

**UTILIZACION DE GRANULO DE CAUCHO PULVERIZADO PROVENIENTE
DE LLANTAS USADAS COMO SOLUCION PARA REFORZAR LOS SUELOS
BLANDOS DE SUBRASANTE EN LA SABANA DE BOGOTA**

SERGIO ANDRÉS ÁLVAREZ CASTELBLANCO

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

INGENIERÍA CIVIL BOGOTÁ

2020

**UTILIZACION DE CAUCHO PULVERIZADO PROVENIENTE DE LLANTAS
USADAS COMO SOLUCION PARA REFORZAR UN SUELO BLANDO DE
SUBRASANTE EN LA SABANA DE BOGOTA**

SERGIO ANDRÉS ÁLVAREZ CASTELBLANCO

Monografía presentada como requisito para optar por el título de

Ingeniero Civil

Director:

Ing. Esp. ALEXANDRA MORALES REY

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

INGENIERÍA CIVIL BOGOTA D.C.

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA JURADO 1

FIRMA JURADO 2

Bogotá, noviembre de 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado se encuentra dedicado a todas las personas que creyeron que fuera posible superar este reto y dedico con mayor fuerza a mis señores padres José Álvarez y Elizabeth de Álvarez, los cuales siempre me apoyaron a enfrentar las adversidades que se presentaron durante mi etapa estudiantil.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi asesora, la ingeniería Alexandra Morales por compartir su conocimiento y experiencia para la elaboración de esta monografía, además también por los conocimientos que me compartió a lo largo de la etapa universitaria, el cual me sirvió para culminar exitosamente mi etapa estudiantil, y agradecer por las oportunidades y confianza brindada.

Quiero agradecer también al profesor Néstor Perico por ser un excelente maestro y compartir todo su conocimiento con los futuros ingenieros del país y agradecer a mis padres por darme la oportunidad de terminar con éxito esta etapa.

Contenido

1. Introducción	10
2. Objetivos	12
2.1. Objetivo general	12
2.2. Objetivos específicos.....	12
3. Marco conceptual	13
4. Estado del arte.....	15
4.1. Reforzamiento de suelos mediante adición de fibras textiles de caucho	15
4.1.1. Reutilización de fibras textiles de neumáticos de desecho como refuerzo del suelo	15
4.1.2. Comportamiento dinámico a largo plazo de una subrasante arenosa reforzada con fibras textiles de llantas desechadas	18
4.2. Reforzamiento de suelos con tiras de neumáticos desechados	20
4.3. Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnica.....	23
4.4. Utilización de caucho pulverizado proveniente de llantas en bases estabilizadas con suelo – cemento sustituyendo la franja granulométrica entre el tamiz n°30 y n°80	24
5. Planteamiento del problema.....	27
6. Metodología	29
7. Resultados	30

7.1. Descripción de los suelos en la sabana de Bogotá	30
7.2. Métodos Tradicionales en Colombia para el Mejoramiento de la Subrasante	35
7.2.1. Mejoramiento de una subrasante usando Rajón.....	35
7.2.2. Estabilización de Suelos de Subrasante con Cal.....	38
7.2.3. Estabilización de Suelos de Subrasante con Geosintéticos.....	42
7.2.4. Estabilización de Suelos de Subrasante con polvo de caucho	46
8. Conclusiones	52
9. Bibliografía	53

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Patrones de Falla Típicos Bajo la Prueba UCS</i>	16
Figura 2 <i>Fibras Textiles de Neumáticos Usados</i>	19
Figura 3 <i>Estilo de Colocación de las Tiras de Neumáticos</i>	22
Figura 4 <i>Polvo de Caucho</i>	23
Figura 5 <i>Mezclas de Suelo-Cemento-Caucho</i>	26
Figura 6 <i>Mapa de zonificación geotécnica</i>	30
Figura 7 <i>Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre calle 127 y calle 200 aprox.</i>	33
Figura 8 <i>Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre calle 13 y calle 127 aprox.</i>	33
Figura 9 <i>Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre calle 36 sur y calle 13 aprox.</i>	34
Figura 10 <i>Esquema geotécnico típico de una sección norte - sur entre Cr 72 a calle 86 aprox.</i>	34
Figura 11 <i>Material tipo Rajón</i>	36
Figura 12 <i>Carrera 60 entre calla 26 y calle 42 sentido sur-norte</i>	42
Figura 13 <i>Estado actual de la Carrera 60 entre calle 26 y calle 42 sentido sur-norte</i> ...	43
Figura 14 <i>Instalación de geomalla biaxial y geotextil</i>	44
Figura 15 <i>Piel de cocodrilo sobre Carrera 60 entre calle 44 y 26 sentido norte-sur</i>	46
Figura 16 <i>Ondulaciones sobre Carrera 60 entre calle 44 y 26 sentido norte-sur</i>	47
Figura 17 <i>Diferencias con respecto al costo del caucho pulverizado</i>	50
Figura 18 <i>Ventajas y desventajas de los métodos para estabilizar una subrasante</i>	51

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Definición de las zonas geotécnicas</i>	31
Tabla 2 <i>APU Mejoramiento de subrasante con rajón</i>	37
Tabla 3 <i>Características del suelo in situ para poder ser estabilizada con cal</i>	39
Tabla 4 <i>APU Mejoramiento de Subrasante con Cal</i>	41
Tabla 5 <i>APU Estabilización de Subrasante con Geomalla</i>	45
Tabla 6 <i>Estabilización de subrasante con caucho pulverizado</i>	49
Tabla 7 <i>Costos directos de cada método para la estabilización de una subrasante blanda</i>	50

1. Introducción

Colombia en la última década ha presentado un aumento exponencial en los vehículos nuevos que circulan por el país, esto ha generado un gran impacto en el medio ambiente con consecuencias ambientales desastrosas, según la ANDI el crecimiento del parque automotor creció un 60% con respecto al año 2010, el país paso de tener 2.414.490 vehículos en el año 2010 a 6.266.954 en el año 2019 ("Parque automotor", 2020).

El incremento de los vehículos matriculados en Colombia trae como problema la acumulación de neumáticos usados, debido a que necesitan de neumáticos nuevos para reemplazar los neumáticos que ya cumplieron su vida útil, lastimosamente en Colombia no existe una regulación sobre el aprovechamiento de los neumáticos usados. La resolución 1488 de 2003 dictamina el uso final de las llantas nuevas y usadas y establece que su destrucción se realice a través de los hornos que se utilizan para la producción de Clinker que tienen las plantas cementeras, La resolución 1488 de 2003 no regula ni instaura ningún aprovechamiento para el reciclaje de los neumáticos usados o en desuso, ya que no son considerados como residuos peligrosos.

El aprovechamiento de las llantas usadas en Colombia, no se ha examinado a profundidad, con esta monografía se pretende generar un uso más adecuado a este material, reciclando los neumáticos que ya cumplieron con su vida útil, con el fin de convertirlos en gránulos de caucho para así agregarlos a un suelo que presente inestabilidad para mejorar su comportamiento mecánico. Bogotá presente grandes secamientos de las reservas hídricas,

causando que la ciudad se hunda lentamente, a factor de 7,5 cm por año (Agencia de Noticias Universidad Nacional, 2012), esto conlleva a que la ciudad contenga altos volúmenes de suelos inestables, según estudios de diferentes universidades, la capital colombiana presenta en su mayoría suelos arcillosos y limosos, los cuales no son aptos para grandes construcciones, y necesiten de un mejoramiento del mismo.

El aprovechamiento de diferentes materiales contaminantes de suelos, mares y ríos, se están evaluando para ser usados como mejoramiento de un suelo. Alrededor del mundo se está evaluando uno de los materiales más contaminantes, los residuos plásticos; este material que se fabrica en grandes cantidades, no tiene una reutilización muy adecuada, pero existe un estudio que reutiliza las botellas PET como geoceldas (Ramesh, Nageshwar Rao., & Kumar, 2019), ayudando a disminuir la contaminación.

Este material no es el único que está causando grandes problemas al mundo, los diferentes desechos que se generan al fabricar un neumático, además de la acumulación de llantas usadas, conlleva a que se busquen alternativas más amigables con el medio ambiente, con el fin de disminuir nuestra huella de carbono. La reutilización y uso adecuado de este tipo de materiales ayuda a la conservación de los hábitats y cuerpos de agua.

La presente monografía, pretende establecer cómo se comporta un suelo blando al agregar caucho pulverizado sobre la capa de soporte de una carretera, por medio del estudio e investigación de diferentes textos que describan el procedimiento y las conductas de un suelo que presente las características que se están evaluando.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar la adición de caucho pulverizado proveniente de llantas en desuso como solución eficiente para reforzar los suelos blandos de subrasante que se encuentran en la sabana de Bogotá.

2.2. Objetivos específicos

- Investigar el comportamiento de un suelo blando cuando se agrega caucho pulverizado.
- Investigar las características y comportamientos de los suelos de la capital colombiana.
- Comparar el uso del caucho pulverizado con los métodos tradicionales usados para el reforzamiento de la subrasante de una carretera.
- Establecer si el caucho pulverizado puede ser utilizado como solución para estabilizar los suelos blandos de la sabana de Bogotá.

3. Marco conceptual

Para entender el propósito de la presente monografía, se deben entender una serie de conceptos que ayudaran al lector a abordar de una manera más clara los objetivos plasmados. A continuación se describen los conceptos necesarios:

CBR: Es un porcentaje que determina la capacidad que tiene un suelo al esfuerzo cortante, el porcentaje de humedad y las condiciones de densidad se deben controlar cuidadosamente. El CBR se emplea principalmente para diseñar pavimentos flexibles (Paucar Naranjo, 2011).

Cal: Es un artículo que se obtiene de la separación de los componentes que tienen las rocas calizas puras al calentarse a una temperatura superior a los 900°C, con el fin de generar una reacción que elimine el anhídrido carbónico por medio de los gases generados por la combustión (Montejo Fonseca, 2002).

