

**APLICACIÓN DE TEMÁTICAS EN INGENIERÍA CIVIL
COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN CON CAL,
CEMENTO, SILICATO DE SODIO Y ACEITE SULFONADO PARA VÍAS
TERCIARIAS CON PRESENCIA DE ARCILLA EN LA REGIÓN DE LA
ORINOQUÍA**



Por:
Brian David Álvarez Pizco
Luis Fernando Rojas Ochoa



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

**APLICACIÓN DE TEMÁTICAS EN INGENIERÍA CIVIL
COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN CON CAL,
CEMENTO, SILICATO DE SODIO Y ACEITE SULFONADO PARA VÍAS
TERCIARIAS CON PRESENCIA DE ARCILLA EN LA REGIÓN DE LA
ORINOQUÍA**



Por:
Brian David Álvarez Pizco
Luis Fernando Rojas Ochoa

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

Aprobado por:
Ing. Luis Fernando Díaz Cruz, Mg.
Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabon, Mg
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABON
Decano Facultad Ingeniería Civil

ING. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ
Director Trabajo de Grado

Villavicencio, 13 de noviembre de 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a nuestros padres y hermanos quienes a pesar de las condiciones difíciles siempre estuvieron con nosotros brindándonos un apoyo incondicional durante el tiempo que tardamos en esta etapa de crecimiento personal y profesional. De igual manera, a la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio y al cuerpo docente, por su apoyo, su conocimiento, su dedicación y por su orientación académica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, por bendecirnos y permitirnos culminar este trabajo de investigación y por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos difíciles que afrontamos durante nuestro proceso de pregrado. A nuestras familias por el apoyo incondicional que nos brindaron para alcanzar este logro y poder ser un motivo de orgullo y felicidad para ellos. Agradecemos a la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio por permitirnos ser parte de esa institución y brindarnos sus instalaciones para la ejecución de los laboratorios, de manera especial al Ing. Luis Fernando Diaz Cruz director de nuestro proyecto de investigación, por compartir de manera muy acertada sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión y quien con paciencia y rectitud como docente logró brindarnos su apoyo a lo largo del proyecto. De manera general a nuestros compañeros de pregrado que estuvieron presentes siempre a lo largo de nuestro proceso de aprendizaje y creyeron en nosotros y a cada una de las personas que de forma directa, indirecta, positiva y negativa hicieron parte de nuestro proceso.

RESUMEN

En Colombia la red vial terciaria juega un papel fundamental para el desarrollo del país por su importancia para conectividad de los centros de producción de materias primas con la zona de industria, pero a pesar de esto, con el paso de los días esta red se ve cada vez más afectada en temas de serviciabilidad y calidad de la infraestructura por causa del descuido y abandono. En el departamento del Meta estas vías juegan un papel fundamental para el desarrollo de la población, además, estas conforman el 60% de la malla vial de la región. Las vías terciarias a lo largo su vida útil se encuentra expuesta a cualquier acción de la naturaleza y del hombre como toda obra de infraestructura, acciones que causan daños en su estructura. Considerando que el gobierno no cuenta con la capacidad en infraestructura, operativa y económica para realizar las obras de mantenimiento tanto preventivo como correctivo, surge la necesidad de explorar diferentes alternativas para el mejoramiento y conservación de estas vías que sean a bajo costo y de una fácil aplicación; enfocándonos en el suelo presente en la región de la Orinoquía, donde encontramos que predomina la presencia de arcilla y limos. En el presente proyecto de grado se evalúan las propiedades mecánicas y características físicas posteriores a la implementación de Agentes estabilizantes (Cal, Cemento, Aceite Sulfonado y Silicato de Sodio) como en su estado inicial replicado en un tramo de 20 metros en el suelo presente en la Vereda las Leonas ubicada entre el municipio de puerto López y puerto Gaitán en el departamento del Meta. El proyecto cuenta con 4 etapas, en la primera etapa se realizó la recopilación de información pertinente para el desarrollo del proyecto, en la segunda etapa se realizó la caracterización del suelo presente en la vía bajo especificaciones de Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en la tercera etapa se llevó a cabo el proceso de aplicación de los agentes estabilizantes en diferentes dosis (acorde a la recomendación de la literatura y proveedores) sobre la superficie de rodadura, posteriormente cuando el suelo tratado alcanzo una edad de maduración de veinte (20) días, del mismo modo que la etapa dos se evaluaron las propiedades y determinaron los cambios obtenidos. Por último, en la cuarta etapa se realizó el análisis del comportamiento de cada uno de los estabilizantes, donde se logró identificar cuál de estos permite obtener mejores resultados en el comportamiento físico y mecánico del suelo con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía.

