



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia

**ESTUDIO DE UNA SUB BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON GEOESTAB  
APLICADO A VÍAS Terciarias.**

**PRESENTADO POR:**

LIGY NORELLA PÉREZ RATIVA

**CÓDIGO:**506944

LEIDY ALEJANDRA VÁSQUEZ VANEGAS

**CÓDIGO:**506978

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ D. C.  
2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia

**ESTUDIO DE UNA SUB BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON MATERIAL  
TRATADO POR LA EMPRESA GEOAMBIENTAL APLICADO A VÍAS  
TERCIARIAS.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

LIGY NORELLA PÉREZ RATIVA                      **CÓDIGO:506944**  
LEIDY ALEJANDRA VÁSQUEZ VANEGAS      **CÓDIGO:506978**

**DIRECTOR:**

ING. JOSE EDUARDO RUEDA CÁRDENAS

**CO-ASESOR:**

ING. JUAN RAMÓN VARGAS MADRID

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ D. C.**

**2020**



## Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

**FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**FIRMA JURADO**

---

**FIRMA JURADO**

**Bogotá 2020**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este presente trabajo de investigación a mi querida madre María Isabel Rativa quien me acompaño y me apoyo en cada momento de mi estudio universitario, eres y siempre serás mi ejemplo a seguir. Adicional, dedico todos mis esfuerzos de la realización de este trabajo a mi querida abuela María Rativa, quien fue mi motivación para ser la primera Ingeniera Civil de la familia Rativa. Por último, a mi hermanita Sofía y a mi hermanito Kevin dedico este trabajo de grado, pues cada vez que pensaba en rendirme, eran ellos los que me daban fortaleza, sin saberlo, para seguir adelante con este proyecto que hace 5 años encamine y ya hoy finalizo.*

**Ligy Norella Pérez.**

*Dedico el presente trabajo de investigación, mi carrera profesional, todos y cada uno de los triunfos que he alcanzado a MI FAMILIA, ellos son mi motor, mi mayor apoyo y el motivo por el cual me he esforzado toda la vida.*

*A mis padres, por su amor incondicional, su entrega y acompañamiento durante este proceso que no fue fácil para ninguno, sin ellos no lo hubiese logrado, siempre tuvieron las palabras de apoyo necesarias en el momento indicado cuando estuve a punto de desfallecer.*

*A mi hermana Angélica, por ser mi ejemplo a seguir en todos los aspectos de la vida, porque siempre creyó en mí, por su acompañamiento constante, consejos y por su inmenso amor.*

*A mi hermano Henry y mi sobrina María Jose, quienes son la principal motivación para culminar esta etapa, voy a brindarles mi apoyo incondicional para que logren sus sueños.*

*Los amo infinitamente.*

**Leidy Alejandra Vásquez**

## **AGRADECIMIENTOS**

*En primer lugar, agradecemos a Dios por acompañarnos durante este largo camino que estamos culminando hoy, por su amor infinito y por no dejarnos desfallecer en los momentos difíciles que tuvimos durante este proceso.*

*Gracias a nuestras familias por su amor incondicional y por creer ciegamente en nuestras habilidades y disciplina para alcanzar este título universitario y por impulsarnos día a día alcanzar nuestros sueños; a amigos y compañeros por ayudarnos y acompañarnos en esta carrera de conocimiento.*

*Gracias a la Universidad Católica de Colombia por abrirnos sus puertas permitiéndonos desarrollarnos como profesionales, creando espacios propicios para la colaboración académica y el aprendizaje. Al Ingeniero co-asesor del presente trabajo de investigación, Juan Ramón Vargas por permitirnos hacer parte de su investigación, confiar en nuestro potencial y por su acompañamiento durante toda la investigación, al Ingeniero Eduardo Rueda por compartirnos su conocimiento y ayudarnos pacientemente en la construcción del informe final y finalmente, a la Ingeniera Laura Espinosa quien aunque ya no hace parte de la universidad, nos ayudó y acompañó durante el desarrollo de la idea principal de nuestra investigación.*

*Gracias a la empresa Geoambiental por suministrarnos la información sobre el material Geoestab objeto de investigación de este trabajo de grado y el aporte de los respectivos ensayos de laboratorio.*

*Esperamos ser profesionales integras, responsables y que aporten a la sociedad de este país con el conocimiento adquirido en nuestra etapa de formación.*

*A todos, Gracias Infinitas ;*

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objeto principal evaluar el aporte estructural del material suministrado por la empresa Geoambiental, que para efectos de esta investigación será llamado Geoestab, para la estabilización de una sub base granular clase A. De acuerdo a la revisión literaria se evidencia la falta de información sobre este material, ya que en la actualidad no está siendo empleado para usos de construcción por considerarse un residuo contaminante, siendo esta la primera propuesta de implementación del Geoestab para la estabilización de una sub base granular clase A. Sí bien algunos estudios han explorado la estabilización con otro tipo de materiales estabilizantes como lo son los asfaltos naturales, los cuales son referentes para esta investigación, teniendo en cuenta que el Geoestab es producto de desechos de petróleo e industriales y en la actualidad no tienen una disposición final, son almacenados en unos campos de infiltración donde reciben un tratamiento químico que disminuye la contaminación que el Geoestab pueda generar pero no en su totalidad, ya que su almacenamiento a cielo abierto permite que se contamine el suelo y los acuíferos presentes en la zona.

Para tal fin, se realizó el análisis de los ensayos de laboratorio de caracterización para el Geoestab en donde se identificó que es un material híbrido compuesto del 84% en peso por arenas finas y asfalto en una proporción del 16% en peso, se verifica que la sub base granular clase A a utilizar cumple con los requerimientos de la normativa del INVIAS, a continuación, se realizó la estabilización de la sub base con el Geoestab adicionándolo en dosificaciones del 4, 8, 12, 16 y 20% en peso. Finalmente, se analizó la resistencia de las dos sub bases (Sub base granular sin estabilizar y sub base granular estabilizada con el Geoestab) mediante la comparación de los resultados del ensayo de laboratorio del CBR, en donde se observó una disminución considerable de la resistencia de la sub base cuando se estabiliza con el Geoestab.

Un aspecto importante para tener en cuenta, es que, al realizar la mezcla, el Geoestab se agregó en frío, para una próxima investigación queda abierta la posibilidad que se estudie aumentando la temperatura para que esté desarrolle sus propiedades viscoelásticas logrando aglutinar y dar cohesión a las partículas y así, realice aporte estructural a la sub base granular, siendo este el propósito de la presente investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	12
2.	ANTECEDENTES .....	13
3.	JUSTIFICACIÓN .....	24
4.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	26
5.	MARCO DE REFERENCIA .....	28
5.1.	MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	28
5.1.1	Definición un pavimento.....	28
5.1.2	Estructura de un pavimento.....	28
5.1.2.1	Subrasante .....	29
5.1.2.2	Sub base granular .....	29
5.1.2.3	Base Granular.....	30
5.1.2.4	Capa de rodadura .....	30
5.1.3	Capas Estabilizadas.....	30
5.1.3.1	Estabilización química del suelo.....	30
5.1.3.2	Estabilización física del suelo .....	31
5.1.3.3	Estabilización de los granulares (capas de fundación).....	31
5.1.4	Tipos de Pavimentos .....	31
5.1.4.1	Pavimentos Asfálticos o Flexibles (PA) .....	31
5.1.4.2	Pavimentos Hidráulicos o Rígidos (PCH).....	32
5.1.4.2	Pavimentos Semirrígidos o Mixtos .....	33
5.1.5.	Vías Terciarias .....	34
5.1.5.1.	Vías de Bajos Niveles de Transito .....	34
5.1.6	Empresa Geoambiental.....	34
5.2.	MARCO NORMATIVO.....	35
5.2.1.	Sub-base granular Clase A.....	35
5.2.2.	Requisitos de calidad para los agregados de la Sub-base.....	37
6.	ESTADO DEL ARTE.....	39
6.1.	CALIDAD DE ADHESIÓN Y PROPIEDADES REOLOGICAS DE ASFALTOS RESIDUALES, NO MODIFICADOS Y NANO-MODIFICADOS, OBTENIDOS DE CRUDOS ESPESADOS DE PAVIMENTACIÓN.....	40
6.2.	DISEÑO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO.....	43

7. OBJETIVOS .....	49
7.1. General.....	49
7.2. Específicos .....	49
8. ALCANCES Y LIMITACIONES. ....	50
8.1. Alcance .....	50
8.2. Limitaciones.....	50
9. METODOLOGÍA .....	51
9.1. OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES .....	51
9.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	51
9.2.1. CARACTERIZACIÓN.....	51
9.2.1.1. GEOESTAB.....	51
9.2.1.2. SUB BASE GRANULAR .....	52
9.2.1.3. SUB BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON EL GEOESTAB.....	52
9.2.2. GUÍA DE DOSIFICACIÓN .....	53
10. ANÁLISIS DE RESUTADOS.....	55
10.1. CARACTERIZACIÓN GEOESTAB .....	55
10.2. CARACTERIZACIÓN SUB BASE GRANULAR.....	60
10.3. SUB-BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON GEOESTAB.....	62
10.4. GUÍA DE DOSIFICACIÓN.....	76
10.5. DISEÑO MÉTODO AASHTO.....	76
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
11.1. CONCLUSIONES .....	82
11.2. RECOMENDACIONES .....	84
12. BIBLIOGRAFÍA .....	85
13. RELACIÓN DE ANEXOS .....	89

## Índice de Figuras

Figura 1. Estadísticas de los derrames de petróleo en Colombia .....	14
Figura 2. Era 1 campo de infiltración Geoambiental. ....	15
Figura 3. Era 2 campo de infiltración Geoambiental. ....	16
Figura 4. Geoestab utilizado en vías. ....	17
Figura 5. Material Geoestab en laboratorio. ....	18
Figura 6. Yacimiento de asfalto natural en Colombia.....	21
Figura 7. Áreas de reservas estudiadas. ....	22
Figura 8. Estructura general de un pavimento. ....	29
Figura 9. Estructura de un pavimento flexible. ....	32
Figura 10. Estructura de un pavimento. ....	33
Figura 11. Estructura de un pavimento semirrígido. ....	34
Figura 12. Valores de trabajo de adhesión (a) en seco y (b) en húmedo .....	41
Figura 13. Valores de módulo dinámico para frecuencia de 5 Hz. ....	42
Figura 14. Curva granulométrica de los materiales estudiados.....	45
Figura 15. Curva granulométrica de diseño. ....	46
Figura 16. Ensayo MR para una mezcla con 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal. ....	47
Figura 17. Comparativa de MR de la base estabilizada con 2.4% de RAP y 1% de cal vs una base hidráulica tradicional. ....	48
Figura 18. Metodología.....	54
Figura 19. Distribución granulométrica. ....	57
Figura 20. Distribución Granulométrica Sub base Clase A .....	62
Figura 21. Valores energía de compactación. ....	63
Figura 22. Curvas de compactación Sub base granular + Geoestab. ....	65
Figura 23. Comparativo Dosificación del Geoestab al 4% de gráficas Penetración vs Esfuerzo. ....	67
Figura 24. Comparativo Dosificación al 8% de graficas Penetración Vs Esfuerzo. ....	68
Figura 25. Comparativo Dosificación al 12% de graficas Penetración Vs Esfuerzo. ....	69
Figura 26. Comparativo Dosificación al 16% de graficas Penetración Vs Esfuerzo. ....	70
Figura 27. Comparativo Dosificación al 20% de graficas Penetración Vs Esfuerzo. ....	71
Figura 28. Valores el CBR corregido al 0.2” .....	72
Figura 29. Valores el CBR corregido vs Peso unitario. ....	74
Figura 30. Valores el CBR al 95%.....	75
Figura 31. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 4%.....	77
Figura 32. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 8%.....	78
Figura 33. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 12%.....	79
Figura 34. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 16%.....	80

Figura 35. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 20% .....	81
--	----

## Índice de Tablas

Tabla 1. Uso típico de las diferentes clases de sub-base granular. ....	36
Tabla 2. Niveles de Tránsito. ....	36
Tabla 3. Requisitos de los agregados para sub-bases granulares. ....	37
Tabla 4. Franjas granulométricas del material de sub-base granular. ....	38
Tabla 5. Asfaltos residuales (AR) evaluados .....	40
Tabla 6. Resultados de calidad del material asfáltico analizado (grado PG). ....	44
Tabla 7. Resultados ensayo límites de límites de Atterberg. ....	55
Tabla 8. Resultados Extracción Cuantitativa de asfaltos en mezclas. ....	56
Tabla 9. Resultados caracterización material pétreo. ....	58
Tabla 10. Valor de Azul de Metileno. ....	59
Tabla 11. Requisitos de Agregados Para Base. ....	61
Tabla 12. Densidad de los especímenes .....	64
Tabla 13. CBR CORREGIDO 4% .....	72
Tabla 14. Resumen resultados ensayo CBR. ....	75

## 1. INTRODUCCIÓN.

La presente investigación está enfocada a la implementación de un nuevo material para el mejoramiento de sub bases en pavimentos flexibles. Lo anterior, con el fin de darle uso a un residuo que genera un alto impacto ambiental y que tiene potencial, por sus propiedades bituminosas, de ser explotado e implementado para el mejoramiento de las diferentes capas que componen un pavimento.

Hoy en día, se pueden encontrar en la naturaleza varios materiales bituminosos, los cuales se han venido implementando para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. Sin embargo, existe un material que proviene de lodos y desechos aceitosos resultantes del mantenimiento y limpieza de tanques, trampas de grasas, piscinas de retención y de oxidación, así como crudo deteriorado recuperado de derrames de petróleo y que es tratado usualmente en áreas a cielo abierto, para darle un uso más ecológico. El Geoestab, no se ha estudiado ni caracterizado anteriormente, y, por lo tanto, en la literatura no se evidencia un aprovechamiento del mismo, sea en la construcción de infraestructura vial del país o en cualquier otra industria.

Adicionalmente, la red vial de Colombia cuenta con aproximadamente 206.700 kilómetros, los cuales se dividen en vías primarias (19.306 km), secundarias (45.137 km) y terciarias (142.284 km) (Ministerio de transporte, 2019). De acuerdo al INVIAS, las vías terciarias son carreteras de acceso entre la cabecera municipal y las veredas, que a su vez comunican las veredas entre sí, estas normalmente se construyen en afirmado (Instituto Nacional de Vías, 2008), por lo cual el material objeto de esta investigación, al ser un residuo del petróleo puede aumentar las características de resistencia de la estructura de pavimento siendo una opción viable para la pavimentación de este tipo de vías. Con este proyecto de investigación se busca entonces presentar una nueva alternativa para la estabilización de una sub-base para pavimentos flexibles; evaluando las propiedades del material en cuestión, encontrando parámetros adecuados para poderlo normalizar y determinar la viabilidad de su uso.

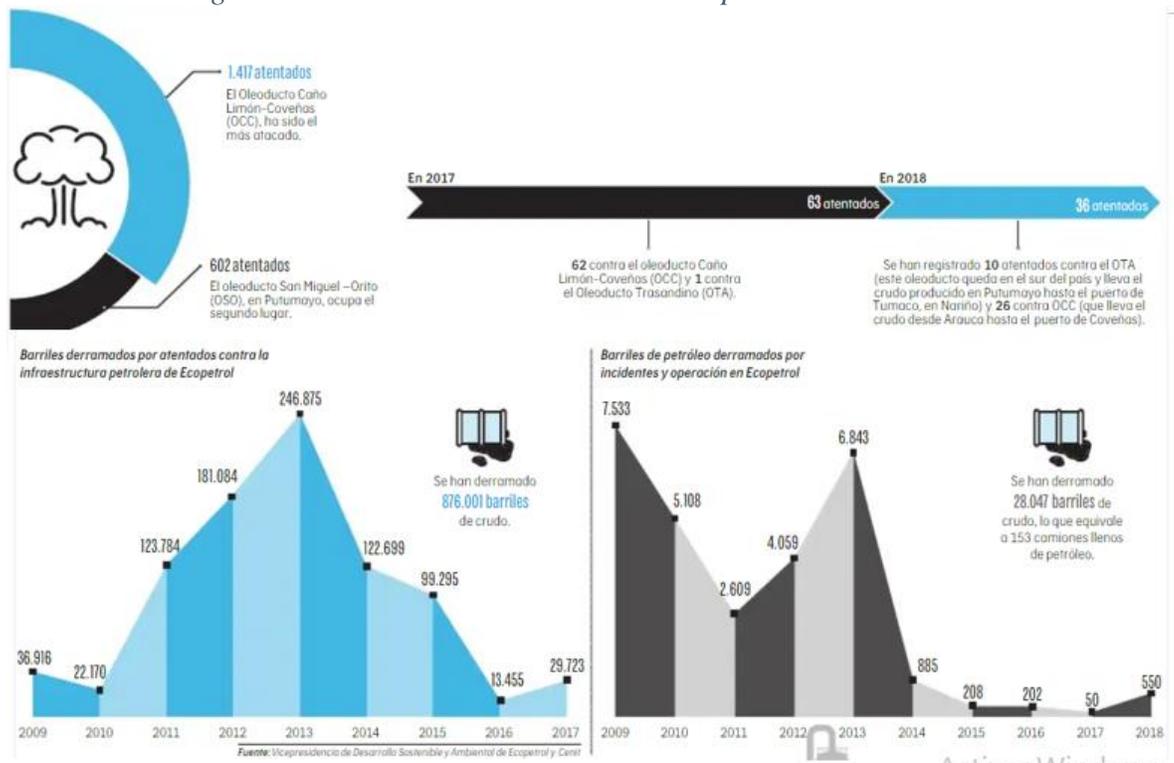
## 2. ANTECEDENTES

Desde años atrás la humanidad ha venido contaminando el medio ambiente de diferentes formas como la polución, la industria de curtiembres, etc. Prácticas inadecuadas en grandes industrias, como la petrolera, puede llevar a grandes e irreversibles deterioros de ecosistemas. Entre estas malas prácticas o accidentes, se encuentran los derrames de petróleo, que afectan a la fauna y flora que alcanzan, como a las comunidades que se encuentran en la zona del desastre.

En Colombia, los derrames de crudo se presentan principalmente por tres razones: deliberados y accidentales en el proceso de explotación, extracción y transporte o por atentados por grupos al margen de la ley a la infraestructura de transporte (oleoductos), según Velásquez J (2017), los derrames en el país alcanzan a superar 11 veces el derrame generado por el buque petrolero Exxon Valdez en Alaska en 1998, donde se derramaron más de 11 millones de galones en el mar superando la tragedia del golfo de México donde el vertimiento superó los 13 millones de galones al Océano Atlántico.

En la Figura 1, se presenta un comparativo entre los derrames generados por el ataque de grupos al margen de la ley a la infraestructura y los generados por incidentes en la operación de Ecopetrol en una ventana de tiempo de 8 años (2009-2017). El principal generador del residuo son los ataques a los oleoductos que alcanzaron los 876.001 barriles de crudo derramados y el año donde más ataques se presentaron fue el 2013 donde se llegaron a derramar 246.875 barriles, a su vez, los incidentes en la operación de Ecopetrol han derramado 28.047 barriles que es el equivalente a 153 camiones llenos de petróleo y el año que mayor volumen de crudo se derramó fue el 2007. En los últimos años se han reducido los derrames, posiblemente por los diferentes acuerdos de paz generados entre el Gobierno Nacional y algunos grupos al margen de la ley, pero es importante recalcar que los ecosistemas pueden tardar cientos de años para que se recuperen de los impactos ambientales, los cuales muchas veces generan un daño irreversible en el hábitat, la fauna y flora (Pardo, 2018).

