que se rompen los enlaces de carbono. El endurecimiento estérico altera el volumen del aglomerante y endurece la parte superior del pavimento. Debido a que un aglomerante más rígido puede agrietarse bajo la carga del tráfico y pueden desarrollarse grietas dentro del pavimento (hasta 15 milímetros de profundidad), el endurecimiento estérico es una causa importante de preocupación en los estudios de envejecimiento.

(García Melo, W., 2013) mencionan que el envejecimiento a corto plazo del asfalto produce cambios en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas; sin embargo, los controles de calidad establecidos en la normatividad pueden encontrar que los parámetros se están dentro de los rangos de trabajo, debido a que estos controles sólo se realizan al asfalto fresco y en algunos pocos casos al material envejecido en el laboratorio. No se tiene control de calidad para los productos terminados en cuanto al envejecimiento del asfalto, lo cual es una gran deficiencia de las especificaciones que guían el control de calidad de las obras viales.

(Gamarra, A., 2014) Definen que el envejecimiento termo-oxidativo de un asfalto comúnmente utilizado en Colombia fue estudiado experimentalmente mediante la utilización de un método estandarizado (TFOT) y un método propuesto que consiste en someter el material a

agitación mecánica a altas revoluciones mientras se mantiene a una temperatura elevada. El método de envejecimiento mediante agitación mecánica resultó ser más agresivo que la técnica normalizada TFOT debido a que el proceso de agitación mecánica logra remover continuamente la superficie del material que está en contacto con el oxígeno del ambiente, permitiendo así una mayor interacción de este con el asfalto, creando en el material nuevos grupos carbonilo y sulfóxido, que son los responsables, en parte, del proceso de envejecimiento del material. La creación de estos grupos genera un incremento en el peso molecular de las fases o componentes fundamentales del asfalto, haciendo que parte de los aromáticos se transformen en resinas e igualmente parte de las resinas pasen a constituir los asfaltenos. De esta manera el proceso termo-oxidativo hace que los asfaltenos aumenten su densidad (número) y tamaño (peso molecular), logrando un endurecimiento y consecuente fragilización del material, que es el efecto nocivo de este fenómeno en las carpetas asfálticas y que lleva a la falla del material.

(Barrasa, R.C., López, V.B., Montoliu, C.M.P.; Ibáñez, V.C., Pedrajas, J., & Santarén, J., 2014) Demuestran que tanto el envejecimiento en campo como el envejecimiento en laboratorio se han investigado en términos de su efecto sobre la reología y la estructura de los aglutinantes. El endurecimiento o rigidez se atribuye a la composición del asfalto, cambios con el envejecimiento. El envejecimiento del asfalto puede afectar significativamente cantidades de asfaltenos y aromáticos sin alterar los saturados y contenido de resinas. El envejecimiento convierte los componentes aromáticos en tolueno asfaltenos solubles. Además, el envejecimiento del campo aumenta drásticamente aromaticidad total pericondensada, así como carbonilo y grupos funcionales sulfóxido. Excelentes relaciones lineales entre parámetros reológicos y composición química como total aromaticidad pericondensada y absorbancia FTIR de la suma de carbonilo y grupos sulfóxido se han demostrado en este trabajo. Además, el efecto del envejecimiento sobre la reología a baja temperatura fue investigado por placas paralelas de 4 mm de diámetro DSR con máquina corrección de cumplimiento. El envejecimiento en campo influye fuertemente en la baja temperatura, en su reología de una manera adversa, mientras que el envejecimiento en el laboratorio produce un efecto suave.

(Villegas-Villegas, R.E., Aguiar-Moya, J.P., & Loria-Salazar, L.G., 2015) Exponen, una metodología utilizada en el barrido de temperaturas y la relación entre la componente viscosa (G'') y la componente elástica (G') como parámetro de control de los ligantes para su eventual aceptación, es un método fácil de realizar, interpretar y con un equipamiento más común en los laboratorios de asfaltos. Los ensayos realizados en el reómetro dinámico de cortante son consecuentes con los cambios en las propiedades reológicas del material sometido a envejecimientos y oxidaciones en métodos normados internacionalmente como el RTFO y el PAV.