Palabras Clave: *vías, estabilización química de suelos, mejoramiento de suelos, agente estabilizante, cal, cemento, silicato de sodio, aceite sulfonado.*

ABSTRACT

In Colombia, the tertiary road network plays a fundamental role for the development of the country due to its importance for the connectivity of the centers of production of raw materials with the industrial zone, but despite this, with the passage of time this network is seen increasingly affected in terms of service and quality of infrastructure due to neglect and abandonment. In the department of Meta, these roads play a fundamental role for the development of the population, in addition, they make up 60% of the road network in the region. The tertiary roads throughout their useful life are exposed to any action of nature and man like all infrastructure works, actions that cause damage to their structure. Considering that the government does not have the infrastructure, operational and economic capacity to carry out both preventive and corrective maintenance works, the need arises to explore different alternatives for the improvement and conservation of these roads that are at low cost and easily application; focusing on the soil present in the Orinoquía region, where we find that the presence of clay and silt predominates. In this degree project, the mechanical properties and physical characteristics after the implementation of stabilizing agents (Lime, Cement, Sulfonated Oil and Sodium Silicate) are evaluated as in their initial state replicated in a section of 20 meters in the soil present in the Vereda las Leonas located between the municipality of Puerto López and Puerto Gaitán in the department of Meta. The project has 4 stages, in the first stage the collection of pertinent information for the development of the project was carried out, in the second stage the characterization of the soil present on the road was carried out under the specifications of the National Institute of Roads (INVIAS), in The third stage was carried out with the process of applying the stabilizing agents in different doses (according to the recommendation of the literature and suppliers) on the tread surface, later when the treated soil reached a maturity age of twenty (20) days, in the same way as stage two, the properties were evaluated and the changes obtained were determined. Finally, in the fourth stage, an analysis of the behavior of each of the stabilizers was carried out, where it was possible to identify which of these allows to obtain better results in the physical and mechanical behavior of the soil with the presence of clay in the Orinoquía region.

Key Word: roads, chemical soil stabilization, soil improvement, stabilizing agent, lime, cement, sodium silicate, sulfonated oil.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	12
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
2.2.	PREGUNTA PROBLEMA.....	14
3.	JUSTIFICACIÓN.....	15
4.	OBJETIVOS.....	17
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	17
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
5.	ALCANCE.....	18
6.	MARCO DE REFERENCIA	19
6.1.	MARCO TEÓRICO	19
6.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	20
6.2.1	Suelo.....	20
6.2.2	Cemento.....	20
6.2.3	Cal.....	20
6.2.4	Silicato de Sodio	20
6.2.5	Aceite Sulfonado	20
6.2.6	Estabilización Química.....	21
6.2.7	Vías.....	21
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	21
6.4.	MARCO NORMATIVO.....	22
6.5.	MARCO GEOGRÁFICO	23
7.	METODOLOGÍA.....	25
7.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	25
7.1.1	Fase I.....	26
7.1.2	Fase II	26
7.1.3	Fase III	27
7.1.4	Fase IV.....	28
7.2.	POBLACIÓN, MUESTRAS, VARIABLES E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	28
7.2.1	Material granular	28
7.2.2	Ensayos de laboratorio.....	28
8.	ETAPA 1 (CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR).....	29
8.1.	EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	30
8.2.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....	30
8.3.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	33
9.	ETAPA 2 (CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR ESTABILIZADO).....	35
9.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....	37
9.2.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	37
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
11.	RESULTADOS E IMPACTOS	46
11.1.	RESULTADOS ESPERADOS	46
11.2.	IMPACTOS	46
12.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	48
12.1.	CONCLUSIONES	48