Figura 1. Estadísticas de los derrames de petróleo en Colombia



Fuente: PARDO T (2018). Recuperado de: *Histórico derrame de petróleo*

Cabe recalcar que existen otros tipos de productos químicos que contaminan el medio ambiente, por ejemplo los derivados de los hidrocarburos como la gasolina, el querosene, aceites, combustibles, parafinas, y el asfalto, cuando se generan vertimientos de estos materiales no solo contaminan los suelos, sino que afectan las aguas superficiales y acuíferos presentes en las zonas intervenidas, reduciendo la cantidad de oxígeno disuelto los que genera un deterioro de las condiciones necesarias para la vida de gran cantidad de especies (Velásquez, 2017).

Una vez el crudo es derramado, pierde todo valor al “contaminarse”, el cual, pasa a considerarse directamente un desecho industrial. En la actualidad, este tipo de residuos de la industria petrolera es recogido y almacenado por la empresa Geoambiental en un campo de infiltración en Flandes Tolima, dicho campo esta seccionado en 10 “Eras” allí se dispone el

material recuperado, se le aplican químicos como lo es el Geolin para reducir el impacto que genera y con la ayuda de un tractor se homogeniza la mezcla para dejarla secar al sol y extraer la mayor cantidad posible de agua residual, el material Geoestab queda almacenado en la “Era” hasta que toma una apariencia seca, en las Figura 2 y Figura 3 se aprecian los campos y el material Geoestab, el proceso que se le da a ese material dentro del campo llamado “Era” es propiedad intelectual de la empresa Geoambiental.

*Figura 2. Era 1 campo de infiltración Geoambiental.*



*Fuente: Autores*

*Figura 3. Era 2 campo de infiltración Geoambiental.*



*Fuente: Autores*

Adicional, el Geoestab ha sido usado empíricamente por los mismos trabajadores del sector quienes lo han colocado como una capa de rodadura sobre los caminos perimetrales de las Eras compactado como se observa en la Figura 4 y sin ningún control, ha sufrido problemas de ahuellamiento.

*Figura 4. Geoestab utilizado en vías.*



*Fuente: Autores*

A continuación, en la Figura 5 se presenta la apariencia que toma el material Geoestab al retirarlo de la Era una vez se ha secado.

*Figura 5. Material Geoestab en laboratorio.*



*Fuente: Autores*

A partir de la literatura, se ha podido evidenciar la falta de información sobre este tipo de residuos, que, al ser considerados como desechos contaminantes, no se han implementado para el desarrollo de ninguna industria, hasta el momento. Por lo tanto, esta investigación busca generar nuevo conocimiento y encontrar la manera de utilizar este material, bajo la premisa de que este pueda llegar a ser considerado como un asfalto natural.

Según el INVIAS en el artículo 442P, una mezcla asfáltica natural en Colombia, es un *“material compuesto esencialmente de arenas finas y conglomerado impregnadas de asfalto, siendo este parámetro común para la mayoría de los depósitos que se encuentran en el territorio colombiano...”* (INVIAS, 2013). Este material, además, ha sido ampliamente usado para la estabilización de bases y sub-bases granulares de vías con un nivel de bajo tránsito (ante la normativa colombiana, NT1), es decir vías terciarias.

En Colombia, de acuerdo con Caro y Caicedo (2017), una mezcla asfáltica natural con un gran potencial es la denominada MAPIA, que se caracteriza por ser un material pétreo de tamaño variable, como arenas o gravas, impregnado de ligante asfáltico. Este material, se encuentra fácilmente en la superficie terrestre, ya que ha pasado por un proceso de destilación

de forma natural y se estima que existen por lo menos 26 minas de MAPIA en el país. Diferentes estudios se han centrado en caracterizarlo y lo han denominado más específicamente como una arena asfalto natural; ya que en una gran proporción se encuentra como una combinación de asfalto natural con partículas de agregados de tamaños iguales o inferiores 4.76 mm (Vásquez, L.C., 2002; Peña, 2010; Arbeláez et al., 2011). De igual manera, se ha encontrado que este material se ha venido empleando en la construcción de carreteras en Colombia desde 1928, según la reseña histórica sobre el empleo de asfaltos naturales realizado por Calderón en el 2009; y dado a los resultados obtenidos hasta el momento, se encontró que la arena asfalto puede ser utilizada para conformar capas superficiales de las vías con bajos volúmenes de tráfico (Calderón, 2009).

En el país, se ha venido generando diversas investigaciones sobre el material MAPIA o también conocido como “asfaltita”, por sus propiedades idóneas para el uso en construcciones viales. Como lo demuestra la investigación realizada de los Efectos del uso de asfalto como relleno en las propiedades mecánicas del asfalto de mezcla caliente (Mehmet, Y, Baha, V.K, and Necati, K, 2011), en donde usando relleno mineral con asfaltita se determinó un alto rendimiento al mejorar la resistencia al daño por humedad y la vida de fatiga. De igual manera, La Universidad de los Andes, realizó una investigación sobre el material MAPIA de la Mina Isaza, para determinar la variabilidad del material y la aplicación a diferentes tipos de proyectos viales, como la conformación de estructuras de pavimentos para vías terciarias, inicialmente se tomaron 5 muestras para caracterizarlas y cuantificar sus propiedades físicas, químicas, reológicas y mecánicas, se realizaron nuevos ensayos estableciendo una nueva metodología y así poder determinar las propiedades reológicas y mecánicas de la arena-asfalto o MAPIA, para verificar el comportamiento del material en campo, encontrando que este material genera un aumento de la capacidad del material para soportar carga, permitiendo controlar la aparición de deformaciones permanentes en el pavimento, el cual también puede ser aplicado a la fabricación de concreto asfáltico para vías con mayores exigencias de cargas (Caro y Caicedo, 2017).

De acuerdo a lo anterior, según Mantilla-Forero & Castañeda-Pinzón (2019), se ha tenido

que incorporar diversos aditivos a las mezclas asfálticas para mejorar del desempeño de los pavimentos, teniendo en cuenta que los esfuerzos a los que están sometidas las carreteras cada vez son mayores, por el cual se realizó el estudio experimental del efecto del caucho reciclado de llantas de automóviles en desuso y asfaltita en una misma mezcla, para caracterizar propiedades visco elásticas en el asfalto con esta adicción, generando una solución a una problemática ambiental, además resulta favorable al construir carpetas asfálticas, por el incremento considerable de rigidez y la elasticidad del asfalto (Forero y Pinzón, 2019). Por otra parte, de acuerdo al análisis realizado del uso y comportamiento de la asfaltita como Base y Sub-base granular, se buscaba incluir este material dentro de la estructura vial, determinando si esta alternativa favorece el comportamiento de las capas del pavimento, con los factores de contenido de materia orgánica y arcilla, granulometría y porcentaje de asfalto, pero se determinó que la asfaltita obtenida de la mina de San Pedro ubicada en Armero Guayabal, no cumple con los parámetros establecidos por la norma INVIAS, ya que su contenido orgánico es de 6.9%, siendo un valor alto, adicional el material pierde mayor resistencia a la base granular (Bustamante, N, González, A y Rodríguez, M. 2019). Con base a lo anterior, cabe aclarar que este es uno de los distintos lugares en donde se puede encontrar este tipo de material, como se observa en la Figura 6, en donde se muestra los yacimientos de asfalto natural en Colombia e indica yacimientos de asfaltita.

Figura 6. Yacimiento de asfalto natural en Colombia.

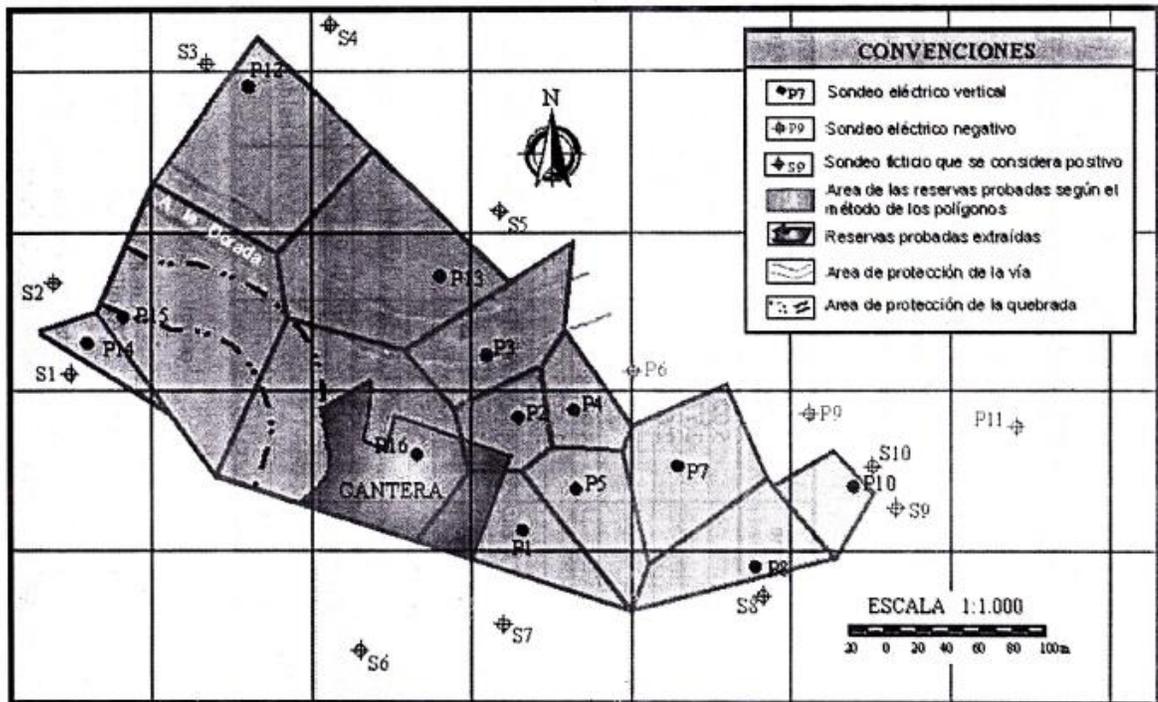


Fuente: Alarcón Luis, 2014.

Jimenez y Cruz (2004), realizaron la caracterización y evaluación de reservas del yacimiento de asfaltitas en el sector de Isaza, municipio de Victoria Caldas, en donde se establecen las reservas junto con la caracterización geológica-minera del yacimiento de asfaltitas en el sector de Isaza, Valle Medio del Magdalena, en la cual se da a conocer el potencial geológico-minero a partir de datos geofísicos SEV (Sondeos Eléctricos Verticales), geoquímicos (fluorescencia) y físico-mecánicos (cuantificados con la medición de los parámetros: penetración, viscosidad, contenido de asfalto, peso unitario-especifico, gravedad especifica-

API, granulometría de la materia mineral, entre otros). De acuerdo a la Figura 7 se presenta el área de reservas probadas en la cual se expone el yacimiento por las excavaciones realizadas, en donde se realizaron 16 SEV.

Figura 7. Áreas de reservas estudiadas.



Fuente: Jiménez, M; Cruz, M, 2004

Los resultados de dicha investigación arrojaron una clasificación de tres muestras de roca impregnada que corresponde a la parte basal, esta clasificación se realizó gracias a la revisión con luz fluorescente mediante tres filtros azul, verde y rojo en intervalos de tiempo entre 3 a 15 segundos, con la luz se realiza una correlación que arrojó como resultado que las rocas estudiadas corresponden a hidrocarburos pesados inmaduros y rocas reservorio superficial. Es posible diferir que hay presencia de rocas generadoras terciarias en el VMM (Valle Medio del Magdalena) pero se ve la necesidad de un estudio más profundo para determinar el grado de maduración de este tipo de yacimientos. (Jiménez, M; Cruz, M, 2004)

Por otro lado, a nivel internacional, en la isla de Trinidad y Tobago, existe un depósito de asfalto natural generado por un accidente geográfico. De acuerdo a Rondón, Hernández y

Urazan (2015), el TLA, o Asfalto del Lago de Trinidad, es un material de muy buenas características, ya que posee una alta viscosidad, desarrolla alta resistencia a la deformación permanente y genera una alta durabilidad en las mezclas en las que es empleado. Además, se ha encontrado que este tipo de asfalto ha sido utilizado en la pavimentación de importantes vías a nivel mundial desde 1815 y más recientemente, se presenta el origen de la utilización de este material como carpeta asfáltica (Timm y Col, 2014).

Finalmente, otro material que se encuentra en la naturaleza y que se ha comprobado que genera un impacto positivo en las características de la mezcla asfáltica es la Gilsonita. Este, es un material bituminoso compuesto principalmente de hidrocarburos y trazas de parafina; que según Sobhi, Yousefi y Behnood (2019) se puede implementar para modificar mezclas en caliente, ya que aumenta su resistencia mecánica, rigidez, viscosidad, punto de ablandamiento y grado de rendimiento a altas temperaturas. Sin embargo, por su componente parafínico puede llegar a desarrollar un comportamiento frágil a bajas temperaturas (Sobhi, Yousefi y Behnood, 2019)

A partir de la información anterior, se puede observar que la naturaleza ofrece directamente distintos materiales asfálticos, que hoy en día se utilizan para diferentes aplicaciones en el área de la infraestructura vial alrededor del mundo. Dicho esto, demuestra que estos materiales permiten impulsar el aprovechamiento de este tipo de recursos naturales y mitigar también el impacto ambiental que dejan los residuos de la industria petrolera.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La motivación principal detrás de este proyecto de investigación es la implementación del material Geoestab anteriormente mencionado para la estabilización de una base o sub-base granular según sea el caso. Lo anterior, buscando dar un uso más inteligente a este tipo de material y contribuyendo a la preservación del medio ambiente. En Colombia, uno de los factores de contaminación generados por la industria petrolera, se presenta a través del derrame del crudo; que en muchos casos se da a causa de las voladuras de oleoductos. Según un estudio realizado por EL TIEMPO, en la última década se han derramado alrededor de 3.7 billones de barriles de crudo, en atentados terroristas causados por parte de grupos al margen de la ley (Pardo T, 2018).

El material a investigar, proviene del almacenamiento de material recuperado situado en Flandes Tolima, caracterizado por tener una superficie totalmente llana en donde el uso del suelo se distribuye por agrícola, zona verde, bosques y otros (Alcandía de Flandes, 2019). Este material es depositado en este lugar en un campo de infiltración a cielo abierto llamado “Era”, dentro de las instalaciones de la empresa Geoambiental, como se ha mencionado con anterioridad se realiza un proceso de tratamiento a estos residuos patentado por la empresa el cual da como resultado un material menos contaminante para el medio ambiente, pero no en su totalidad puesto que el suelo en donde se almacena tiene afectaciones y con los años, se ha evidenciado que el almacenamiento de este material genera altos niveles de contaminación del suelo y de los acuíferos presentes en la zona, adicional el lugar ya está saturado por este material, por ende, el motivo principal de esta investigación es darle al material Geoestab un adecuado uso final en la estabilización de una sub-base granular, para pavimentos de bajos volúmenes de tránsito o a lo que se refiere vías terciarias, ayudando a disminuir la contaminación que este genera.

Con base a esto, y a la gran problemática ambiental y social que este material genera, en esta investigación, se busca estudiar la viabilidad de su implementación en la industria de la construcción vial, mejorando la posibilidad de construir vías con bajos volúmenes de tránsito

estabilizando la sub-base granular y así extender su vida útil. Para esto, se realizará el análisis a los ensayos de laboratorio realizados por la empresa Geoambiental, cuyo fin será caracterizar físicamente al material y a su vez determinar las propiedades mecánicas de este mismo. Por lo cual, realizando la estabilización de una sub-base granular clase A con el material Geoestab, se analizará que comportamiento tendrá, los beneficios que aportará y a su vez se verificará la capacidad estructural que aportará dentro de la estructura de pavimento.

#### **4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

En la actualidad la contaminación que generan los residuos de la industria petrolera, es un problema de impacto ambiental. Como bien ya se había mencionado, el material a investigar proviene de diversos desechos y en un gran porcentaje se encuentra el crudo deteriorado recuperado de derrames de petróleo que es tratado junto a los demás desechos por la empresa Geoambiental para disminuir su impacto ambiental y dan como resultado el material Geoestab, siendo almacenado en un campo de infiltración dentro de las instalaciones de la empresa Geoambiental, al cual le falta poco para ser llenado por este material.

De acuerdo a un estudio realizado por El Tiempo, la contaminación generada por los derrames no solo se genera por parte de los accidentes, sino también intervienen en gran parte los atentados generados por grupos armados como lo es la guerrilla, el ELN y las FARC. Uno de los casos más conocidos es el del oleoducto Caño Limón - Coveñas (OCC) (2019), cuyo derrame provocó la desaparición de las aguas cristalinas del pozo azul ubicado en el municipio de Tibú, que hasta el día de hoy tiene un aspecto de un estanque oscurecido (Semana, 2019). Por otro lado, según investigaciones, de cada 100 barriles de crudo derramado, por parte de estos atentados, se logra recuperar únicamente entre 25% y 30% del material. Lo que significa que, en Colombia, por lo menos 3.7 millones del crudo derramado queda afectando directamente al ecosistema. A causa de estas cifras tan elevadas, se han empezado a desarrollar actividades de descontaminación, que según el ICP (Instituto de Ciencias Políticas), buscan mitigar un poco el problema del derrame del petróleo (El Tiempo, 1997).

Dicho lo anterior, se resalta también el gran impacto que generan los desechos de la industria petrolera, en donde proviene el material a investigar, pues hasta el momento no eran considerados como un material reutilizable. Este material es recogido de residuos de lodos y desechos aceitosos resultantes del mantenimiento y limpieza de tanques, trampas de grasas, piscinas de retención y de oxidación, así como crudo deteriorado recuperado de derrames de petróleo para ser procesado y después almacenado en un centro de infiltración. Por lo que,

en la actualidad, se tiene una gran cantidad de Geoestab procesado al que no se le da ningún uso. Es por ello que, en busca de minimizar el impacto que genera este residuo al medio ambiente, esta investigación pretende caracterizarlo y determinar la forma de cómo se podría usar para estabilizar una sub-base y satisfacer así las necesidades de vías consideradas como terciarias.

¿Cómo puede realizarse la estabilización de una sub-base granular con el material Geoestab para el diseño y construcción de una estructura de pavimento de bajos volúmenes de tránsito?

## **5. MARCO DE REFERENCIA**

### **5.1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.**

Teniendo en cuenta que el objeto de este proyecto es la estabilización de una capa granular de un pavimento, es importante abarcar temáticas como la definición de los pavimentos y su estructura. Además, como estado del arte, se presentarán los materiales empleados en la actualidad para la estabilización de las capas granulares.

