

COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VÍA SECA
CON CENIZAS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA PTAR DE ACACIAS, META.



FEDERICO ESTEBAN BARON DITTERICH

KEWIN SEABSTIAN DUQUE VELASQUEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020

COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA POR VÍA SECA
CON CENIZAS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA PTAR DE ACACIAS, META.

FEDERICO ESTEBAN BARON DITTERICH

KEWIN SEABSTIAN DUQUE VELASQUEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Directora

M.Sc MONICA YINETH LARA PEREZ.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2021

Autoridades académicas

P. JOSE 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

Esp. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN
Secretaria de División Sede Villavicencio

ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN
Decano Facultad de Ingeniería Civil.

Contenido

	Pag.
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Glosario.....	10
Introducción.....	11
Formulación del problema.....	12
Objetivos.....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
Justificación.....	14
Estado del Arte.....	15
Metodología.....	18
Etapa 1:.....	18
Etapa 2:.....	18
Etapa 3:.....	18
Etapa 4:.....	18
Etapa 5:.....	19
Desarrollo.....	20
Material granular y ligante asfaltico empleado.....	20
Ensayos realizados al material granular grueso y fino:.....	20
Resistencia al desgaste de los agregados (I.N.V. E-218).....	20
Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos agregados (I.N.V. E-223)	20
Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V. E-125).....	21
Límite plástico e índice de plasticidad (I.N.V. E-126).....	21
Equivalente de arena de suelos y agregados finos (I.N.V. E-133).....	22
Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V. E-222).....	23
Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (I.N.V. E-213).....	23

Caracterización de material granular.....	24
Ensayos realizados a la emulsión asfáltica	25
Penetración de los materiales asfálticos (I.N.V. E-706).	25
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (I.N.V. E-712).	25
Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (I. N.V. E – 709).....	25
Ensayos realizados al Biosólido	26
Revisión del lugar para muestreo	26
Muestreo desde tanque de almacenamiento	26
Equipo y tipo de muestreo utilizado.....	26
Pretratamiento	27
Diseño Experimental.....	27
Resultados e impactos.....	29
Ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto.....	29
Pesos de las muestras.	30
Propiedades físicas de las muestras.	31
Propiedades mecánicas de las muestras.....	32
Propiedades promedio de los diferentes porcentajes de asfalto.....	33
Representación gráfica de las propiedades de las briquetas.	34
Contenido óptimo de asfalto.....	35
Muestras con contenido de biosólido.....	36
Módulo resiliente	39
Factor de ponderación	39
Conclusiones y recomendaciones	47
Referencias.....	48

Lista de tablas

	Pag.
Tabla 1 Desarrollo metodológico.....	19
Tabla 2. Distribución de agregados para cada porcentaje de asfalto.	29
Tabla 3. Pesos de las muestras correspondientes al 4,5% de asfalto.	30
Tabla 4. Pesos de las muestras correspondientes al 5% de asfalto.	30
Tabla 5. Pesos de las muestras correspondientes al 5,5% de asfalto.	30
Tabla 6. Pesos de las muestras correspondientes al 6% de asfalto.	30
Tabla 7. Altura y volumen promedio de cada una de las briquetas.	31
Tabla 8. Peso específico de cada una de las briquetas.....	31
Tabla 9. Fluidez de cada una de las briquetas.....	32
Tabla 10. Estabilidad experimental y teórica de cada una de las briquetas.....	33
Tabla 11. Propiedades promedio de cada porcentaje de asfalto.	33
Tabla 12. Contenido óptimo de asfalto.	36
Tabla 13. Distribución de agregados los porcentajes de biosólido.	36
Tabla 14. Propiedades de las briquetas con inclusión de biosólido.....	37
Tabla 15. Cálculo del factor de ponderación, con base a la estación climática “Unillanos”	40

Lista de ilustraciones

	Pag.
Ilustración 1. Curva Granulométrica para mezcla densa en caliente, Tipo MDC-19.	24
Ilustración 2. Peso específico de las briquetas.	34
Ilustración 3. Estabilidad media de las briquetas.	34
Ilustración 4. Porcentaje de vacíos en las briquetas.	35
Ilustración 5. Fluidez en las briquetas.	35
Ilustración 6. Peso específico media para cada porcentaje de inclusión.	37
Ilustración 7. Estabilidad presentada por cada briqueta.	38
Ilustración 8. Fluidez presentada por cada briqueta.	38
Ilustración 9. Porcentaje de vacíos presente en cada briqueta.	39
Ilustración 10. Curva de factores de ponderación de temperatura.	41
Ilustración 11. Índice de penetración para t_{800}	42
Ilustración 12. . Estimación de la temperatura de la mezcla asfáltica.	43
Ilustración 13. . Módulo de rigidez del asfalto.	44
Ilustración 14. Nomograma para la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica sin inclusión de biosólido.	45
Ilustración 15. Nomograma para la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica con 50% de contenido de biosólido.	46

Resumen

El presente trabajo se desarrolla en un contexto de investigación, a través del cual se pretende evaluar el comportamiento y / o propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con ceniza biosólido por vía seca. El cumplimiento del alcance de la investigación se da en primera instancia, mediante la recolección de la materia prima "Biosólidos", con el fin de llevar a cabo la respectiva modificación y diseño de la mezcla asfáltica. Para lo cual se establece el área de obtención y suministro del material, la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) de Acacias, Meta.

En la ciudad de Villavicencio y sus municipios aledaños, la población y el abastecimiento de agua domiciliaria han ido en aumento, así mismo el uso de dicho recurso hídrico está limitado por la disponibilidad de los afluentes de agua que proveen agua para el consumo de la población. El aumento de la demanda tiene como consecuencia un crecimiento exponencial en el volumen de residuos sólidos, cuyo vertido, sin duda, son los afluentes de agua cercanos que facilitan su deposición, la disposición, evacuación y tratamiento inadecuados del recurso dañan la calidad del agua que luego será tratada para consumo humano.

Dicho esto, anteriormente, los municipios del Departamento están obligados a crear proyectos que involucren el diseño y construcción de nuevas PTAR para el tratamiento de aguas residuales; Las leyes que preservan y mantienen el medio ambiente no pueden permitir que los desechos orgánicos se depositen en los afluentes de agua y alteren la composición molecular del agua.

Palabras claves: Biosólido, Propiedades, Asfalto, Porcentaje optimo, Granulometría.

Abstract

The present work is developed in an investigative context, through which it is intended to evaluate the behavior and / or physical-mechanical properties of a dense hot asphalt mix modified with biosolid ash by dry means. Compliance with the scope of the investigation occurs in the first instance, through the collection of the raw material "Biosolids", in order to carry out the respective modification and design of the asphalt mix. For which the area for obtaining and supplying the material is established, the WWTP (Wastewater Treatment Plant) of Acacias, Meta.

In the city of Villavicencio and its neighboring municipalities, the population and the domestic water supply have been increasing, likewise the use of said water resource is limited by the availability of the water tributaries that provide water for the population's consumption. The increase in demand has as a consequence an exponential growth in the volume of solid waste, whose discharge, without a doubt, is the nearby water tributaries that facilitate its deposition, the inappropriate disposal, evacuation and treatment of the resource damages the quality of the water which will later be treated for human consumption.

That said, previously, the municipalities of the Department are obliged to create projects that involve the design and construction of new WWTPs for the treatment of wastewater; Laws that preserve and maintain the environment cannot allow organic waste to be deposited in water tributaries and to alter the molecular composition

Keywords: Biosolid, Properties, Asphalt, Optimal percentage, Granulomere

Glosario

Biosólidos: Son residuos orgánicos semisólidos producto de la purificación y limpieza del tratamiento de agua residuales.

PTAR: Plata de tratamiento de aguas residual.

Asfalto: Es una mezcla en estado sólido de hidrocarburos y minerales la cual se utiliza para pavimentar las rutas y calles.

Mezcla Asfáltica: Es el resultado de la combinación de agregados pétreos con el asfalto produciendo un material heterogéneo

Introducción

La gestión ambiental es un mecanismo de apoyo a la supervisión de operaciones realizadas en el entorno global terrestre con el fin de resolver problemáticas ambientales que alteran el ecosistema; las actividades domésticas e industriales son las principales fuentes de generación de residuos, causando un alto índice de biosólidos asimilables o urbanos que por poseer contaminantes se debe llevar un debido tratamiento (Mendoza & Rojas, 2012).

El tratamiento idóneo para tratar los residuos de las aguas servidas radica en la importancia de bajar el nivel de contaminación y aprovechar la materia prima que deriva los procesos y subprocesos de la limpieza del líquido, por ello, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada por vía húmeda con partículas seca de Biosólidos de la PTAR de Acacias.

Para el apropiado manejo de las aguas residuales, se debe tener la suficiente disposición de las estructuras hidráulicas, para llevar acabo todos los procesos requeridos en el tratamiento, control y distribución. Teniendo en cuenta los parámetros y límites establecidos en el reglamento técnico para el manejo del agua (Nannavecchia, 2016). El aumento poblacional ha generado el uso de estructura hidráulicas (Alcantarillado) en nuevas zonas de expansión en las ciudades, producto de esto conlleva al crecimiento de las aguas residuales producidas por los usuarios, provocando un problema ambiental para el control del material residual producido en la PTAR. Para el apropiado manejo de las aguas residuales, se debe tener la suficiente disposición de las estructuras hidráulicas, para llevar acabo todos los procesos requeridos en el tratamiento, control y distribución. Teniendo en cuenta los parámetros y límites establecidos en el reglamento técnico para el manejo del agua (Vidal & Villegas, 2009).

Formulación del problema

¿De qué manera se pueden aprovechar los biosólidos generados por la PTAR Acacias en el uso de la carpeta asfáltica en la estructura de un pavimento?

La calidad de los biosólidos depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales: metales, nutrientes y materia orgánica, contaminantes orgánicos y agentes patógenos, la caracterización de los biosólidos de la PTAR de Acacias dan como resultado para el aprovechamiento de dicho material contaminante para el uso ya sea en el área de agricultura, civil o aprovechamiento del recurso en suelos orgánicos (Figuerola, González, Jasso, Orona & Potisek, 2010).

El impacto medioambiental ocasionado por el crecimiento poblacional de la región del Meta, está provocando el aumento de materia contaminante en las PTAR, el problema radica en que no se tiene destinado un lugar preciso en donde se puedan almacenar o reutilizar estos residuos.

Por lo general, dichos contaminantes son incinerados debido a que es la forma más económica para desecharlos, el reto económico que afrontan los biosólidos es la forma de reutilizarlos, puesto que el volumen y la cantidad que se generan involucran tanto en la inversión en infraestructura necesaria para su tratamiento y la aplicación de nuevas tecnologías que reduzcan el daño ambiental (Vélez, 2007).

El incremento de las aguas servidas a nivel departamental y a su vez el aumento del material biosólido, hasta llegar a un punto en que no habrá cabida para almacenar el material contaminante, teniendo en cuenta su peligrosidad con la reacción que tiene con cualquier recurso hídrico o cuerpo de agua, que al tener contacto habrá una producción excesiva de fango disminuyendo el oxígeno disuelto en el agua y dañando la calidad del agua, esto perjudica el abastecimiento de agua para los municipios cercanos al cuerpo de agua, sus características físico-químicas impedirán o harán más costosa la potabilización

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada por vía húmeda con cenizas de Biosólidos de la PTAR de Acacias

Objetivos específicos

- ✓ Evaluar el comportamiento físico-mecánico de una mezcla densa en caliente modificada por vía húmeda.
- ✓ Caracterizar el asfalto modificado a través de ensayos de penetración, ductilidad, viscosidad y punto de ablandamiento
- ✓ Determinar el contenido óptimo de partículas de biosólidos en el ligante asfáltico, haciendo cumplimiento de las normas vigentes en el INVIAS.