12.2. TRABAJOS FUTUROS.....	49
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 6-1 Marco Normativo	22
Tabla 7-1 Ensayos de caracterización	26
Tabla 7-2 Área de Intervención	27
Tabla 7-3 Dosificaciones.....	27
Tabla 8-1 Contenido de Humedad – Suelo Natural	29
Tabla 8-2 Descripción Visual – Suelo Natural	29
Tabla 8-3 Características de plasticidad	32
Tabla 8-4 Dosificación	36
Tabla 8-5 Características de plasticidad del suelo natural y estabilizado	37
Tabla 8-6 CBR del suelo natural y estabilizado	38
Tabla 8-7 Proctor modificado del suelo natural y estabilizado	40
Tabla 8-8 Compresión inconfínada del suelo natural y estabilizado	43
Tabla 9-1 Resultados esperados	46
Tabla 9-2 Impactos	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 6-1 Localización del área de estudio	24
Figura 7-1 Descripción Metodológica	25
Figura 8-1 Zona de estudio	29
Figura 8-2 Granulometría por tamizado	30
Figura 8-3 Granulometría por hidrómetro	31
Figura 8-4 Determinación del límite líquido	32
Figura 8-5 Determinación del límite plástico	32
Figura 8-6 Curva de fluidez en estado natural	32
Figura 8-7 Muestra de material para ensayo de CBR	33
Figura 8-8 CBR Inalterado en estado natural	33
Figura 8-9 Ensayo Proctor	34
Figura 8-10 Proctor modificado en estado natural	34
Figura 8-11 Ensayo Compresión Inconfinada	35
Figura 8-12 Compresión inconfinada suelo natural	35
Figura 8-13 Aplicación del estabilizante	36
Figura 8-14 Comportamiento de las características de plasticidad del suelo natural y estabilizado	37
Figura 8-15 CBR Inalterado - Aceite sulfonado	38
Figura 8-16 CBR Inalterado - Silicato de sodio	38
Figura 8-17 CBR Inalterado - Cal	39
Figura 8-18 CBR Inalterado - Cemento	39
Figura 8-19 Valore de CBR inalterado para muestras estabilizadas	39
Figura 8-20 Ensayo CBR	40
Figura 8-21 Procedimiento ensayo Proctor modificado	41
Figura 8-22 Proctor modificado estabilizado con aceite sulfonado	41
Figura 8-23 Proctor modificado estabilizado con silicato de sodio	41
Figura 8-24 Proctor modificado estabilizado con cal	42
Figura 8-25 Proctor modificado estabilizado con cemento	42
Figura 8-26 Valores de Proctor modificado para muestras estabilizadas	42
Figura 8-27 Compresión inconfinada estabilizado con aceite sulfonado	43
Figura 8-28 Compresión inconfinada estabilizado con silicato de sodio	43
Figura 8-29 Compresión inconfinada estabilizado con cal	44
Figura 8-30 Compresión inconfinada estabilizado con cemento	44
Figura 8-31 Valores de compresión inconfinada para muestras estabilizadas	44

1. INTRODUCCIÓN

En el área de la Ingeniería Civil, el uso de estabilizantes químicos para mejorar las condiciones de las vías terciarias ha venido siendo a lo largo del tiempo un método bastante investigado, a pesar de esto, su implementación para mejorar las condiciones que puede tener una vía a lo largo de su vida útil o hasta que sea intervenida de mejor manera ha sido baja, teniendo en cuenta que la mayoría de las vías del país se encuentran en afirmado, esta situación puede ser representada por la región de la Orinoquía en donde un 60% de sus vías cuenta con el suelo como capa de rodadura. [1]

Se entiende como un método de estabilización de la rasante a un conjunto de parámetros físicos, químicos y fisicoquímicos, con tendencia a modificar propiedades del suelo más influyentes en labores de ingeniería para la construcción de una determinada obra, haciendo que los materiales encontrados inicialmente sean adecuados para el uso previamente definido, evitando así el uso de sustancias y materiales de difícil acceso o de alto costo. A su vez, la necesidad de generar métodos y estrategias para mejorar la infraestructura vial terciaria ha generado numerosos trabajos de investigación y posibles soluciones en el área de la mecánica de suelos tradicional.