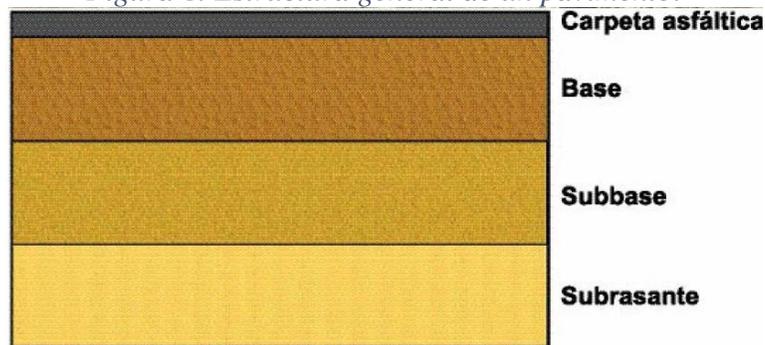
#### **5.1.1 Definición un pavimento.**

Según las generalidades del pavimento de Rondón y Reyes, el pavimento es una estructura vial compuesta por varias capas de materiales seleccionados, colocadas superpuestas una encima de otra de forma casi horizontal; de tal manera, que pueda recibir las cargas sobrepuestas por tránsito y medio ambiente, disipar los esfuerzos generados por dichas cargas a través de las diferentes capas y transmitirlos a la subrasante. Además, deberá ofrecer al usuario (parque automotor), seguridad, comodidad y economía, durante todo el periodo para el cual fue diseñado (Rondón y Reyes, 2015).

#### **5.1.2 Estructura de un pavimento.**

El pavimento está conformado por capas de materiales seleccionados y convencionalmente su estructura se compone de una subrasante (suelo de fundación), capas granulares (sub base y base), y la capa de rodadura. La presencia de dos capas granulares o solo de la sub base granular, dependerá del tipo de pavimento que se esté trabajando. Por otro lado, la capa de rodadura podría estar construida con concreto asfáltico o concreto hidráulico; en la Figura 8 se presenta la estructura general de un pavimento ( Rondón y Reyes, 2015; Mora, 2006; Sánchez, 1984).

*Figura 8. Estructura general de un pavimento.*



*Fuente:ingenieriareal.com*

### **5.1.2.1 Subrasante**

La subrasante corresponde al suelo de fundación, que será el terreno natural sobre el cual se construirá la estructura del pavimento. Se encarga de soportar los esfuerzos impuestos por el tránsito y que serán transmitidos por las diferentes capas de la estructura. Cabe recalcar que, si se posee una subrasante de buenas condiciones, la estructura del pavimento no necesitará ser muy robusta (menor espesor del pavimento). Lo anterior, dado que tendrá mayor capacidad para soportar los esfuerzos y no requerirá entonces una amplia disipación de los mismos a través de las diferentes capas. Sin embargo, si el suelo de fundación no posee las condiciones necesarias para soportar las cargas sobreimpuestas, se deberá realizar un mejoramiento mediante la colocación de capas de material seleccionado (Rondón y Reyes, 2015; Mora, 2006 y Sánchez, 1984).

### **5.1.2.2 Sub base granular**

La sub base granular corresponde a una capa colocada entre la subrasante y la base granular. Esta capa, tiene como función principal ayudar al drenaje de la estructura, evitando que el agua ascienda por capilaridad desde la subrasante o acuíferos cercanos o que se contamine la base con materia orgánica. Según la norma del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la sub base granular se clasifica en 3 tipos (A, B y C), en función a la calidad de los agregados y por ende al tránsito que deben soportar. En el pavimento flexible, la sub base granular trabaja entonces como una capa de transición entre la subrasante y la base granular y garantiza que

se transmitan correctamente los esfuerzos a la subrasante (INVIAS Cap. 3, 2013).

### **5.1.2.3 Base Granular**

La capa de base, está compuesta de material granular y tiene la función de reducir las tensiones verticales y las deformaciones de tracción que se pueden presentar en la capa asfáltica de un pavimento. Adicional, esta capa permite el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento (Universidad Mayor de San Simón, 2004), y en ocasiones, es estabilizada con materiales ligantes para aumentar su rigidez y reducir su susceptibilidad a deformaciones (Rondón y Reyes, 2015 y Sánchez, 1984).

### **5.1.2.4 Capa de rodadura**

Esta capa, corresponde a la capa superficial de la estructura del pavimento, la cual estará expuesta a los esfuerzos generados por el tránsito (ejes equivalentes) y el medio ambiente (Temperatura Media Ponderada del Aire TMPA y Precipitación Media Anual PMA). Por tal razón, deberá diseñarse para que soporte esfuerzos de fatiga y reduzca los esfuerzos verticales impuestos por los vehículos. Además, funciona como una capa impermeabilizante, ya que limita el paso directo del agua lluvia a las diferentes capas de la estructura del pavimento, (Rondón y Reyes, 2015; Mora, 2006). Sin embargo, dado que será la superficie de rodadura del pavimento y estará en contacto con el agua, debe asegurarse que presente una alta fricción para evitar accidentes (Universidad Mayor de San Simón, 2004).

## **5.1.3 Capas Estabilizadas**

La estabilización consiste en la incorporación de materiales seleccionados para mejorar las características de una capa determinada, mejorando su comportamiento ya sea mediante la adición de algún elemento químico o con un método físico.

### **5.1.3.1 Estabilización química del suelo**

Requiere que se establece una reacción química entre el agregado y los minerales de la fracción fina del suelo, dicha relación busca aumentar la cohesión del suelo mediante la impermeabilización del material (Dellarossa, 2013).

### **5.1.3.2 Estabilización física del suelo**

Este tipo de estabilización se enfoca en la aglomeración de las partículas del suelo gracias al uso de un recurso mecánico con la adición de un material aglutinante, para lograrlo se debe realizar estudios de granulometría, cohesión del ligante y humedad óptima del material. Entre los estabilizantes más usados se encuentran las resinas, polímeros, cemento hidráulico, cal, yeso, filler cementante, cenizas, etc. (INVIAS Manual Cap. 1, 2008)

### **5.1.3.3 Estabilización de los granulares (capas de fundación)**

Los estabilizantes más conocidos para las capas granulares de una estructura de pavimento son la cal, el cemento hidráulico y el asfalto emulsionado o espumado el cual se hará mención en el estado del arte, también puede realizarse una combinación de los estabilizantes con el fin de realizar pre-tratamiento al suelo antes de aplicar el estabilizante dominante, entre las más comunes se encuentran: **a.** Cal y Cemento, **b.** Cal y Asfalto (emulsionado – espumado) **c.** Cemento y Asfalto (emulsionado – espumado), (Sánchez, 2018).

### **5.1.4 Tipos de Pavimentos**

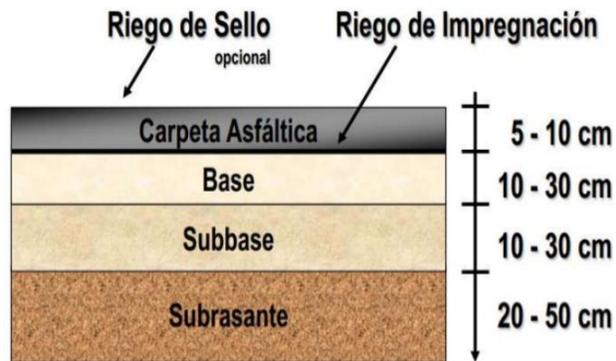
- Pavimentos Asfálticos (PA).
- Pavimentos de Concreto Hidráulico (PCH).
- Pavimentos Compuestos o Semirrígidos.
- Pavimentos de avanzada tecnológica: a carga plena (firme emul. Total); a resistencia profunda (firme + firme emul.).

#### **5.1.4.1 Pavimentos Asfálticos o Flexibles (PA)**

Los pavimentos flexibles están compuestos por una capa de concreto asfáltico como carpeta de rodadura de la estructura; la cual, se compone de una mezcla de material granular y asfalto. Como se evidencia en la Figura 9, esta capa de rodadura se encuentra sobre capas de base granular, sub base granular y subrasante (suelo de fundación). Por otro lado, al ser una estructura compuesta por un material visco-elástico, como el asfalto, se debe asegurar, que será capaz de soportar los esfuerzos normales y tangenciales impuestos por el tránsito, (Rondón, 2015)

Algunos autores coinciden con que este tipo de pavimento es el más económico y puede desarrollar una vida útil de 10 a 15 años. Sin embargo, se puede considerar como una desventaja, que las propiedades del material de la capa de rodadura, por ser un material visco-elástico, pueden variar en función de la temperatura.

Figura 9. Estructura de un pavimento flexible.



Fuente: Ramírez F.

#### 5.1.4.2 Pavimentos Hidráulicos o Rígidos (PCH)

Este tipo de pavimentos varían su estructura respecto al pavimento flexible revisado anteriormente. La estructura del PCH cuenta con una losa de concreto hidráulico (CH), de un espesor entre 15cm y 30cm, una capa de sub-base granular colocada para dar estabilidad a la losa y la subrasante o suelo de fundación, como se puede ver en la Figura 10, (Rondón y Reyes, 2015; INVIAS Cap. 3, 2012)

Este tipo de pavimento, tiende a sufrir principalmente problemas generados por bombeo, debido a que la losa de CH no es una superficie continua infinita y la unión entre las losas se consideran superficies de falla, por donde ingresa agua y puede lavar los granulares generando un vacío debajo de la losa.

Figura 10. Estructura de un pavimento.



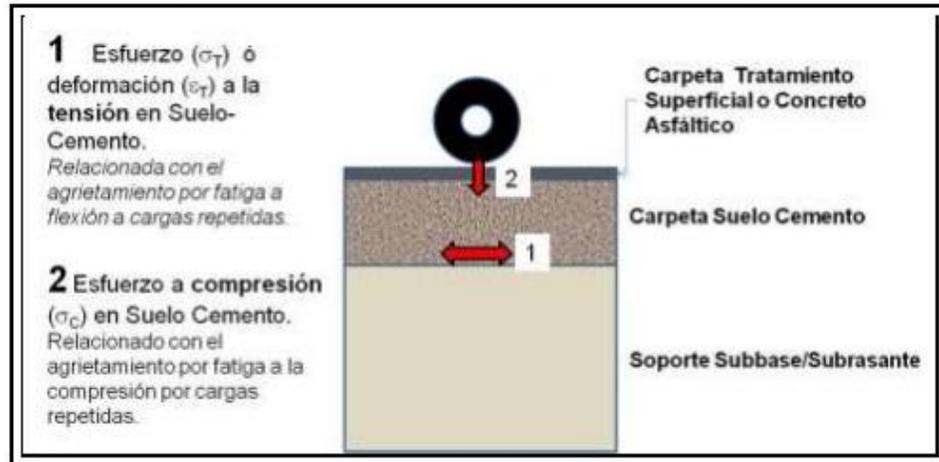
Fuente: Ramírez F.

#### 5.1.4.2 Pavimentos Semirrígidos o Mixtos

Los pavimentos semirrígidos son una mezcla entre un pavimento rígido y uno flexible, donde la capa superior cumplirá la función de capa flexible y la capa inferior será la capa rígida. Este tipo de pavimento, a diferencia de los mencionados anteriormente, cuenta con una capa de base o sub-base estabilizada con ligantes hidráulicos (cal, emulsión o cemento) y una capa de rodadura de cemento asfáltico, como se observa en la Figura 11, (Rondón y Reyes, 2015; INVIAS Cap. 3, 2012).

Al revisar las fuerzas presentes en la estructura, se puede apreciar que, al aumentar la rigidez de las capas estabilizadas, los esfuerzos verticales transmitidos a la subrasante son menores, en cambio, los esfuerzos en tracción por fatiga generados por la carga aumentan (Rondón y Reyes, 2015).

Figura 11. Estructura de un pavimento semirrígido.



Fuente: Asociación Dominicana de Productores de Cemento Portland.

### 5.1.5. Vías Terciarias

Como se expuso anteriormente, en la introducción del presente trabajo, esta investigación busca proponer una sub base granular estabilizada, para ser implementada en la estructura de vías con bajos volúmenes de tránsito. Más específicamente, de vías terciarias, que, según el INVIAS en Colombia, son vías que van desde las cabezas municipales hasta las veredas y también sirven para interconectar veredas, normalmente las vías terciarias no están pavimentadas se dejan en afirmado. (INVIAS Manual Cap. 1, 2008).

#### 5.1.5.1. Vías de Bajos Niveles de Transito

De acuerdo a lo anterior, se enfoca la presente investigación para vías de bajos niveles de tránsito o NT1, el cual corresponde a las vías en el que el tránsito de diseño de las obras es inferior a  $0.5 \times 10^6$  ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño. (INVIAS, 2013)

### 5.1.6 Empresa Geoambiental.

Como se ha mencionado a lo largo del presente documento, el material propuesto para la estabilización de la sub base granular es un material residuo de desechos resultantes del mantenimiento y limpieza de tanques, trampas de grasas, etc., y residuo de la industria petrolera, generado a partir de derrames de crudo. En consecuencia, la empresa

*Geoambiental* recoge el crudo derramado y lo lleva a un campo de infiltración ubicado en Flandes Tolima, donde le da tratamiento químico para reducir el impacto ambiental que este residuo genera.

Los métodos de tratamiento del crudo derramado son sistemas flexibles, puede realizarse en separadores centrífugos, separadores gravitacionales, coalescedores electrostáticos para lograr la deshidratación, que combinados con la aplicación de agentes deshidratantes o des-emulsionantes logran llegar al método óptimo fisicoquímico de recuperación (G. SAS, 2009).

## **5.2. MARCO NORMATIVO.**

Para realizar un correcto análisis de los resultados obtenidos de los respectivos laboratorios aplicados al material a investigar, se toma como referencia las normas INVIAS; Siendo esta la agencia encargada de la asignación, regulación y supervisión de las construcciones de autopistas, carreteras y el mantenimiento de las vías en Colombia.

Teniendo en cuenta que se va a realizar la caracterización del material para la estabilización de la sub-base granular, se toma como conceptos principales el tipo de agregado que se quiere estabilizar y los requisitos de calidad de los agregados de la sub-base aceptados por el INVIAS.

### **5.2.1. Sub-base granular Clase A**

Las sub-base en Colombia, se clasifican en tres tipos (Tabla 1) y como se mencionó anteriormente, para la presente investigación se trabajara con un agregado clase A. Este tipo de agregados se considera de alta calidad, lo que permite que sea utilizado comúnmente en vías primarias o con alto tránsito (NT3) (Tabla 2) (INVIAS Cap. 3, 2013). Cabe aclarar que esta investigación se enfoca en utilizar el agregado clase A para un nivel de transito NT1.

Tabla 1. Uso típico de las diferentes clases de sub-base granular.

CLASE DE SUB-BASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

Fuente: Norma INVIAS (2013). Capítulo 3-Art.320.

Tabla 2. Niveles de Tránsito.

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, $N_{80kN}$ , MILLONES
Clase C	$N_{80kN} \leq 0.5$
Clase B	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
Clase A	$N_{80kN} > 5.0$

Fuente: Norma INVIAS (2013). Capítulo 1-Art.100.

### 5.2.2. Requisitos de calidad para los agregados de la Sub-base

Se presenta a continuación la Tabla 3 y la Tabla 4 con los ensayos solicitados para la caracterización del material junto con los valores aceptados por el INVIAS para los agregados de la sub-base.

*Tabla 3. Requisitos de los agregados para sub-bases granulares.*

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

*Fuente: Norma INVIAS (2013). Capítulo 3-Art.320.*

Tabla 4. Franjas granulométricas del material de sub-base granular.

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

Fuente: Norma INVIAS (2013). Capítulo 3-Art.320.

## 6. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta que la procedencia del Geoestab es la recuperación de residuos provenientes de desechos resultantes del mantenimiento y limpieza de tanques y trampas de grasas, y adicional en un gran porcentaje es el crudo derramado recuperado de derrames de petróleo que al final es tratado, para implementarlo en la estabilización de una sub-base granular clase A. Dicho esto, el siguiente estado del arte hace énfasis a investigaciones que se han venido realizando sobre diferentes estabilizaciones en granulares, de acuerdo a la recuperación y aplicación de crudo derramado siendo este el que se presenta con mayor porcentaje en el material a investigar.

El área de infraestructura vial, cuenta actualmente con diferentes procesos para desarrollar bases estabilizadas, especialmente las emulsiones asfálticas. Según Local Road Research Board LRRB (Junta local de investigación vial) de Estados Unidos (LRRB, 2017), el material a utilizar, debe seleccionarse y dosificarse cuidadosamente, para asegurar un aumento de la resistencia del material estabilizado y evitar provocar inestabilidad en la mezcla. Es así como, se definen diferentes materiales con los que debería realizarse la estabilización (LRRB, 2017):

1. Mezcla entre ligante asfáltico, agua y un emulsionante (emulsión asfáltica): El emulsionante “rompe” los enlaces de la emulsión, haciendo que el ligante se separe del agua y se adhiera a los granulares. Cabe resaltar que, este método de estabilización no requiere llevar el material a altas temperaturas lo que lleva a que no se envejezca el asfalto. (LRRB, 2017).
2. Asfalto espumado: este material se genera al adicionar una mezcla de agua caliente y aire comprimido al asfalto frío; se mezcla con los granulares de la base y actúa como un aglutinante que aumenta la rigidez de la misma. (LRRB, 2017).

## 6.1. CALIDAD DE ADHESIÓN Y PROPIEDADES REOLOGICAS DE ASFALTOS RESIDUALES, NO MODIFICADOS Y NANO-MODIFICADOS, OBTENIDOS DE CRUDOS ESPESADOS DE PAVIMENTACIÓN.

Por otro lado, la Universidad Nacional de Colombia realizó una investigación sobre la Calidad de adhesión y propiedades reológicas de asfaltos residuales, no modificados y nano-modificados, obtenidos de crudos pesados de pavimentación (Álvarez Allex, et al, 2019), se tiene en cuenta que los crudos pesados de pavimentación (CPP) son asfaltos líquidos naturales que pueden ser usados en soluciones de pavimentación para vías de tránsito bajo, para evaluar la adhesión en base a propiedades fundamentales de los asfaltos residuales (AR) obtenidos de CPP, se presenta la Tabla 5 en donde se caracteriza los AR de acuerdo a los contenidos de solventes extraídos de CPP, obteniendo el asfalto residual cuantitativo por volumen V y masa M, junto con la temperatura de mezclado del AR obtenido del CPP (Álvarez, 2019).