Caucho pulverizado: Es un subproducto que se obtiene del triturado de llantas que ya cumplieron su vida útil y en el proceso de reciclaje se separan todos los elementos que componen los neumáticos, con el fin de obtener el caucho que los compone (Huamán Casas & Muguera Zeballos, 2019). Su uso es variado y generalmente se usa para mejorar las propiedades de los asfaltos, ya que se ha demostrado que la mezcla MD-GCR dura un 50% más que las mezclas convencionales (Patiño & Rodríguez Ramos, 2017).

Cohesión: Es una propiedad de las arcillas, en donde se genera una atracción molecular entre las partículas debido a la tensión superficial del agua. (Hossne, Paredes, Carvajal, Santaella, & Malaver, 2011)

Geomallas: Es un componente que se instala en las capas granulares de una estructura, con el fin de evitar que los materiales instalados se mezclen cuando se presente humidificación, además de proteger las diferentes capas que componen la estructura y servir como refuerzo de un suelo. (Vargas Jiménez *et al*, 2017)

Reciclaje: Consiste en el proceso de transformación de un producto sometido a un proceso fisicoquímico, mecánico o un tratamiento con el fin de hacer aprovechar los materiales con los que está fabricado, para hacer un nuevo producto (Isan, 2017).

Subrasante: Se le denomina a la capa de soporte de la estructura del pavimento de una carretera, sobre la cual actúan cargas estáticas y dinámicas que provenientes del tránsito y el propio peso de la estructura del pavimento. (Londoño Naranjo & Alvarez Pabón, 2008)

Subrasante mejorada: Es una capa que se encuentra por debajo de la subbase granular y se reemplazó parte de la misma con materiales de conformación de relleno, con rajón o con escombros; debido a que la subrasante presentaba baja rigidez y poca resistencia a la carga cíclica (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

4. Estado del arte

En el mundo existen diferentes estudios sobre la reutilización de los neumáticos usados en las carreteras, en la presente monografía se pretende exponer las noticias, artículos y estudios sobre los diferentes usos del caucho para mejorar las capas granulares de los pavimentos.

Diferentes investigaciones se han realizado para entender el comportamiento de un suelo blando sometido a cargas estáticas y dinámicas con adición de caucho, a continuación, se enumeran diferentes estudios que se llevaron a cabo, con el fin de analizar un suelo inestable y como mejorarlo:

4.1. Reforzamiento de suelos mediante adición de fibras textiles de caucho

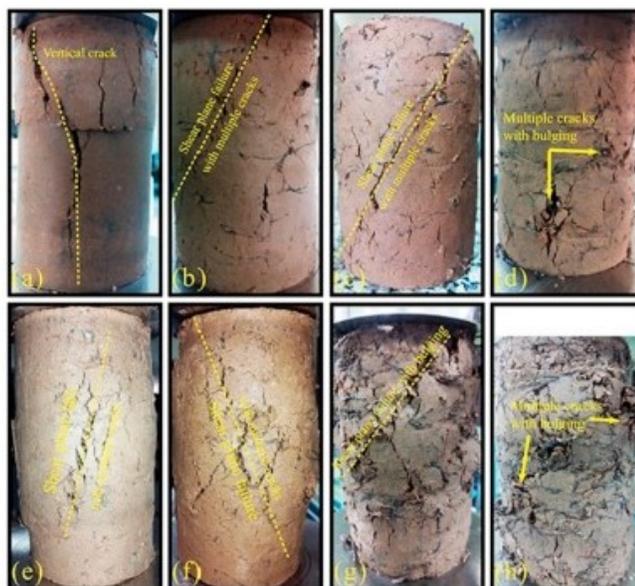
4.1.1. Reutilización de fibras textiles de neumáticos de desecho como refuerzo del suelo

Esta investigación permitió recolectar información sobre el comportamiento de dos suelos, arenoso y arcilloso, por medio de diferentes estudios fundamentales hechos a través de un microscopio óptico. Las muestras utilizadas se tomaron en Shahr-e Kord al suroeste de Irán, estas muestras se clasificaron según la SUCS como un suelo SW-SC para la arena, y CL para la arcilla. (Mohsen, Esmail, & Fereidoon Moghadas, 2019).

Se utilizó como elemento de refuerzo del suelo, fibras de neumáticos reciclados obtenidos de la fábrica Yazd Tire, con porcentajes variados hasta el 10%, pero debido a la dificultad de producir mezclas uniformes que contengan más del 4% debido al alto volumen de fibras que se necesitan, se ensayó con muestras en porcentajes de 0%, 0,5%, 1%, 2%, 3% y 4%.

El grupo de investigadores a cargo (Mohsen *et al.*, 2019) evaluó el efecto de las fibras de neumáticos recicladas a través de diferentes ensayos de laboratorio, con el fin de analizar y conocer las características y componentes de los suelos. Se realizaron pruebas de compactación, prueba de corte directo, resistencia a la compresión no confinada, CBR y resistencia a la tracción dividida. En la **Figura 1** se puede observar el patrón de falla de diferentes muestras al efectuar el ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS).

Figura 1 Patrones de Falla Típicos Bajo la Prueba UCS



Nota: (a) CF_{0%}, (b) CF_{0.5%}, (c) CF_{1%}, (d) CF_{4%}, (e) SF_{0.5%}, (g) SF_{3%}, (h) SF_{4%}

Fuente: (Mohsen *et al.*, 2019).

Se analizaron las pruebas por medio de un microscopio óptico para identificar de mejor manera la interacción entre los granos del suelo y las fibras de neumáticos reciclados. Con el fin de averiguar que se repitieran los resultados, las muestras se vieron repetidas en dos turnos sobre los residuos con un intervalo de tiempo de 6 meses.

Las conclusiones de este equipo de investigadores (Mohsen *et al.*, 2019) dan como resultado que las muestras sometidas a corte directo tienen un aumento significativamente en porcentajes de 3% y 4% de fibra textil de caucho reciclado. La adición de fibra en la arcilla da como resultado un pequeño cambio en la cohesión de la muestra, pero el ángulo de fricción interna se ve reducida hasta en un 3% y se ve un pequeño aumento al agregar más fibras; diferente a lo que se pudo observar con la arena, el cual la cohesión tiene un gran aumento en porcentajes mayores al 1%, y en un porcentaje de fibra del 1% el ángulo de fricción interna tiene un leve aumento.

La adición de fibra de caucho de neumáticos reciclados en porcentajes mayores al 1%, da un resultado favorable en la resistencia a la compresión no confinada en la arcilla. El suelo pasa de tener un comportamiento frágil a un comportamiento muy dúctil, al igual que con la mezcla arenosa, pero con la diferencia que, con cualquier contenido de fibra este suelo presenta un aumento en la ductilidad del suelo.

Según (Mohsen *et al.*, 2019), los resultados de esta investigación generan un alto reconocimiento para el uso de las fibras de caucho como material de refuerzo en proyectos geotécnicos con suelos granulares, pero se debe tener en cuenta que el uso de este material con

suelos arcilloso, reduce algunas propiedades mecánicas pero aumenta la resistencia a la tracción y la ductilidad de la arcilla, por lo tanto se puede usar en proyectos como terraplenes de tierra, relleno de muros de contención reforzados y por gravedad, además de la estabilización de taludes.

4.1.2. Comportamiento dinámico a largo plazo de una subrasante arenosa reforzada con fibras textiles de llantas desechadas

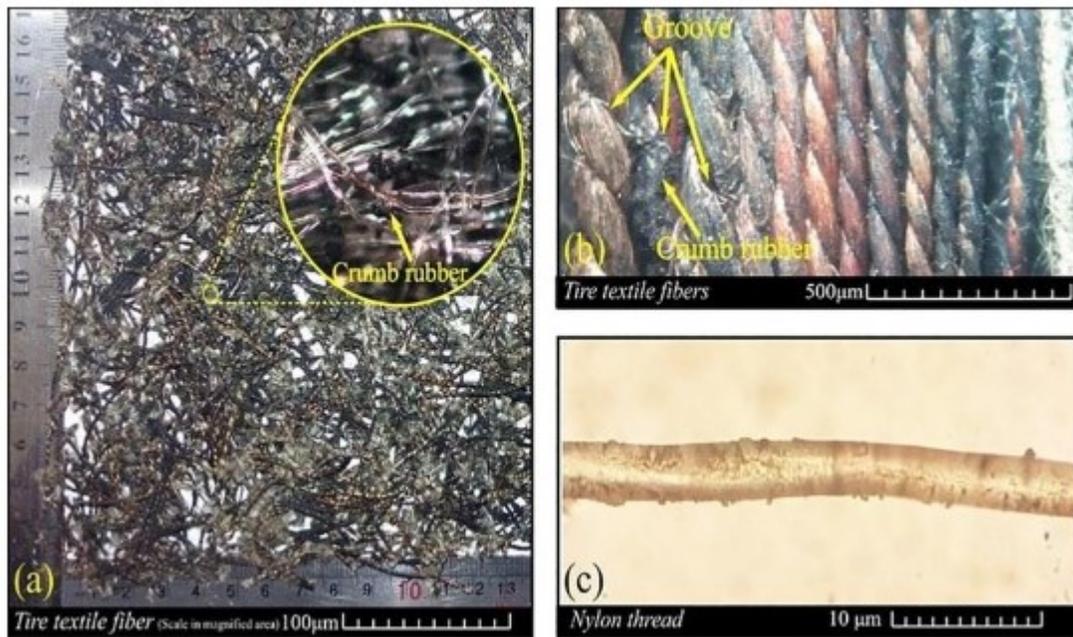
Este grupo de personas (Narani, Abbaspour, Mir Mohammad Hosseini, & Moghadas Nejad, 2020) estudio y analizo el comportamiento de un suelo arenoso reforzado con contenidos variables de fibras textiles sacadas de neumáticos usados de vehículos pesados por medio de la realización de pruebas triaxiales de cargas cíclicas. Las variables investigadas en este documento son la capacidad del suelo para disipar la energía cíclica aplicada y la relación de amortiguación, además del análisis del módulo resiliente y los parámetros aceptables de deformación permanente.