Para poder obtener una temperatura de referencia para las relaciones G'' y G' es necesario tener un historial importante de mediciones realizadas. La consideración esencial en la evaluación de los asfaltos es que cuando $G'' > G'$ en el intervalo de 10 a 34 °C, el asfalto no presenta problemas de envejecimiento u oxidación. Si el dominio de G'' se hace presente entre los 10 y 19 °C el asfalto está envejecido, pero si esto ocurre a temperaturas superiores a los 19 °C el asfalto está oxidado.

Para asfaltos originales y envejecidos en el RTFO los valores obtenidos en el FTIR no muestran parámetros de decisión a la hora de tomar una decisión en la compra del asfalto. Cuando el asfalto está oxidado hay una evidencia en los resultados del FTIR, por lo que para este tipo de condición los resultados son concluyentes. El cálculo de sulfóxidos y carbonilos en el asfalto por el área del pico generado por el FTIR es un método a trabajar para poder hacer más sensible las mediciones y obtener datos más finos y precisos.

(Su, J.F., Shlangen, E., & Wang, Y.Y., 2015) Manifiestan que el mecanismo de autocuración del betún envejecido mediante microcápsulas que contiene rejuvenecedor fue investigado. Para los efectos de la media, se evaluó el tamaño y el grosor de la cáscara de las microcápsulas para la autocuración. conductas y capilares y conductas de penetración fueron analizados para evaluar los movimientos rejuvenecedores. De lo mencionado resultados preliminares, dejan en evidencia que: El grosor de la cáscara de las microcápsulas no se vio muy

afectado. por las relaciones núcleo / corteza y las velocidades de agitación de la emulsión. Estas microcápsulas pueden sobrevivir derritiendo betún con una buena estabilidad térmica. Este resultado significa que las microcápsulas prácticamente se puede aplicar en betún sin se rompió antes de su uso. De la misma manera, las microcápsulas pueden romperse por microfisuras y filtrarse. el rejuvenecedor líquido aceitoso en microgrietas. Con la ayuda de capilaridad, el rejuvenecedor llenó las grietas con un movimiento velocidad determinada principalmente por el volumen de microcápsulas en betún. Además, una mayor relación de volumen de microcápsulas conduce al rejuvenecedor, y necesita menos tiempo para completar un movimiento longitudinal. Y, por último, con la ayuda de la penetración del rejuvenecedor, el betún envejecido tiene una transformación para recuperar sus propiedades vírgenes.

(Figuerola Infante, A.S., 2015) comprobó que la temperatura de fatiga en PAV fue la misma para todo el tiempo de inmersión, es decir 19°C, sin embargo, estos ensayos también se realizaron en el reómetro para las muestras sumergidas, pero sin llevarlos a la cámara de envejecimiento PAV y las temperaturas fueron menores —e incluso hubo variaciones a partir del noveno mes en donde cambió de 13°C a 16°C— que las encontradas en cámara PAV. Al respecto hay algunas observaciones, una primera es que, así como se evidencian los cambios con envejecimiento en agua para los diferentes asfaltos según los periodos de inmersión, debería verse reflejado de manera análoga este resultado en el envejecimiento en cámara PAV. Por otra parte, si la fatiga en PAV de este asfalto se presenta a 19°C, claramente no es el asfalto más adecuado para Bogotá, dado que en las horas más frías las temperaturas promedio están incluso por debajo de 16°C. De acuerdo con estos resultados se observa que hay coherencia en este sentido con los resultados de desempeño por fatiga de la mezcla asfáltica.

(Betancourt Cardozo, F., 2018). Señala que el envejecimiento del asfalto se debe principalmente a la acción conjunta de los componentes y de las condiciones de su entorno (el aire, las radiaciones y la temperatura, entre otros) y su efecto se evidencia por cambios reológicos, termodinámicos y químicos entre otros, que influyen en el comportamiento general de la mezcla asfáltica en las que sirve como ligante.