Justificación

La sobreproducción de Biosólidos conduce al vertimiento inadecuado a fuentes hídricas, provocando un exceso de nutrientes en el agua, de igual forma ocasionando que otros organismos crezcan en abundancia y consuman gran cantidad de oxígeno disuelto, dañando la calidad de agua y provocando olores nauseabundos en la zona, esto por causa del mal manejo de políticas ambientales y reglamentos que competen al vertimiento de aguas residuales (Vélez, 2007).

Actualmente en Colombia se generan 274 toneladas de biosólidos por día, en donde el 97% de la producción es generada por tres plantas de tratamientos (El salitre, Cañaveralejo y San Fernando). La prelación dada a las alternativas requeridas para el uso y/o aplicación de los biosólidos, depende de su calidad y caracterización (Dágner, 2003).

El municipio de Acacias en el departamento del Meta, cuenta con una planta de tratamiento de las aguas residuales, la cual se ha puesto en funcionamiento desde el año 2009. El tratamiento realizado por esta PTAR, busca recolectar biogás generado por sus sistemas anaerobios, quedando rezagado el contenido de los lodos, hasta formar un volumen considerable para la empresa destinada e interesada en la disposición final y/o respectiva de los mismos, en este caso Bioagropecuaria del Llano (Donado, 2013).

En base a lo anterior se busca establecer una alternativa en función del manejo y aprovechamiento adecuado para el uso de los biosólidos generados por la estación depuradora (PTAR Acacias-Meta). [10] Teniendo en cuenta como base fundamental, la afectación ambiental provocada y la alteración a la composición ecosistémica, se pretende incorporar estos biosólidos, en el diseño de mezclas asfálticas, probando de igual manera el beneficio en las dos áreas de interés, (ambiental e infraestructura vial). (Barreto, 2016).

Estado del Arte

En el diseño de mezclas asfálticas se debe tener en cuenta tanto el porcentaje de asfalto como la proporción de agregados gruesos y finos, esto determinara las propiedades físico químicas de la mezcla para trabajar en condiciones óptimas para la cual fue diseñada. Se han venido realizando investigaciones para el mejoramiento de las características del asfalto esto con el fin de garantizar la prolongación de su vida útil con ayuda de adición de distintos materiales ya sean convencionales o no convencionales, estas investigaciones son una de las bases fundamentales para el planteamiento de la investigación y a continuación se presentan las reseñas investigativas más importantes.

(Calvo & Moreno, 2014) Establecieron como objeto de estudio la determinación del porcentaje óptimo de asfalto modificado para los agregados que componen la mezcla, incorporando por vía húmeda materiales tales como, cuero y caucho, evaluando el comportamiento de mezclas asfálticas densas en caliente (MDC-2), mediante el ensayo Marshall; los materiales se obtuvieron de botas desechadas por militares. Se realizó la caracterización a las muestras elaborados, en cuanto al material granular, cemento asfáltico y agente modificador, la modificación de la mezcla se llevó a cabo empelando diferentes porcentajes de cuero y caucho (1, 2, 4 y 8%). Según los ensayos realizados, se obtuvo como resultado que, al tener un mayor porcentaje de cuero, la mezcla presenta un aumento en su fluidez, asimismo, el mejor comportamiento se presenta en la mezcla que contiene 8% de aditivo, 100% de caucho, manteniéndose este comportamiento superior para todos los porcentajes en el 6% de asfalto modificado. La investigación evidencia mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla, puesto que la inclusión de caucho vulcanizado presenta mejoras en la rigidez, mayores deformaciones, y a su vez proporciona mayor estabilidad.

(Forigua & Pedraza, 2014) Establecieron como objetivo principal, diseñar mezclas asfálticas modificadas a través de la adición de desperdicios plásticos; determinaron el porcentaje óptimo de desperdicio plástico implementado en la mezcla los parámetros de la misma, mediante aplicación del método Marshall, esto en función de mejorar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico reduciendo el contenido total de polímeros; como resultado de la investigación, se obtuvo que el 0,4% de desperdicios plásticos de la muestra, es el porcentaje optimo que mejora substancialmente

las propiedades mecánicas del asfalto, además se evidencio que en porcentajes comprendidos entre 0,1% y 0,2% de desperdicio de polímeros.

(Mehmet, Nihat, Sebnem, Secan & Serdal, 2013) Estudiaron la forma en la cual podrían inducir ceniza producida por la cascara de arroz, como relleno mineral de la mezcla densa en caliente; obtuvieron como resultado que si la gradación de agregado es más grueso, se tendrá un mayor espesor de la película de la mezcla asfáltica, por otro lado, la determinación del contenido óptimo de asfalto de la mezcla se llevó a cabo mediante la medición de cuatro contenidos de asfalto, tomando el valor medio de dichas mediciones se determinó: máxima densidad aparente, máxima estabilidad, la mediana de los límites de vacíos de aire porcentuales en la mezcla total (4%), la mediana de los límites de huecos llenos de bitumen en el total de la mezcla (8%). En conclusión, se obtuvo la mezcla que presento el mejor comportamiento en la prueba Marshall son las que contienen 50% de piedra caliza y 50% de ceniza de cascara de arroz, estos utilizados como filler.

(Murillo & Orozco, 2011) Evaluaron el comportamiento de una mezcla asfáltica en caliente modificada con cenizas generadas por las locaciones petroleras, en lo cual establecieron como objeto primordial de estudio, la comparación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica (MDC-2) en su estado natural, en relación con la mezcla modificada en 5%, 10% y 15% de ceniza volátil como adición de ligante asfáltico; obtuvieron como resultado en la investigación, que en la muestra del 4,5% de asfalto contenido de 15% de ceniza, presento la mayor estabilidad de las muestras, asimismo, se comprobó que el aumento en el contenido de asfalto, aumenta considerablemente la fluidez de la mezcla

(Barrera & Rojas, 2016) Identificaron y analizar el comportamiento de un cemento asfáltico 60/70 modificado con diferentes porcentajes de grafito, entre los cuales adicionaron 5%, 10% y 15% de respectivo material, ante lo cual se estableció evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla densa en caliente modificada por vía húmeda. Como resultado de la investigación se encontró que al adicionar grafito al cemento asfáltico, este presenta un aumento en su rigidez, disminuyendo fisuraciones y entre otras patologías por cargas de transito; asimismo se evidencio y/o presento un incremento en la dureza del ligante, siendo capaz de soportar la implementación en altas temperaturas, puesto que de manera determinada el cemento asfáltico 60/70 en su estado original puede soportar temperaturas mayores a los 24°C (INVIAS, 2014).

Al modificar dicho cemento con grafito, se obtuvo una reducción en la aparición de deformaciones en la carpeta asfáltica. El estudio realizado, concluye que el 5% y 10% son las

dosificaciones optimas de granito para la modificación del cemento asphaltico; esto en razón a que se comprobó y obtuvo una disminución en los indicadores de exudación del asfalto y un rendimiento duradero del mismo.

(Lara, 2016) Evaluó las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica modificada con biosólidos de la PTAR salitre de Bogotá, a través de la investigación se determinó un contenido optimo del 4.6% correspondiente a asfalto y 50% de biosólido. Dicho estudio, permitió establecer una mejoría en las propiedades del asfalto, al obtener un aumento en magnitudes de la estabilidad, y fluidez, brindando una consistencia mayor al pavimento y reduciendo a futuro grandes patologías en las vías de la región. Por otra parte, el comportamiento ambiental de los biosólidos inducidos en la mezcla fue evaluado y, arrojó un impacto positivo para el ecosistema, a su vez, estos biosólidos en la mezcla no pueden ser considerados residuos tóxicos, por el contrario, se incentiva a la inclusión de dicha materia prima, en investigaciones y estudios futuros.

Metodología

Para el desarrollo de la metodología se necesitó un procedimiento cuantitativo y cualitativo con etapas descriptivas y específicas, a continuación, se presentan las etapas del desarrollo del proyecto

Etapas 1:

- ✓ Obtención de Biosólidos
- ✓ Recolección de Biosólidos en la PTAR de Acacias, Meta.
- ✓ Secado de Biosólido a temperatura ambiente

Etapas 2:

- ✓ Ensayos realizados al material granular y fino
- ✓ Caracterización del agregado fino
- ✓ Caracterización del agregado granular
- ✓ Caracterización del filler

Etapas 3:

- ✓ Ensayos realizados a la emulsión asfáltica
- ✓ Caracterización física de la emulsión asfáltica
- ✓ Elaboración de briquetas sin modificar
- ✓ Evaluar y determinar el contenido óptimo de asfalto

Etapas 4:

- ✓ Ensayos realizados al Biosólido
- ✓ Caracterización del Biosólido
- ✓ Determinación del porcentaje a modificar para cada briqueta

Etapas 5:

- ✓ Diseño experimental
- ✓ Modificar la mezcla del asfalto por vía húmeda
- ✓ Elaboración de briquetas con mezcla asfáltica modificada
- ✓ Fallo de briquetas por método Marshall
- ✓ Evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica

Tabla 1. Desarrollo metodológico

Objetivo	Actividad	Descripción
Evaluar el comportamiento físico-mecánico de una mezcla densa en caliente modificada por vía húmeda.	Etapas 2 Etapas 5	A partir de los ensayos realizados al material, se analizará su composición y se realizó el diseño experimental
Caracterizar el asfalto modificado a través de ensayos de penetración, ductilidad, viscosidad y punto de ablandamiento	1. Etapa 3	Descripción detallada de la composición de la emulsión asfáltica a partir de ensayos realizados a la muestra
Determinar el contenido óptimo de partículas de biosólidos en el ligante asfáltico, haciendo cumplimiento de las normas vigentes en el INVIAS.	1. Etapa 1 1. Etapa 4	Extracción de material natural procesado (Biosólido) en PTAR

NOTA: Descripción del cumplimiento de objetivos en las etapas del desarrollo del proyecto. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020

Desarrollo

Material granular y ligante asfáltico empleado

Los materiales utilizados en el desarrollo del proyecto de investigación fueron suministrados por la empresa PASOLIN S.A.S, ubicada en la ciudad de Villavicencio en el departamento del Meta, haciendo cumplimiento con todos los requisitos necesarios para la fabricación y distribución para una Mezcla Densa en Caliente tipo 19 (MDC-19).

Ensayos realizados al material granular grueso y fino:

Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles (I.N.V. E-218)

Este método se realiza para determinar la resistencia al desgaste del agregado pétreo a la abrasión teniendo en cuenta su composición mineralógica, se requiere un tambor de acero rotatorio el cual contiene en total 12 esferas metálicas, y el número de esferas a utilizar depende directamente de la granulometría de la muestra del ensayo. El tambor está compuesto por extremos cerrados y tiene en cada extremo un eje perpendicular a él, quedando el cilindro de modo tal que pueda girar en su eje horizontal con una pendiente aproximada de 1%, en la parte superior del tambor se encuentra un entrepaño de abrir y cerrar con tuercas metálicas, con el fin de colocar la carga abrasiva (esferas de acero) y la carga comprendida a evaluar, la carga abrasiva cae por efecto de la gravedad de extremo a extremo del tambor, creando así un efecto de impacto y trituración, tras finalizar el número específico de revoluciones, se procede a retirar el material y se tamiza la cantidad de agregado evaluado para medir su degradación, en un porcentaje de desgaste.

Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos agregados (I.N.V. E-223)

Este método se utiliza principalmente para obtener requiere balanzas, canastillas metálicas, tanque de agua dispositivo de suspensión y tamices, Se coloca una muestra de 2 Kilogramos de

material pétreo cubierto por una lámina por un tiempo estimado de 24 horas, para ocupar los espacios permeables que se los resultados de gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente, para el desarrollo se encuentren en el material. Se seca el material en un horno a una temperatura de 110 °C, se toman los pesos antes y después del secado del material para posteriormente dejar la muestra a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y luego sumergir en agua a temperatura ambiente durante 24 horas, luego se procede a secar las partículas con un paño grande absorbente y se toma el peso para determinar la masa en el aire, siguiente el procedimiento se coloca el material en el interior de la canastilla metálica y se determina su masa sumergida en el agua, para finalizar se seca la muestra en el horno a 110 °C, se deja a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su masa (INVIAS, 2014).

Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V. E-125)

El objeto principal de este método es encontrar el contenido de humedad expresado en porcentaje y se determinará si la muestra evaluada se encuentra entre el estado límite líquido y límite plástico; la muestra a utilizar deberá pasar por el tamiz No 40 y su peso será de 100 gramos, luego se debe ajustar la cazuela tal y como lo indica la norma, posteriormente se colocan 100 gramos de muestra en la cazuela en esta semihúmedo, se realiza una abertura de 10 mm de profundidad y se procede a realizar 25 golpes o menos, esto dependerá de cuando la abertura este cerrada, se toma el dato del número de golpes en el cual la abertura se cerró y se procede a realizar el mismo procedimiento para 35 y 45 golpes tal y como lo indica la norma, el contenido de humedad será dado en porcentaje y será la división entre la masa del agua y la masa del suelo seco al horno (INVIAS, 2014).

Límite plástico e índice de plasticidad (I.N.V. E-126)

El objetivo de este procedimiento que se le realiza a la muestra de un suelo, es determinar su índice de plasticidad en caso de que lo tenga y de qué manera influye el límite líquido conocido previamente. El material se coloca sobre una superficie de vidrio

y se presiona suavemente hasta conseguir una superficie lisa en forma de elipsoide con un

diámetro de 3.2 milímetros, en caso de que el material se desmorone por falta de consistencia antes de llegar a estas condiciones ideales el material evaluado no tendrá límite plástico. El índice de plasticidad de un suelo, en este caso de la muestra evaluada, se puede definir como la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico, en caso de que el límite plástico no pueda determinarse, el índice de plasticidad se colocara con la abreviatura NP, indicando No Plasticidad (INVIAS, 2014).

Equivalente de arena de suelos y agregados finos (I.N.V. E-133)

Este ensayo tiene como objetivo principal determinar las proporciones relativas del contenido de material proveniente de arcilla (arcilloso), y su desarrollo se podrá llevar a cabo en los suelos y agregados finos. El resultado final que se obtiene es un valor empírico de la cantidad relativa de finura y característica principal del material arcilloso presente en la muestra del suelo, que en este caso será de mínimo 3 pruebas realizadas a 1 muestra a evaluar.

El procedimiento se le realiza a una muestra de suelo de 1500 gramos de material que pase por el tamiz N°4 y se divide en 3 porciones de igual cantidad, se coloca sobre una superficie alta aproximadamente con una diferencia de 90 centímetros un galón de solución (cloruro de calcio), se irriga el material floculante a cada tubo de ensayo (cilindro de plástico graduado) hasta que llegue a 381 milímetros de altura, se deja reposar el material durante 10 minutos con el fin de que el material floculante separe las partículas de arena y arcilla, luego se agita el material con la solución hasta que las partículas de arena pierdan la cobertura arcillosa, el material arcilloso quedara en suspensión encima de la arena. Se deja pasar un periodo de tiempo en el cual las partículas pasaran por un proceso de sedimentación y se determinaran las alturas de las arcillas floculada y la arena en el cilindro.

La lectura de arcilla se llevará a cabo pasados 20 minutos del periodo de sedimentación y se anota la altura del nivel superior en donde se encuentre el material. La lectura de arena se llevará a cabo luego de haber tomado la lectura de arcilla; se introduce el conjunto del disco. La barra y el sobrepeso hasta que llegue al nivel inferior del material y se tomara la medida y se le restara 254 milímetros del valor registrado inicialmente. El equivalente de arena será la relación entre la altura de arena y la altura de la arcilla, expresada en porcentaje (INVIAS, 2014).

Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V. E-222)

Este ensayo tiene como objeto describir el procedimiento para determinar las gravedades específicas bulk y aparente, asimismo la absorción de agregados finos. Se necesitarán 500 gramos de material en este caso tendrá que ser agregado fino y deberá estar saturado y superficialmente seco, la cantidad de agua que se le agregara es aproximadamente 90% de su capacidad. La temperatura de la muestra debe ser 23°C. se remueve el material fino que se encuentra dentro del picnómetro, se seca en el horno a una temperatura constante de 110°C, se determina la masa del picnómetro llenado con agua a una temperatura ambiente, y para finalizar se toma el peso de la masa saturada y superficialmente seca, luego se podrá calcular la gravedad específica de los agregados finos con la ecuación específica bulk, la gravedad específica aparente y se calcula la absorción de finos, expresada en porcentaje (INVIAS, 2014).

Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (I.N.V. E-213)

El objetivo de este ensayo es determinar cuantitativamente la distribución relativa de los agregados gruesos y finos de un material en específico, por medio de tamices organizados de manera decreciente como lo estipula la norma. La muestra que se piensa evaluar debe estar previamente en el horno a una temperatura constante de 110°C por 24 horas, con el fin de que el material tenga la humedad óptima necesaria y evitar la segregación y pérdida de finos (INVIAS, 2014).

Además, se debe mostrar completamente la muestra para reducir su tamaño apropiado para realizar el ensayo, después de que la muestra haya estado en el horno, debe tener una masa mínima de 300 gramos para agregado fino y 2 Kilogramos para agregado grueso.

Después de tamizar el material, se procede a seleccionar tamiz por tamiz para pesar cada uno de ellos para continuar con el desarrollo de la curva granulométrica. Se calcula el porcentaje total retenido en cada tamiz y el porcentaje retenido en cada tamiz con base en la muestra inicial evaluada (INVIAS, 2014).

Caracterización de material granular

La granulometría de las partículas del agregado que se van a utilizar para la construcción de la mezcla debe cumplir los estándares mínimos estipulados en la norma correspondiente (INVIAS, 2014).

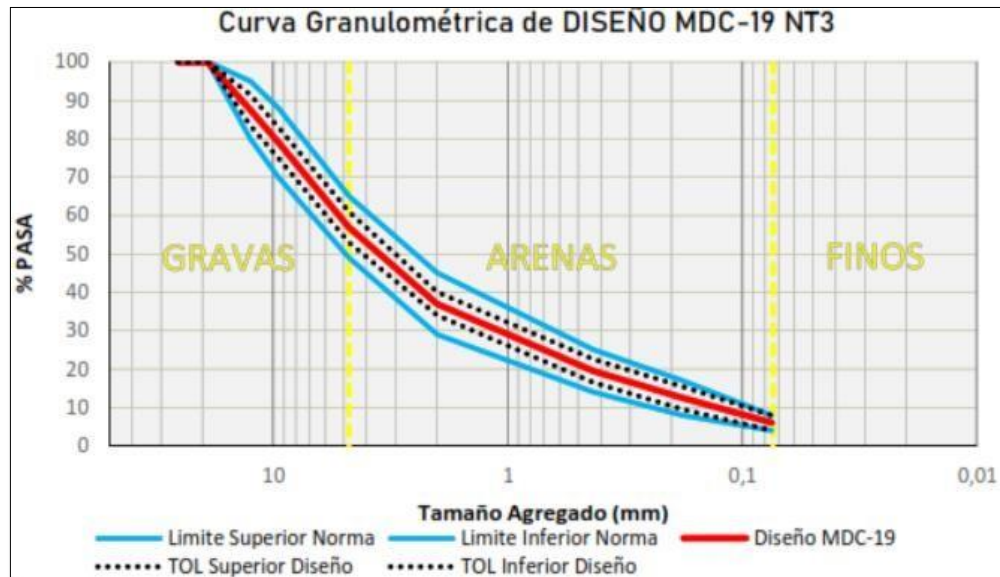


Ilustración 1. Curva Granulométrica para mezcla densa en caliente, Tipo MDC-19. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Ensayos realizados a la emulsión asfáltica

Penetración de los materiales asfálticos (I.N.V. E-706).

Este ensayo tiene como objeto seguir el procedimiento para determinar la consistencia de una muestra de asfalto. La cantidad de muestra que se debe preparar debe oscilar entre 400 a 500 gramos que se colocara en un recipiente circular, el cual se colocara en el horno a una temperatura de 110°C, se debe ir agitando el molde con el material para evitar sobrecalentamientos locales y homogeneizar el material hasta que alcance su estado líquido que permite ser vertido en las probetas. (INVIAS, 2014).

Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola) (I.N.V. E-712).

Se lleva a cabo el montaje de los especímenes con dos discos circulares pequeños en donde se coloca la muestra a analizar (Asfalto). Colocar los anillos con las dos muestras junto con sus guías para sostener las bolas de acero y se llena el recipiente de vidrio a una altura de 105 milímetros, se procede a iniciar un pre calentamiento del agua destilada hasta llegar a su punto de temperatura adecuada para finalizar el procedimiento, cada muestra tendrá una temperatura diferente a la cual el espécimen toco fondo del plato de base, la diferencia de temperatura no debe exceder de 1°C (INVIAS, 2014).

Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (I. N.V. E – 709)

Este procedimiento pretende describir el procedimiento adecuado para determinar los puntos de ignición y de llama, mediante el equipo copa abierta de Cleveland de productos pétreos. La copa es llenada en su totalidad a una temperatura que no exceda 56°C por encima del punto de ignición esperado de la muestra, en caso de que se haya llenado demasiado en la copa, se remueve el exceso empleando una pipeta u otro dispositivo que lo permita. Se enciende la llama del ensayo y el diámetro correcto será entre 3.8 y 5.4 milímetros. La temperatura a la cual se pretende llegar aproximadamente es de 56°C por debajo del punto de ignición esperado. Se pasa la llama a través

del centro de la copa, con un movimiento suave y continuo, se presta atención a todos los detalles relativos que puedan pasar, tales como, tamaño de esta, velocidad de incremento de temperatura y el paso de la llama sobre el espécimen de ensayo. (INVIAS, 2014).

Ensayos realizados al Biosólido

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación establece la norma NTC- ISO 5667-13 que fue ratificada por el concejo directivo de 1998-07-22. (Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas) (ICONTEC, 1998). Siguiendo los lineamientos y procedimientos descritos en dicha norma, el muestreo se llevó a cabo de la siguiente manera:

Revisión del lugar para muestreo

En primer lugar, se realizó la visita a la PTAR ubicada a las afueras del municipio de acacias con el fin de conocer los procedimientos y equipos que utilizan para llevar a cabo el debido tratamiento de las aguas residuales del municipio, se determinó cual sería el lugar más apropiado para la recolección de la muestra de manera manual.

Muestreo desde tanque de almacenamiento

El procedimiento que se llevó a cabo fue manual con elementos de Bioseguridad y realizo en el tanque de almacenamiento de lodos, con el fin de evitar el riesgo de enfermedades y peligro de contaminación, se utilizó una pala de mango de madera y cabeza metálica, se insertó en la parte superior del tanque y se recolecto 1 caneca de material, asegurándose de que la materia estuviera fuera del alcance de materia orgánica (troncos, palos, pasto y raíces).