La presente investigación implementará el método de estabilización química, con el fin de comparar el efecto que diferentes agentes estabilizantes pueden causar sobre las características físicas y mecánicas del suelo, identificando a su vez, cuál de estos permite obtener mejores resultados en los ensayos de caracterización (límites de Atterberg, compresión inconfiada, Proctor modificado y CBR inalterado - California Bearin Ratio), logrando obtener un análisis que resulte útil para la implementación en distintos proyectos de Ingeniería Civil en la región de la Orinoquía para carreteras que tengan presencia de materiales con comportamiento plástico.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia la intercomunicación por vía terrestre carretable entre zonas rurales es cada día más crítica debido a que las vías terciarias se encuentran en un mal estado e inclusive algunas son totalmente intransitables, según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de la red vial nacional de carreteras el 94% se encuentra en mal estado y solo un 6% en buen estado de un total de 142,000 Km aproximadamente de vías terciarias en todo el territorio nacional [1]. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) del total de las vías que componen la red terciaria de la región de Orinoquía el 60% de estas se encuentran construidas en afirmado y se encuentran en mal estado, el 32% se encuentran en estado regular y solo un 8% se encuentra en buen estado [2] además, la red vial terciaria de la región se encuentra ubicada principalmente en zonas con depósitos eólicos [3] lo que aumenta la dificultad y las condiciones adecuadas para transitar fácilmente por las mismas.

El mal estado de las vías terciarias perjudica principalmente a los sectores agrícolas en el área del transporte de materias primas que se cultivan en zonas veredales (plátano, maíz, caucho, palma, entre otras), ya que al no contar con vías que faciliten un transporte óptimo de los productos se generaran afectaciones por retrasos, baja productividad, pérdidas ecológicas y financieras que de alguna u otra manera son principales para la economía y el desarrollo de la región que aporta un 5,9% del PIB.

Cuando hablamos de vías terciarias hacemos referencia a vías que por estar construidas en afirmado presentan inestabilidad a lo largo su vida útil debido a que se encuentran expuestas y cualquier acción que pueda causar daños en la capa de rodadura, por lo que se deben plantear acciones que brinden una solución a este problema no sólo de manera temporal a corto plazo, si no que garantice un periodo de operación cumpliendo condiciones técnicas permitiendo la circulación. De ahí la importancia de investigar alternativas que permitan estabilizar los suelos de las vías terciarias a través de procesos físicos, químicos o fisicoquímicos para poder garantizar un suelo resistente por los cambios y exposiciones ambientales a los que se encuentra expuesto, estas soluciones deben no solo responder a la necesidad de brindar un suelo resistente, también deben ser viables económicamente. Para el periodo del 2020 – 2023 se presupuestó 1 billón de pesos por parte del gobierno nacional para atender proyectos de infraestructura para el mejoramiento de la conectividad del país a través de vías terciarias. De esta inversión el departamento del Meta es uno de los departamentos con 20 municipios beneficiados [2].

En la región de la Orinoquía predominan materiales de comportamiento plástico (suelos con alta presencia de limos y arcillas), sumado a esto se presenta una alta pluviosidad de órdenes de 2000 a 3000 mm columna de agua/año. La combinación de materiales de comportamiento plástico con cambios de contenido de humedad promueve al deterioro de las vías terciarias. Estas afectaciones a la superficie de

rodadura en la mayoría de los casos también son promovidas por la ausencia elementos geométricos que faciliten la evacuación del agua.

2.2. PREGUNTA PROBLEMA

¿Cuál es el agente estabilizante que permite obtener mejores resultados en el comportamiento mecánico de las vías con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía?