(Bolívar Sierra, J.A., Suescún Florez, J.A., & Silva Mora, E.A., 2019) Demuestran que el envejecimiento es un proceso complejo, consiste principalmente en la evaporación de ciertos componentes y la oxidación por oxígeno de aire. La modificación química se traduce en una alteración de su estructura, aumentando su dureza, rigidez y fragilidad; como consecuencia pierde la capacidad de ser un ligante adecuado para el concreto asfáltico.

(Agudelo-Cendales, M.A. & Martínez-Gómez, S., 2019) La mezcla asfáltica convencional con envejecimiento presenta valores muy altos de módulo resiliente, haciendo que la mezcla sea más rígida con el tiempo y más susceptible a las fisuras por fatiga. La mezcla asfáltica modificada con GCR presenta una disminución en la rigidez de la mezcla presentando valores de módulo resiliente más bajo con respecto al asfalto convencional esto debido a que requiere mayores contenidos de asfalto presentándose una reducción en la resistencia de la mezcla, y haciendo la mezcla mucho más frágil. La mezcla modificada con GCR presenta un mejor comportamiento al envejecimiento debido a que el módulo resiliente aumenta en un 3.0 % después de envejecida la mezcla, variando muy poco la rigidez de la mezcla en el tiempo, presentando una muy poca variación de sus propiedades y sus características, aumentando así su vida útil.

La investigación bibliográfica realizada por (Kikut Cruz, K., Baldi A., & Elizondo Salas, A.L. , 2020) sugiere que, al adicionar cal hidratada a la matriz asfáltica, hay una mejora en las propiedades de la mezcla en cuanto a la dureza y la resistencia ante la fatiga, oxidación, envejecimiento químico y daño por humedad. Asimismo, se observan cambios en las propiedades viscoelásticas del asfalto, cuando la cal hidratada se mezcla, mejorando su resistencia a la deformación permanente. Por otro lado, con base en los estudios consultados, se infiere que la cantidad óptima de cal en la mezcla asfáltica corresponde al 1,5% en peso de agregados para obtener mejores propiedades y que el material resista a la humedad.

La disminución en la durabilidad de las mezclas asfálticas, de acuerdo a (Sierra Arenas, C., 2020) asociada al deterioro por exposición a condiciones ambientales está relacionada con diferentes procesos, entre los más destacados son el envejecimiento por oxidación y el daño por humedad. En este estudio se evaluó la susceptibilidad al daño por humedad utilizando el ensayo de tracción indirecta para probetas en condición seca y húmeda, para un estado de envejecimiento a corto y dos estados de envejecimiento a largo plazo, los cuales simulaban una vida de servicio del pavimento de 4 y 8 años. Para el caso del envejecimiento a corto plazo, la resistencia a la tensión del grupo de probetas en condición húmeda cayó un 20% respecto a la resistencia a la tensión del grupo de probetas en condición seca. Este valor, según la normativa, se encuentra justo en el límite de aprobación. Para el envejecimiento a largo plazo 1, condición que simula 4 años de servicio del pavimento, la resistencia del grupo húmedo disminuyó 2%. Sin embargo, la cantidad y variabilidad de los datos no permiten establecer una susceptibilidad clara al daño por humedad en este estado. Finalmente, para el envejecimiento a largo plazo 2, condición que simula 8 años de servicio del pavimento, la resistencia cayó 21%. En este caso, la desviación estándar de los datos es significativa. Además, la caída de la resistencia a la tensión del grupo húmedo respecto al seco para el envejecimiento a largo plazo 2, es apenas menor en un 1.25% respecto a la del envejecimiento a corto plazo, lo que no permite concluir que dicha mezcla sea más o menos susceptible al daño por humedad con el paso del tiempo.