*Tabla 5 Asfaltos residuales (AR) evaluados*

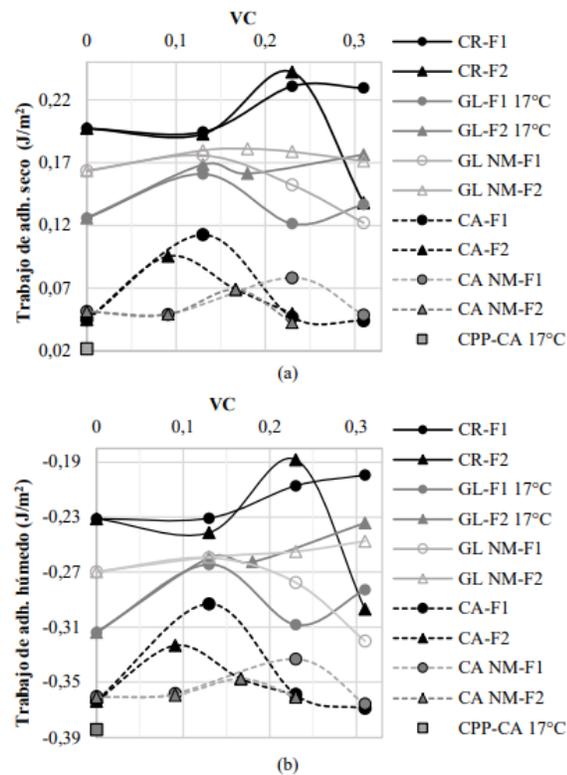
<b>Material asfáltico</b>	<b>CS (V/M) (%)</b>	<b>TM (°C)</b>
Asfalto residual de CPP del campo La Gloria, o GL	16.4/12.8	75
Asfalto residual de CPP del campo La Gloria adicionado con nano-modificador, o GL NM	16.4/12.8	75
Asfalto residual de CPP del campo Castilla, o CA	16.2/12.7	115
Asfalto residual de CPP del campo Castilla, o CA	16.2/12.7	118

Nota: CS = contenido de solventes, TM = temperatura de mezclado del AR.

*Fuente: Álvarez Allex, et al, 2019*

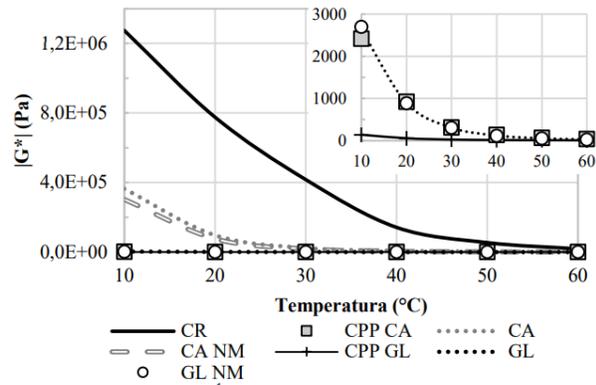
Se realizó la caracterización de AR y se procedió a extraer los AR de cada uno de los CPP, analizados sin y con adición de nano-modificadores (Tabla 5) agregados al 0.0625% por masa de AR. Se encontró de acuerdo a que los altos valores de trabajo de adhesión en seco denotan interfaces con alta resistencia a la fractura que conlleva a la alta resistencia a la fatiga, que con los siete agregados analizados pueden establecer una concentración volumétrica (VC) óptima al combinar estos materiales con los AR de CPP como se muestra en la Figura 12 maximizando el valor absoluto del trabajo de adhesión en húmedo para cada combinación AR-agregado.

Figura 12. Valores de trabajo de adhesión (a) en seco y (b) en húmedo



Fuente. Álvarez Allex, et al, 2019

Figura 13. Valores de módulo dinámico para frecuencia de 5 Hz.



Fuente. Álvarez Allex, et al, 2019

A partir de los resultados y el análisis del estudio, se opta por utilizar un sistema estandarizado de clasificación para estos materiales que defina su aplicación potencial para proyectos de pavimentación, adicional el asfalto residual del campo La Gloria (AR GL) genera mayor resistencia a la fractura y menor susceptibilidad al daño por humedad que el asfalto residual del campo Castilla (AR CA) como se muestra en la Figura 13, por lo que las mezclas asfálticas fabricadas con crudo pesado de petróleo (CPP) pueden alcanzar respuestas mecánicas aceptables como lo demuestra la experiencia previa que existe en Colombia sobre el uso de mezclas fabricadas con CPP para vías de bajo y medio tránsito, mostrando también la reducción de la rigidez de los AR a causa del Nano-modificador, por lo que se sugiere validar a futuro los resultados de la evaluación de mezclas asfálticas.

## **6.2. DISEÑO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO**

El reciclaje de los asfaltos se realiza desde el año 1900, la técnica inicio en Estados Unidos con los estudios de la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y en Europa gracias a la European Asphalt Pavement Association (EAPA).

El proceso de reciclaje se realiza y consiste en la recuperación profunda del pavimento (Full-Depth Reclamation, FDR) mediante el retiro total de la carpeta asfáltica existente y la capa inferior (base hidráulica) puede ser toda la capa o una porción para después reutilizarla, previo a un tratamiento o estabilización, en una de las capas estructurales del pavimento.

Pero en la actualidad no encontraba un registro de las propiedades mecánicas de la base estabilizada, dada esta situación se presentó la necesidad de definir procedimientos de diseño y realizar una evaluación de las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado incorporando material reciclado, así como determinar los valores de referencia para el diseño estructural de un pavimento con este tipo de estabilización, como es el valor de módulo de resiliencia. (Delgado, et all, 2019).

### **Características de los materiales asfálticos:**

El estudio se realizó con un material asfáltico AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca. Y se empleó el método SUPERPAVE grado PG para la caracterización del material asfáltico, en la Tabla 6. Resultados de calidad del material asfáltico analizado (grado PG). se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 6. Resultados de calidad del material asfáltico analizado (grado PG).

<i>Ensayo</i>	<i>Norma</i>	<i>Temperatura de prueba</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>
<b>Condición original</b>					
<i>Viscosidad</i>	<i>ASTM D4402-15</i>	<i>135 °C</i>	<i>n</i>	<i>0.466 Pa*s</i>	<i>&lt; 3 Pa*s</i>
<i>Reómetro de corte dinámico (DSR)</i>	<i>ASTM 7175-15</i>	<i>64 °C</i>	<i>G*/senØ</i>	<i>1.80 kPa</i>	<i>&gt; 1 kPa</i>
<b>Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12</b>					
<i>Cambio de masa</i>	<i>ASTM 2872-12</i>	<i>163 °C</i>	<i>CM</i>	<i>0.52%</i>	<i>&lt; 1.0%</i>
<i>Reómetro de corte dinámico (DSR)</i>	<i>ASTM 7175-15</i>	<i>64 °C</i>	<i>G*/senØ</i>	<i>9.38 kPa</i>	<i>&gt; 2.2 kPa</i>
<b>Envejecimiento en vasija de presión y temperatura (PAV), ASTM D6521-13</b>					
<i>Reómetro de corte dinámico (DSR)</i>	<i>ASTM 7175-15</i>	<i>22 °C</i>	<i>G*/senØ</i>	<i>3881 kPa</i>	<i>&gt; 5.000 kPa</i>
<i>Reómetro de viga a flexión (BBR)</i>	<i>ASTM D6648-08</i>	<i>(-)6°C</i>	<i>s</i>	<i>66.7 MPa</i>	<i>&lt; 300 MPa</i>
			<i>m</i>	<i>0.331</i>	<i>&gt; 0.300</i>

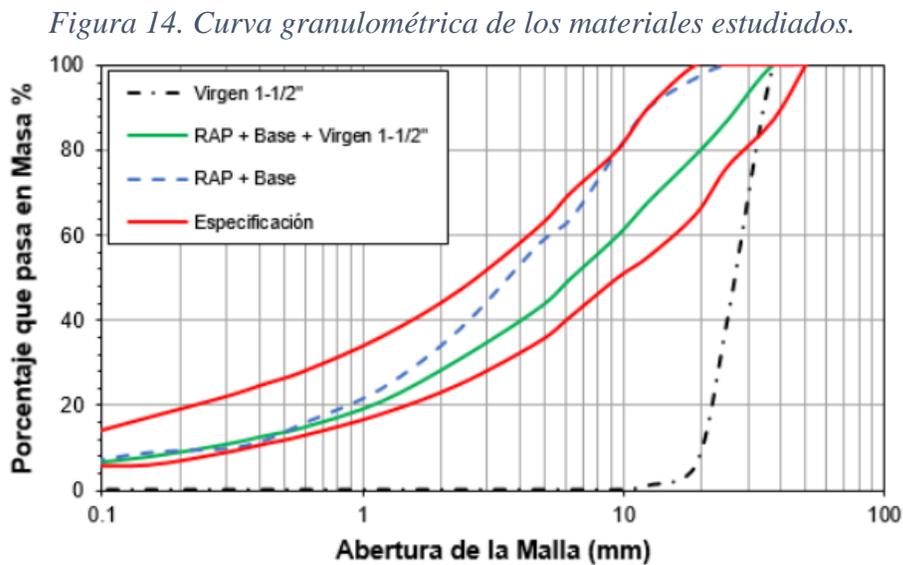
Fuente: Delgado, et all, (2019).

Dadas las condiciones de viscosidad baja y que no contiene polímeros que modifique sus propiedades reológicas, se asume que es un buen asfalto para el proceso de espumado y se clasifica como Asfalto con grado de desempeño PG 64-16.

### Características de los granulares:

Se realizan ensayos de límites de consistencia y granulometría y se obtuvo para el material reciclado de pavimento asfáltico RAP + base un límite líquido de 23.6% y un IP de 5.2 %, para la base los valores fueron despreciables por el bajo porcentaje de finos, lo que indica que ninguno de los dos materiales requiere pretratamiento con cal.

Se realiza la curva granulométrica (Figura 14) donde se logra apreciar que la curva del material reciclado de pavimento asfáltico + BASE se cruza con el límite superior, es decir, el material se encuentra fuera de rango (valores entre la malla  $\frac{1}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ " ), por lo cual, es necesario realizar una combinación con material virgen.



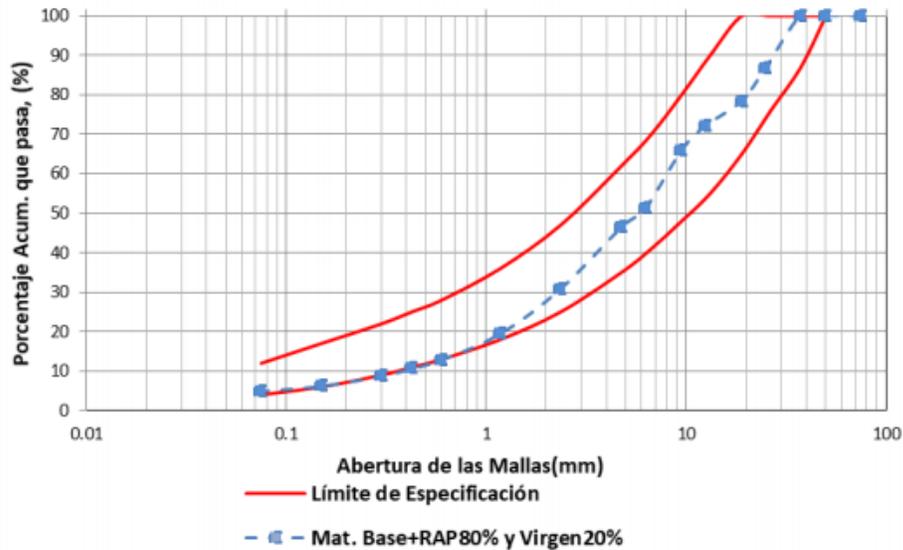
Fuente: (DELGADO, et al, 2019).

### Granulometría de Diseño

Se realizan combinaciones para el mejoramiento de material mezclado, dichas combinaciones varían del 95 al 80% del material reciclado en variaciones del 5% (95% RAP-5% virgen, 90% RAP-10% virgen, 80% RAP-20% virgen), en base a las combinaciones teóricas, se determina que la mezcla que mejor se adapta a las exigencias granulométricas

corresponde al 80% de RAP + base recuperada y 20% de material virgen 1-1/2", la cual queda compuesta de 40% de RAP + 40% de base recuperada + 20% de material virgen 1-1/2". A continuación se presenta la granulometría de diseño en la Figura 15.

Figura 15. Curva granulométrica de diseño.



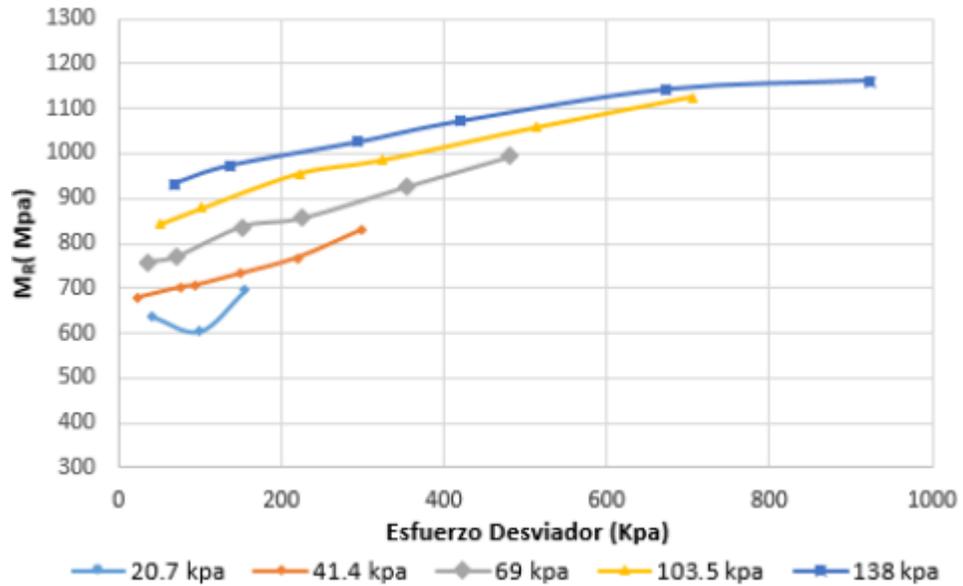
Fuente: Delgado, et all (2019).

### Módulo Resiliente: Evaluador estructural

Uno de los principales interrogantes en la estabilización de bases con asfalto espumado es la capacidad estructural que puede desarrollar la capa estabilizada, para evaluar esta es necesario realizar un ensayo de Modulo Resiliente.

En la Figura 16 se presentan los resultados obtenidos para una mezcla de 2.4% de asfalto espumado y el 1% de cal, para una carga aplicada de 103.5 KPa (usualmente el valor del esfuerzo radial para un eje dual a una profundidad de 20 cm), se obtiene un módulo de resiliencia, que oscila entre 850 y 1150 MPa, y al incrementar la carga, se alcanza un módulo que varía entre 933 y 1161 MPa (Delgado, et all, 2019).

Figura 16. Ensayo MR para una mezcla con 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal.

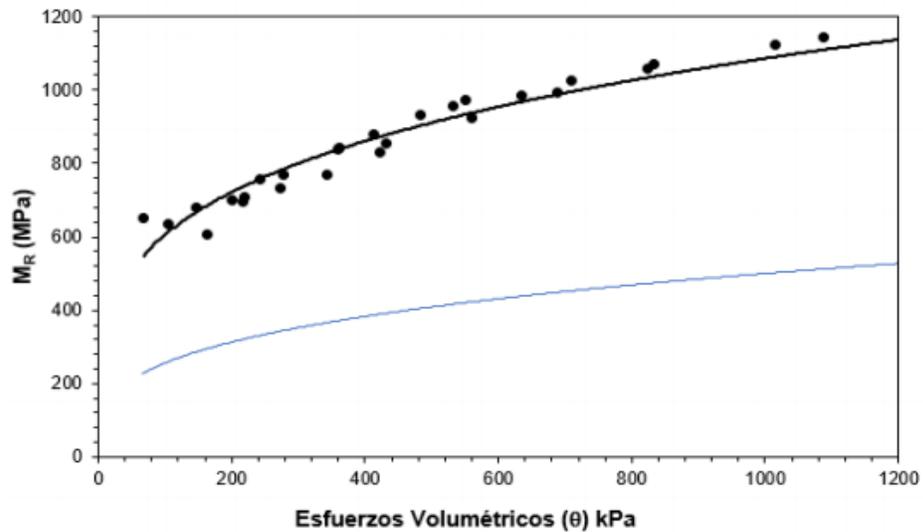


Fuente: (Delgado, et all, 2019).

Pero es importante tener en cuenta que el Módulo resiliente no es un valor único y que depende de la compresión y carga axial aplicada, por tal razón, es más acertado graficar el Módulo resiliente medido vs. esfuerzo volumétrico ( $\Theta$ ) para predecir así el comportamiento del material ante cargas cíclicas.

Para realizar una correcta evaluación del aporte estructural generado por el asfalto espumado es necesario conocer el módulo resiliente la base estabilizada en función de la profundidad a la que será aplicado el esfuerzo y el tipo de tránsito esperado en dicha vía. A continuación se exponen los resultados alcanzados por la base estabilizada contenido de 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal (Figura 17) en comparación con una base hidráulica tradicional.

Figura 17. Comparativa de MR de la base estabilizada con 2.4% de RAP y 1% de cal vs una base hidráulica tradicional.



Fuente: Delgado, et all (2019).

De estos resultados obtenidos se encontró que la base estabilizada presenta un mejor comportamiento mecánico que la base hidráulica. El mejoramiento es asociado a la estabilización de la capa con el asfalto reciclado ya que al compararla con la de la capa hidráulica se evidencia que tiene mayor rigidez.

Un aspecto que vale la pena mencionar es que entre mayor sea la concentración del RAP en la mezcla, más alto serán los valores del módulo resiliente y menores los valores de cohesión lo que podría llegar a generar una falla por pérdida de cohesión. (Delgado, et all, 2019).

## **7. OBJETIVOS**

### **7.1. General**

Evaluar el aporte estructural generado por el material Geoestab en la estabilización de una sub-base granular.

### **7.2. Específicos**

1. Analizar los resultados de los laboratorios realizados al residuo en estudio por la empresa Geoambiental para su caracterización.
2. Comparar los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio con los requisitos de calidad exigidos por la norma INVIAS en el art 320 para las sub-bases granulares.
3. Establecer una guía de directrices para la correcta dosificación del material Geoestab para la estabilización de una sub-base granular tipo A, a partir de los datos suministrados por Geoambiental.

## **8. ALCANCES Y LIMITACIONES.**

### **8.1. Alcance**

La presente investigación tiene como alcance atribuirle un uso final adecuado al material Geoestab, y así mismo que este pueda ser aplicado para la estabilización de la sub-base granular para una vía terciaria; minimizando así la contaminación que genera el almacenamiento de este material al medio ambiente. Esta investigación abarca entonces toda la caracterización del material, con laboratorios específicos que exige el INVIAS (para una sub-base estabilizada con una mezcla asfáltica natural) suministrados por la empresa Geoambiental. Lo anterior, con el fin de evaluar el comportamiento del material y verificar si este puede ser usado para la estabilización de la sub-base granular clase A; de no ser así, analizar de acuerdo a los resultados en que puede ser utilizada.

### **8.2. Limitaciones**

Teniendo en cuenta que el material Geoestab propuesto para el desarrollo de la investigación, es tratado por un sistema patentado por la empresa Geoambiental para reducir el impacto ambiental que este genera en su disposición final, en donde puede verse afectado el comportamiento mecánico del mismo, adicional a esto, se tiene en cuenta que este material no ha sido empleado técnicamente en la construcción de pavimentos (que es el objeto de esta investigación) no existen referentes que puedan orientar o validar los resultados obtenidos en los laboratorios que se van a realizar.

Otra limitación importante es que el material no se encuentra en la naturaleza, es un material producto del tratamiento de una empresa privada (Geoambiental).