La investigación de centro en el comportamiento de un suelo adquirido de un pozo en la provincia de Yazd, en el área central de Irán, se clasifico como SC-SM (Arena Arcillosa – Arena Limosa) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Las fibras utilizadas son provenientes de neumáticos gastados de vehículos pesados recicladas en la fábrica de llantas de Yazd. En la **Figura 2** se aprecia de mejor manera la apariencia de las fibras textiles a través de un microscopio (a), además de la imagen

microscópica de varias fibras textiles con diferentes diámetros (b) y la imagen microscópica de un hilo de nailon (c).

Figura 2 *Fibras Textiles de Neumáticos Usados*



Fuente: (Narani *et al.*, 2020).

Se realizó el estudio de suelos con contenidos de fibras de caucho del 0%, 0,5%, 1%, 2%, 3% y 4%, arrojando un resultado satisfactorio en la disminución de la deformación permanente (ϵ_p) de 69,5%, 86,6% y 57,8% para los contenidos de fibra de caucho del 0,5%, 1% y 2% y de 630% y 985% para 3% y 4% de fibra de caucho con una tendencia acelerada en porcentajes mayores. (Narani *et al.*, 2020).

Según la teoría de Shakedown (Guimarães Delgado, Rodrigues Guimarães, & Goretti da Motta, 2014)., se puede predecir el estado de colapso incremental de una estructura, cuando al

presentar acumulaciones progresivas de deformaciones plásticas bajo cargas cíclicas la magnitud de las cargas excede un cierto valor límite llamado límite de Shakedown o límite de carga. (Patiño J. C., 2006). El suelo estudiado se encuentra en la categoría A conocida como remoción plástica para los porcentajes con contenido de fibras de 0,5%, 1% y 2% y en la categoría B se encuentran los contenidos de 3% y 4% clasificada como fluencia plástica. Este grupo de investigadores concluyo que la fibra de caucho reciclado se puede utilizar como refuerzo de una subrasante, evitando que la capa de pavimento presente problemas de surcos.

Según (Narani et al., 2020), se encontró que el módulo de resiliencia crece según el número de ciclos de carga aplicados. Cuando se adiciona un 2% de fibra de caucho, aumenta hasta en un 744% el módulo resiliente, pero a medida que aumenta la cantidad de fibra, se genera una disminución en el módulo resiliente. Los investigadores propusieron un modelo que podría predecir el módulo elástico integrando la influencia de los primeros ciclos de carga, el contenido de fibra y el número de ciclos de carga.

4.2. Reforzamiento de suelos con tiras de neumáticos desechados

El grupo de investigadores (Hongbo *et al.*, 2020) realizo un estudio con el fin investigar el comportamiento de mallas tejidas con tiras de neumáticos con el fin reforzar un suelo que presenta inestabilidad. Se consideraron cuatro factores para entender las características del tejido con las tiras de neumáticos en el suelo: densidad relativa, tensión normal vertical, tipo de material de relleno y número de nervaduras transversales.

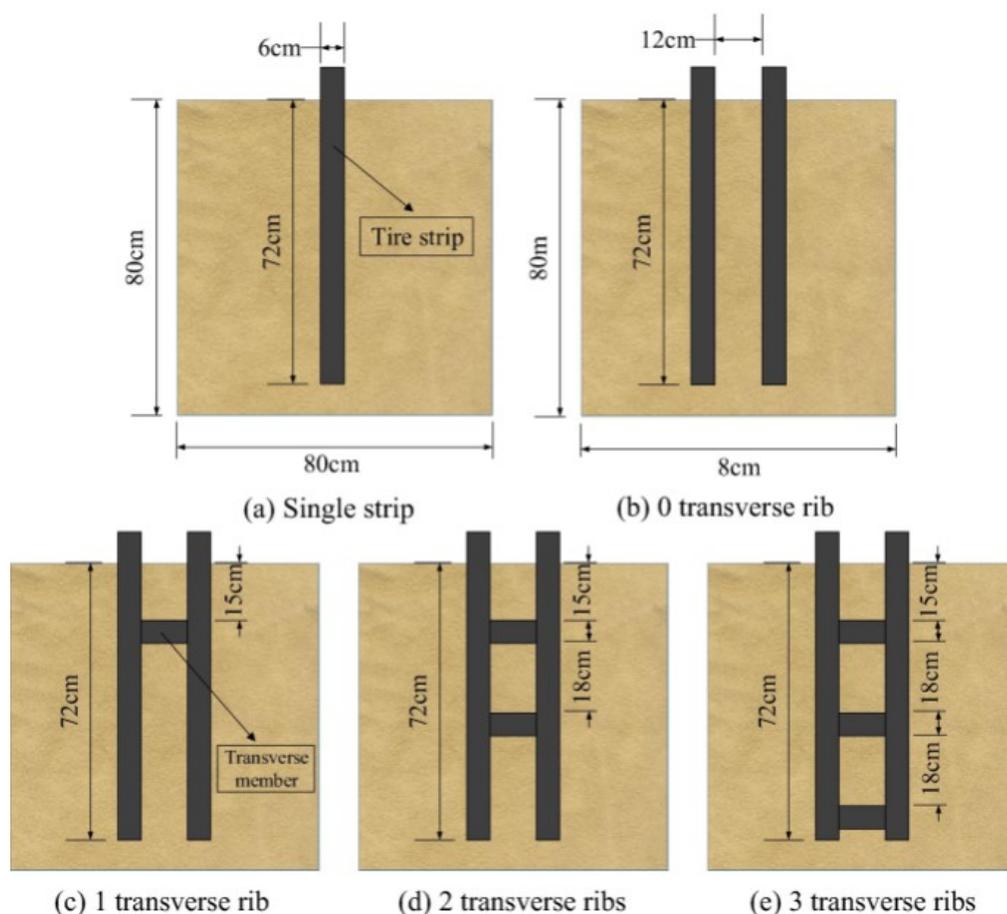
El material usado para la investigación es una arena obtenida del río Amarillo y un suelo limoso de la llanura del río Amarillo en China. Las tiras de los neumáticos se obtuvieron de llantas usadas con especificación de 175/70 R14, las cuales son las que ocupan mayor parte del mercado en el país asiático. Se seleccionó llantas con una desviación de espesor dentro del 5% y se cortaron en un ancho de 6 cm las paredes laterales de las llantas. (Hongbo *et al.*, 2020).

La investigación se realizó por medio de un equipo especializado en medir la tensión, y determinar el comportamiento de la tira del neumático desechado. Se aplicó una carga normal uniformemente distribuida en la parte superior del relleno con arena y una carga tensional (pull-out) a la tira del neumático situada debajo de dos capas de 10 mm de arena, con el fin de registrar la carga normal, la carga a tensión y el desplazamiento frontal.

Para averiguar el efecto de las tiras de llantas se investigó 5 tipos diferentes de capas., 1 tira simple y 4 tiras con 1, 2 o 3 nervios transversales. En la **Figura 3** se puede observar de mejor manera la acomodación de las tiras de neumáticos en una vista superior. Se incluyó esta acomodación de tiras de neumáticos individuales en suelos de arena y limo, su principal característica es que ambos suelos tuvieran una compacidad similar; según el método de pruebas de suelos para ingeniería de carreteras en china un suelo arenoso está controlado por la densidad relativa, mientras que un suelo limoso por el coeficiente de compactación.

Para que las pruebas realizadas en ambos suelos fueran exitosas, la densidad relativa de la arena se transformó en el coeficiente de compactación del suelo limoso como índice uniforme.

Figura 3 Estilo de Colocación de las Tiras de Neumáticos



Fuente: (Hongbo *et al.*, 2020)

Los investigadores (Hongbo *et al.*, 2020) a través de las pruebas realizadas en los suelos arenosos y limosos, compararon cada uno de resultados para determinar el comportamiento de las tiras de los neumáticos usados en los diferentes rellenos. Las conclusiones a las que llegó este grupo de investigadores es que a medida que la tensión normal aumenta sobre el suelo arenoso, la tensión aumenta a mayor velocidad en la tira de la llanta; además el ángulo de fricción en la interfaz de la banda de la tira del neumático y la arena es mucho mayor que en la arena sola, ayudando a la estabilización del material.

4.3. Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnica

Un grupo de estudiantes (Alvarez Benites & Gutierrez Gallegos, 2019) de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas demostró la viabilidad del uso de polvo de caucho (**Figura 4**) como reforzamiento en las propiedades mecánicas y físicas de un suelo arcilloso, extrajeron un suelo catalogado como arcilloso del caserío de Callampampa, Cajamarca, Perú y le agregaron polvo de caucho de llantas en desuso de camiones con diámetros entre 2mm y 0.075 mm.

Figura 4 *Polvo de Caucho*



Fuente: (CM Shredders, 2017)

Para investigar el comportamiento de la muestra se llevó a cabo diferentes ensayos de laboratorio con mezclas de polvo de caucho de 0 %, 1.5%, 2.5% y 3.5%. Para describir las propiedades físicas se realizó un ensayo de análisis granulométrico, además de diferentes pruebas de laboratorio con el fin de conocer el índice de plasticidad, el límite líquido y plástico y

el peso específico relativo de las partículas del suelo; para identificar características mecánicas del suelo arcillo se realizó un ensayo de Proctor Modificado, un ensayo de corte directo al igual que un ensayo de CBR.

Con las pruebas realizadas a las mezclas de arcilla con polvo de caucho, la pareja de estudiantes (Alvarez Benites & Gutierrez Gallegos, 2019) encontró que para la muestra con un porcentaje de 3.5% de polvo de caucho a medida que aumentaba el esfuerzo normal, el esfuerzo al corte también aumentaba; así mismo la cohesión se incrementa a medida que la adición de caucho también aumenta. Este fenómeno se debe a que por cada partícula de polvo de caucho la acompaña una gran cantidad de partículas de suelo arcilloso, logrando con ello una mejora en el área de influencia, ayudando que aumente la cohesión al igual que la resistencia al esfuerzo de corte.