Equipo y tipo de muestreo utilizado

Se utilizaron bolsas negras de polietileno y una caneca de plástico para almacenamiento y así evitar la contaminación del material. Se realizó un muestreo en diferentes partes del tanque de

almacenamiento, teniendo como resultado la recolección del material en 3 puntos diferentes.

Pretratamiento

El Biosólido recolectado en la PTAR se le realizó un tratamiento adecuado para su utilización, dicho material fue extendido durante 72 horas en una lámina metálica cubierta por una cinta de demarcación con el fin de evitar el contacto con las personas, pasadas las 72 horas la humedad relativa material fue eliminada por los rayos UVA Y UVB que corresponden a los ratos invisibles de la radiación ultravioleta del sol.

Luego de secado el material, se almaceno en una caneca de plástico a una temperatura ambiente y lejos del alcance de las personas. Al pasar los días, se le realizó un procedimiento descrito en la norma INVIAS (Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles I.N.V. E-218 (INVIAS, 2014).

En el procedimiento mencionado anteriormente, se colocó una muestra de 5000 gramos con 12 esferas metálicas en un tambor que está compuesto por extremos cerrados a 500 revoluciones por minuto, esto con el fin de generarle un desgaste cuantitativo al material y mejorar sus características físicas.

Para evitar la conglomeración de partículas de diferentes tamaños, se tamizo el material por el tamiz N°200 y fondo, como fin del tratamiento del Biosólido se pesó el material del fondo y se concluyó que el peso cumplía con los requisitos necesarios para la construcción de las briquetas modificadas. (Lara, 2016)

Diseño Experimental

Se prepara la mezcla asfáltica en una taza de un tamaño considerable, se pesa cada fracción del agregado de material granular necesario y se coloca en la tasa, se deja en el horno a 140°C durante 1 hora, igualmente el ligante asfáltico se calienta en el horno a 110°C hasta alcanzar un estado líquido. Se prepara la parrillera de calentamiento acompañado de un mechero para calentar a una temperatura constante la mezcla asfáltica. Encima de la parrilla de calentamiento se realiza la mezcla con los agregados gruesos, finos, filler y ligante asfáltico en el menor tiempo posible para evitar cambios bruscos de temperatura que puedan afectar la mezcla asfáltica.

Se limpia con gasolina el molde de compactación y se ajusta en el pedestal firme anclado al piso y se verifica que la temperatura de la mezcla asfáltica este a 110°C, en caso de no estarlo se deberá calentar en el horno durante 1 hora. Se coloca 1200 gramos de mezcla aproximadamente en el interior del molde de compactación y se empareja, aplicando 15 golpes a su alrededor. El aro de ajuste del equipo sujeta el molde de compactación, se coloca el martillo encima de la mezcla a compactar y se procede a realizar 35 golpes por cada cara en caída libre y verificando que el martillo siempre se encuentre en posición vertical.

Resultados e impactos

Para este proyecto se estableció un cemento asfáltico 60/70 y fue suministrado por la empresa PASOLIN S.A, se realizaron las pruebas y laboratorios respectivos al material bituminoso para establecer su uso y así poder realizar la dosificación de los agregados pétreos para cada una de las curvas de diseño para cada briqueta respectivamente.

Ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto.

Los porcentajes de cemento asfáltico utilizados para el desarrollo de las briquetas se estableció con un rango de 0.5 % empezado en 4.5% a 6.0% de la mezcla total. La tabla que se muestra a continuación muestra la cantidad de material granular que se utiliza en cada briqueta teniendo en cuenta los diferentes porcentajes de cemento asfáltico utilizados en cada briqueta.

Se emplea el ensayo Marshall para 12 muestras de diferentes porcentajes cada una, variando entre el 4.5% y el 6% de contenido de asfalto, y así poder estimar el porcentaje óptimo de asfalto para a realizar la inclusión de biosólido con dicha distribución mineralógica y de contenido de cemento asfáltico

Tabla 2. Distribución de agregados para cada porcentaje de asfalto.

Tamiz	%Retenido	4,5%	5%	5,5%	6%
1/2	13,8	157,7	156,9	156,0	155,2
3/8	10,2	117,1	116,5	115,9	115,3
N°4	14,7	168,7	167,8	167,0	166,1
N°10	28,1	321,9	320,2	318,5	316,9
N°40	13,7	157,1	156,3	155,5	154,7
N°80	9,2	105,2	104,7	104,1	103,6
N°200	3,7	42,7	42,5	42,24	42,0
Filler	6,6	75,6	75,2	74,8	74,4
Total	100	1146	1140	1134	1128

NOTA: Descripción de numero de tamices utilizados sumado el porcentaje retenido respectivamente. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Pesos de las muestras.

Se presentan las muestras para cada porcentaje de asfalto, en donde se determina humedad a partir del peso húmedo, obtenido a través del baño maría.

Tabla 3. Pesos de las muestras correspondientes al 4,5% de asfalto.

Nº ensayo	Peso seco (gr)	Peso húmedo(gr)	%Humedad
1	1236,5	1243,0	0,5
2	1124,0	1131,3	0,6
3	1220,0	1231,8	0,9

NOTA: Numero de ensayos realizados para la obtención de peso seco y húmedo. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Tabla 4. Pesos de las muestras correspondientes al 5% de asfalto.

Nº ensayo	Peso seco (gr)	Peso húmedo(gr)	%Humedad
1	1182,8	1188,7	0,5
2	1179,1	1182,8	0,6
3	1183,5	1193,1	0,9

NOTA: Descripción de los resultados obtenidos en cuanto a un 5% de contenido de asfalto. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Tabla 5. Pesos de las muestras correspondientes al 5,5% de asfalto.

Nº ensayo	Peso seco (gr)	Peso húmedo(gr)	% Humedad
1	1182,8	1188,7	0,5
2	1179,1	1182,8	0,6
3	1183,5	1193,1	0,9

NOTA: Descripción de los resultados obtenidos en cuanto a un 5,5% de contenido de asfalto. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Tabla 6. Pesos de las muestras correspondientes al 6% de asfalto.

Nº ensayo	Peso seco (gr)	Peso húmedo(gr)	% Humedad
1	1189,4	1195,0	0,5
2	1186,7	1190,3	0,6
3	1227,1	1227,0	0,9

NOTA: Descripción de los resultados obtenidos en cuanto a un 6% de contenido de asfalto. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Propiedades físicas de las muestras.*Tabla 7. Altura y volumen promedio de cada una de las briquetas.*

Nº ensayo	%Asfalto	Altura (mm)	Volumen (m3)
1	4,5	69,0	0,00176
2	4,5	62,8	0,00160
3	4,5	69,3	0,00176
4	5,0	63,7	0,00162
5	5,0	64,0	0,00163
6	5,0	63,5	0,00162
7	5,5	65,6	0,00167
8	5,5	63,8	0,00162
9	5,5	64,6	0,00164
10	6,0	65,2	0,00166
11	6,0	64,2	0,00163
12	6,0	65,4	0,00166

NOTA: Numero de ensayos realizados a cada una de las briquetas con su respectivo volumen y altura. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Tabla 8. Peso específico de cada una de las briquetas.

Nº ensayo	%Asfalto	Peso específico (kg/m3)
1	4,5	2351,073
2	4,5	2285,017
3	4,5	2326,025
4	5,0	2360,407
5	5,0	2371,480
6	5,0	2348,214
7	5,5	2358,724
8	5,5	2360,702
9	5,5	2356,863
10	6,0	2410,620
11	6,0	2420,355
12	6,0	2435,834

NOTA: Descripción de los resultados obtenidos por briquetas en cuanto a su peso específico y contenido de asfalto. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Se registra la altura y el volumen de las briquetas, con el fin de determinar el factor de corrección por altura y así determinar la estabilidad corregida.

Propiedades mecánicas de las muestras.

Los datos registrados en la siguiente tabla, se obtienen mediante la prueba Marshall, permitiendo evaluar su consistencia

Tabla 9. Fluidez de cada una de las briquetas.

N° ensayo	%Asfalto	Fluidez (mm)
1	4,5	2,87
2	4,5	2,96
3	4,5	3,21
4	5,0	4,78
5	5,0	4,22
6	5,0	5,03
7	5,5	5,72
8	5,5	5,30
9	5,5	6,33
10	6,0	6,05
11	6,0	6,27
12	6,0	5,45

NOTA: Numero de ensayos realizados a briquetas teniendo en cuenta su contenido de asfalto y su fluidez. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

En el registro de la estabilidad, se tienen dos tipos de estabilidad diferentes, ya que una es la obtenida a través del ensayo Marshall, y la segunda se obtiene a través del factor de corrección de altura, el cual depende de las variaciones de la altura de las briquetas.

Tabla 10. Estabilidad experimental y teórica de cada una de las briquetas.

N° ensayo	%Asfalto	Estabilidad experimental (kN)	Factor de corrección de altura	Estabilidad teórica corregida (kN)
1	4,5	5,51	0,877	4,832
2	4,5	5,33	1,019	5,431
3	4,5	7,34	0,871	6,393
4	5,0	8,64	0,995	8,597
5	5,0	7,82	0,988	7,726
6	5,0	7,02	1,000	7,020
7	5,5	11,14	0,951	10,594
8	5,5	11,69	0,993	11,608
9	5,5	8,64	0,973	8,407
10	6,0	10,01	0,958	9,590
11	6,0	10,25	0,983	10,076
12	6,0	9,21	0,954	8,786

NOTA: Descripción de características físico-mecánicas obtenidos de las briquetas construidas. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Propiedades promedio de los diferentes porcentajes de asfalto.

Tabla 11. Propiedades promedio de cada porcentaje de asfalto.

N° ensayo	%Asfalto	Peso específico promedio (kg/m ³)	Fluidez media (mm)	Estabilidad media (kN)	Vacíos (%)
1	4,5	2320,705	3,010	5,552	3,001
2	5,0	2360,034	4,677	7,781	3,587
3	5,5	2358,763	5,783	10,203	2,156
4	6,0	2422,270	5,923	9,484	1,579

NOTA: Numero de ensayos realizados a briquetas teniendo en cuenta su contenido de asfalto y su fluidez media. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Representación gráfica de las propiedades de las briquetas.