Dado la situación actual, la universidad se encuentra cerrada y desarrollando las actividades en modo remoto, de acuerdo a las medidas tomadas por el ministerio de educación y el Gobierno Nacional como contingencia a la pandemia, en consecuencia, no se realizaron los laboratorios en las instalaciones de la Universidad, por lo cual la empresa Geoambiental realizo los ensayos en un laboratorio certificado y suministro los resultados para su análisis que se desarrolla en la presente investigación.

## **9. METODOLOGÍA**

Por la naturaleza del objeto de estudio se optó por realizar un análisis de resultados para el desarrollo de una investigación tecnológica. Teniendo en cuenta que se realizó la implementación de un nuevo material para la estabilización de la sub-base granular tipo A, se analizaron los resultados de los ensayos de laboratorio (ver Anexo A) que permitieron realizar la caracterización de dicho material y evaluar su comportamiento, por consiguiente, se ordenaron los ensayos de laboratorio, los cuales, fueron realizados por la firma Idicol y patrocinados por Geoambiental, como se observa en el Anexo A.

### **9.1. OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES**

La muestra empleada en este trabajo de investigación, corresponde al material procesado y suministrado por la empresa Geoambiental, descrito anteriormente en el marco de referencia llamado Geoestab, el agregado pétreo corresponde a  $6\text{m}^3$  de base granular clase A, extraídos de una cantera ubicada en Melgar Tolima, es necesario recalcar que, se proponen materiales locales buscando que la mezcla tenga características similares a la sub base granular de las vías terciarias del sector.

### **9.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **9.2.1. CARACTERIZACIÓN**

##### **9.2.1.1. GEOESTAB**

De acuerdo a los objetivos planteados, se analizaron los resultados de laboratorio suministrados por la empresa Geoambiental, para la caracterización del material Geoestab con base en la normatividad INVIAS, teniendo en cuenta que este material se compone de dos materiales, granulares y asfalto, se realizaron ensayos sobre los componentes separados mencionados a continuación:

- Granulares: Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas Asfálticas (E-782), Determinación del límite líquido de los suelos (E-125) y Valor de azul de metileno en agregados finos (E-235).
- Asfalto: Ensayo de extracción de contenido de asfalto (E-732), Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (E-709),

#### **9.2.1.2. SUB BASE GRANULAR**

De acuerdo al objetivo principal, se busca estabilizar una sub base granular con el Geoestab, por tal motivo, se realiza el análisis de los ensayos de laboratorios para caracterizar la sub base granular proveniente de la cantera Extraboqueron de Melgar Tolima, anteriormente mencionada, al cual se le realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- FÍSICA: Granulometría (E-123), Limite Líquido (E-125), Limite Plástico e Índice de plasticidad (E-126) y Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable (E-211).
- MECÁNICA: Desgaste en la máquina de los ángeles (E-218) y Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (E-238).

A continuación, se realiza la comparación según las características del agregado con los requerimientos de la norma INVIAS presentadas en la Tabla 3 y Tabla 4 del marco normativo, verificando si este cumple con las especificaciones ahí establecidas.

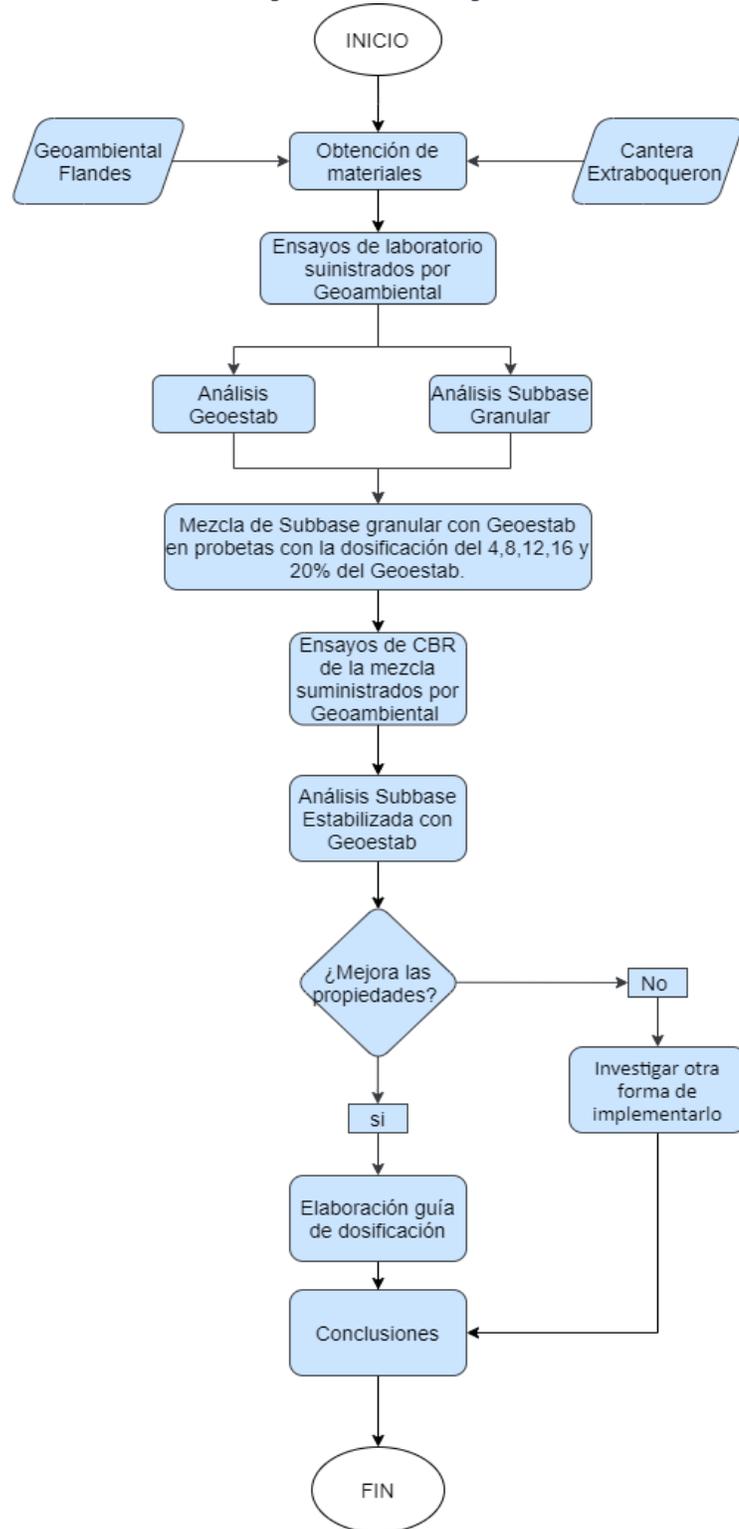
#### **9.2.1.3. SUB BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON EL GEOESTAB**

Ya realizada la caracterización del Geoestab y la sub base granular, se prosigue con el análisis de los ensayos de laboratorios de la mezcla de estos dos materiales, con dosificación del Geoestab en un 4, 8, 12, 16 y 20%, realizando la comparación de los resultados del ensayo de laboratorio CBR, con el fin de verificar cual ha sido el comportamiento del material estabilizado con respecto al material sin estabilizar.

### **9.2.2. GUÍA DE DOSIFICACIÓN**

Una vez definida la caracterización de cada uno de los materiales y la sub base granular estabilizada con el Geoestab, se evalúan los resultados obtenidos para la dosificación del 4, 8, 12, 16 y 20%. Como resultado se define si el Geoestab genera un aporte estructural a la sub base, de ser así se establecen los parámetros más favorables para la estabilización.

Figura 18. Metodología



Fuente: Autores

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 10.1. CARACTERIZACIÓN GEOESTAB

Como fue mencionado en los antecedentes de la presente investigación, el Geoestab es un material residuo de diferentes actividades que hasta el día de hoy no ha sido implementado ni normalizado, es por esto que no se cuenta con una normativa que parametrize las características que debe cumplir.

Teniendo en cuenta que este material será implementado en la estabilización de una sub-base granular se realizaron ensayos de laboratorio para la caracterización del mismo a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

- **Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.**

Se realiza el ensayo de laboratorio de límite líquido según el INV E -125-13, y como resultado se obtiene lo siguiente: (NL) no líquido y (NP) no plástico, indicando que el Geoestab no se caracteriza por un suelo fino como se observa en la Tabla 7.

*Tabla 7. Resultados ensayo límites de límites de Atterberg.*

Límite líquido	NL	Límite plástico	NP	índice de plasticidad	NP
----------------	----	-----------------	----	-----------------------	----

*Fuente: Laboratorio IDICOL*

- **Extracción Cuantitativa de Asfaltos en Mezclas para Pavimentos. INV E – 732 – 13.**

Como se expuso anteriormente, el Geoestab es un material que tiene diferentes procedencias entre ellas el crudo derramado que, a su vez, es la materia prima del asfalto por tal razón, es necesario conocer cuál es la cantidad de asfalto presente en dicho material.

El tamaño nominal máximo de la muestra ensayada es  $\frac{3}{4}$  de pulgada, la masa empleada para el ensayo fueron 1795.3 gr, haciendo uso de Cloruro de Metileno se extrajo el ligante presente en la muestra de Geoestab obteniendo así, una masa final 1507.7 gr.

La cantidad de material mineral presente en el Geoestab se determinó mediante el método de la ceniza, dicho método consiste en reducir una fracción del Geoestab a cenizas y por cada gramo de ceniza producida se adicionan 5 ml de solución de carbonato de amonio saturado, la mezcla se deja reaccionar durante una hora y posteriormente se seca al horno, finalmente se encuentra el valor de la masa de mineral presente en el material.

El contenido de asfalto es calculado respecto a la masa total menos la masa de agua y la masa del mineral extraído, el Geoestab contiene un 15.8% de asfalto, los resultados se presentan en la Tabla 8:

*Tabla 8. Resultados Extracción Cuantitativa de asfaltos en mezclas.*

<b>EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DE ASFALTOS EN MEZCLAS</b>			
V1	Volumen total del extracto	ml	3842
	Masa de la cápsula de porcelana	g	59.975
V2	Volumen del extracto luego de remover la alícuota	ml	3742
G	Ceniza en alícuota	g	0.085
-	Contenido mineral en el extracto	g	3.266
<b>CONTENIDO DE ASFALTO</b>		<b>%</b>	<b>15.8</b>

*Fuente: Laboratorio IDICOL.*

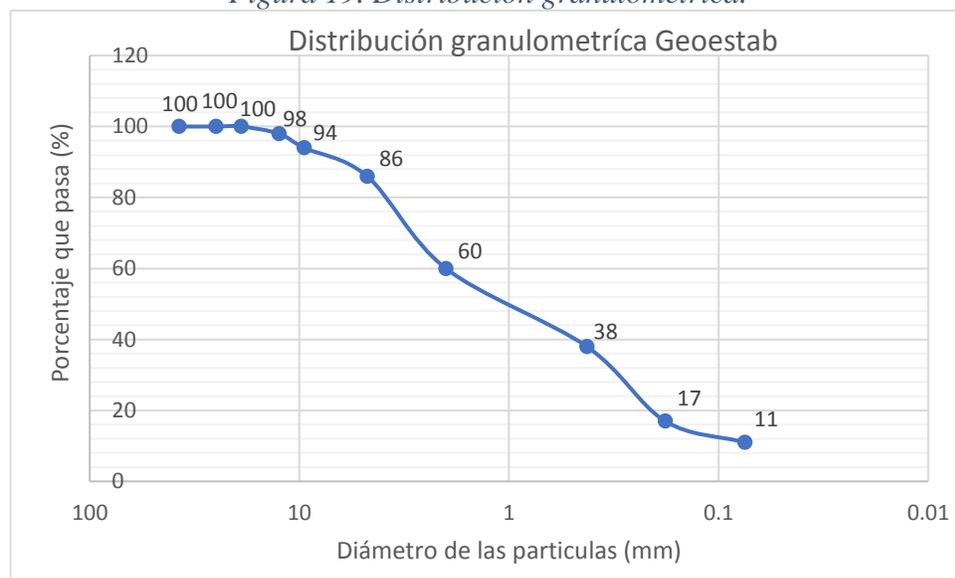
Donde resulta que, el Geoestab posee un alto contenido de asfalto ya que haciendo un comparativo con el Cemento Asfáltico (CA), el cual normalmente posee tan solo del 5 al 10% en peso de asfalto y el 90 a 95% en peso de granulares, el 15.8% extraído del Geoestab revela una buena relación entre granulares y asfalto.

- **Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.**  
**INV E – 782 – 13.**

Una vez realizado el ensayo INV E – 732 – 13 Extracción cuantitativa de asfaltos en mezclas para Pavimentos, al material resultante de la separación se le realizó un análisis granulométrico.

En la Figura 19 se presenta la curva granulométrica en donde se observa que el Geoestab contiene más material de Arenas que de Gravas, se cataloga como una **arena fina** teniendo en cuenta que los valores de porcentaje mayores están entre el rango del tamiz No. 10 y No. 80 con el valor del 69% y tendría un bajo porcentaje de arenas gruesas con un porcentaje retenido entre el tamiz de ½” al No. 4 del 14%

*Figura 19. Distribución granulométrica.*



*Fuente: Laboratorio IDICOL*

- **Punto de Inflamación y de Combustión mediante la copa abierta de Cleveland.**  
**INV E -709-13**

Es necesario evaluar el punto de inflamación y combustión para encontrar la presencia de sustancias altamente volátiles e inflamables en el Geoestab, partiendo de la premisa que parte

de él contiene crudo de petróleo contaminado con materia orgánica, material altamente inflamable.

Se debe corregir el ensayo teniendo en cuenta que la presión atmosférica durante la ejecución del ensayo fue 102.8 kPa y el ensayo esta normalizado para ejecutarlo a una presión atmosférica de 101.3 kPa.

En la Tabla 9 se presentan los valores para el punto de inflamación y combustión corregidos.

*Tabla 9. Resultados caracterización material pétreo.*

Punto de inflamación medido	°C	251
Punto de Combustión	°C	296
Punto de inflamación corregido	°C	250.6
Punto de combustión corregido	°C	295.6

*Fuente: Laboratorio IDICOL*

Es importante recordar que el Geoestab es un material que hasta la actualidad no se ha implementado ni normalizado, por tal razón no se cuenta con valores de referencia, para efectos del punto de inflamación se decide hacer un breve comparativo con el valor exigido para las mezclas asfálticas en el artículo 410 del capítulo 4 de la Norma INVIAS ya que esta sería la exigencia máxima de la estructura del pavimento por ser colocadas como capa de rodadura, de acuerdo a la norma para un asfalto de grado de penetración 40 – 50 el punto de inflamación debe ser mínimo 240 C° y para asfaltos grado 60-70 y 80-100 el punto de inflamación deber ser 230 C°, el Geoestab alcanzó un punto de inflamación del 250.6 C°, 10 C° por encima de la exigencia para las mezclas asfálticas, es probable que el material soporte altas temperaturas antes de alcanzar el punto de inflamación y combustión.

- **Valor de azul de metileno en agregados finos.**  
**INV-E - 235 – 13**

El ensayo de azul de metileno evalúa la propiedad limpieza y busca encontrar la cantidad de arcilla nociva presente en el Geoestab, en la Tabla 10 se presentan los valores del ensayo que fueron necesarios para la aparición de la aureola azul celeste.

*Tabla 10. Valor de Azul de Metileno.*

<b>VALOR DE AZUL DE METILENO</b>			
Ensayo		No	1
C	Concentración de la solución de Azul de metileno por ml de solución	-	10
V1	Volumen total añadido de la solución colorante	ml	63
V'	Volumen de la solución colorante absorbido por la caolinita	ml	0
M1	Masa de la muestra de ensayo	g	204.8
<b>VALOR DE AZUL (VA)</b>	<b>ml/g</b>	<b>3</b>	

*Fuente: Laboratorio IDICOL*

Teniendo en cuenta que el Geoestab no se encuentra normalizado, se toma como referente la Norma INVIAS artículo 330 capítulo 3, requisitos para una Base Granular, la cual tiene como requerimiento de calidad de los agregados un valor de azul de metileno máximo de 10 ml/g, para el Geoestab se necesitaron 3 ml/g de manera que se es posible decir que el material tiene baja cantidad de arcilla nociva y es un material limpio.

## **10.2. CARACTERIZACIÓN SUB BASE GRANULAR.**

La sub-base granular seleccionada tiene procedencia de una cantera ubicada en Melgar Tolima, se le realizaron los ensayos exigidos por la norma INVIAS en el capítulo 3 afirmado, sub-bases y bases, para evaluar los requisitos de calidad exigidos en el artículo 320.

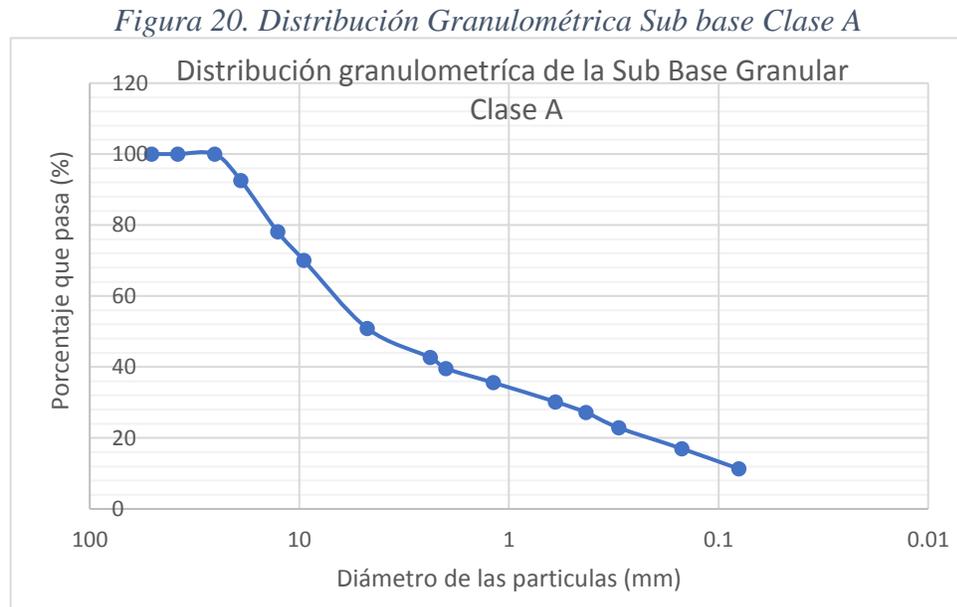
A continuación, en la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización demostrando que el material es óptimo para la estabilización.

Tabla 11. Requisitos de Agregados Para Base.