Según (Alvarez Benites & Gutierrez Gallegos, 2019) el CBR en las mezclas con porcentajes de 1.5%, 2.5% y 3.5% logro una mejora del 56%, 172% y 194% respectivamente; esto es causado porque la cantidad de vacíos en las mezclas interactúan con el caucho impidiendo que el agua ingrese al suelo, por lo cual aumenta la resistencia de penetración.

4.4. Utilización de caucho pulverizado proveniente de llantas en bases estabilizadas con suelo – cemento sustituyendo la franja granulométrica entre el tamiz n°30 y n°80

Un grupo de estudiantes de la universidad de la Salle realizó un estudio sobre la viabilidad de sustituir una parte de la capa de base granular estabilizada con suelo-cemento, por

caucho pulverizado proveniente de llantas usadas. Se recogió una muestra de material de cantera, proveniente de canteras ubicadas en el sector sur de la capital colombiana, a las cuales se le realizó diferentes ensayos de laboratorio con el fin de establecer la caracterización de la muestra.

Se realizó la sustitución de parte del material granular (suelo-cemento) en porcentajes de 25%, 50%, 75% y 100% con caucho pulverizado, en la **Figura 5** se puede observar las mezclas. Según (Cruz Sánchez & Díaz Roa, 2015) el punto de compensación ¹ se encuentra entre el 25% y el 50% de polvo de caucho en la mezcla; este porcentaje de caucho ayuda a que la densidad de la mezcla disminuya, a lo que conlleva que la mezcla sea más liviana.

La disminución de la densidad arroja que el material puede ser utilizado sobre suelos de baja capacidad de soporte o terraplenes de poca altura, sin agregar un porcentaje mayor al 40% de caucho, ya que una combinación disminuirá la resistencia del suelo y por ende toca agregar más cantidad de cemento. La adición del 40% de caucho no afecta la estabilidad volumétrica lo que causa que haya menos consumo de cemento, disminuyendo los costos del mismo.

¹ Es el punto donde la densidad máxima y el porcentaje de cemento respecto a la cantidad de caucho sustituido se encuentra en la proporción adecuada

Figura 5 Mezclas de Suelo-Cemento-Caucho



Nota: (A) 25%, (B) 50%, (C) 75% y (D) 100%

Fuente: Modificada de (Cruz Sánchez & Díaz Roa, 2015)

En el mundo existen varios estudios sobre el uso del caucho reciclado en las diferentes industrias. En pavimentos flexibles el caucho reciclado se utiliza en mayor medida como bitumen para la construcción de carretas, en el campo geotécnico los estudios para el uso del granulo de caucho no son ampliamente conocidos, es por esto que se necesita investigar más sobre el tema y generar usos más adecuados para este material tan contaminante.

5. Planteamiento del problema

El aumento del parque automotor en Colombia conlleva a problemas de acumulación de neumáticos usados en lugares inadecuados, según cifras de la empresa Mundo Limpio y el Ministerio de Ambiente entre 4,5 y 5,5 millones de llantas son consumidas en Colombia y el 72% de estas se incineran y se depositan en los rellenos sanitarios de las ciudades; las llantas reutilizadas como reencauche son de tan solo el 17% y solo el 5% tienen otros usos como el regrabado.

En la ciudad de Bogotá esta problemática es bastante delicada, según el exministro de ambiente Gabriel Vallejo, en el año 2015 cinco millones de llantas fueron incineradas, a lo que llevo a grandes problemas respiratorios que afectaron la salud de niños y adultos mayores principalmente (Bohórquez Quintero & Ballesteros Bejarano, 2016).

La capital del país ha sufrido 2 grandes incendios generados en la misma bodega, en donde se almacenaba una gran cantidad de llantas recicladas . El incendio arrasó con cerca de 600.000 llantas, a lo que llevo que la ciudad se declarara en alerta naranja debido a la contaminación atmosférica que se generó, todo esto debido al inadecuado almacenamiento de llantas y la operación ilegal de la bodega (El Tiempo, 2015).

Lo anterior genera problemas ambientales para la ciudad, la ocupación de grandes volúmenes de llantas usadas ayuda a la proliferación de moscos, sancudos y ratas, debido a la

acumulación de agua en los espacios vacíos de los neumáticos, además que un neumático puede demorar en degradarse alrededor de quinientos años.

El material más usado en el país para el mejoramiento de una subrasante es el rajón, el cual es un material no renovable y conlleva a grandes impactos ambientales para su obtención, es por esto que se deben buscar alternativas más amigables con el medio ambiente.

La presente monografía pretende solucionar y generar un método alternativo que mejore las propiedades de los suelos blandos de la capital del país, ya que Bogotá presenta grandes problemas con sus suelos, debido a la extracción de agua subterránea que causan hundimientos en el suelo, además de la extracción de importantes volúmenes de agua del subsuelo, la construcción de alcantarillados y la sobrecarga excesiva del terreno.

Con la aplicación de polvo de caucho sobre la subrasante de un suelo blando se intenta generar una alternativa para el mejoramiento de la misma, además de establecer y plantear futuras investigaciones, debido a que no existen grandes estudios sobre el tema en el país.

6. Metodología

Con el fin de desarrollar la idea principal de la monografía se realizaron diversas acciones, a continuación, se enumera el paso a paso de cada una de ellas:

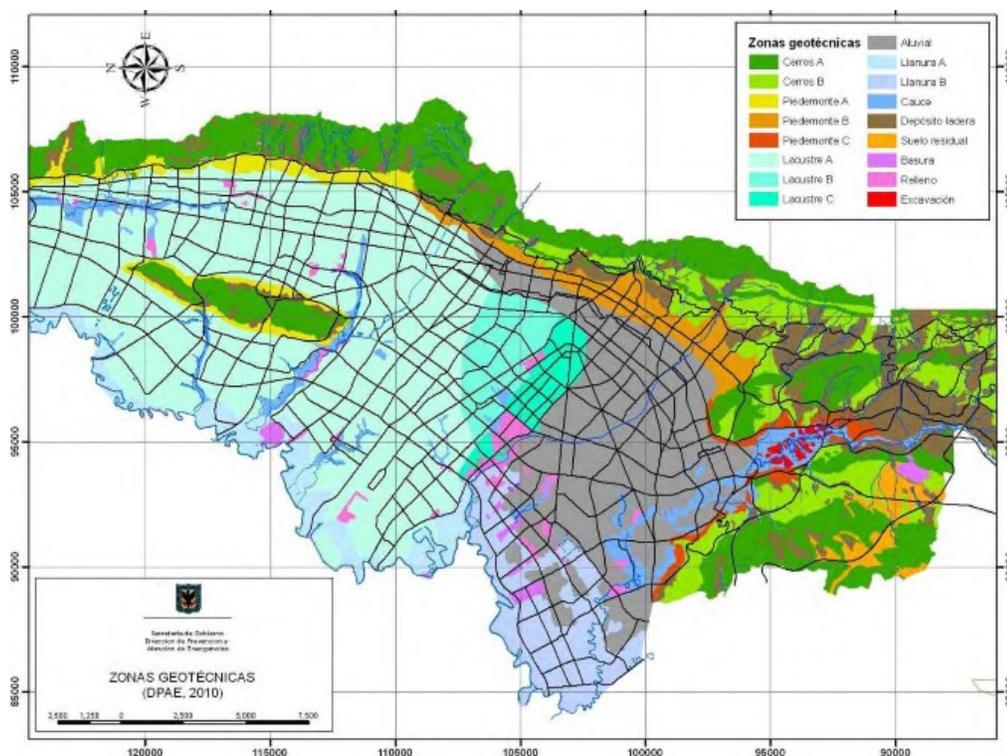
1. Se realizó la búsqueda de información referente al tema de consulta por medio de diferentes medios digitales y físicos, con el propósito de identificar la línea de estudio de la monografía.
2. Se fijó una serie de objetivos para enfocar la temática de la monografía.
3. Se realizó una introducción para que el lector se contextualice en el tema a tratar del documento.
4. Se hizo un marco conceptual estableciendo una serie de conceptos y términos orientados en al área de estudio.
5. Se realizó un estado del conocimiento para evidenciar las prácticas y desarrollos actuales sobre el caucho reciclado en el campo de la ingeniería civil en un nivel internacional, nacional y local.
6. Se realizó la construcción de los resultados en base a los objetivos planteados para analizar el impacto de la adición de caucho pulverizado como refuerzo de un suelo blando de subrasante en la sabana de Bogotá.
7. Se generó una serie de conclusiones en función de los resultados con el fin que el lector analice la factibilidad en un proyecto de ingeniería.

7. Resultados

7.1. Descripción de los suelos en la sabana de Bogotá

La ciudad de Bogotá es la capital del país colombiano, se ubica en el departamento de Cundinamarca a 2625 m.s.n.m. y su área aproximada es de 350 km². Los suelos de la sabana de Bogotá se caracterizan por contener diferentes capas de arcillas, arenas, gravas y niveles orgánicos, es por ello que se describen con una humedad media y una densidad blanda. El mapa de zonificación geotécnica de la sabana de Bogotá elaborado por el DPAE (FOPAE, 2010), que se ilustra en la **Figura 6**, muestra las zonas geotécnicas presentes en la sabana.

Figura 6 Mapa de zonificación geotécnica



Fuente: (FOPAE, 2010)

Este mapa muestra con mayor exactitud la composición geotécnica que se ha logrado identificar en la capital, delimitando de forma más precisa la información de los depósitos de la sabana de Bogotá D.C., en la **Tabla 1** se resume de forma la composición de estos depósitos.