3. JUSTIFICACIÓN

La infraestructura para el transporte tanto de carga como de pasajeros es de gran importancia para cualquier país, la calidad y conectividad de su red se refleja directamente en el crecimiento de su economía y el bienestar para su población. En Colombia, acorde a su principal actividad económica como lo es la producción agrícola y explotación de recursos minerales, la red vial terciaria juega un papel muy importante, pues es por esta red de conexión que se garantiza la explotación, las vías terciarias en Colombia comparadas con red vial primaria y secundaria son las que cuentan con la mayor extensión y presencia en todo territorio nacional, por medio de esta infraestructura se transportan los productos agrícolas que se producen en el país, que para el 2019 representaron el 2% del Producto Interno Bruto [4]. Colombia en la actualidad cuenta con una red de carreteras con una extensión aproximada de 204,855 Km, de la cual en su mayoría corresponde a la red terciaria con una longitud de 142,284 Km. La región de la Orinoquía cuenta con el 8% de la red vial terciaria en su territorio, es decir, cuenta con una extensión en vías de 11,838 Km aproximadamente [5]. El buen funcionamiento de esta red vial fortalece el crecimiento económico y permite que el estado tenga mayor presencia en estos sectores. Actualmente esta red vial no está bien distribuida a lo largo del país debido a que aún existen zonas del país que no cuentan con infraestructura de transporte que faciliten su conexión con la sociedad y permitan que los beneficios del desarrollo del país lleguen a estos lugares, sumado a esto al tener una extensión el estado no cuenta con los recursos y capacidad operativa para garantizar su condición de servicio óptima en todo momento reflejado en inversiones del gobierno a largo plazo y periodos que en la mayoría de los casos destina la inversión en acciones correctivas y de reparación.

Colombia cuenta con 17.8 Km de vías terciarias por cada 100 Km², similar a otros países de Latinoamérica, lo que realmente preocupa es la distribución de esta red vial en el territorio nacional ya que hay zonas que cuentan con más de 20 Km por cada 100 Km² y otras que están por debajo de los 9 Km por cada 100 Km² [5], lo cual hace que la gestión de estas vías sea diferente para cada municipio y que el país tenga que priorizar su inversión en estas vías para poder alcanzar un equilibrio en el desarrollo del país. A lo largo del territorio nacional, las vías terciarias en su mayoría funcionan en afirmado y están expuestas a factores como el clima o el simple paso de los vehículos que puede hacer que esta sufra fácilmente cambios en su estructura, en la región de la Orinoquía el común denominador de estas vías es que el material sobre el cual circulan los vehículos es arcilloso. Este es un suelo fino que puede llegar a tener un comportamiento desventajoso para cualquier estructura que sea construida o funcione sobre este ya que ante la presencia o pérdida de agua este tipo de suelo tiende a expandirse o contraerse respectivamente [6], además, la geografía del país expone variaciones climáticas que son un detonante para este tipo de vías.

Debido a los problemas que se pueden presentar en las vías terciarias por los diferentes factores externos y la falta de recursos por parte de los diferentes municipios del país para ejecutar actividades de construcción o mantenimiento de estas vías surge la necesidad de implementar otras alternativas para mejorar el estado de las vías de manera prolongada, esta alternativa debe ser económicamente viable y dirigida a ser ambientalmente viable. La estabilización de las vías es una alternativa que mejora el rendimiento de las vías que funcionan en afirmado, buscando mejorar la durabilidad de la vía y su resistencia a las condiciones medioambientales que pueden ser desfavorables [7]. La estabilización se puede lograr por medio de aditivos como la cal, cemento, silicato de sodio y aceite Sulfonado, que pueden mejorar el estado de transitabilidad de la red vial. La estabilización con cal permite la reducción de límite líquido y el índice plástico lo que hace que los cambios volumétricos en el suelo disminuyan, además de mejorar las propiedades de resistencia del suelo [8], la estabilización con cemento al igual que la cal disminuye la susceptibilidad del suelo al agua y aumenta su resistencia [9], la estabilización con aceite sulfonado incrementa la resistencia al suelo y disminuye sus características expansivas [9] y la estabilización con silicato de sodio incrementa la estabilidad frente a la adición de agua, disminuye la plasticidad y la expansión del suelo [10]. Además, cuando se tiene el objetivo de mejorar las condiciones del suelo con la ayuda de aditivos como los anteriormente mencionados es necesario comprobar que este trabaja eficientemente en conjunto con el suelo presente en la zona donde va a ser utilizado, mejorando sus propiedades y ayudando a mantener la vía en buen estado. Es necesario realizar un análisis del comportamiento del suelo con cada uno de los estabilizantes a implementar por medio de ensayos como CBR, Relación humedad-densidad (Proctor) y resistencia a la compresión confinada para conocer con cuál de estos la superficie de rodadura presenta mejores condiciones de resistencia y gracias a esto poder contar con una mejor infraestructura vial que impactara positivamente la calidad de vida de los habitantes de la zona intervenida.