REQUISITOS DE AGREGADOS PARA BASE					
ENSAYO		NORMA DE ENSAYO	REQUISITO	RESULTADO	OBSERVACIÓN
<b>Dureza</b>					
Desgaste los ángeles, en seco 500 revoluciones % máximo		INV E-218-13	50	32	CUMPLE
Desgaste los ángeles, en seco 100 revoluciones % máximo			N.A	N.A	
Micro deval, % máximo		INV E-238-13	30	10.3	CUMPLE
10 % de finos	Valor en seco, (kN) mínimo	INV E-224-13	N.A	N.A	-
	Relación húmedo / seco % mínimo		N.A	N.A	-
<b>Durabilidad</b>					
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de sodio, % máximo		INV E-220-13	12	7.9	CUMPLE
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de Magnesio, % máximo			18	12	CUMPLE
<b>Limpieza</b>					
Límite líquido, % máximo		INV E-125-13	25	NL	-
Índice de plasticidad, % máximo		INV E-126-13	6	NP	-
Equivalente de arena, % mínimo		INV E-133-13	25	51	CUMPLE
Valor de azul de metileno, máximo		INV E-235-13	N.A	N.A	-
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211-13	2	1.2	CUMPLE
<b>Geometría de las partículas</b>					
Partículas fracturadas mecánicamente, % mínimo	1 Cara	INV E-227-13	N.A	N.A	-
	2 Caras		N.A	N.A	-
Índice de aplanamiento, % máximo		INV E-230-13	N.A	N.A	-
Índice de alargamiento, % máximo		INV E-230-13	N.A	N.A	-
Angularidad del agregado Fino, % mínimo		INV E-239-13	N.A	N.A	-
<b>Capacidad de soporte</b>					
CBR % mínimo, Referido al 100% de la densidad seca máxima		INV E-148-13	40	40.3	CUMPLE

Fuente: Laboratorio IDICOL

Adicional, se tiene el ensayo realizado de Granulometría, donde se observa en la Figura 20 que la curva del material en la gráfica de distribución granulométrica sobrepasa el límite inferior de los parámetros del tamaño de las partículas para un agregado de sub base clase A, por ende, no cumple su granulometría.



### **10.3. SUB-BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON GEOESTAB.**

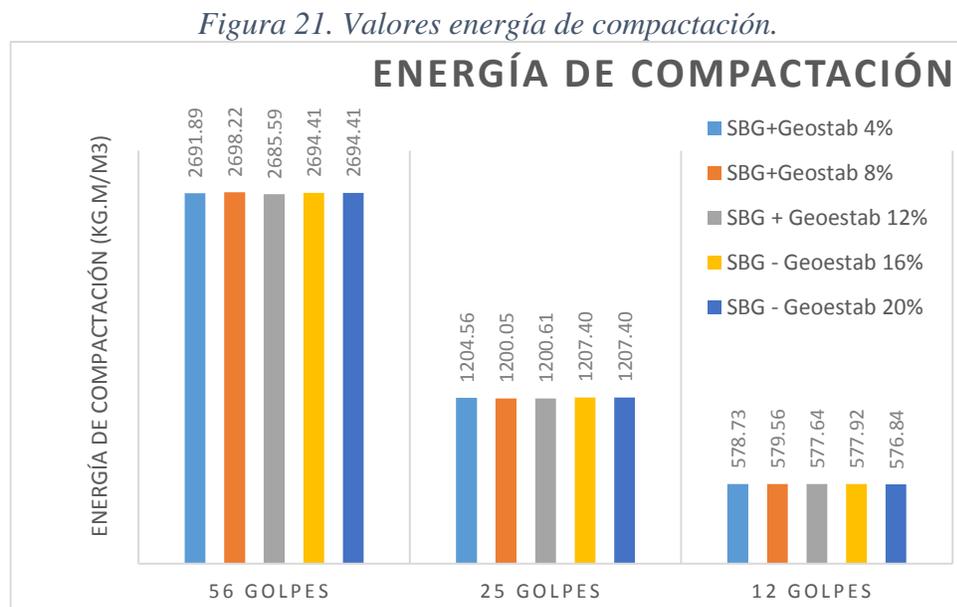
Una vez elaborada la mezcla del material Geoestab y la sub-base granular, de acuerdo a la norma INV E 148-2013 se realizó el ensayo de CBR (Relación de Soporte de California) en donde se compara el material estudiado con respecto a un material ideal, el cual es la piedra partida, el valor de CBR obtenido va a corresponder a un % de la resistencia del material ideal.

Se realizaron probetas de la sub base + Geoestab, la adición del Geoestab se realizó en dosificaciones del 4, 8, 12, 16 y 20% en peso para evaluar su comportamiento.

Se ensayaron 3 especímenes compactados en 5 capas con 56, 25 y 12 golpes; la humedad óptima fue calculada por IDICOL de acuerdo a la norma INV-142 sección 7, numeral 7.2.1, nota 3 la cual indica que si se cuenta con la experiencia necesaria, se puede juzgar visualmente un punto de humedad cercano al óptimo dependiendo del tipo de suelo estudiado:

- Suelo cohesivo, cuando alcanzan la humedad óptima se pueden apretar con la mano hasta que se forme un terrón que no se separará al liberar la presión y que al doblarlo se divide limpiamente en dos. Si no ha alcanzado la humedad óptima se desmenuza y si la ha superado, tiende a mantenerse como una masa pegajosa. Para este tipo de suelo, el contenido de humedad óptimo se encuentra un poco por debajo del límite plástico.
- Suelo sin cohesión, el contenido de humedad óptimo se encuentra cerca al 0 o al punto de donde aflora agua de la superficie del terrón.

Los valores de energía de compactación para cada una de las mezclas de la Sub base granular y las dosificaciones del Geostab se presentan en la Figura 21



*Fuente: Propia.*

A continuación se presentan los resultados, se observa que la densidad de cada uno de los especímenes para grados de compactación de 56 golpes, 25 golpes y 12 golpes en la Tabla 12, donde se aprecia que la variación no fue representativa dentro de los rangos de compactación.

*Tabla 12. Densidad de los especímenes*

<b>Densidad Seca (kg/m<sup>2</sup>)</b>			
<b>%</b>	<b>56 Golpes</b>	<b>25 Golpes</b>	<b>12 Golpes</b>
4	1933	1826	1732
8	1889	1812	1727
12	1832	1806	1773
16	1860	1783	1726
20	1802	1741	1665

*Fuente: Laboratorio IDICOL*

### **Curvas de compactación**

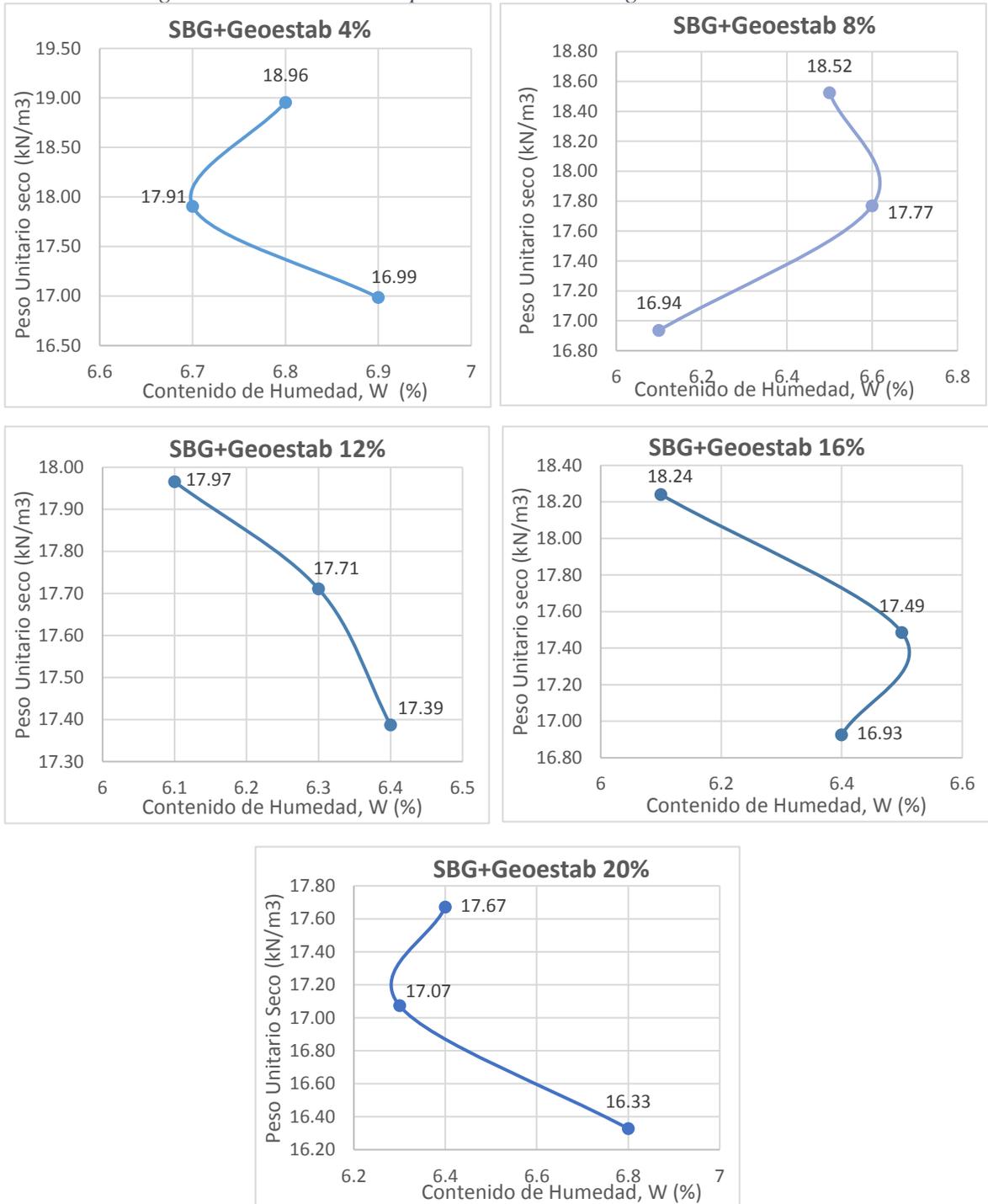
Para realizar la curva de compactación se encontró el valor del peso unitario seco (kN/m<sup>3</sup>) de acuerdo a la norma INV 141 y se comparó con el contenido de humedad de la mezcla, el peso unitario se calculó mediante la ecuación:

$$\gamma_d = K1 \times \rho_d \text{ (kNm}^3\text{)}$$

$\gamma_d$ : Peso unitario seco, aproximado a 0.01 kN/m<sup>3</sup> (0.1 lbf/pie<sup>3</sup>);

K1: Constante de conversión (9.8066 para densidad en g/cm<sup>3</sup>; 0.0098066 para densidad en kg/m<sup>3</sup>)

Figura 22. Curvas de compactación Sub base granular + Geoestab.



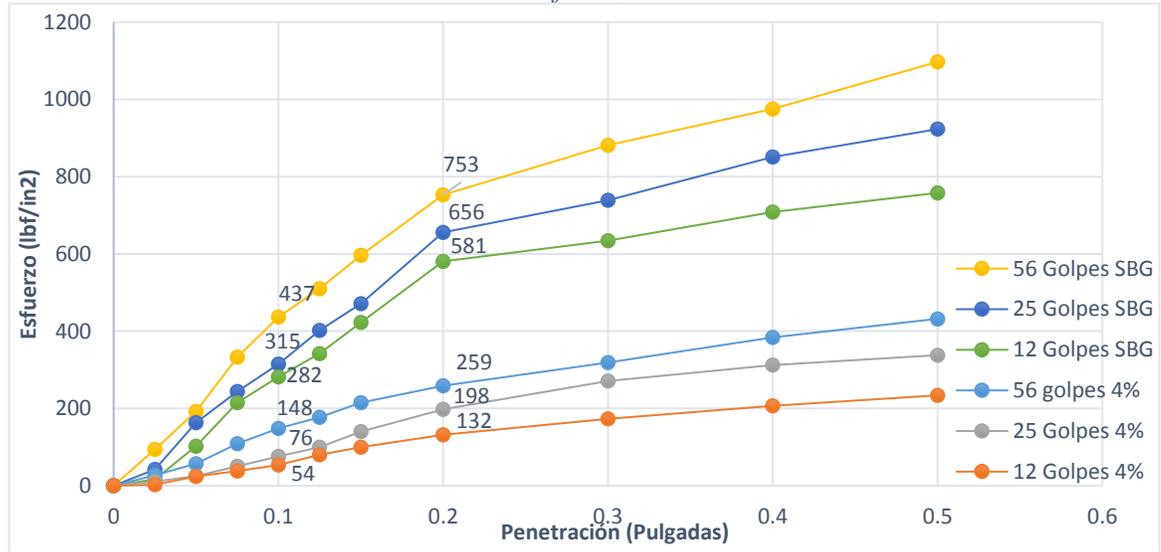
Fuente: PROPIA

Una vez aplicada la presión al pistón se encuentran los valores de esfuerzo para cada una de las penetraciones desde 0.025 hasta 0.5 pulgadas presentados en la Figura 22, los valores más importantes a tener en cuenta corresponden al valor del esfuerzo cuando se presenta una penetración del 0.1 y 0.2 pulgadas que fue: para el espécimen 1 los valores de 148 lb/in<sup>2</sup> y 259 lb/in<sup>2</sup>, para el espécimen 2 los valores de 76 lb/in<sup>2</sup> y 198 lb/in<sup>2</sup> y para el espécimen 3 los valores de 54 lb/in<sup>2</sup> y 132 lb/in<sup>2</sup>.

A partir de los datos presentados en la tabla anterior se construyen las curvas de compactación que corresponden a la penetración (in) vs esfuerzo (lbf/pulg<sup>2</sup>) para cada una de los especímenes, las curvas de la sub base granular clase A + Geoestab se comparan con las curvas obtenidas para la sub base granular sola mostradas en la figura, presentadas a continuación:

## Dosificación 4%

Figura 23. Comparativo Dosificación del Geoestab al 4% de gráficas Penetración vs Esfuerzo.

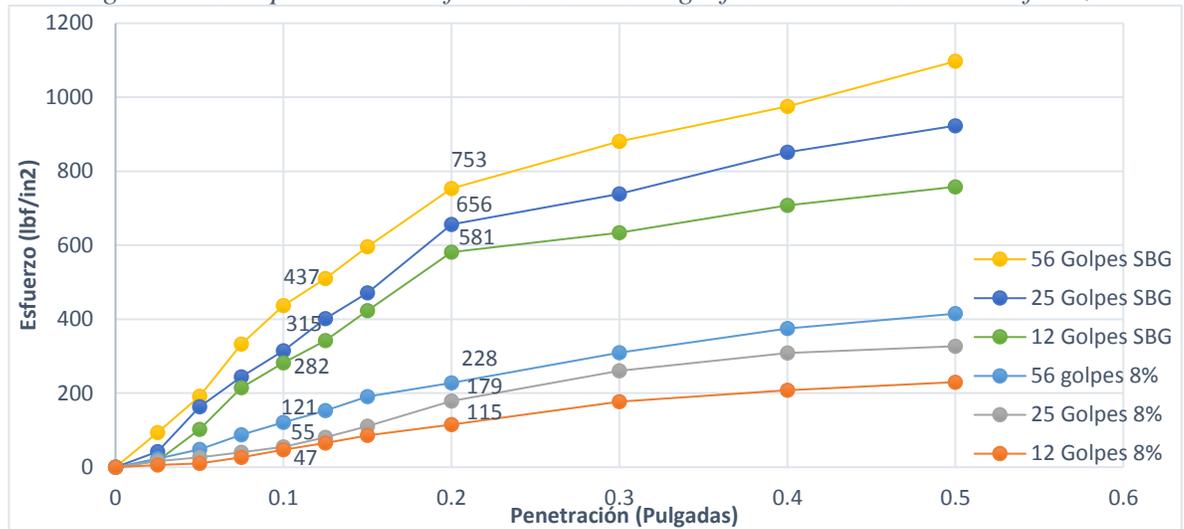


Fuente: Propia.

En la Figura 23, se observa que los valores de los esfuerzos de la sub base clase A + Geoestab en una dosificación del 4% en peso, disminuyen considerablemente en comparación a la sub base clase A sin estabilizar; pues al comparar los esfuerzos a los que el material alcanzó una penetración de 0.2” los especímenes con adición del Geoestab en 4% solo soportaron 259 lbf/pulg<sup>2</sup>, 198 lbf/pulg<sup>2</sup> y 132 lbf/pulg<sup>2</sup> (especímenes 1, 2 y 3 respectivamente), la reducción fue del 34%, 30% y 23% con respecto a la sub base sin estabilizar que para esa misma penetración soportó 753 lbf/pulg<sup>2</sup>, 656 lbf/pulg<sup>2</sup> y 581 lbf/pulg<sup>2</sup> respectivamente.

## Dosificación 8%

Figura 24. Comparativo Dosificación al 8% de graficas Penetración Vs Esfuerzo.

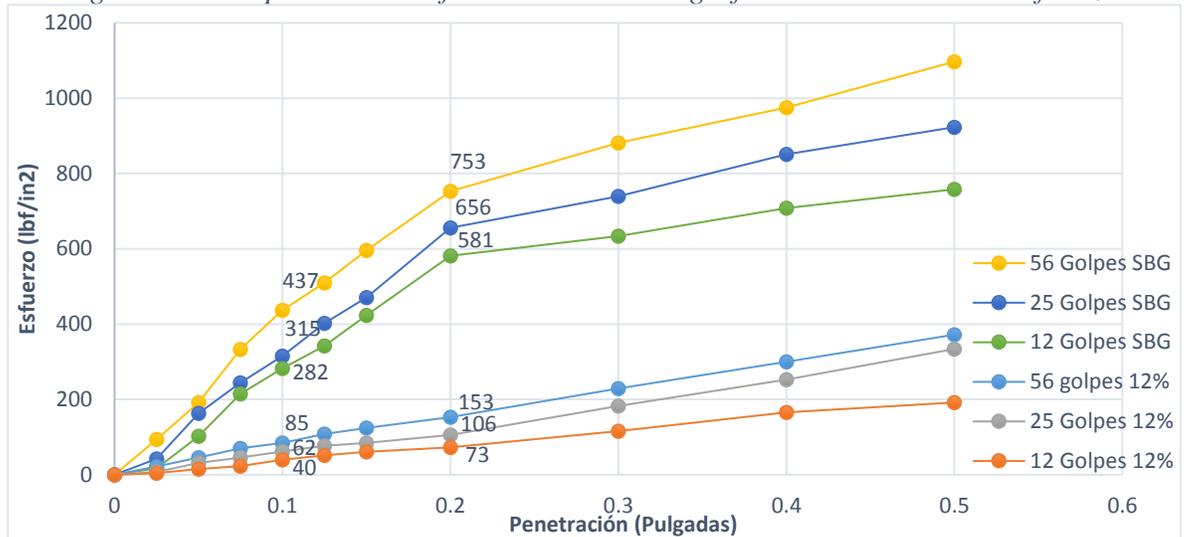


Fuente: PROPIA

En una Figura 24, se observa que los valores de los esfuerzos de la sub base clase A + Geoestab en una dosificación del 8% en peso, disminuyen considerablemente en comparación a la sub base clase A sin estabilizar; pues al comparar los esfuerzos a los que el material alcanzó una penetración de 0.2” los especímenes con adición del Geoestab en 8% solo soportaron 228 lbf/pulg<sup>2</sup>, 179 lbf/pulg<sup>2</sup> y 115 lbf/pulg<sup>2</sup> (especímenes 1, 2 y 3 respectivamente), la reducción fue del 30%, 27% y 20% con respecto a la sub base sin estabilizar que para esa misma penetración soportó 753 lbf/pulg<sup>2</sup>, 656 lbf/pulg<sup>2</sup> y 581 lbf/pulg<sup>2</sup> respectivamente

## Dosificación 12%

Figura 25. Comparativo Dosificación al 12% de graficas Penetración Vs Esfuerzo.