Tabla 1 *Definición de las zonas geotécnicas*

Nombre	Geotecnia	Composición principal	Comportamiento geotécnico general	Espesor
Cerros A	Roca de arenisca	Areniscas duras	Son rocas con gran resistencia a la meteorización, pero presentan eventuales problemas de estabilidad de taludes cuando las excavaciones son a cielo abierto, generalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas.	
Cerros B	Roca de arcillolita	Arcillolitas blandas	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, debido a esto tienen problemas de estabilización de taludes en excavaciones a cielo abierto, generalmente cuando las rocas se encuentran fracturadas.	
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	Gravas arcillo arenosas compactas		
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro	Gravas arenoso arcillosas compactas	Son suelos de alta capacidad portante, pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas.	> 50 m
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur	Gravas arenoso arcillosas compactas		
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Arcillas limosas muy blandas		
Lacustre B	Suelo lacustre blando	Arcillas limosas blandas	Estos suelos presentan muy baja a media capacidad portante y tienden a ser muy compresibles	20 - 500 m
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial	Arcillas arenosas firmes		

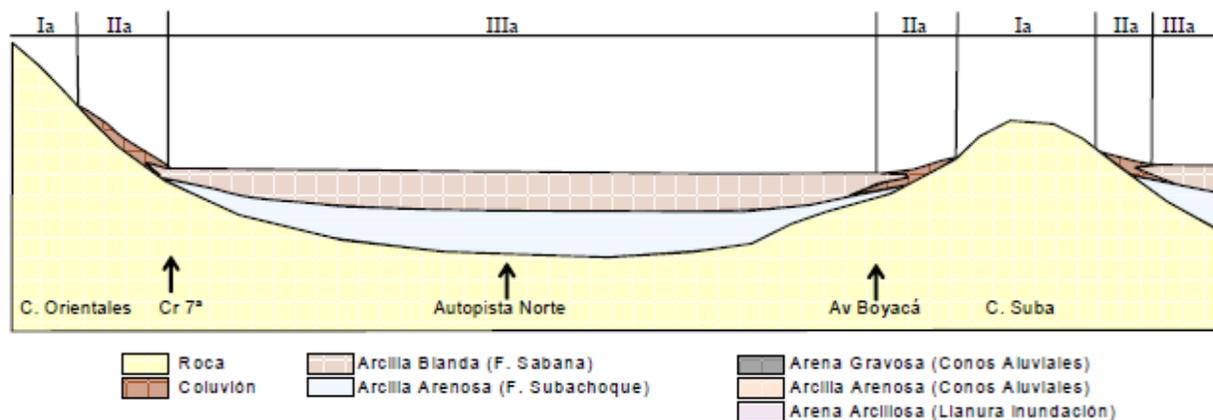
Aluvial	Suelo aluvial grueso a medio	Arenas arcillosas sueltas a compactas	Son suelos que tiene una mediana a alta capacidad portante, son poco compresibles, pero son susceptibles a licuación y generalmente son inestables en excavaciones a cielo abierto	50 - 250 m
Llanura A	Suelo de llanura - lacustre	Arenas sueltas y arcillas limosas blandas	Son suelos que poseen una capacidad portante y compresibilidad moderada, son susceptibles a licuación	200 - 500 m
Llanura B	Suelo de llanura - aluvial	Arenas sueltas y arcillas arenosas duras		
Cauce	Cauce activo o antiguo	Gravas arenosas sueltas a compactas	Son suelos con una capacidad portante de baja a mediana, son propensos a licuación y presentan problemas de estabilidad de taludes	
Depósitos	Suelo de ladera	Gravas arenos arcillosas compactas	Son suelos con una capacidad portante mediana susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	5 - 15 m
Residual	Suelo residual	Arcillas gravo arenosas firmes	Son suelos de mediana a alta capacidad portante y pueden presentar problemas de estabilidad de taludes en sectores de alta pendiente	5 - 10 m
Basura	Relleno de basura	Basuras	Materiales heterogéneos, dependiendo que como se dispongan pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Relleno	Relleno de excavación	Rellenos heterogéneos	Materiales heterogéneos, dependiendo que como se dispongan pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Excavación	Excavación especial	Gravas arenosas sueltas a compactas	En esta zona se explotan agregados en el rio Tunjuelo, son altamente propensos a generar problemas de estabilidad de taludes.	

Fuente: Modificada de (FOPAE, 2010)

Para visualizar de mejor manera la composición de los suelos de la sabana de Bogotá, es necesario ilustrar los depósitos de Bogotá, en la **Figura 7** a la **Figura 9** se expone las secciones

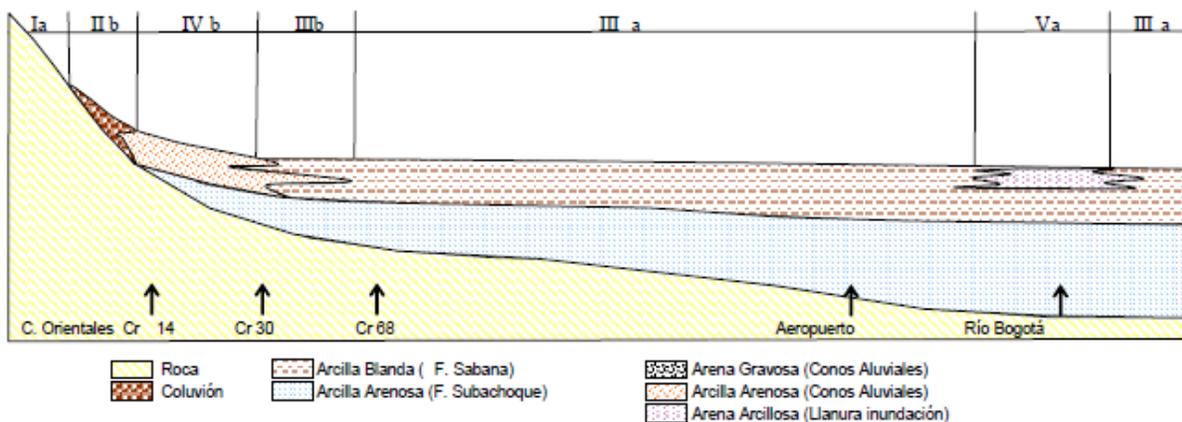
esquemáticas tridimensionales de los esquemas geotécnicos típicos de la sabana en sentido este – oeste; en la **Figura 10** se expone en sentido norte – sur.

Figura 7 Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre calle 127 y calle 200 aprox.



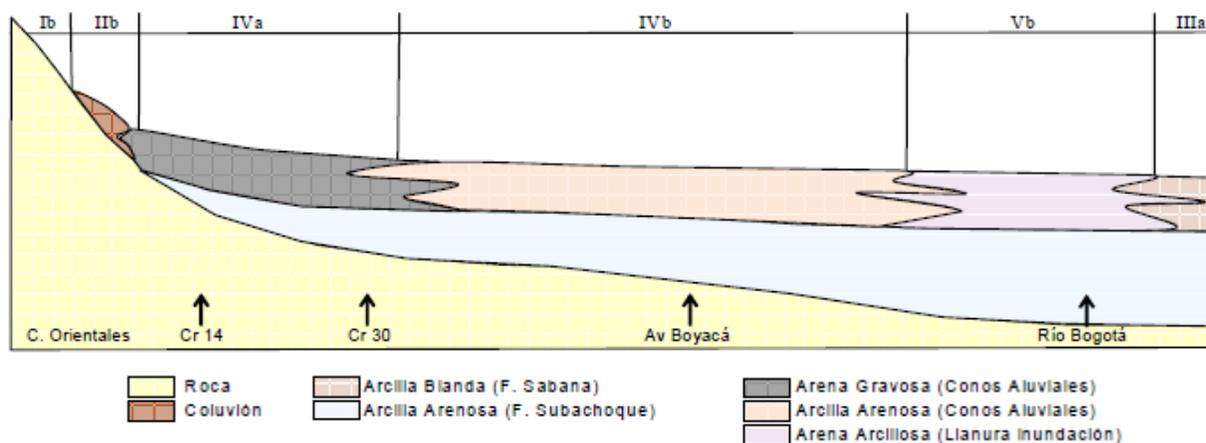
Fuente: (FOPAE, 2010)

Figura 8 Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre calle 13 y calle 127 aprox.



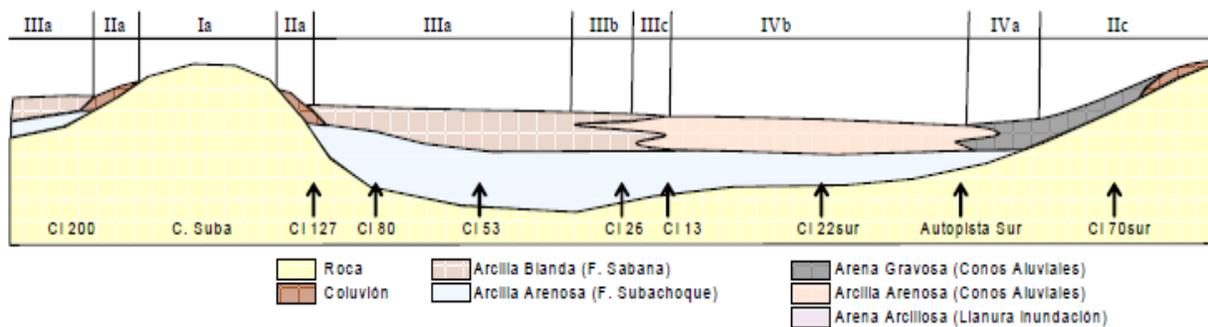
Fuente: (FOPAE, 2010)

Figura 9 Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre calle 36 sur y calle 13 aprox.



Fuente: (FOPAE, 2010)

Figura 10 Esquema geotécnico típico de una sección norte - sur entre Cr 72 a calle 86 aprox.



Fuente: (FOPAE, 2010)

De acuerdo a las figuras anteriormente mencionadas, se puede evidenciar que la capital del país presenta diferentes problemáticas a la hora de construir sobre su superficie; esto se debe a la gran cantidad de suelos arcillosos con altos espesores, especialmente en sector occidental de Bogotá (Rojas Perilla & Rivera Pardo, 2014).