Una vez se tienen las medias de las propiedades físico-mecánicas, se evalúan gráficamente dichas propiedades, para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

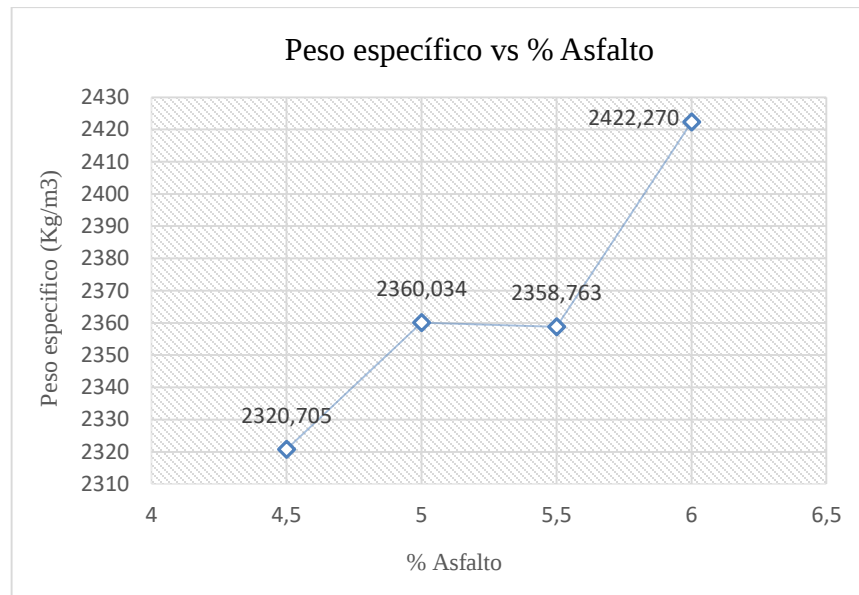


Ilustración 2. Peso específico de las briquetas en comparación con el porcentaje de asfalto empleado. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

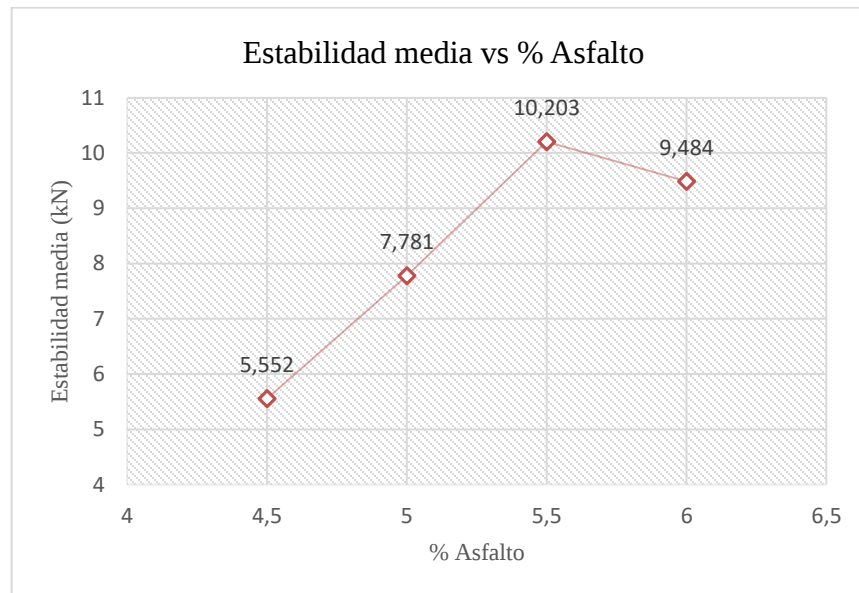


Ilustración 3. Estabilidad media de las briquetas en comparación con el porcentaje de asfalto empleado. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

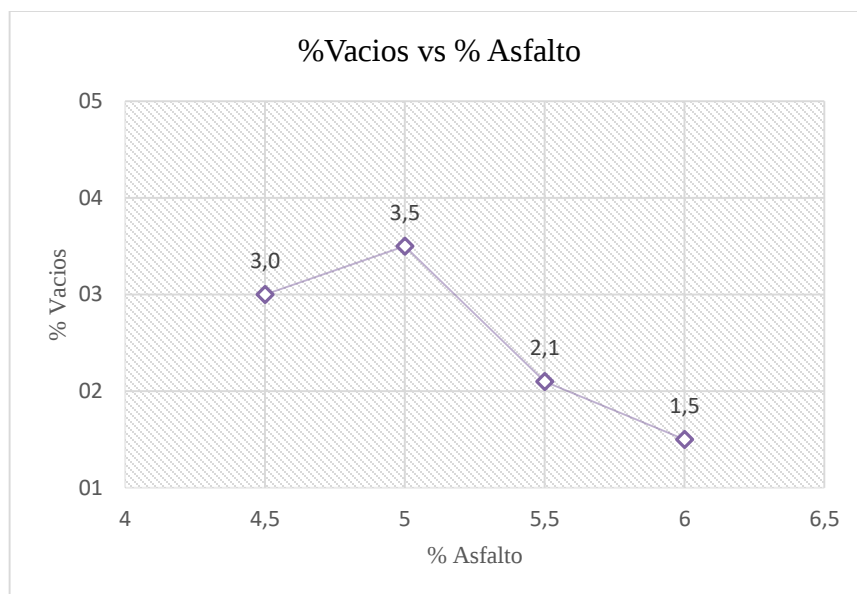


Ilustración 4. Porcentaje de vacíos en las briquetas en comparación con el porcentaje de asfalto empleado. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020

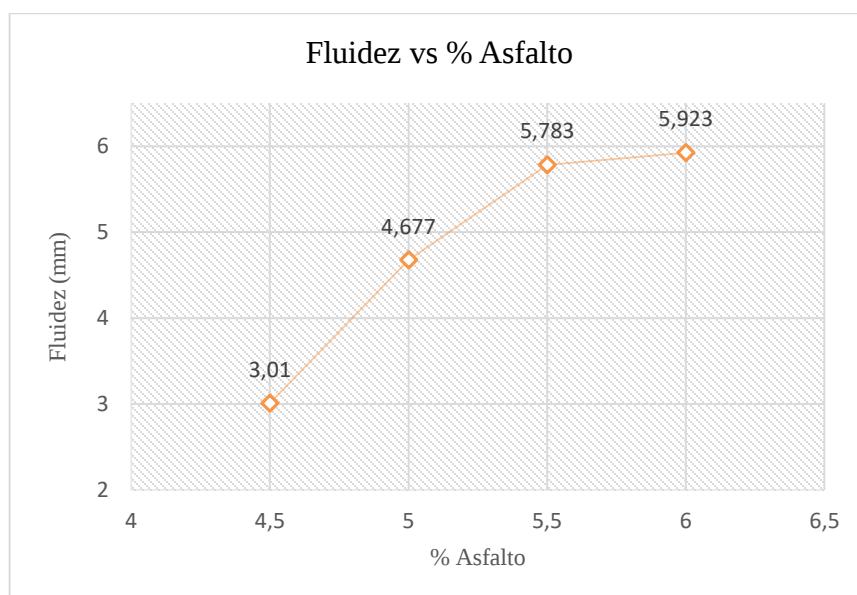


Ilustración 5. Fluidez en las briquetas en comparación con el porcentaje de asfalto empleado. Por Kewin, Duque. & Federico Barón,

Contenido óptimo de asfalto.

Para obtener los valores presentados en la tabla 12, se seleccionan los máximos del peso específico y estabilidad, mientras que, en las propiedades de porcentaje de vacíos y fluidez, se toman los valores correspondientes a la magnitud de rango 3 en cada una de estas. Al promediar los valores de las propiedades de las muestras, se obtiene un 5% de contenido óptimo de asfalto,

el cual se selecciona para la elaboración de las briquetas con inclusión de biosólido.

Tabla 12. Contenido óptimo de asfalto.

Propiedad	Contenido de asfalto (%)
Peso específico	6,0
Estabilidad	4,5
Porcentaje de vacíos	5,5
Fluidez	4,5
Contenido óptimo	5

NOTA: Descripción de las propiedades de las briquetas y su contenido de asfalto óptimo. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020

Muestras con contenido de biosólido

Con base al contenido optimo, se procede a elaborar las briquetas con diferentes porcentajes de inclusión de biosólido, para lo cual se seleccionan y clasifican los siguientes porcentajes de contenido de biosólido y agregados minerales:

Tabla 13. Distribución de agregados los porcentajes de biosólido.

Tamiz	%Retenido	0%	25%	50%	75%
1/2	13,8	156,9	156,9	156,9	156,9
3/8	10,2	116,5	116,5	116,5	116,5
Nº4	14,7	167,8	167,8	167,8	167,8
Nº10	28,1	320,2	320,2	320,2	320,2
Nº40	13,7	156,3	156,3	156,3	156,3
Nº80	9,2	104,7	104,7	104,7	104,7
Nº200	3,7	42,5	42,5	42,5	42,5
Pasa Nº200	6,6	75,2	75,2	75,2	75,2
Filler	-	75,2	56,4	37,6	18,8
Biosólido	-	0	18,8	37,6	56,4

NOTA: Descripción de resultados obtenidos en el tamizaje por el material granular. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Tabla 14. Propiedades de las briquetas con inclusión de biosólido.

N° ensayo	%Asfalto	Peso específico promedio (kg/m ³)	Índice media (mm)	Estabilidad media (kN)	Vacíos (%)
1	0	2320,705	3,010	5,552	3,001
2	25	2411,786	6,923	7,981	2,455
3	50	2333,49	3,024	10,798	2,783
4	75	2460,909	3,491	9,997	2,150

NOTA: Descripción de ensayos respecto al porcentaje de asfalto utilizado en cada briketa. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

En la anterior tabla, se evidencian las propiedades obtenidas a través del ensayo Marshall, ante lo cual se considera la representación gráfica de las mismas, para determinar sus rangos límites.



Ilustración 6. Peso específico media para cada porcentaje de inclusión. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

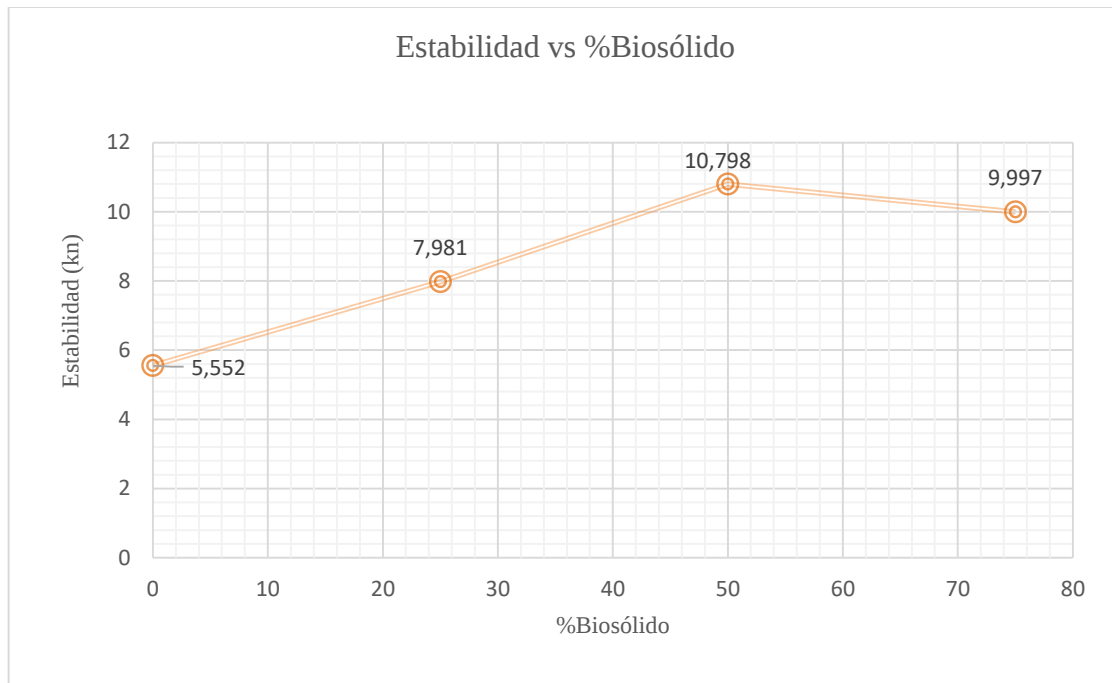


Ilustración 7. Estabilidad presentada por cada briqueta en comparación con el porcentaje de Biosólido. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