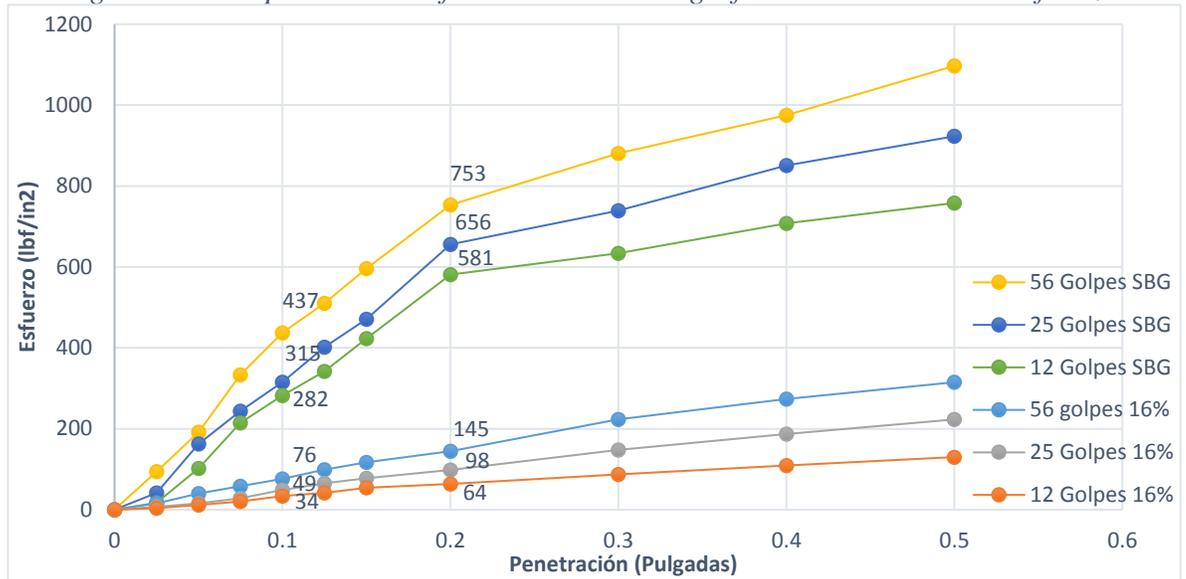


Fuente: PROPIA

En la Figura 25, se observa que los valores de los esfuerzos de la sub base clase A + Geostab en una dosificación del 12% en peso, disminuyen considerablemente en comparación a la sub base clase A sin estabilizar; pues al comparar los esfuerzos a los que el material alcanzó una penetración de 0.2” los especímenes con adición del Geostab en 12% solo soportaron 153 lbf/pulg<sup>2</sup>, 106 lbf/pulg<sup>2</sup> y 73 lbf/pulg<sup>2</sup> (especímenes 1, 2 y 3 respectivamente), la reducción fue del 20%, 16% y 12% con respecto a la sub base sin estabilizar que para esa misma penetración soportó 753 lbf/pulg<sup>2</sup>, 656 lbf/pulg<sup>2</sup> y 581 lbf/pulg<sup>2</sup> respectivamente

## Dosificación 16%

Figura 26. Comparativo Dosificación al 16% de graficas Penetración Vs Esfuerzo.

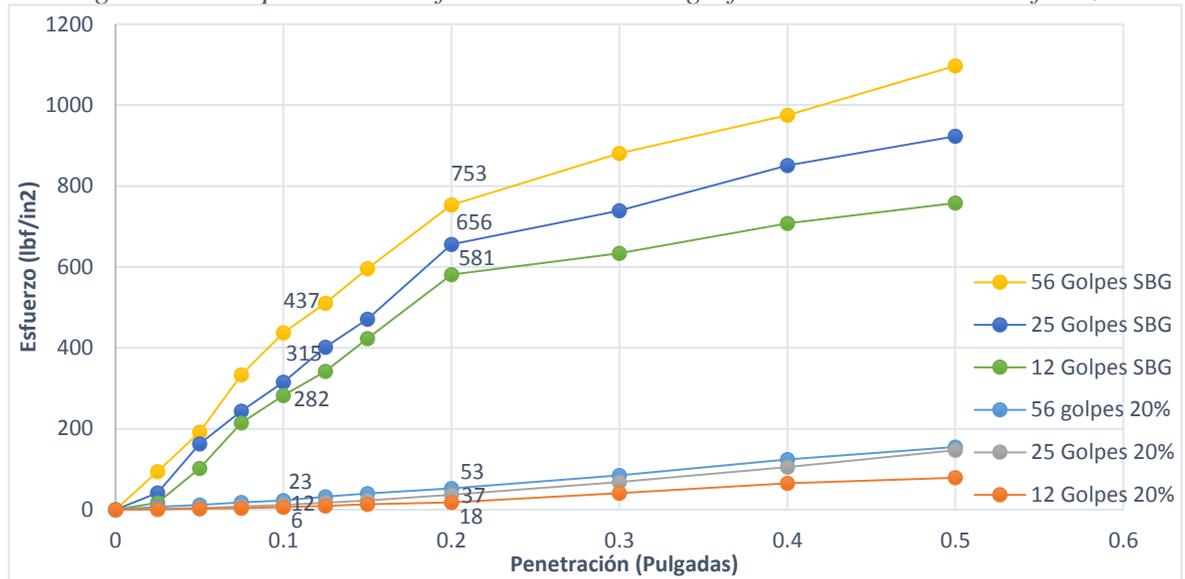


Fuente: PROPIA

En la Figura 26, se observa que los valores de los esfuerzos de la sub base clase A + Geoestab en una dosificación del 16% en peso, disminuyen considerablemente en comparación a la sub base clase A sin estabilizar; pues al comparar los esfuerzos a los que el material alcanzó una penetración de 0.2” los especímenes con adición del Geoestab en 16% solo soportaron 145 lbf/pulg<sup>2</sup>, 98 lbf/pulg<sup>2</sup> y 64 lbf/pulg<sup>2</sup> (especímenes 1, 2 y 3 respectivamente), la reducción fue del 19%, 15% y 11% con respecto a la sub base sin estabilizar que para esa misma penetración soportó 753 lbf/pulg<sup>2</sup>, 656 lbf/pulg<sup>2</sup> y 581 lbf/pulg<sup>2</sup> respectivamente.

## Dosificación 20%

Figura 27. Comparativo Dosificación al 20% de graficas Penetración Vs Esfuerzo.



Fuente: PROPIA

En la Figura 27, se observa que los valores de los esfuerzos de la sub base clase A + Geoestab en una dosificación del 20% en peso, disminuyen considerablemente en comparación a la sub base clase A sin estabilizar; pues al comparar los esfuerzos a los que el material alcanzó una penetración de 0.2” los especímenes con adición del Geoestab en 20% solo soportaron 53 lbf/pulg<sup>2</sup>, 37 lbf/pulg<sup>2</sup> y 18 lbf/pulg<sup>2</sup> (especímenes 1, 2 y 3 respectivamente), la reducción fue del 93%, 94% y 97% con respecto a la sub base sin estabilizar que para esa misma penetración soportó 753 lbf/pulg<sup>2</sup>, 656 lbf/pulg<sup>2</sup> y 581 lbf/pulg<sup>2</sup> respectivamente.

Como se puede apreciar en las gráficas de esfuerzo vs penetración, la curva resulto cóncava hacia arriba por tal razón se realizó la corrección al CBR, los valores de la corrección al 0.1” y 0.2” se presentan en la Tabla 13. No obstante, los valores del CBR corregido a 0.2” dieron mayor en consecuencia, se repitió el ensayo de acuerdo a lo dispuesto en la norma INV E 148-13 y nuevamente el valor a 0.2” fue mayor por esta razón se trabajó con estos valores de CBR.

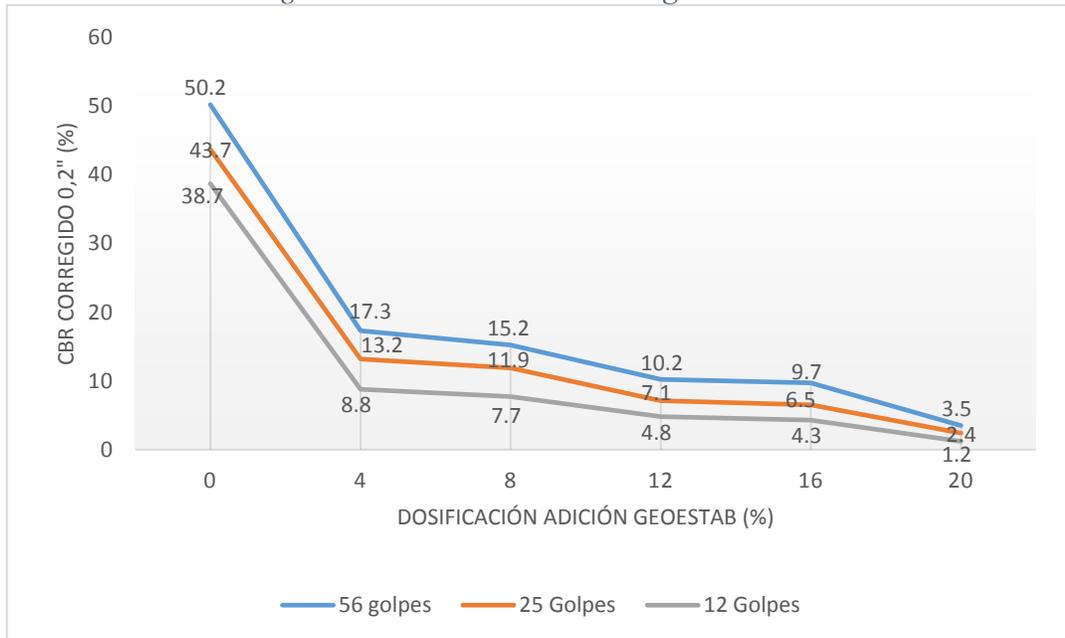
Tabla 13. CBR CORREGIDO 4%.

CBR CORREGIDO			
Golpes	56	25	12
CBR corregido a 0,1"	14.8	7.6	5.4
CBR corregido a 0,2"	17.3	13.2	8.8

Fuente: Laboratorio IDICOL

En la Figura 28, se presentan los valores del CBR corregido al 0.2", se aprecia la reducción que presenta la resistencia de la sub base estabilizada en comparación con los valores de resistencia alcanzados por la sub base sin estabilizar que para la compactación de 56 golpes fue un CBR del 50.2 %, para 25 golpes CBR del 43.7 % y para 12 golpes CBR del 38.7%, al adicional el Geoestab como estabilizante se redujo considerablemente la resistencia del material, bajando en una proporción del 30% al adicionar el 4% en peso del Geoestab y dicha reducción es directamente proporcional al porcentaje de Geoestab adicionado es decir, si se aumenta la cantidad del material se reduce la resistencia al CBR.

Figura 28. Valores el CBR corregido al 0.2".



Fuente: PROPIA

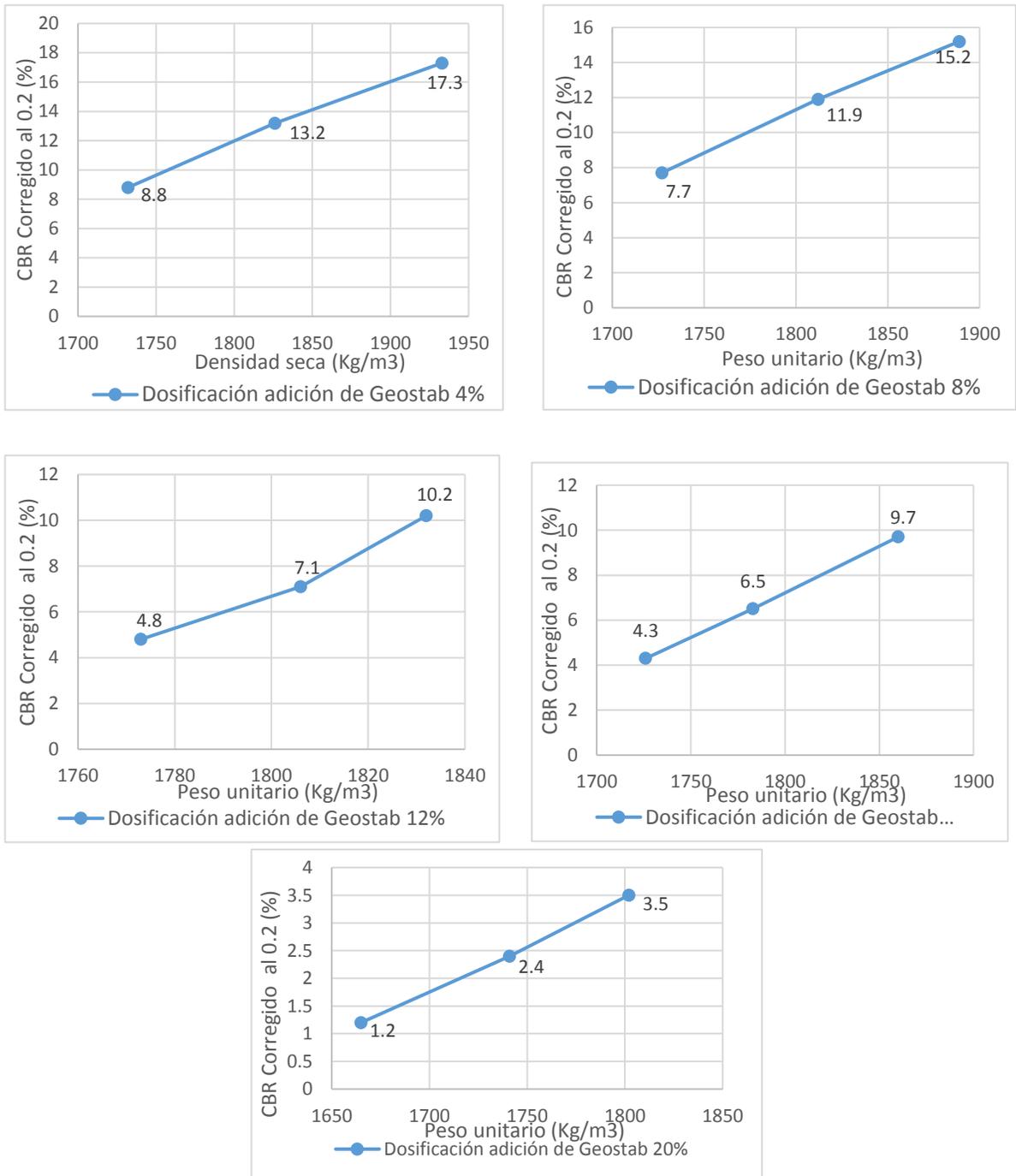
Se calculó el 95% de la densidad máxima seca de laboratorio como el 95% de la densidad seca.

$$\text{Densidad seca máxima} = \text{Densidad seca} * 95\%$$

$$\text{Densidad seca máxima} = 1933 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 95\% = 1836.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Con el valor de densidad seca máxima se ingresó en la gráfica de la Densidad seca Vs CBR, se encontró el valor del CBR al 95%, como se presenta en la Figura 29

Figura 29. Valores el CBR corregido vs Peso unitario.



Fuente: PROPIA

## Resumen

Se muestra a continuación la Tabla 14 con el resumen de los resultados del ensayo de laboratorio de CBR para cada una de las dosificaciones:

*Tabla 14. Resumen resultados ensayo CBR.*

Dosificación	Subbase estabilizada con el Geoestab					Sub base Granular estabilizada				
	Densidad seca máxima (kg/m3)	CBR a 0.2"			CBR 95%	Densidad seca máxima (kg/m3)	CBR a 0.2"			CBR 95%
		56	25	12			56	25	12	
4%	1836	17.3	13.2	8.8	13.5	1807	50.2	43.7	38.7	40.3
8%	1795	15.2	11.9	7.7	11					
12%	1740	10.2	7.1	4.8	4.8					
16%	1767	9.7	6.5	4.3	5.6					
20%	1712	3.5	2.4	1.2	2.0					

Fuente: Propia

En la Figura 30 se aprecia que la reducción del CBR al 95% cuando se adiciona el Geoestab, la norma indica que el valor mínimo para la aceptación de una sub base granular debe ser el 40% por tal razón, el valor obtenido en la mezcla de la Sub base clase A más en Geoestab no cumple la exigencia.

*Figura 30. Valores el CBR al 95%.*



Fuente: PROPIA

#### **10.4. GUÍA DE DOSIFICACIÓN.**

Teniendo en cuenta que ninguna de las dosificaciones de la sub base granular clase A con el Geoestab no alcanzan a cumplir con la resistencia mínima requerida para una Sub base clase A, al contrario, genera una pérdida de resistencia a la Sub base, no se realiza guía de dosificación, pues no es recomendable el Geoestab como estabilizante.

#### **10.5. DISEÑO MÉTODO AASHTO**

De acuerdo al Manual De Diseño De Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito (2007), capítulo 5, se establecen los parámetros para realizar un posible diseño AASHTO para un pavimento asfáltico tomando como ejemplo el municipio de Flandes Tolima, esto con el fin de evaluar la variación del aporte estructural, en donde se tienen los siguientes valores de entrada:

1. Espesor mínimo capa sub base granular

Se asume que sea una capa de espesor variable, la cual permite sensibilizar variaciones en la capacidad de soporte de la subrasante, teniendo un  $h_{\min}$  de 150mm.

2. Parámetros de confiabilidad:

Tomando como guía el manual, se adquiere un nivel de confiabilidad en el diseño del 70% ( $z_r$ ) y un  $s_o$  de 0.44.

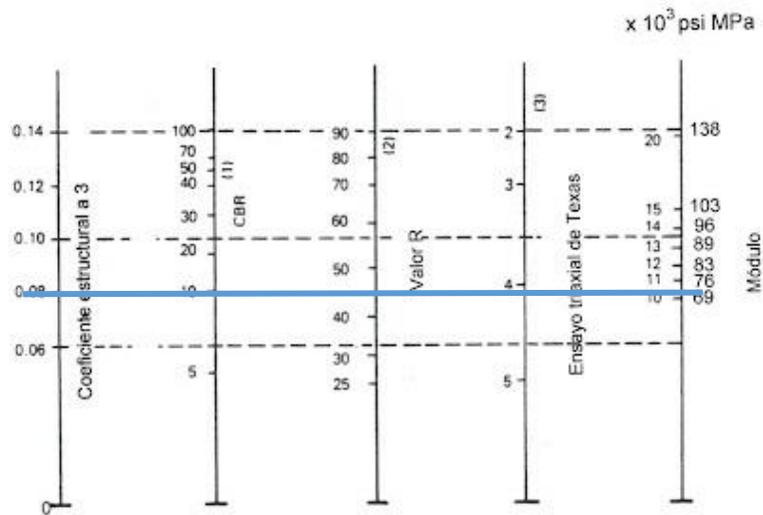
Valores de  $a$  y  $Mr$  para cada dosificación:

Dosificación 4%:

$a$  = Se toma el valor de  $a$  en el ábaco para  $M_r$  de la sub base con un CBR de 13.5% (Dosificación del 4%) como se muestra en la Figura 31.