Cada proyecto de construcción que se realiza en la ciudad requiere de un estudio detallado de la composición de los suelos, con el fin de establecer si el suelo tiene la capacidad para soportar la estructura que se va a encontrar encima.

7.2. Métodos Tradicionales en Colombia para el Mejoramiento de la Subrasante

En Colombia existen diferentes métodos para el reforzamiento de la subrasante existente, con el fin que los trabajos empleados, cumplan con los requisitos exigidos para mejorar el suelo seleccionado. A continuación, se pretende exponer los diferentes métodos tradicionales que se utilizan para reforzar una subrasante, además de comparar las propiedades mecánicas y físicas de estos métodos tradicionales con el del uso de polvo de caucho, y determinar si es posible y viable este método para los suelos de la sabana de Bogotá.

7.2.1. Mejoramiento de una subrasante usando Rajón

La capa de subrasante o suelo natural se puede sustituir con material tipo “rajón” cuando las condiciones mecánicas de material que conforma la subrasante presentan baja rigidez y una baja resistencia a la carga cíclica. Para el uso de este método, la consistencia del suelo se encuentra con un CBR por debajo del 2.5% en condición de humedad natural o 1,5% en condición sumergida como lo indica la sección 321-11 de las especificaciones técnicas del IDU, además debe presentar capacidades de soporte bajas. (IDU, 2011).

El mejoramiento con este material pétreo es apto para los suelos de las sabanas de Bogotá, debido a que gran parte del occidente de la ciudad son rellenos o suelos indeseables, los cuales se necesita reemplazar para evitar fallas por hundimiento de la capa de rodadura y/o deformaciones plásticas de las subcapas que la componen. El material necesario para este método debe tener una buena resistencia, constituida por rocas sanas y durables, con diámetros máximos de 30 centímetros; los cuales deben ser sellados con un material granular tipo subbase, con el fin de rellenar los vacíos entre las piedras y lograr una adecuada compactación de este material como se ilustra en la **Figura 11**.

Figura 11 *Material tipo Rajón*



Fuente: Propia

Con el rajón se pretende mejorar las características mecánicas de una subrasante blanda, reforzando el terreno de fundación como un esqueleto mineral grueso, el cual garantiza un gran soporte para las cargas de tránsito a soportar, así mismo, aportar a la capacidad de distribución de esfuerzos, disminuyendo que se presenten problemas geotécnicos que causen hundimientos y deformaciones a las capas que soporta.

En términos económicos este método puede no presentar grandes costos cuando el material de relleno, es reemplazado por material de escombros reciclado obtenido de la demolición de obras civiles, además el material que sirve de sello puede ser reemplazado por fresado de pavimento asfáltico, disminuyendo significativamente los costos. El material de sello debe cumplir con lo definido en el numeral 400.2.2 del IDU, descrito en la tabla 400.3 como SBG-C. En la **Tabla 2** se expone el APU para el mejoramiento de una subrasante.

Tabla 2 APU Mejoramiento de subrasante con rajón

DESCRIPCIÓN		GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD
MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON RAJON			m2	
I. EQUIPO				
DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
Buldozer, Potencia al volante de 140 HP, motor de 2200 RPM, longitud de hoja 4,80m.		\$ 269,950.47	400.000	\$ 674.88
Carrotanque de agua (1000 Galones)		\$ 86,984.38	200.000	\$ 434.92
Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton.		\$ 186,655.39	200.000	\$ 933.28
Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 Ton.		\$ 164,970.10	200.000	\$ 824.85
HERRAMIENTA MENOR (%)			2%	2.55
SUBTOTAL \$				\$ 2,870.48
II. MATERIALES				

DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO	
Rajón - 30		m3	1.00	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00	
Material seleccionado para Relleno		m3	0.70	\$ 39,000.00	\$ 27,300.00	
SUBTOTAL \$					\$ 102,300.00	
III. TRANSPORTES						
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
Transporte de material Rajón - 30	m3/km	1.00	1.00	1.00	\$ 958.00	\$ 958.00
Transporte de material seleccionado para relleno	m3/km	0.70	1.00	0.70	\$ 958.00	\$ 670.60
SUBTOTAL \$					\$ 1,628.60	
IV. MANO DE OBRA						
TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
Oficial	\$ 55,207.79	185	\$ 102,134.41	1,600.00	\$ 63.83	
Obrero (2)	\$ 55,207.79	185	\$ 102,134.41	1600.00	\$ 63.83	
SUBTOTAL \$					127.67	
TOTAL COSTO DIRECTO \$					106,926.75	

Fuente: (INVIAS, 2019)

El rajón y el material de sello causan graves deterioros ambientales al no ser un material renovable y la explotación de este material conlleva a cambios en la geomorfología de montañas y generan afectaciones a ecosistemas en donde se extrae el material.

7.2.2. Estabilización de Suelos de Subrasante con Cal

La estabilización con cal consiste en el mejoramiento de un suelo con alto contenido de humedad, con el fin de aumentar la resistencia mecánica, mejorar la plasticidad del suelo

inadecuado y convertirlo en un suelo apto; además se busca reducir el potencial de hinchamiento para que soporte cargas y no se generen daños en las capas superficiales.

El material que se mezcla con la cal puede provenir del mismo suelo que se quiere mejorar a través de la escarificación de la capa superficial existente, pero se puede combinar con suelos excavados de otros sitios, o con agregados cercanos que presenten baja calidad. Los suelos in situ que se pueden estabilizar con cal deben cumplir con las siguientes características:

Tabla 3 Características del suelo in situ para poder ser estabilizada con cal

Ensayo	Norma de ensayo	Recomendaciones
Humedad	INV E – 122-07	*
Límite líquido	INV E – 125-07	≥40
Límite plástico	INV E – 126-07	>15
Índice de plasticidad		
CBR, % mínimo del material sin cal - Referido al 95 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.	INV E – 148-07	<3%
Expansión	INV E-804-07	≥2%
Proporción de sulfatos del material combinado, expresada como SO ₄	INV E-233-07	≤0,3%
Granulometría		Material que pasa el tamiz N°4 ≥50%
Contenido de materia orgánica (%)		≤0,1

Fuente: Sección 230-11 (IDU, 2011)

La aplicación de la Cal hidratada sobre el suelo genera que las partículas de arcilla de la mezcla reaccionen y desarrollen una condición cementante. La aplicación puede ser en forma de lechada de cal o en forma granulada, y esta no puede presentar fraguaciones parciales o contener terrones con el producto porque no se podrá utilizar.

En Bogotá para trabajar con este tipo de material se encuentra la especificación 230-11 del IDU (IDU, 2011), la cual indica una serie de actividades para el diseño de la mezcla cal-

suelo. La cantidad de cal para mezclar se determina por medio de los ensayos INV E-805-07 e INV E-804-07, dependiente de la necesidad que se tenga. Según la sección 230-11, la fórmula de trabajo establecida como resultado del diseño de la mezcla deberá indicar:

- La granulometría del material que se va a estabilizar.
- Límites de Atterberg.
- El contenido óptimo de cal.
- La resistencia a la compresión Inconfinada.
- El valor máximo de la densidad.
- CBR del material mejorado.
- Resistencia a la compresión simple después de la estabilización.
- Tiempo y condiciones de curado.

Según (Rivera *et al.*, 2020) este tipo de estabilización de suelos, tiene grandes ventajas económicas debido a que se pueden utilizar prácticamente en la mayoría de clases de suelos, del mismo modo tiene ventajas técnicas al ganar resistencia a edades tempranas y el incremento de la durabilidad de los suelos tratados, a su vez esto genera reducir los espesores de las capas de las estructuras de los pavimentos.

En términos ambientales las desventajas son generadas por el proceso de producción de unos de sus activadores (silicato de sodio), en la medida que para producir este componente se necesita altas temperaturas, a lo que conlleva que se realicen grandes emisiones de CO₂, igualmente la producción de este componente contamina fuentes de agua y suelos por los

elevados factores de toxicidad que se generan (Habert, d'Espinose de Lacaille, & Roussel, 2011). En la **Tabla 4** se presenta el APU para este tipo de estabilización:

Tabla 4 APU Mejoramiento de Subrasante con Cal

DESCRIPCIÓN		GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD		
SUBRASANTE ESTABILIZADA CON CAL (INCLUYE SUMINISTRO DE CAL)			m3			
I. EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
Carrotanque de agua (1000 Galones)		\$ 86.984,38	35,000	\$ 2.485,27		
Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton.		\$ 186.655,39	35,000	\$ 5.333,01		
Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 Ton.		\$ 164.970,10	35,000	\$ 4.713,43		
HERRAMIENTA MENOR (%)			2%	14,59		
SUBTOTAL \$				\$ 12.546,30		
II. MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
Cal	kg	80,00	\$ 950,00	\$ 76.000,00		
Agua	lt	25,00	\$ 70,00	\$ 1.750,00		
SUBTOTAL \$				\$ 77.750,00		
III. TRANSPORTES						
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
Transporte de cal	m3km	0,05	1,00	0,05	\$ 52,00	\$ 2,60
SUBTOTAL \$						\$ 2,60
IV. MANO DE OBRA						
TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
Oficial	\$ 55.207,79	185	\$ 102.134,41	280,00	\$ 364,77	
Obrero (2)	\$ 55.207,79	185	\$ 102.134,41	280,00	\$ 364,77	
SUBTOTAL \$					729,53	
TOTAL COSTO DIRECTO \$					91.028,43	

Fuente: (INVIAS, 2019)

7.2.3. Estabilización de Suelos de Subrasante con Geosintéticos

El sector ubicado en la carrera 60 entre calle 26 y calle 42 en la ciudad de Bogotá, presenta fallas en la capa asfáltica como ondulaciones, piel de cocodrilo y grietas que se pueden observar a lo largo de la calzada. Las problemáticas que se presentan en este sector se deben a que en ese lugar existen grandes volúmenes de suelos arcillosos, causando que la subrasante presente inconvenientes de estabilización y afectaciones a las capas superiores. El suelo que se encuentra en ese lugar no es capaz de soportar las cargas cíclicas a las cuales se ve sometido a diario por el tránsito local. En la **Figura 12** se observa las ondulaciones que se encontraban en el carril derecho de la calzada norte-sur y en la **Figura 13** se observa el estado actual de la calzada.