De acuerdo con (Carrizales, A.R., Gonzales, Y.T., Garavito. M.P., & Benavides, R.H., 2021), la existencia de agua en la superficie del pavimento, provoca desplazamiento de material fino proveniente de la capa base arrastrados a través de las grietas del pavimento. La pérdida de material, aumenta la deformación y el agrietamiento, lo que acelera su deterioro; sin embargo, la presencia de agua en el deterioro acelerado se puede cuantificar a través del levantamiento de datos superficiales del pavimento que permitan identificar el comportamiento y el estado de los materiales que se degradan; es decir, el envejecimiento no se debe solamente al endurecimiento físico, sino también a procesos oxidativos; por lo que, ensayos para un proceso de envejecimiento del asfalto por oxidación en la determinación de sus propiedades respecto a la resistencia y adherencia, permite modificar las propiedades físicas de los asfaltos reológicamente que sean

aptos para su utilización como materia prima más resistentes a aguas pluviales en el mercado vial.

Entre uno de los factores que intervienen en el envejecimiento de las mezclas asfálticas (Loor Torres, M.A. , 2021) manifiesta que existe un componente clave que es intrínseco al ambiente. Esto quiere decir que es imprescindible que cada país, región o ciudad, según convenga, investigue este fenómeno para elaborar sus propios estándares de diseño. El uso de normativas y procedimientos extranjeros sirven de guía, pero no deben de ser utilizados en nuestro medio, sin antes comprobar su validez.

Por lo que (Janet, L.D.E. , 2021) recomienda realizar pruebas químicas, para medir el efecto asociado al envejecimiento en el RTFO (Se observó que este ensayo envejece más que un proceso de laboratorio) y comprobar si es un asfalto sin modificar, el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del asfalto modificado probar si es más importante el efecto del solvente que el envejecimiento en el RTFO.

Por último, (Flores, G., & Gallego, J., 2021) comprobaron que el calentamiento de mezclas asfálticas con infrarrojos produce un mayor envejecimiento en el betún que el calentamiento por microondas. Los asfaltos recuperados de las mezclas recalentadas con infrarrojos tenían penetraciones más bajas y temperaturas de reblandecimiento, viscosidades y módulos complejos más altos que los asfaltos recuperados de mezclas recalentadas con microondas.

Estos resultados pueden atribuirse, tal y como se comprobó con el estudio termográfico, a que el calentamiento con microondas es más homogéneo en toda la masa de la mezcla, mientras que el calentamiento con infrarrojos produce temperaturas más altas en la superficie de la probeta que se difunden progresivamente hacia el interior. Esta situación provoca sobrecalentamiento en la superficie.

7.2. Ensayos realizados a los asfaltos y a las mezclas asfálticas envejecidos

Tabla 1. Relación de ensayos realizados a los asfaltos y mezclas asfálticas envejecidos.			
Fecha	Investigador	Método de envejecimiento	Método de evaluación
2013	Weimar García Melo	Mezclas envejecidas de las siguientes características: 3.2 mm de espesor de lámina ,163 °C de temperatura. Calentamiento de 5 horas, para la primera condición de envejecimiento, y Calentamiento de 10 horas, para la segunda condición de envejecimiento.	Gravedad específica “Gs” (ASTM D 3289), Penetración de materiales asfálticos a 25 °C (INV E-706), Punto de ablandamiento (INV E-712), Ductilidad de materiales asfálticos 0 a 25 °C (INV E-702), Determinación de la curva Reológica del asfalto a partir del Viscosímetro Rotacional Brookfield (adaptación de la Norma INV E-717), Determinación del módulo complejo “G*” con DSR (ASTM D 7175).
2014	Adriana Gamarra E.	Envejecimiento termo-oxidativo en las características físicas, químicas y micro-estructurales del asfalto fueron empleados dos métodos de ensayo; uno normalizado TFOT (Thin Film Oven Test, (ASTMD1754, 1997)) y otro propuesto que permite una fácil implementación a nivel de laboratorio, el cual es la agitación mecánica a altas revoluciones.	Punto de ablandamiento (INV E-712), Penetración (ASTM D5-13 (1997)), La viscosidad fue medida mediante la utilización de un viscosímetro Brookfield (Modelo DV-II+, Brookfield Engineering Laboratories Inc.)
2015	Rafael Ernesto Villegas-Villegas ¹ , José Pablo Aguiar-Moya ² , Luis Guillermo Loria-Salazar ³	Los métodos RTFO (Horno de envejecimiento en película delgada rotacional) y PAV (Cámara de envejecimiento por presión)	Medición reológica que el parámetro a considerar es el daño por fatiga del bitumen a temperaturas intermedia
2015	Ana Sofía Figueroa Infante	Envejecimiento en el corto plazo – RTFO Envejecimiento en el largo plazo – PAV	Punto de Ablandamiento, Penetración, Viscosidad, Ductilidad, Punto de llama, Punto de ablandamiento, RTFOT, Ensayo en DSR, Fracciones SARA, Análisis infrarrojo, Punto de ignición