$M_r$  = Se toma el valor de  $76 \times 10^3$  Psi MPa. (Figura 31)

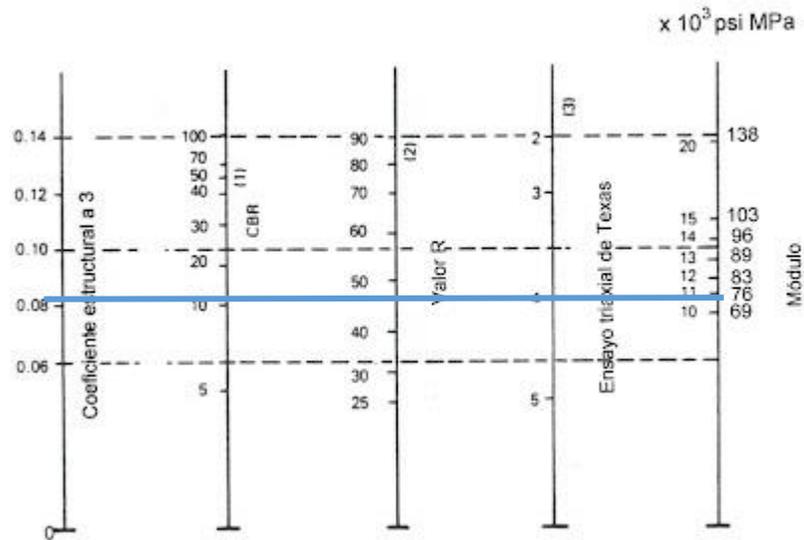
Figura 31. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 4%.



Fuente: Método AASHTO-93.

- Dosificación 8%, CBR de 11%:  
 $a$  = Se toma el valor de 0.081 (Figura 32).  
 $Mr$  = Se toma el valor de  $75 \times 10^3$  Psi MPa (Figura 32).

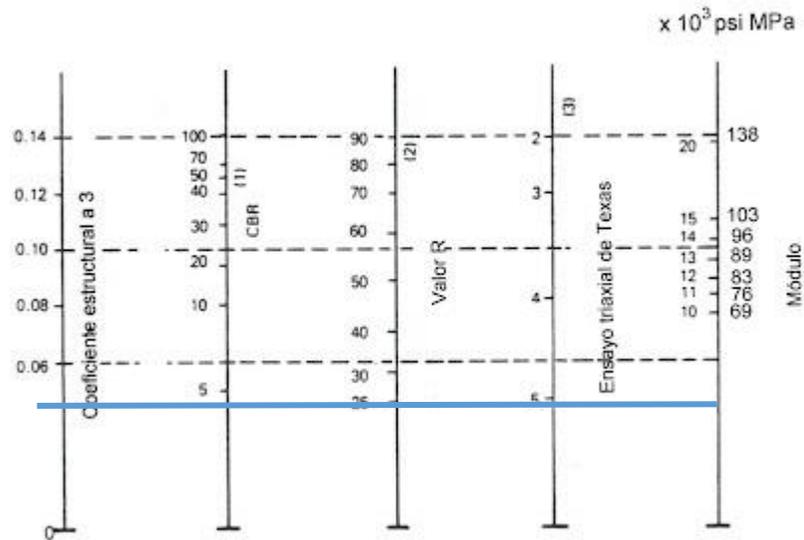
Figura 32. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 8%.



Fuente: Método AASHTO-93.

- Dosificación 12%, CBR de 4.8%:  
 $a$  = Se toma el valor de 0.051 (Figura 33).  
 $Mr$  = No se visualiza un valor exacto. (Figura 33)

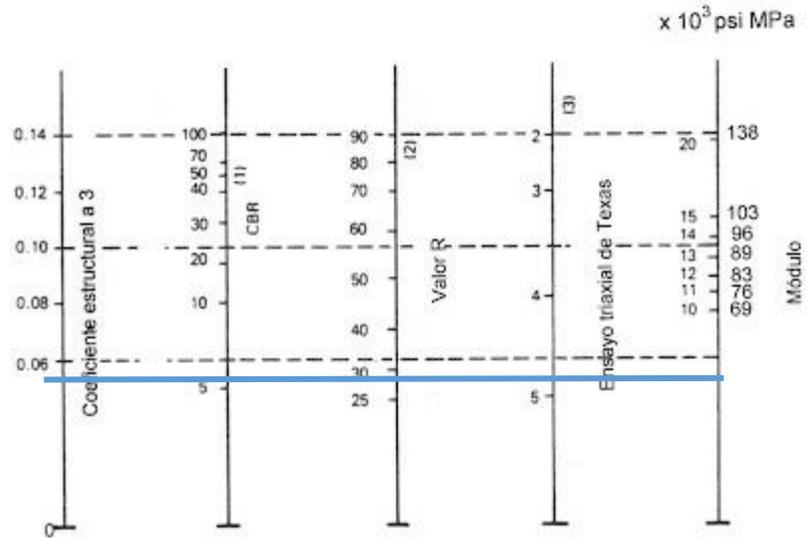
Figura 33. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 12%.



Fuente: Método AASHTO-93.

- Dosificación 16%, CBR de 5.6%:  
 $a$  = Se toma el valor de 0.058 (Figura 34).  
 $Mr$  = No se visualiza un valor exacto. (Figura 34)

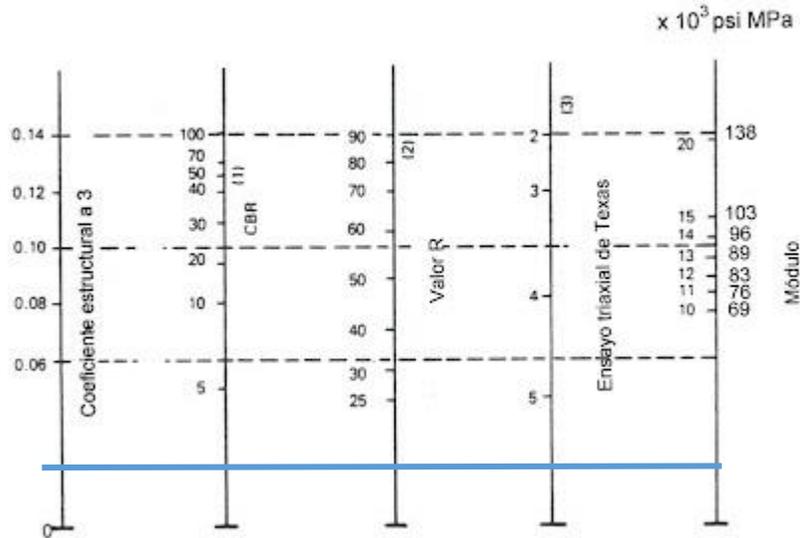
Figura 34. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 16%.



Fuente: Método AASHTO-93.

- Dosificación 20%, CBR de 2%:  
**a** = No se visualiza un valor exacto (Figura 35).  
**Mr** = No se visualiza un valor exacto. (Figura 35)

Figura 35. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes 20%.



Fuente: Método AASHTO-93.

1.  $\Delta PSI = 2.2$
2. Número estructural (SN)

Con la ayuda del programa PAV-NT1, es posible encontrar el valor de SN, para finalmente realizar el diseño del dimensionamiento de las estructuras, con la siguiente ecuación propuesta por la AASHTO:

$$\text{Log } N_{80\text{kN}} = z_r * s_o + 9.36 \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{nx}{1!} + \frac{\text{Log} \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log } Mr - 8.07$$

Con lo anterior, se busca que, en futuras investigaciones, ya se tenga como base los parámetros anteriormente establecidos de tal manera que se pueda continuar con la investigación, así mismo, sea posible determinar nuevas dosificaciones del Geoestab, en donde este material aporte resistencia a la una sub base granular y pueda tener una disposición final.

## **11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **11.1. CONCLUSIONES**

Una vez analizados todos los ensayos de laboratorio realizados a los materiales individuales, del mismo modo con las dosificaciones del 4, 8, 12, 16 y 20%, se evidenció que el Geoestab no realiza un aporte estructural a la sub base granular clase A, debido a que la resistencia de las probetas fue menor en una proporción significativa a la alcanzada por la sub base granular sin estabilizar, de acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo CBR.

La cantidad de Geoestab y el porcentaje de resistencia de la sub base granular estabilizada son inversamente proporcionales, se evidencio cuando se obtuvo un valor de CBR del 13.5% para la dosificación del 4% y para una dosificación del 20% el valor de CBR fue del 2%, es posible que esto se presente debido a un exceso del estabilizador, ya que el tener un alto contenido de Geoestab puede generar una disminución en la rigidez de la sub base.

En la estabilización de las capas de soporte de un pavimento, normalmente en la base granular y en algunas ocasiones en la sub base, la incorporación de asfalto ya sea espumado, emulsionado o adicionado como mezcla en caliente, funciona como un impermeabilizante ayudando así a que los granulares no pierdan resistencia por la humedad y a generar cohesión entre las partículas aumentando así, la resistencia al corte y la flexión; en la mezcla para la estabilización de la sub base granular el Geoestab se agregó en frío, una forma en la que podría cumplir con el objetivo de aglutinar y dar cohesión a las partículas, es adicionarlo en caliente teniendo en cuenta que el asfalto es un material visco elástico y el Geoestab posiblemente conseguirá tener un comportamiento similar, debido a que al aumentar la temperatura la viscosidad disminuye, el volverse menos viscoso puede recubrir los granulares manteniéndolos juntos, más rígidos y así aportar resistencia a la mezcla.

Como se expuso desde el inicio del presente trabajo de investigación, el Geoestab es un material no implementado ni normalizado, por esta razón, definitivamente una caracterización común con ensayos convencionales para materiales de este tipo y mezclas no deberá cumplir con la normativa vigente en el país, no aplica para este material y los

resultados no son fieles al comportamiento y posible aporte estructural que pueda ofrecer el mismo. Verificar su comportamiento es uno de los objetivos de esta investigación.

Teniendo en cuenta el objetivo principal de evaluar el aporte estructural generado por el material Geoestab como estabilizante de una sub base granular, es importante recalcar que, esta es la primera investigación sobre este material, por lo tanto, se debe realizar más estudios de sus diferentes comportamientos, como la continuación del diseño de ASSHTO, con el fin de poder reutilizar el Geoestab y disminuir su contaminación actual.

## 11.2. RECOMENDACIONES

No es recomendable estabilizar una sub base granular clase A con el Geoestab, COLOCANDOLE LAS PROPORCIONES EN LAS CUALES SE REALIZÓ ESTA PRIMERA INVESTIGACIÓN, deberá ampliarse la investigación a otras proporciones en las cuales se evidencie el aporte a tensión en el granular.

Para poderse usar como estabilizante se tendrá que realizar una investigación con dosificaciones menores al 4% similar a la que se presenta en este trabajo, dado que se le asignaron porcentajes del 4, 8, 12, 16 y 20% de dosificación del Geoestab en la mezcla con la sub base granular, pero al no alcanzar los resultados esperados, se sugiere tener en cuenta la absorción, hinchamiento y estabilidad del material, con el fin de obtener un criterio más acertado que ayude a determinar nuevas dosificaciones del Geoestab y este pueda generar una mayor resistencia a la sub base granular.

Para obtener la fórmula de trabajo del laboratorio a futuras investigaciones con el Geoestab, es necesario realizar las siguientes etapas: caracterización de los materiales, contenido teórico de ligante del material mediante los métodos mencionados en la guía de dosificación, contenido óptimo de agua de envuelta y contenido óptimo de agua de compactación.

Cabe resaltar que la investigación puede ir enfocada no solo a una sub base granular sino también, a bases granulares, bloques o adoquines, de tal manera que se amplíe la investigación del Geoestab y así poderle dar un uso final al material que ayudé a disminuir la contaminación que este genera.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

1. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Oficina de Planeación. Transporte en Cifras Estadísticas. (2019).
2. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Capítulo 1 Aspectos Generales. Página 5. (2008)
3. VELÁSQUEZ, J. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Revista De Investigación Agraria y Ambiental, 8 (1), 151-167. Retrieved from <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/1955992586?accountid=45660>
4. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. ESPECIFICACIÓN PARTICULAR MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL. Artículo 442P. Página 1. (2017).
5. CARO, Silvia y CAICEDO, Bernardo. Tecnologías para Vías Terciarias: Perspectivas y Experiencias desde la Academia. Revista de Ingeniería. no 45. (2017).  
PEÑA, J. J. “Los Morteros Asfálticos Naturales, Una Alternativa Ecológica para el Mejoramiento de la Red Vial: de lo Empírico a lo Técnico”. Memorias de las 4tas ornadas Técnicas del Asfalto. Cartagena (Colombia). (2010)  
ARBELÁEZ, H., Henao, A., Zocattelli, L.A. (2011) “MAPIA, una Alternativa Competitiva y Ecológica en Carpetas Asfálticas (Arista Ingeniería)”. Recuperado en marzo de 2017 de: <https://es.slideshare.net/alexa842003/presentacmapia-santa-marta>. Citado por CAIRO Y CAICEDO. Tecnologías para Vías Terciarias: Perspectivas y Experiencias desde la Academia. (2017)
6. VÁSQUEZ, L.C. “Evaluación en Laboratorio del Comportamiento de un Asfalto Natural con la Adición de Gravas Trituradas”. Memorias de las Terceras Jornadas Internacionales del Asfalto; Popayán (Colombia). (2002)
7. Calderón, B. “Consultoría para la evaluación, caracterización de obra y presupuesto de los trabajos para el mejoramiento y mantenimiento en “MAPIA” (Material Pétreo Impregnado de Asfalto) de la vía “La Esperanza – El Arbolito – Tabacal”, municipio de

- Villamaría, incluido en el programa de pavimentación de la gobernación de Caldas”. Gobernación de Caldas. Secretaría de Infraestructura. (2009)
8. RONDÓN, Hugo; HERNÁNDEZ, Jesús y URAZAN, Carlos. Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes. Universidad Nacional Autónoma de México. (2015).
  9. YILMAZ; Mehmet, VURAL; Baha y KULOGLU; Necati. “Effects of using Asphaltite as Filler on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt”. Construction and Building Materials. Vol.25, pp. 4279 – 4286. (2011).
  10. CARO; Silvia y CAICEDO; Bernardo. Technologies for tertiary roads: Perspectives and experiences from an academic approach. Universidad de los Andes. Revista de Ingeniería, n° 45, pp. 12-21 (2017).
  11. MANTILLA; Javier y CASTAÑEDA; Eduardo. Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders. Revista DYNA, 86(208), pp. 257-263. (2019).
  12. BUSTAMANTE; Brayan, GONZALEZ; Ana y RODRIGUEZ; Michael. Análisis del Uso y Comportamiento de la Asfaltita como Base y Sub-base Granular en Pavimentos. Universidad Piloto de Colombia. (2019).
  13. JIMÉNEZ, Leticia; CRUZ, Mauricio. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESERVAS DEL YACIMIENTO DE ASFALTITAS EN EL SECTOR DE ISAZA, MUNICIPIO DE VICTORIA, DEPARTAMENTO DE CALDAS – COLOMBIA. Editorial Universidad de Caldas. Cuaderno de investigación N°9. Facultad de ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Caldas. (2004).
  14. ALARCÓN; Luis. Uso de la Asfaltita para pavimentos en vías terciarias en Boyacá y Cundinamarca en la república de Colombia. Universidad Nueva Granada. (2014)
  15. TIMM, D. H.; ROBBINS, M. M.; WILLIS, J. R. and TAYLOR, A. J. “Field and laboratory study of Trinidad Lake asphalt mixtures at the NCAT test track.” NCAT Rep. 14-05, National Center for Asphalt Technology, Auburn Univ., Auburn, AL. (2014).
  16. SOBHI, Saeid; YOUSEFI, Afshar and BEHNOOD, Ali. The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures. Construction and Building Materials. Volumen 238. (2019).

17. Pardo T, EL TIEMPO. Bogotá D C. 20 de abril (2018). Consultado el día: 10 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cifras-de-derrames-de-crudo-en-colombia-en-los-ultimos-anos-207664>.
18. ALCALDIA DE FLANDES. Nuestro municipio. Flandes puerta del oro del Tolima. (2019) Disponible en: <http://www.flandes-tolima.gov.co/municipio/nuestro-municipio>.
19. SEMANA. El ataque al oleoducto Caño Limón-Coveñas que desapareció las aguas cristalinas de Pozo Azul. En: Revista SEMANA. 19 marzo 2019. Disponible en: <https://www.semana.com/nacion/articulo/pozo-azul-las-aguas-cristalinas-que-desaparecieron-tras-ataque-a-oleoducto-cano-limon-covenas/610273>.
20. EL TIEMPO. Bogotá D C. 05 de mayo 1997. Consultado el día: 10 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-555907>.
21. RONDON, H. A. & REYES, F. A. *Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño*. (2015).
22. MORA, S. Pavimentos de concreto hidráulico. *FIC-UNI ASOCEM*. (2006).
23. SANCHEZ, F. PAVIMENTO. (1984)
24. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Normas y Especificaciones. Capítulo 3 Afirmados, sub bases y bases. (2013).
25. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN, Facultad de Ciencia y tecnología. PAVIMENTOS. (2004).
26. DELLAROSSA N. ANÁLISIS DE LA FATIGA DE BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO EN RUTAS DE BAJO TRÁNSITO”. Universal Austral de Chile. (2013). Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmficid357a/doc/bmficid357a.pdf>
27. SANCHEZ F. MÓDULO 7: MATERIALES PARA BASE Y SUBBASE. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-7-materiales-para-base-y-subbase-fernando-sanchez-sabogal>.(2016)
28. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Capítulo 1. (2008).
29. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). Normas y Especificaciones. Capítulo 1 Aspectos generales. Artículo 100. Ámbito de aplicación, términos y definiciones. (2013).

30. G. SAS, "GEOAMBIENTAL SAS," *MISION, VISION*. [Online]. Available: <https://www.geoambiental.com/>. (2009).
31. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). *NORMAS Y ESPECIFICACIONES. CAPITULO 3 AFIRMADOS, SUB BASES Y BASES. ARTICULO 320 SUB BASE GRANULAR*. (2013).
32. LOCAL ROAD RESEARCH BOARD LRRB. *Base Stabilization Guidance and Additive Selection for Pavement Design and Rehabilitation*. Estados Unidos. Page 9. (2017)
33. ÁLVAREZ Alex, et al. Adhesion quality and rheological properties of unmodified and Nano-modified asphalt residues derived from paving-heavy crude oils. *Universidad Nacional de Colombia DYNA*, Vol. 86, Número 209, p. 357-366. (2019) DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.73588>
34. DELGADO Horacio, et all, *DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTO ESPUMADO*. Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte. (2018). Recuperado de: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt519.pdf>
35. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). *Normas y Especificaciones. Sección 200*. (2013).
36. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). *Normas y Especificaciones. Sección 100*. (2013).
37. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). *Normas y Especificaciones. Sección 700*. (2013).
38. CORREDOR, Gustavo. *Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHTO. Maestría en Vías Terrestres Módulo III Diseño de Pavimentos I*. (2008)

### **13. RELACIÓN DE ANEXOS**

Anexo A. Ensayos de laboratorio Idicol

Anexo B. Propuesta de trabajo de grado Aprobada.