Mejorar las condiciones del suelo presente en la vía terciaria perteneciente a la “vereda las leonas” por medio métodos de estabilización con Cal, Cemento, Aceite Sulfonado y Silicato de Sodio se llevará a cabo debido a que por su ubicación, en esta zona la vía presenta depósitos eólicos, conglomerados y arenitas poco consolidadas con matriz ferruginosa y arcillosa [11], tipos de suelo que predominan en la región, es decir, la vía está conformada en su mayoría por el material más abundante y predominante de la región y los resultados que se puedan obtener por medio de la simulación de caso podrían establecerse como referentes para futuras intervenciones de las vías que abarquen los resultados de la investigación.

La aplicación de los agentes estabilizantes sobre la superficie de la vía caso de estudio será realizada de forma manual, la elección e implementación de un método manual para la realización de este proceso, está basada en la corta longitud que tendrá cada uno de los tramos a intervenir, permitiendo que se elabore un riego de las sustancias sobre la superficie de la rasante de forma fácil y sencilla, sin requerir ningún tipo de maquinaria para la aplicación de cada uno de los agentes.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Comparar las alternativas de estabilización con cal, cemento silicato de sodio y aceite sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía. Caso de estudio: vía terciaria “vereda las leonas”, ubicada entre el municipio de puerto López y puerto Gaitán en el departamento del Meta.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización de las arcillas presentes en la zona de intervención mediante los ensayos Límites de Atterberg, Análisis granulométrico de partículas, CBR, Relación humedad-densidad (Proctor) y resistencia a la compresión confinada, bajo normativa INVIAS.
- Estabilizar mediante cal, cemento, aceite sulfonado y silicato de sodio, una muestra del material de la vía que conduce a la vereda “las leonas”.
- Analizar cuál de los estabilizadores implementados en la arcilla presenta mejores resultados en un periodo de 20 días para los ensayos descritos.
- Aplicar en la vía de acceso a la vereda “Las Leonas” métodos de estabilización con Cal, Cemento, Aceite Sulfonado representando condiciones a escala real.
- Identificar el agente estabilizante que permite obtener mejores resultados en el comportamiento mecánico del suelo con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía.

5. ALCANCE

En el presente proyecto se busca comparar el efecto de la Cal, cemento, aceite sulfonado y silicato de sodio como agentes estabilizantes en vías terciarias con presencia de arcilla en la capa de rodadura. Se tomó como referencia la vía de acceso a la vereda las leonas ubicada entre los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán. El análisis del efecto de los agentes estabilizantes se evaluó en cuatro sectores, correspondientes a tramos de 20 metros de longitud por cada uno de los agentes, con un periodo de maduración de 20 días, permitiendo así que cada estabilizante alcance un nivel máximo de evolución acorde a la recomendación de la literatura y proveedores.

Se analizó cada una de las alternativas mediante los ensayos de laboratorio (Límites de Atterberg, Análisis granulométrico de partículas, CBR inalterado, Relación humedad-densidad Proctor modificado y compresión inconfina) y ensayo en campo (medición de la caída de polvo), comparando cada uno de los resultados obtenidos para cada agente estabilizante.