Tabla 1. Continuación

2016	Daniella Rodríguez U Cristian Rodríguez Sindy Ramírez Cristhian Flórez	El asfalto envejecido a corto plazo (RTFO) y el asfalto envejecido a largo plazo (RTFO+PAV).	Penetración, Superpave, Punto de ablandamiento (anillo y bola)
2018	Ferney Betancourt Cardozo	Simulación en el laboratorio del ECP de los asfaltos frescos mediante modelos convencionales (TFOT, RTFOT)	Gravedad específica, Gb Punto de ablandamiento, Pa Penetración a 25°C, P25 Penetración a 40°C, P40 Viscosidades aparentes a 60°C y 135°C
2019	Miguel Ángel Agudelo Cendales Stivinson Martínez Gómez	Envejecimiento a corto plazo en donde la mezcla experimenta la volatilización y la oxidación muy rápidamente en un horno a temperatura de 150 °C por un tiempo de dos horas, mientras que para el envejecimiento a largo plazo el proceso es más lento en un horno a una temperatura de 85°C durante 5 días, tanto para mezcla MDC- 19 y la mezcla MDC-GCR.	Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta RTI Módulo resiliente Penetración Punto de ablandamiento
2020	Sergio Andrés Rincón Leal	Envejecimiento artificial en el horno a 95°C durante 3, 6, 9 15 y 30 días	Reología de un mortero asfáltico envejecido a 30 días Viscoelasticidad
2020	Carolina Sierra Arenas	Para simular el envejecimiento a corto plazo, una vez hecha la mezcla y antes de ser compactada, fue puesta en el horno por 2 horas a temperatura de compactación (140°C). Envejecimiento a largo plazo, se evaluaron 2 periodos de tiempo, los cuales equivalen a una vida útil de la mezcla asfáltica de 4 y 8 años.	Índice de daño por humedad Módulo Dinámico
2021	Mario Andrés Loor Torres	Envejecimiento a largo plazo normativa AASHTO R 30, TFOT RTFOT Cámara de envejecimiento a presión PAV	Módulo de Rigidez Prueba de fatiga con el Nottingham Asphalt Tester (NAT)
2021	Esbeydi Janet Limeta Dionet	Envejecimiento RTFOT Cámara de envejecimiento a presión PAV	Viscosidad DSR MSCR

Tabla 1. Continuación

2021	Guillermo Flores, Juan Gallego	La primera consistió en el calentamiento de la mezcla asfáltica y posterior análisis del envejecimiento del asfalto. En la segunda se realizó un análisis termográfico del calentamiento de las mezclas con el objetivo de ayudar a interpretar los resultados de envejecimiento de los asfaltos recuperados.	Análisis Termográfico Penetración Viscosidad Rotacional DSR
------	-----------------------------------	---	---

Nota. Esta tabla demuestra la recopilación de información de los últimos 11 años sobre el estudio del envejecimiento a corto y largo plazo en asfaltos y mezclas asfálticas.