Figura 12 Carrera 60 entre calle 26 y calle 42 sentido sur-norte



Fuente: (Google Maps, 2019)

Figura 13 Estado actual de la Avenida la Esmeralda entre calle 26 y calle 42 sentido sur-norte



Fuente: Propia, 2020

La intervención para el mejoramiento de la subrasante y la calzada en el tramo comprendido entre la calle 26 y calle 42 sobre la Carrera 60 sentido sur-norte, se realizó por medio del uso de geomallas biaxiales y geotextiles como se observa en la **Figura 14**.

El uso de estas tecnologías en una subrasante blanda ayuda a estabilizar y reforzar el suelo, el artículo 233-13 del Instituto Nacional de Vías detalla las actividades, características y equipos necesarios para la aplicación de este método sobre un suelo, además de especificar los tipos de geomallas y las calidades que debe tener el material (INVIAS, 2013).

Figura 14 *Instalación de geomalla biaxial y geotextil*



Fuente: Propia, 2019

Con el fin de evitar los problemas que se habían presentado en la construcción anterior debido a los suelos blandos del lugar, se reforzó la capa de base granular con geoceldas para que la carretera pudiera soportar los volúmenes de tránsito que iban a circular por ese sector.

El uso generalmente de la geomalla se emplea principalmente para la separación y filtración de subrasantes, pero en ocasiones sirve como refuerzo. En la **Tabla 5** se presenta el APU de este método de mejoramiento:

Tabla 5 APU Estabilización de Subrasante con Geomalla

DESCRIPCIÓN		GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD		
SUMINISTRO E INSTALACION DE GEOMALLA Y GEOTEXTIL			m2			
I. EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
HERRAMIENTA MENOR (%)			1%	2,04		
SUBTOTAL \$				\$ 2,04		
II. MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
Geotextil Nt-2500 O Similar	m2	1,30	\$ 6.479,00	\$ 8.422,70		
Geomalla Biaxial	m2	1,20	\$ 10.650,00	\$ 12.780,70		
SUBTOTAL \$				\$ 21.202,70		
III. TRANSPORTES						
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
Transporte de geomalla y geotextil	m3km	0,05	1,00	0,05	\$ 52,00	\$ 2,60
SUBTOTAL \$						\$ 2,60
IV. MANO DE OBRA						
TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
Oficial	\$ 55.207,79	185	\$ 102.134,41	1.000,00	\$ 102,13	
Obrero (2)	\$ 55.207,79	185	\$ 102.134,41	1.000,00	\$ 102,13	
SUBTOTAL \$					204,27	
TOTAL COSTO DIRECTO \$					21.411,61	

Fuente: (INVIAS, 2019)

7.2.4. Estabilización de Suelos de Subrasante con polvo de caucho

En Colombia se encuentran muy pocos estudios sobre el uso del caucho para estabilizar un suelo, esto se debe en parte a la poca investigación que se maneja en el país y al mínimo apoyo y presupuesto que se maneja para realizar esta clase de investigaciones. Debido al poco conocimiento que se tiene en Colombia sobre el aprovechamiento como refuerzo de un suelo con caucho reciclado, se propone el uso de este material en una futura investigación sobre la subrasante existente en la carrera 60 entre calles 44 y 26 calzada norte-sur, en donde la carpeta asfáltica presenta deterioro y fallas estructurales, y necesita una intervención total del tramo como se puede ver en la **Figura 15** y la **Figura 16**.

Figura 15 Piel de cocodrilo sobre Carrera 60 entre calle 44 y 26 sentido norte-sur



Fuente: (Google Maps, 2019)

Figura 16 Ondulaciones sobre Carrera 60 entre calle 44 y 26 sentido norte-sur



Fuente: (Google Maps, 2019)

En diferentes lugares del mundo se han realizado estudios que se pueden tomar como base, los cuales ayudan a exponer una serie de actividades para el uso del polvo de caucho sobre el suelo del tramo descrito en la parte superior, además se pretende exponer los costos y ventajas ambientales que conlleva el uso de este material en el país.

A continuación, se describen las actividades para la implantación de este método en un suelo con características arcillosas, además presenta baja capacidad de soporte a cargas cíclicas e hinchamiento. En base a las recomendaciones que se investigaron en diferentes documentos (Mejía Rentería & Mesías Castillo, 2014) (Alvarez Benites & Gutierrez Gallegos, 2019), y las ideas expuestas en los documentos se pretende describir las actividades para trabajar con este método cuando la capa de la subrasante se encuentra expuesta para reforzarla:

1. Por medio de una motoniveladora con uñas escarificadoras, se realiza la escarificación del suelo existente, con el fin de remover el material arcilloso que se encuentra en el suelo, y poder generar una mezcla adecuada con el polvo de caucho.
2. Se aplica el polvo de caucho uniformemente sobre el material escarificado para que se mezcle con el suelo de subrasante; por medio de la motoniveladora se realiza la mezcla suelo-caucho revolviendo estos dos materiales. La cantidad recomendada por las diferentes investigaciones (Alvarez Benites & Gutierrez Gallegos, 2019) (Mejía Rentería & Mesías Castillo, 2014) es en un porcentaje máximo del 4%.
3. Una vez la mezcla suelo-caucho se encuentre repartida homogéneamente, se procede a la compactación en capas de 20 cm con un vibro compactador de 10 Toneladas.
4. Cuando se compacte la mezcla a los niveles de diseño, se toman muestras de la mezcla y se realizan los ensayos necesarios para determinar si la mezcla cumple como soporte para las capas posteriores de material granular
5. Si la mezcla cumple con lo requerido para soportar las cargas, se procede a instalar el geotextil para separar las capas de subrasante de la de los materiales granulares.

El tramo de la carrera 60 tiene un aproximado de 200 m, a continuación, se muestra el APU para la intervención de este sector con caucho pulverizado, los precios para la maquinaria se obtuvieron del INVIAS y para el caucho pulverizado puesto en obra se cotizo con la Empresa Service Linpa, en el anexo 1 se encuentra la cotización de este material.

Tabla 6 Estabilización de subrasante con caucho pulverizado

DESCRIPCIÓN		GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD		
REFUERZO DE SUBRASANTE CON CAUCHO PULVERIZADO			m3			
I. EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton.		\$ 186.655,39	35,000	\$ 5.333,01		
Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 Ton.		\$ 164.970,10	35,000	\$ 4.713,43		
HERRAMIENTA MENOR (%)			2%	13,62		
SUBTOTAL \$				\$ 10.060,06		
II. MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
Caucho pulverizado	kg	0,04	\$ 1.181,79	\$ 47,27		
SUBTOTAL \$				\$ 47,27		
III. TRANSPORTES						
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$						\$ -
IV. MANO DE OBRA						
TRABAJADOR	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JORNAL TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
Oficial	\$ 55.207,79	185	\$ 102.134,41	300,00	\$ 340,45	
Obrero (2)	\$ 55.207,79	185	\$ 102.134,41	300,00	\$ 340,45	
SUBTOTAL \$					680,90	
TOTAL COSTO DIRECTO \$					10.788,23	

Fuente: (INVIAS, 2019)

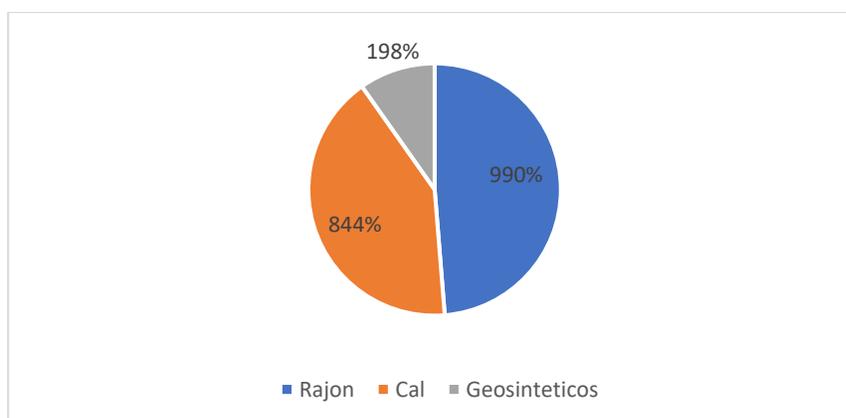
Con los APUs de cada uno de los métodos para reforzar una subrasante blanda, se puede realizar una comparación económica entre ellos, la cual se encuentra en la **Tabla 7**. La **Figura 17** la diferencia porcentual comparada con el uso del caucho pulverizado.

Tabla 7 Costos directos de cada método para la estabilización de una subrasante blanda

	Método			
	Rajón	Cal	Geosintéticos	Caucho pulverizado
Costo Directo	\$ 106.826,75	\$ 91.028,43	\$ 21.411,61	\$ 10.788,23

Fuente: Propia, 2020

Figura 17 Diferencias porcentuales con respecto al costo del caucho pulverizado



Fuente: Propia, 2020

La diferencia tan elevada en comparación con el caucho pulverizado se debe a que para este método no se necesitan transportar grandes volúmenes de materiales, ya que se reutiliza el material del suelo existente y se combina con el polvo de caucho para generar la mezcla de soporte. Se debe tener en cuenta que esta metodología no cuenta los suficientes estudios que avalen su uso, para esto se necesita una investigación a profundidad que determine una fórmula exacta para el cálculo de adición de polvo de caucho en la mezcla, por ahora se evalúa por medio

las recomendaciones de estudios hechos en otras regiones y países. En la **Tabla 8** se enumeran las ventajas y desventajas técnicas, ambientales y económicas de cada uno de los métodos presentados.