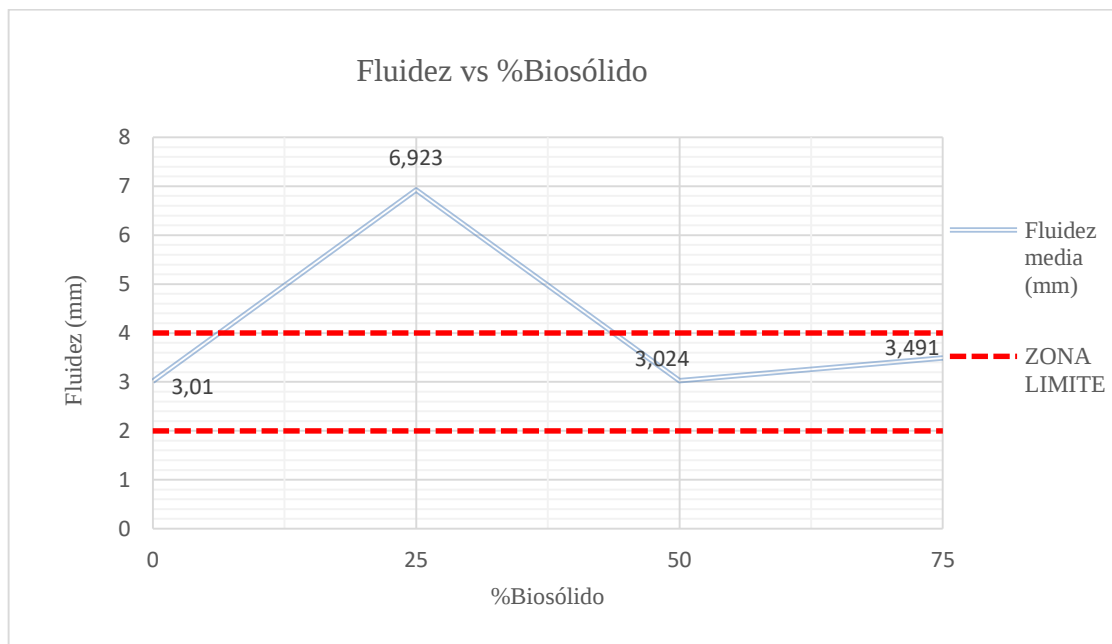


Ilustración 8. Fluidez presentada por cada briqueta en comparación con el porcentaje de Biosólido. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

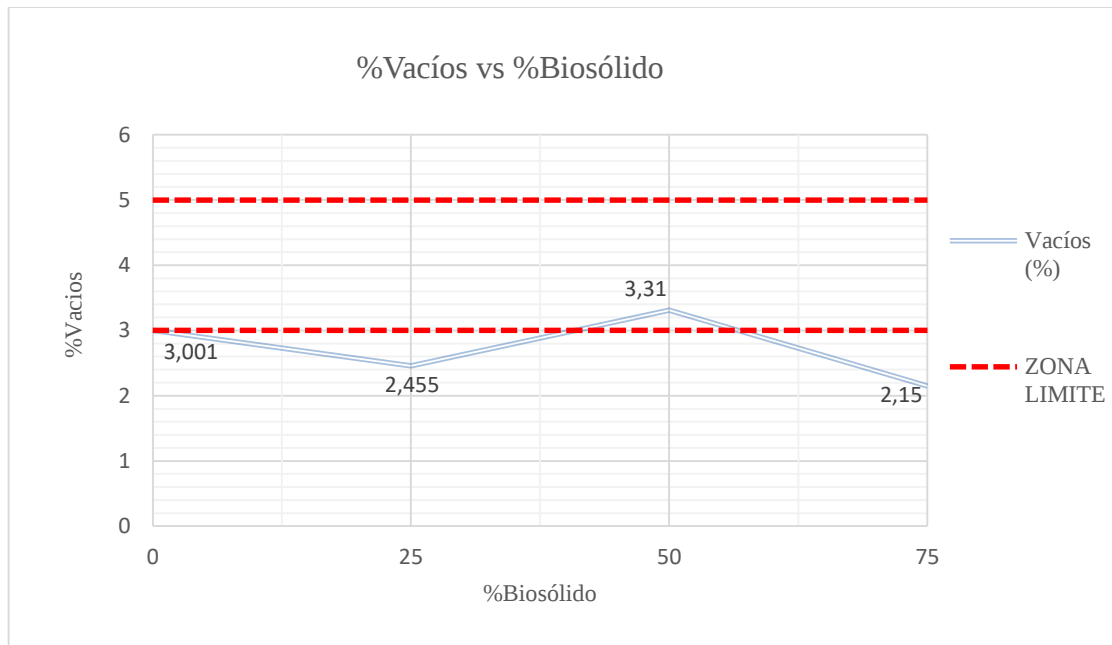


Ilustración 9. Porcentaje de vacíos presente en cada briqueta en comparación con el porcentaje de Biosólido. Por Kewin, Duque. & Federico Barón, 2020.

Cabe resaltar que el diseño de la mezcla que cumple con las normas técnicas del INVIAS es 50% llenante mineral (Filler) y 50% partículas de Biosólido, mejorando sus capacidades físico-mecánicas notablemente, y se observa que, al aumentar la estabilidad, este aumentará la capacidad de desplazamiento y deformación de las partículas, al disminuir su porcentaje de vacíos proporciona una mayor durabilidad a la mezcla y evitando un envejecimiento prematuro con el fin de prevenir daños superficiales y lesiones moderadas en la carpeta de rodadura. (Lara, 2016).

Módulo resiliente

Factor de ponderación

Para el cálculo del módulo resiliente, en primera instancia se debe tener en cuenta el factor de ponderación, y para estimar dicho factor, se debe considerar la temperatura del aire, media anual ponderada (TMAP), de la ciudad de Villavicencio en el departamento del Meta. Para el cálculo del factor de ponderación, se selecciona como estación cercana y fuente principal de información la de UNILLANOS, y así seleccionar una efectiva temperatura del asfalto para la apreciación del módulo resiliente.

Tabla 15. Cálculo del factor de ponderación, con base a la estación climática “Unillanos”.

Mes	TMMA °C	Factor Ponderación
Enero	26,88	2,64
Febrero	27,23	2,83
Marzo	26,5	2,43
Abril	25,41	2,10
Mayo	25,39	2,00
Junio	24,53	1,80
Julio	24,36	1,73
Agosto	24,72	1,90
Septiembre	25,61	2,20
Octubre	25,79	2,28
Noviembre	25,71	2,25
Diciembre	26,3	2,31
Factor Ponderación Total		26,47
Factor Ponderación Promedio		2,21

NOTA: Descripción mensual del factor de ponderación y la temperatura media máxima. Por Kevin, Duque. & Federico Barón, 2020

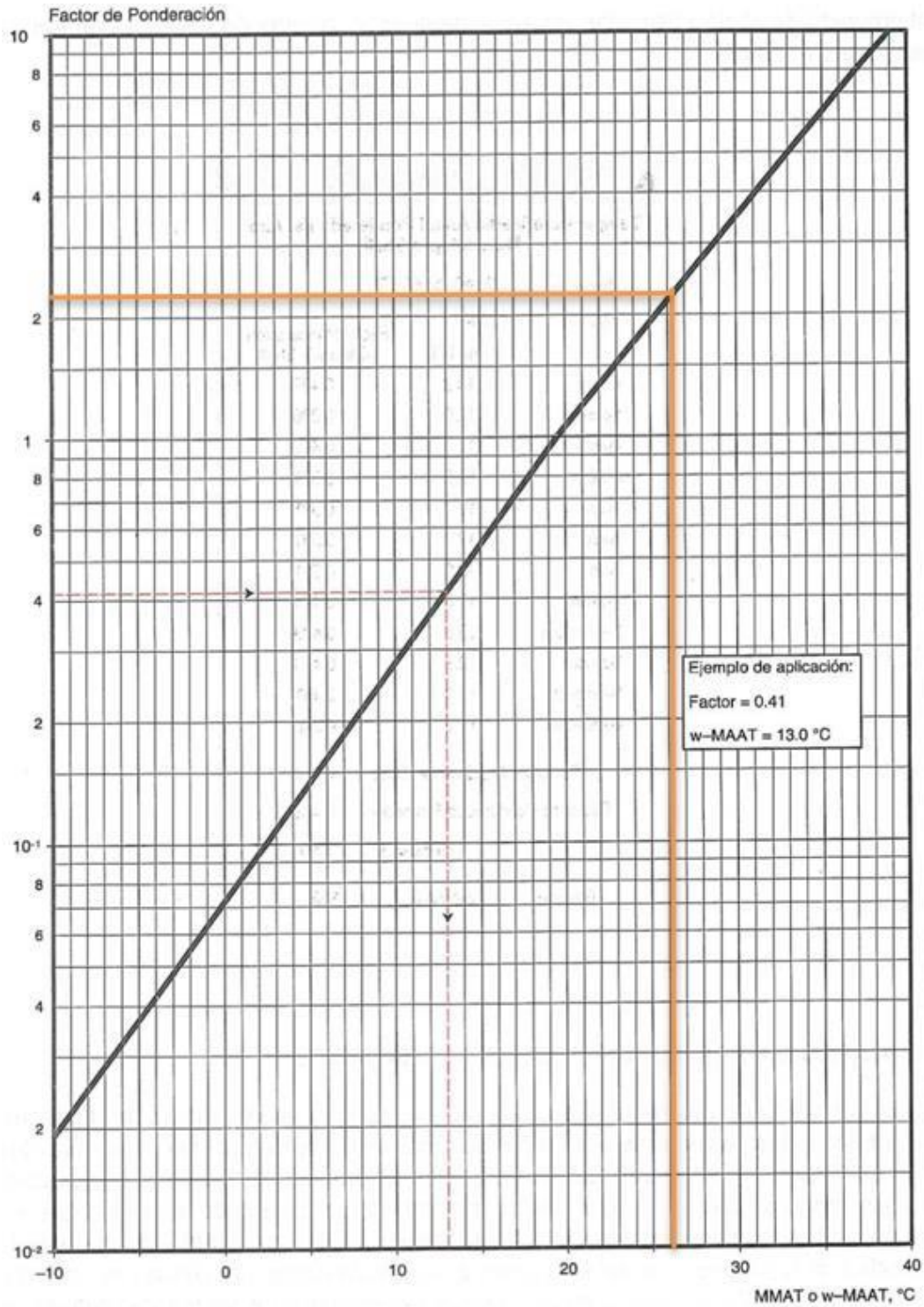


Ilustración 10. Curva de factores de ponderación de temperatura. Por shell international petroleum company limited, shell pavement design manual-asphalt pavements and overlays for road traffic. londres, 1978. p. 57.