8. Cronograma o Flujograma

Tabla 2. Cronograma

ACTIVIDAD		MES															
		Septiembre		Octubre		Noviembre				Diciembre							
Desarrollo anteproyecto																	
1	Redacción de proyecto de anteproyecto y espera aprobación de este																
Desarrollo de la metodología																	
2	Ordenar y sistematizar información relevante para realizar las diferentes actividades, recopilación de textos y resumen de investigaciones																
3	Tablas de comparación se determinará los diferentes ensayos que se le realizan a los asfaltos y a las mezclas asfálticas																
4	Realizar retroalimentación y verificación de resultados con estudios encontrados en la literatura																
Desarrollo documento final																	
5	Informe de resultados, conclusiones y documentación final																

9. Recursos

9.1. Recursos Humanos

El proyecto de grado contara con la asesoría de magísteres (correspondientes a los asignados por la Universidad Santo Tomas a dictar los seminarios y a nuestro director de tesis) en las diferentes áreas del conocimiento que se requieran durante el desarrollo de la misma. (Ver Tabla 5)

Tabla 3. Perfil del personal que elabora la monografía.

Personal	Nombre	Perfil
Estudiante	José Manuel Rondón Mogollón	Aspirante Ingeniero Civil
Director	Juan Manuel Salgado Díaz	Magister en Ingeniería Civil – Énfasis en Infraestructura Vial

Nota: Esta tabla muestra los perfiles de los autores de la monografía.

9.2. Recursos Técnicos y operativos

Los recursos institucionales serán suministrados por la Universidad Santo Tomas, sede Villavicencio. De donde se requiere bibliografía propia de la biblioteca relacionada con la temática del proyecto de grado.

Asimismo, se indica el detalle de aquellos elementos de índole operativa que se necesitaran en el trabajo de grado.

Tabla 4. Recurso operativo.

Detalle	Cantidad
Impresiones - Avances a color	50
Dispositivo USB - Almacenamiento 16GB	1
Papelería - Resma papel carta	1
Copias - Documentos / artículos / Empaste	100

Nota: Esta tabla muestra los recursos operativos a utilizar para esta monografía

9.3. Recurso Financiero

Los recursos con los cuales se financiará la realización de este proyecto de grado serán suministrados en su totalidad por el autor. No se requiere de financiaciones externas dado a lo reducido de las cuantías a utilizar. (Ver Tabla 7)

Tabla 5. Presupuesto

CONCEPTO	Hora semanal	Costo hora [Pesos]	Tiempo de dedicación [Semanas]	TOTAL [Pesos]
Personal				
Director – Ing. Juan Manuel Salgado Díaz M. Sc.	2	\$85.000	20	\$3.400.000
José Manuel Rondón Mogollón	12	\$20.000	20	\$4.800.000
SUBTOTAL				\$7.800.000
Recursos técnicos				
Adquisición de documentos pertinentes.	20	\$3.000	20	\$1'200.000
SUBTOTAL				\$1.200.000
Recursos operativos				
Gasto en papelería y unidades de almacenamiento e información				\$100.000
Redacción e impresión				\$50.000
Toma de copias – anillado o empaste de documentos				\$100.000
SUBTOTAL				\$250.000
SUBTOTAL GENERAL				\$9.250.000
Imprevistos (10%)				\$105.000
TOTAL GENERAL				\$9.355.000

Nota: Esta tabla muestra el presupuesto proyectado para la elaboración de la monografía.

10. Conclusiones

La recopilación bibliográfica sistemática de los últimos once años acerca del comportamiento del asfalto y mezclas asfálticas con diferentes características en escenarios específicos permitió comprender el efecto del envejecimiento y su afectación en el ciclo de vida del pavimento.

Se evidenció que, aun cuando existen nuevas metodologías, los métodos tradicionales continúan siendo eficientes, por lo que es valioso mencionar que continúan vigentes en la mayoría de las investigaciones en lo que respecta a la evaluación y comparación de los parámetros físicos, químicos y reológicos.