Las muestras de suelo fueron sometidas a ensayos de laboratorio anteriormente mencionados para su caracterización sin los agentes estabilizadores y posteriormente con cada uno de ellos pasados 20 días de maduración, para comparar la evolución del comportamiento mecánico, esto con la finalidad de identificar el agente que produce un mejor resultado en el comportamiento del suelo.

La aplicación de los estabilizantes en los tramos que se evaluaron se realizó de forma manual sobre la superficie de la capa de rodadura que presenta la vía, debido a que por ser tramos muy cortos no se empleó maquinaria pesada para dicho proceso. Además, esto facilitó el riego de las sustancias sobre la superficie de rodadura de forma fácil y sencilla.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

La infraestructura vial con la que cuenta el territorio nacional es de gran importancia para el crecimiento de la economía y el bienestar de las personas que se benefician de estas, pero en nuestro país las vías terciarias tienen mayor importancia debido a que la red vial terciaria cuenta con la mayor extensión y presencia en el territorio nacional.

Debido a la importancia que esta red vial representa para el país es necesario que cuenten con las características adecuadas para el tránsito que por ellas transcurre día a día, es decir, por su infraestructura el estado de estas vías debe ser observado constantemente y cuando se requiera realizar las labores necesarias para mantenerla en un estado transitable, pero la situación a la que estas vías se enfrentan es completamente diferente ya que la vista del gobierno se encuentra muy apartada de las zonas en donde estas se encuentran y es muchas veces la comunidad la que se encarga de mantenerlas en la mejor condición posible, porque de lo contrario los más afectados son ellos. Por lo que surge la necesidad de desarrollar acciones encaminadas a la conservación de estas vías de una manera económica y eficiente, reduciendo las afectaciones a la comunidad y al desarrollo económico, asegurando un medio con el que interactuamos y del que nos beneficiamos día a día. La estabilización de suelos mejora la circulación de la vía, las propiedades geotécnicas del suelo, para finalmente conseguir un fundamento estable con las condiciones adecuadas para soportar el tránsito al que se encontrara sometido.

Para mejorar las condiciones del suelo y por consiguiente obtener un fundamento estable para el tránsito vehicular, es necesario realizar ensayos de laboratorio que permitan conocer el comportamiento del suelo de la zona de estudio, y los efectos que un posible estabilizante puede generar en el comportamiento del suelo. La estabilización del suelo presente en la vía caso de estudio con cal, cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado requiere de análisis como: CBR inalterado, Relación humedad-densidad y resistencia a la compresión inconfiada. Todo esto para conocer cuál es el estabilizante que mejora las condiciones del suelo en estudio de una manera económica y eficiente, promoviendo las acciones de mantenimiento para corregir las malas condiciones de las vías terciarias y de esta manera mejorar la transitabilidad y calidad de vida de la población que se beneficia de estas.

6.2. MARCO CONCEPTUAL

6.2.1 Suelo

En la Ingeniería Civil el suelo es considerado como aquel material presente en cualquier tipo de proyecto ya que es la base en la cual estarán cimentados los diferentes tipos de estructuras que se quieran elaborar, ya sean estructuras de pavimentos, puentes, edificaciones verticales u horizontales, entre otras, además, el suelo es contemplado con un material con características muy variables, ya que no todos los suelos están conformados por diferente contenido de partículas, líquidos, humedad y de vacíos.

6.2.2 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico que presenta propiedades de adherencia y cohesión, logrando la unión de varios fragmentos de minerales lo que permitirá que después de un proceso de aplicación del cemento en la rasante este logre aprovechar las propiedades del suelo y brindar una mayor estabilidad, haciendo la estructura del pavimento sea más fuerte para afrontar las condiciones ambientales a las que se ve sometido el suelo. [9]

6.2.3 Cal

La cal es considerada un material cementante que se obtiene de la roca sedimentaria, dicho material es comúnmente utilizado en vías con presencia de suelos cohesivos (arcillosos) ya que sus propiedades han mostrado una mejor respuesta brindando un secado del suelo, una modificación a su estructura molecular y una mayor estabilización para soportar las cargas a las que se verá sometida la vía. [12]