Figura 18 *Ventajas y desventajas de los métodos para estabilizar una subrasante*

Rajón		Cal		Geosintéticos		Polvo de caucho	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Actúa como un esqueleto mineral grueso, mejorando en gran forma las características mecánicas de la subrasante.	Se necesita la remoción de grandes volúmenes de material inadecuado, para ser reemplazado por el rajón.	Permite aprovechar los materiales de la subrasante, secando de forma rápida y eficaz un suelo con altos contenidos de humedad	No se puede utilizar con todos los suelos, se necesita conocer previamente las características y homogeneidad de la subrasante a tratar y no pueden contener elevados contenidos de materia orgánica	Es un método económico para estabilizar un suelo cuando el CBR de la subrasante se encuentra entre el 1 y 3%	Tiene bastante limitaciones para estabilizar un suelo, generalmente se usa para la separación de las capas que van a componer la estructura para evitar filtraciones	El uso de este material genera aumentos en la resistencia del suelo	No existe ninguna normatividad que dictamine su uso y aplicación como reforzamiento de suelo
Distribuye de mejor manera los esfuerzos aplicados al suelo.	Para la obtención de este material de emiten grandes cantidades de CO ₂ , debido a la gran cantidad de equipos necesarios para su explotación, además es un material no renovable y tiene un uso limitado	Al aplicar este material las cargas de un suelo arcilloso se reparten de mejor manera	El impacto ambiental es alto para producirlo es alto, además tiene un alto costo de fabricación.	No necesita de grandes equipos para su instalación	Necesita de un geotextil para separar la subrasante de la geomalla, aumentado el costo del mismo	Permite dar un segundo uso a un material que es muy contaminante para el medio ambiente y a su vez dañino para los seres humanos	Hay muy pocos estudios en Colombia que permitan usar este material como refuerzo de un suelo blando
Se puede utilizar en suelos con bajas capacidades portantes, con presencia de arcillas, limos, suelos orgánicos o turbas altamente compresibles.	Se necesitan grandes volúmenes de material rajón y de sello, debido a la profundidad de la capa que se va a reemplazar.	Aumenta la resistencia del suelo rápidamente y reduce el hinchamiento		Permite proteger la subrasante y dependiendo del tipo de geomalla que se use, actúa como un refuerzo secundario			
Incrementa en gran medida la durabilidad del suelo tratado, para que no presente afectaciones en las capas adyacentes.	Si no se tiene la disponibilidad de todo el material que se va utilizar, la subrasante se puede ver afectada por las condiciones climáticas.	Ayuda a reducir los espesores del suelo tratado					

Fuente: Propia, 2020

8. Conclusiones

A través de diferentes investigaciones en el mundo sobre el uso de neumáticos reciclados en suelos inapropiados para soportar una estructura vial, se pudo evidenciar que un neumático contiene diferentes materiales, que pueden ser aprovechados para el refuerzo de un suelo blando de subrasante, el polvo de caucho es un material que puede ser aprovechado para reforzar un suelo que presente inestabilidad, ya que incrementa algunas propiedades mecánicas del suelo como la resistencia al esfuerzo cortante, la cohesión y el ángulo de fricción de un suelo arcilloso, además el CBR mejoro en gran medida al mezclar el 4% de polvo de caucho con el suelo inadecuado.

Para poner en práctica esta metodología en los suelos de la capital colombiana, se pudo establecer las características, comportamientos y espesores de los materiales que se encuentran en los depósitos de la capital colombiana, lo que permitió conocer de manera más detallada en que partes de la ciudad es posible la aplicación del polvo de caucho para reforzar un suelo.

La comparación entre los métodos tradicionales para reforzar un suelo blando, arrojó que el método que se expone en la monografía, tiene beneficios económicos y ambientales para la ciudad; pero por la poca investigación que se realiza en Colombia con esta clase de temas, no fue posible establecer con certeza si este el polvo de caucho puede servir para el uso de los suelos capitalinos, pero se puede establecer una línea de investigación nueva en el país para desarrollar futuras investigaciones respecto al tema.

9. Bibliografía

- "Parque automotor en el país ha crecido 60% en los últimos 10 años: Andi". (18 de Febrero de 2020). *La Patria*. Obtenido de <https://www.lapatria.com/>
- Agencia de Noticias Universidad Nacional. (10 de Septiembre de 2012). Suelos arcillosos de Bogotá, proclives al hundimiento. *Agencia de noticias*. Obtenido de www.agenciadenoticias.unal.edu.co
- Alvarez Benites, N. C., & Gutierrez Gallegos, J. A. (9 de Diciembre de 2019). *Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnica*. (Tesis de pregrado), Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Bohórquez Quintero, C., & Ballesteros Bejarano, M. Á. (2016). *Reutilización y transformación de llantas usadas como alternativa de mitigación del problema de contaminación ambiental en Bogotá*. (Tesis de pregrado) Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- CM Shredders. (21 de Marzo de 2017). *CM Shredders*. Obtenido de CM Shredders Web site: Recuperado de <https://cmshredders.com/es/2017/03/21/final-milling-screening/>
- Cruz Sánchez, J. D., & Díaz Roa, I. D. (2015). *UTILIZACIÓN DE CAUCHO PULVERIZADO PROVENIENTE DE LLANTAS EN BASES ESTABILIZADAS CON SUELO – CEMENTO SUSTITUYENDO LA FRANJA GRANULOMÉTRICA ENTRE EL TAMIZ N°30 Y N°80*. (Tesis de pregrado), Universidad de la Salle, Bogota D.C., Colombia.
- El Tiempo. (15 de Enero de 2015). Por segunda vez se incendió bodega de llantas en Fontibón. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15104715>

- FOPAE. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones*. Obtenido de Recuperado de <http://www.idiger.gov.co>
- Guimarães Delgado, B., Rodrigues Guimarães, A. C., & Goretti da Motta, L. M. (Septiembre de 2014). A Teoria do Shakedown Aplicada à Pavimentação com Solos Tropicais. *COBRAMSEG 2014*. Simposio llevado a cabo en el VII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Goiânia, Brasil.
- Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J.-B., & Roussel, N. (11 de Julio de 2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229-1238.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>
- Hongbo, Z., Xuefeng, Y., Yuan, L., Jianqing, W., Xiuguang, S., & Fangding, H. (10 de Septiembre de 2020). Experimental study on the pullout behavior of scrap tire strips and their application as soil reinforcement. *Construction and Building Materials*, 254, Artículo No. 119288. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119288>
- Hossne, A. J., Paredes, G., Carvajal, R., Santaella, E., & Malaver, J. (2011). Cohesión aparente de un suelo agrícola franco arenoso de sabana. *Acta Universitaria*, 21(3), 5-13. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=416/41620956001>
- Huamán Casas, R. D., & Muguerza Zeballos, K. W. (2019). *Influencia del caucho granulado en suelos cohesivos relacionado a la propiedad de la resistencia a la penetración (CBR)*. (Tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Lima, Peru.
- IDU. (2011). SECCIÓN 230-11. *ESTABILIZACION CON CAL*. Obtenido de ESTABILIZACION CON CAL.
- IDU. (2011). SECCIÓN 321-11. *MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE CON RAJÓN*.

INVIAS. (2013). ARTICULO 233-13. *Estabilizacion de Suelos de Subrasante y Refuerzo de Capas Granulares Con Geomallas.*

INVIAS. (2019). MANUAL DE INTERVENTORÍA OBRA PÚBLICA. *ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS.*

Isan, A. (22 de Noviembre de 2017). *Definicion de reciclaje.* Obtenido de Ecologia verde:
Recuperado de <https://www.ecologiaverde.com/definicion-de-reciclaje-240.html>

Londoño Naranjo, C., & Alvarez Pabón, J. A. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.* Medellín, Colombia: Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Mejía Rentería, L., & Mesías Castillo, A. M. (2014). *Estudio del mejoramiento de las propiedades de suelos expansivos utilizando caucho sintético reciclado.* (Tesis de pregrado), Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.

Mohsen, A., Esmail, A., & Fereidoon Moghadas, N. (10 de Enero de 2019). Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. *Journal of Cleaner Production*, 1059-1071.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.253>

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingenieria de Pavimentos para Carreteras.* Bogotá D.C., Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.

Narani, S. S., Abbaspour, M., Mir Mohammad Hosseini, S. M., & Moghadas Nejad, F. (Septiembre de 2020). Long-term dynamic behavior of a sandy subgrade reinforced by Waste Tire Textile Fibers (WTTFs). *Transportation Geotechnics*, 24, 100375.
doi:10.1016/j.trgeo.2020.100375

Patiño, J. C. (Febrero de 2006). *Parámetros Hipoplásticos de la Arena del Guamo-Colombia.* (Tesis de maestria). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

- Patiño, L. V., & Rodríguez Ramos, M. A. (2017). Llantas usadas: materia prima para pavimentos y multiples ecoaplicaciones. *Revista Ontare*, 5, 73 - 114.
doi:<https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2004>
- Paucar Naranjo, L. E. (2011). *Determinación de la ecuación de Correlación entre los Ensayos CBR de Laboratorio y PDC In Situ para los Tipos de Suelos de la Subrasante de la via Riobamba*. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Ramesh, A., Nageshwar Rao., C., & Kumar, M. (13 de Junio de 2019). Experimental Study on Geocell and of Fibre Reinforced Soil Sub-grade Under Static and Repetitive Load. *Geotechnics for Transportation Infrastructure*, 29, 113-149.
doi:https://ezproxy.uan.edu.co:2072/10.1007/978-981-13-6713-7_11
- Rivera, J., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020, Junio 10). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente. *Informador Técnico*. doi:10.23850/22565035.2530
- Rojas Perilla, L. L., & Rivera Pardo, S. A. (2014). *Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la sabana de Bogotá*. (Tesis de pregrado), Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: materiales, construccion y diseño*. Bogota: Ecoe Ediciones.
- Vargas Jiménez, J., Moncayo Theurer, M., Córdova Rizo, J., Maza, C., Barzola Zambrano, I., Velasco Cevallo, G., . . . Lucio, S. (2017). La geomalla como elemento de refuerzo en pavimentos flexibles. *Ingeniería*, 21(1). Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467/46752305006>