Los métodos de envejecimiento y métodos de evaluación, fueron similares, pues en estos los ensayos son los mismos; sin embargo, también se incluyeron otras condiciones importantes como la radiación solar, la humedad y la presencia de ensayos adicionales como análisis termográfico.

Al momento de realizar simulaciones de envejecimiento se requiere tener en cuenta los elementos externos e internos para un estudio adecuado de la durabilidad y su capacidad de soporte frente a los daños a los que estará expuesta la carpeta asfáltica.

El aporte realizado por medio de este documento es base importante en la línea de investigación de pavimentos, siendo una contribución apreciable para un estado del arte de un proyecto de tipo experimental que se enmarque en el territorio colombiano.

Este documento puede ser referencia de nuevas investigaciones que sean enfocadas al análisis de la influencia directa de los aglutinantes en las variaciones de los parámetros que inciden en el envejecimiento de las mezclas y el ciclo de vida del pavimento.

Con las publicaciones consultadas se dieron a conocer los nuevos ensayos a través del avance científico y tecnológico, donde se involucran nuevos aditivos químicos que se pueden utilizar para la recuperación de las carpetas asfálticas envejecidas.

La investigación futura debe estar orientada hacia el descubrimiento de las características del envejecimiento en asfaltos y el efecto que tiene sobre las mezclas asfálticas para formular un modelo de envejecimiento que se acerca a las condiciones reales.

11. Bibliografía

- Agudelo-Cendales, M.A. & Martínez-Gómez, S. (2019). Estudio comparativo del envejecimiento a largo plazo de una mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado. Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24074/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20ESPECIALIZACION%20EN%20INGENIERIA%20DE%20PAVIMENTOS.pdf>
- Arega, Z.A., Bashin, A., & De Kesel, T. (2013). Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods. *Construction and Building Materials*, 44, 168-174. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813002432?via%3Dihub>
- Barrasa, R.C., López, V.B., Montoliu, C.M.P.; Ibáñez, V.C., Pedrajas, J., & Santarén, J. (2014). Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 162, 188-197, <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877042814063009?token=4990A6FDC6EB0C97E89711D88B1EFA7C826002184C6592D6359F3C3FD71DDDF491F89CA149D1C47D6C9170615EC87B95&originRegion=us-east-1&originCreation=20220126150922>
- Betancourt Cardozo, F. (2018). Evaluación de los cambios químicos que experimenta el asfalto durante el proceso de envejecimiento a corto plazo y su relación con algunas propiedades físico-mecánicas. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69084?show=full>
- Bolívar Sierra, J.A., Suescún Florez, J.A., & Silva Mora, E.A. (2019). Estado del arte sobre el desarrollo de los aditivos que devuelvan al asfalto envejecido su estructura físico-química para restablecer su durabilidad. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/13118/1/2013_estado_art_e_sobre_.pdf
- Carrizales, A.R., Gonzales, Y.T., Garavito, M.P., & Benavides, R.H. (2021). Acción del agua y la temperatura ambiental extrema sobre pavimento flexible. *GnosisWisdom*, 1(2), 39-49. <https://journal.gnosiswisdom.pe/index.php/revista/article/view/17/12>