Esta ecuación permite determinar la temperatura media anual promedio del aire en la ciudad de Villavicencio, tomando como referencia las temperaturas medias mensuales del aire de la estación climática UNILLANOS (IDEAM, 2019).

$$w - MAAT = 25,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

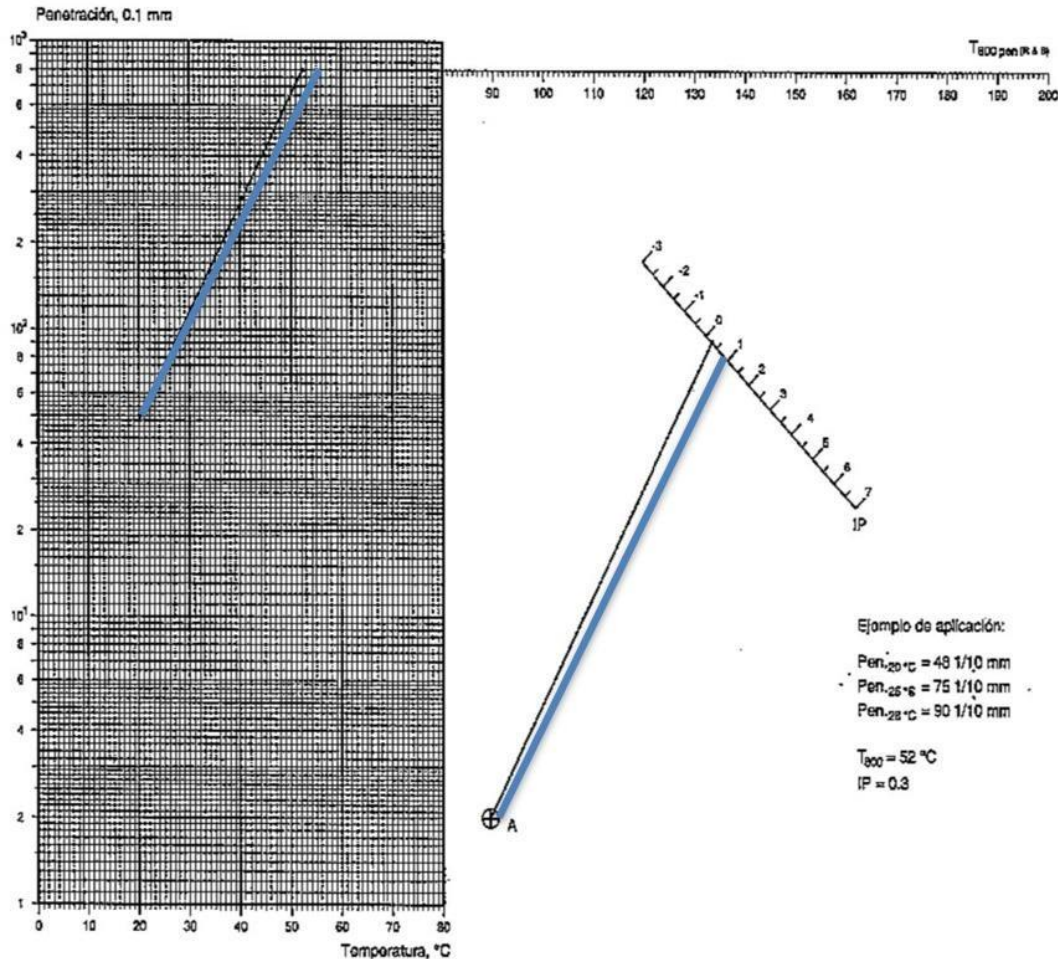


Ilustración 11. Índice de penetración para t_{800} . Por shell international petroleum company limited, shell pavement design manual-asphalt pavements and overlays for road traffic. londres, 1978. p. a - 2.

- Índice de penetración (IP): 0.9
- T₈₀₀: 55 °C

Modulo dinámico del asfalto (S_b), se determina a través de:

Consideración del índice de penetración.

Se estima la diferencia entre la temperatura media anual para T800, y la temperatura de la mezcla (T_{mix} en °C):

$$\Delta T = T_{800} - T_{mix}$$

Para el tiempo de carga la Shell recomienda un aproximado de 0.02 Segundos, correspondiente a un intervalo de velocidad de 58-68 km/h (Higuera, 2011).

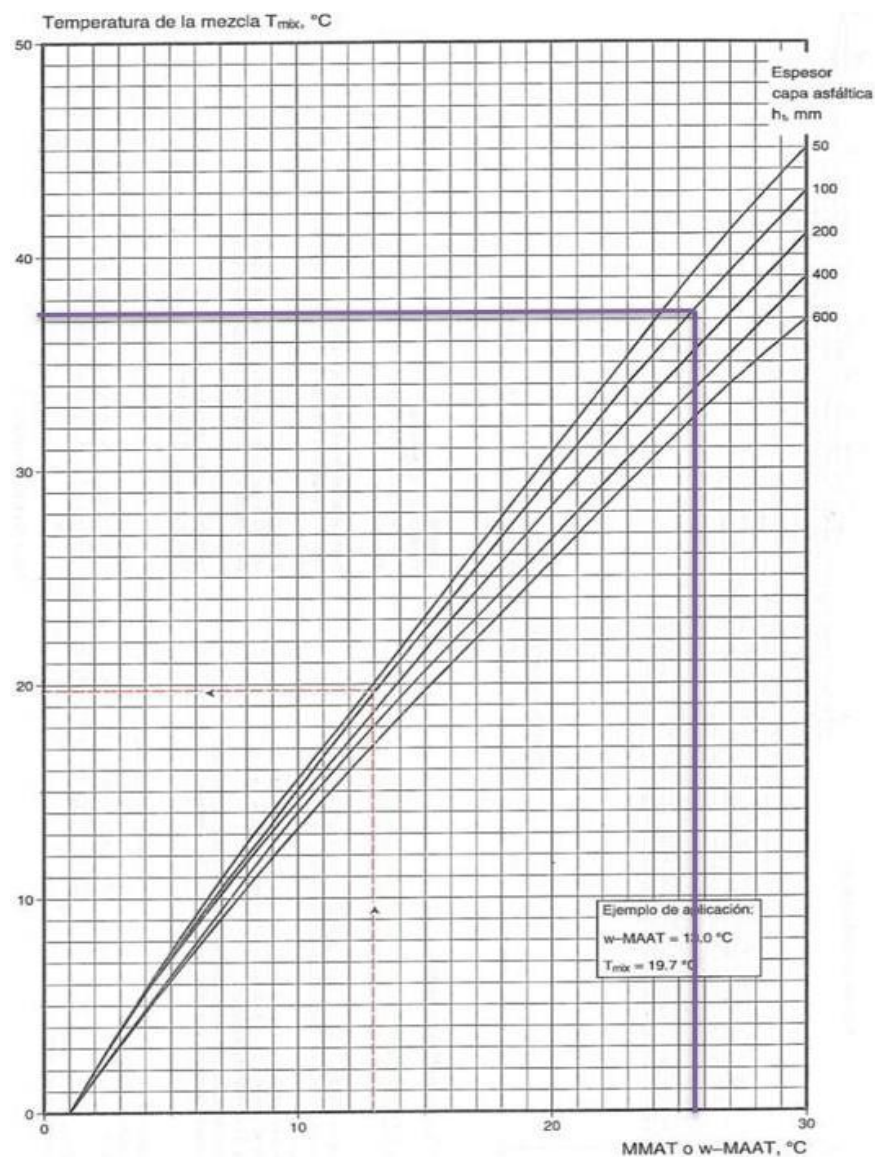


Ilustración 12. . Estimación de la temperatura de la mezcla asfáltica. Por shell international petroleum company limited, shell pavement design manual-asphalt pavements and overlays for road traffic. londres, 1978. p.

Mediante la figura 4, se determina la temperatura de la mezcla asfáltica:

$$T_{mix} = 37.2^{\circ}\text{C}$$

$$T_{800} = 55^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 55 - 37.2 = 17.8^{\circ}\text{C}$$

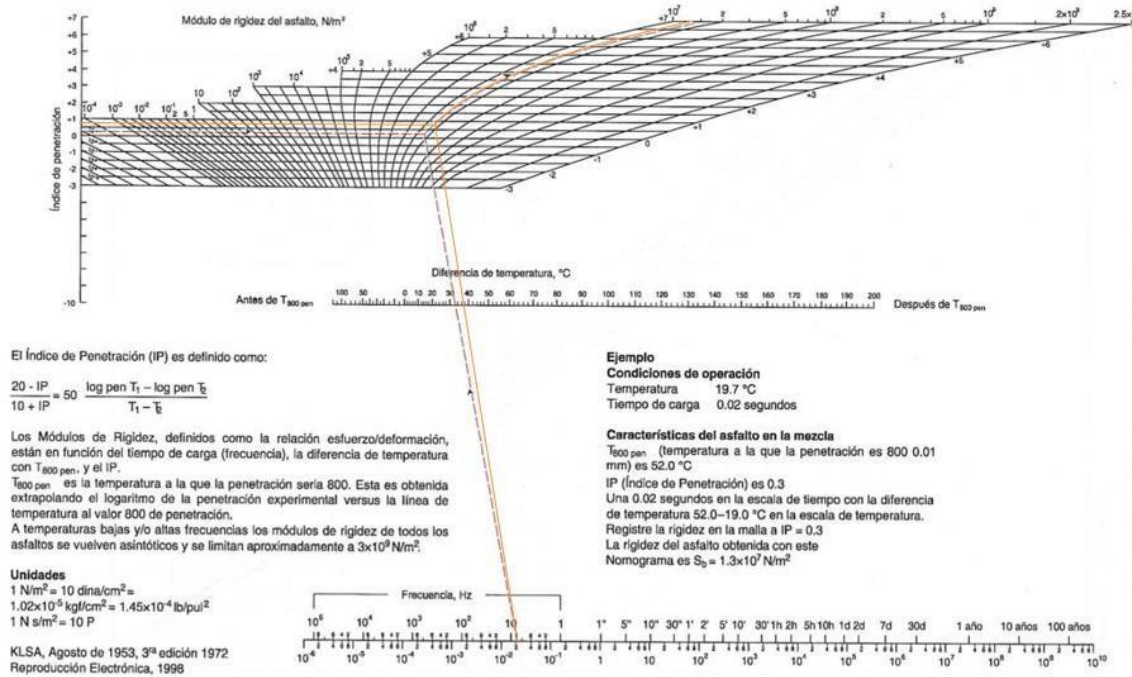


Ilustración 13. . Módulo de rigidez del asfalto mediante el nomograma de Van Der Poel. Por shell international petroleum company limited, shell pavement design manual-asphalt pavements and overlays for road traffic. londres, 1978. p. a-2.

La rigidez obtenida mediante el normograma de Van Der Poel es: $S_b = 0.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

- Módulo de rigidez de la mezcla S_{mix} sin inclusión de biosólido:

Tomando como datos base, el volumen de agregado mineral de la mezcla, el módulo dinámico del asfalto y el volumen de asfalto de la mezcla, se utiliza el nomograma de Bonnaure para estimar el módulo dinámico de la mezcla. (Higuera, 2011).