- Fernández-Gómez, W., Rondón, H., & Reyes, F. (2011). Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas: estado del conocimiento.
<https://es.scribd.com/doc/112503071/Envejecimiento-de-asfaltos-y-mezclas-asfalticas>
- Fernández-Gómez, W.D., Rondón Quintana, H.A., & Reyes-Lizcano, F. (2013). El fenómeno de envejecimiento en asfaltos y mezclas asfálticas. una revisión. Ingeniería e Investigación. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeeinv/article/view/37659/39979>
- Figueroa Infante, A.S. (2015). Investigación sobre el efecto del agua en el asfalto y su impacto en la mezcla asfáltica. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/33624/FigueroaInfanteAnaSofia2015.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Flores, G., & Gallego, J. (2021). Influencia del tipo de energía de calentamiento en el envejecimiento de las mezclas asfálticas. <https://gruposurfax.wordpress.com/2021/05/06/influencia-del-tipo-de-energiade-calentamiento-en-el-envejecimiento-de-las-mezclas-asfalticas/>
- Gamarra, A. (2014). Envejecimiento Termo-Oxidativo de Asfaltos. Doctoral dissertation, Universidad EAFIT. <https://docplayer.es/71183230-Envejecimiento-termooxidativo-de-asfaltos.html>
- García Melo, W. (2013). Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente. <https://1library.co/document/qog58g5z-estudio-influencia-envejecidocomportamiento-mecanico-concreto-asfaltico-producida.html>
- Granados Cristancho, Y.A. (2017). Importancia de los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69084?show=full>
- Guerrero, W.M.C., & Pabón, S.B.C. (2020). Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento. Revista Vínculos, 17(1), 7-23. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/16227/15831>
- Janet, L.D.E. . (2021).). Evaluación del asfalto recuperado por los métodos de destilación y rotavapor e impacto en el Grado de Desempeño. <http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/3160/1/IGMAC-281378-0621-621-Limeta%20Dionet%20Esbeydi%20Janet%20%20%20%20-A.pdf>

- Kikut Cruz, K., Baldi A., & Elizondo Salas, A.L. . (2020). Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte. *Infraestructura Vial*, 22(39), 12-19. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/41618/43523>
- Loor Torres, M.A. . (2021). Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas con núcleos de obras y briquetas procesadas en laboratorio. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/16609/1/T-UCSG-PRE-ING-IC394.pdf>
- López-Montero, T., & Miró, R. (2016). (2016). Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to ageing and moisture damage. *Construction and Building Materials*, 112, 299-306. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87784/17838631.pdf;jsessionid=6EA7051014758AC82256090564F5A3CE?sequence=1>
- Qin, Q., Schabron, J.F., Boysen, R.B., & Farrar, M.J. . (2014). Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging. *Fuel*, 121, 86-94. <https://daneshyari.com/article/preview/206239.pdf>
- Rincón Leal, S.A. . (2020). Estudio del impacto del envejecimiento en morteros asfálticos. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/50969/22990.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, D., Rodríguez C., Ramírez C., Flórez C. . (2016). Evaluación del efecto del envejecimiento del cemento asfáltico 80-100 modificado con lignina. *Ingeniare* N°20, pp. 47-61. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/408/319>
- Rondón-Quintana, H.A., & Moreno-Anselmi, L.Á. (2015). Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. *Ingeniería y universidad*, 14(2). 297-297. <http://hdl.handle.net/10554/25831>
- Sierra Arenas, C. (2020). Impacto del envejecimiento en la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/50965/23034.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Su, J.F., Shlangen, E., & Wang, Y.Y. (2015). Investigation the self-healing mechanism of aged bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and building materials*, 85, 49-56. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815003670?via%3Dihub>
- Vargas, X., & Reyes, F. . (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e investigación*, 30(3). 27-44.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000300003#:~:text=El%20fen%C3%B3meno%20de%20envejecimiento%20de%20los%20asfaltos%20altera%20las%20propiedades,complejo%20ha%20sido%20ampliamente%20estudiado

Villegas-villegas, R.E., Aguiar-Moya, J.P., & Loria-Salazar, L.G. (2015). Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con FTIR y su relación con los parámetros reológicos.

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/621/Estudio%20del%20envejecimiento%20y%20oxidaci%C3%B3n%20de%20asfaltos%20con%20FTIR%20y%20su%20relaci%C3%B3n%20con%20los%20par%C3%A1metros%20reol%C3%B3gicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wills Sanín, J. (2013). Estado del arte en modificadores de asfalto no convencionales . Bachelor's thesis, Uniandes.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/26134/u670325.pdf?sequence=1>