- Volumen de Volumen de agregado mineral de la mezcla: 91,4%
- Módulo dinámico del asfalto (S_b) = $0.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
- asfalto de la mezcla: 5%

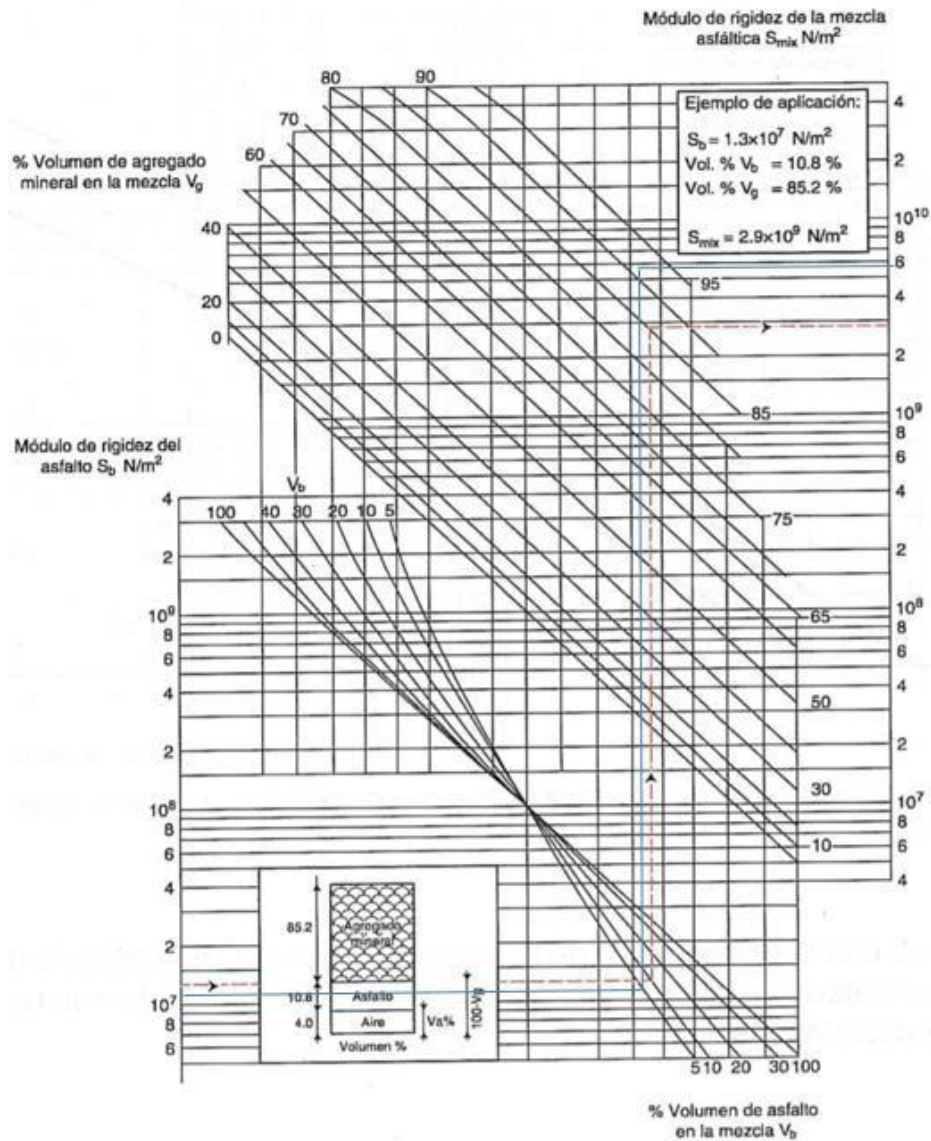


Ilustración 14. Nomograma para la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica sin inclusión de biosólido. Por shell international petroleum company limited, shell pavement design manual asphalt pavements and overlays for road traffic. londres, 1978. p. a-4.

- Módulo dinámico de la mezcla asfáltica $S_{mix} = 5.9 \times 10^9$ N/m², valor obtenido a través del análisis del nomograma de Bonnaure.

Módulo de rigidez de la mezcla S_{mix} con 50% de contenido de biosólido:

- Volumen de asfalto de la mezcla: 5%, Volumen de agregado mineral de la mezcla: 92,5%

- Módulo dinámico del asfalto (S_b) = 0.9×10^7 N/m²

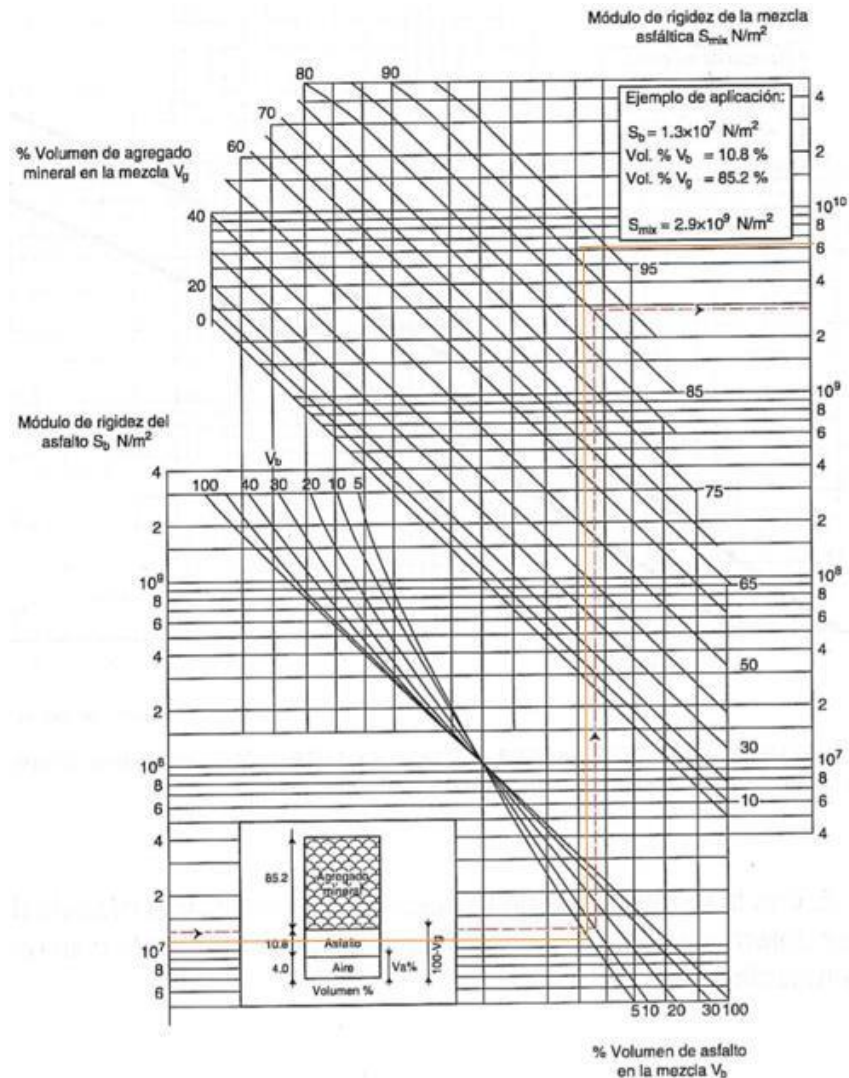


Ilustración 15. Nomograma para la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica con 50% de contenido de biosólido. Por shell international petroleum company limited, shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic. londres, 1978. p. a-4.

Módulo dinámico de la mezcla asfáltica con inclusión de biosólido: $S_{mix} = 6.2 \times 10^9$ N/m²,
 valor obtenido a través del análisis del normograma de Bonnaure.

Conclusiones y recomendaciones

El módulo resiliente obtenido para el 50% de inclusión de biosólido y para el 0%, no presento un aumento del espesor en la capa de rodadura, arrojando un análisis no significativo, esto corresponde a que el rango de variación es mínimo, y equivale a 0.3 en escala de $\times 10^9$ N/m². El anterior resultado se debe a que el filler y biosólido tienen una baja incidencia en el volumen total de la mezcla, otorgando un rol fundamental a los agregados minerales. Para lo cual se incentiva a la modificación de las mezclas por vía húmeda, y así poder hallar una reducción en los costos de la construcción de los pavimentos en la región.

El proyecto se desarrolló satisfactoriamente en las cinco etapas, se cumplió a plenitud el alcance y sus objetivos, se profundizó y desarrollo cada una de las sub etapas planteadas en la metodología con el fin de evaluar y analizar el comportamiento de la emulsión asfáltica y los agregados pétreos que se utilizaron en el diseño de la mezcla tipo 19 (MDC- 19), asimismo, se evaluó los procesos de modificación del asfalto sustituyendo en diferentes porcentajes (0%, 25%, 50% y 75%) el llenante mineral (Filler) con partículas de Biosólido que pasan el tamiz #200 obtenidos en la PTAR de Acacias, Meta.

A pesar del costo mínimo adicional que representa el secado del Biosólido a temperatura ambiente y su pre tratamiento para su utilización en la mezcla, el uso de este material en sistemas de pavimentación proporciona a la carpeta asfáltica múltiples beneficios en cuanto a las patologías tales como fisuras por reflexión de juntas, piel de cocodrilo y fisuras por desplazamiento de capas.

El futuro de las carreteras auto sostenibles está en la modificación de mezclas asfálticas por vía seca o húmeda con materiales que ayuden a disminuir la generación de contaminación ambiental, a pesar del poco desarrollo que se tiene en Colombia respecto al diseño de mezclas asfálticas con modificaciones en sus agregados pétreos, para este proyecto se obtuvo buena compatibilidad entre los Biosólidos y el asfalto 60/70, no siempre se obtiene la requerida y su fluidez no es la deseada, por esto, tiene a existir una separación entre partículas.

Referencias

- Barreto, N. (2016). *Caracterización de diseño mezcla asfáltico mdc-19, mezcla asfáltica asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC y mezcla asfáltica GRC con polímeros*. (Tesis de posgrado). Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/15937/BARRETONANCY2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barrera, J., y Rojas, P. (2016). *Mezclas densas en caliente modificadas por vía húmeda con Grafito*. (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002944.pdf>
- Calvo, D., y Moreno, A. (2014). *Estudio mecánico del asfalto modificado con polímeros y cueros que son utilizados en la elaboración del calzado*. *L'esprit Ingénieux*, 5(1). Recuperado a partir de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1231>
- Dágner. (2003) Gestión de biosólidos de la PTAR El Salitre, Pontificia Universidad Javeriana, Curso Internacional de restauración ecológica de canteras y uso de biosólidos, 28 de julio – 2 de agosto, Bogotá.
- Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D, De los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta*. (Tesis de Maestría). Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Figuerola, U., González, G., Jasso, R., Orona, I., & Potisek, M. (2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. *Terra Latinoam* [online]. Vol.28, n.4, pp.327-333. ISSN 2395-8030. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000400004
- Forigua, J., y Pedraza, E. (2014). *Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de Desperdicios plásticos*. (Tesis de posgrado). Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2575/1/Dise%C3%B1o-mezclas-asf%C3%A1lticas-modificadas-adici%C3%B3n-desperdicios-pl%C3%A1sticos.pdf>
- Higuera, C. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. Tunja, Boyacá - Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). *Gestión ambiental. Calidad de agua. Muestreo. Parte 13. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas*. NTC-ISO 5667-13:1998. Recuperado de <https://www.icontec.org/rules/gestion-ambiental-calidad-de-agua-muestreo-parte-13-guia-para-el-muestreo-de-lodos-de-aguas-residuales-y-plantas-de-tratamiento-de-aguas/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Estación meteorológica Unillanos. Recuperado de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Instituto Nacional de Vías. (2014). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- Lara, M. (2016). *Cenizas de biosólido de PTAR como llenante mineral en la Elaboración de mezclas asfálticas tipo MDC-19*. (Tesis de pregrado). Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/29857/2016m%C3%B3nicalara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Mendoza, L., y Rojas, R. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Scielo*. Vol.7, No.2 - 74•94. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a06.pdf>
- Murillo, J., y Orozco, G. (2011). *Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente con ceniza proveniente de locaciones petroleras*. (Tesis de pregrado). Recuperado de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1836/digital_21913.pdf?sequence=1
- Nannavecchia, P. (2016). *Contaminación antrópica de los cuerpos de agua. Estudio de su efecto sobre organismos del fitoplancton a escala ecológica y de bioensayos de laboratorio*. (Tesis Doctoral). Recuperado de https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6085_Nannavecchia.pdf
- Sebnem, S., Mehmet, S., Nihat, M., Secan, S., & Serdal, T. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and building materials*, ScienceDirect, 390-397. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813005473?via%3Dihub>
- Shell International Petroleum Company Limited (1978), shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic. Londres, p. 57.
- Vélez, J., Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Revista Limpia*. Vol. 2 No. 2. Recuperado de http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL_V2N2_57-71_biosolidos.pdf
- Vidal, E., y Villegas, M. (2009). *Gestión de los procesos de descontaminación de aguas residuales domésticas de tipo rural en Colombia*. (Tesis de posgrado). Recuperado de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/55/1/GestionProcesosDescontaminacion.pdf>