6.2.4 Silicato de Sodio

El silicato de sodio es un producto químico (Na_2S) incluido en una amplia gama de aplicaciones como en productos de limpieza, ligantes, cementos, capas protectoras, anticorrosivos, entre otros, debido a sus propiedades solubles pueden ser utilizadas de una manera eficiente y su costo es bastante accesible, además, es una sustancia que brinda soluciones ecológicas ya que no es tóxica y no inflamable. [10]

6.2.5 Aceite Sulfonado

El aceite sulfonado es un líquido soluble en agua que al ser incorporado en suelos puede lograr reducir el efecto cohesivo y propiedades expansivas en las fracciones finas y permite una acomodación de partículas en las fracciones gruesas. [13]

6.2.6 Estabilización Química

Proceso en el cual se le realiza un cambio a las propiedades del suelo mediante un tratamiento físico-químico mediante la aplicación de sustancias que logren mejorar las condiciones iniciales del suelo y permitan alcanzar las condiciones ideales o deseadas. [14]

6.2.7 Vías

Las vías y su estado son un aspecto fundamental y un indicador en el desarrollo y crecimiento de un país, ya que por medio de estas se busca dar solución a la necesidad de desplazarse de un lado a otro, lo que facilita la interacción de las comunidades rurales y las comunidades urbanas, permitiendo un intercambio de bienes y servicios. [15]

6.3. ESTADO DEL ARTE

- **Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías**

El suelo es el material más importante en los proyectos de construcción y actualmente es mayor el interés por utilizar métodos mecánicos o químicos alternativos para mejorar su calidad, estos métodos alternativos pueden ser una mejor opción que los métodos tradicionales ya que son más económicos lo que facilita su capacidad de adquisición y una mayor implementación. [16]

- **Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada**

Debido a los limitados recursos para la intervención a vías terciarias y que muchas veces el material del que está compuesta su estructura no presenta las características adecuadas para su funcionamiento, se manifiesta la necesidad de buscar métodos de bajo costo para mejorar las propiedades de resistencia y durabilidad del suelo. [17]

- **Análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos**

En el desarrollo de obras viales, una alternativa económica y que puede generar un menor impacto ambiental es el uso del suelo procedente de la excavación. El suelo presente en el área de intervención puede obtener las especificaciones requeridas para su implementación en la construcción de la vía por medio del uso de un agente estabilizante, el cual puede mejorar las propiedades de capacidad de soporte y resistencia del suelo haciendo de este un material adecuado para su implementación. [10]

- **Estudio de la cal y el cloruro de sodio como agentes estabilizadores de suelos arcillosos en propiedades como la resistencia y expansividad**

El suelo es la fundación para cualquier estructura desarrollada por el ser humano y este está comprendido por muchos materiales ya sean granulares, finos, minerales, materia orgánica, entre otros componentes que le brindan diferentes características. Debido a esto surge la necesidad de adaptar el suelo de acuerdo con nuestra necesidad por medio de diferentes procesos. Uno de estos procesos es la estabilización por medio de agentes estabilizantes como la cal o el cloruro de sodio, que son económicos, de fácil acceso y producen un bajo impacto ambiental. [18]

- **Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres**

La estabilización de suelos, específicamente en vías es un procedimiento comúnmente utilizado para mejorar las propiedades del suelo y por consiguiente su comportamiento a lo largo de su vida útil. Actualmente existen diferentes métodos para estabilizar el suelo, utilizando diferentes agentes estabilizantes como: la cal, el cemento Portland, productos asfálticos, ácidos orgánicos, entre otros, con los cuales se busca dar una solución adecuada a un problema específico. [19]

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 6-1 Marco Normativo

NORMA	NOMBRE DEL ENSAYO	FINALIDAD
I.N.V. E-123	Determinación de los tamaños de partículas de los suelos	Hace referencia a la determinación cuantitativa de las distribución, composición y tamaño de las partículas del suelo.
I.N.V. E-125	Determinación del límite líquido de los suelos	Determinar el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo seco, que se encuentra entre el estado líquido y el estado plástico.
I.N.V. E-126	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	Determinar en laboratorio el límite plástico de un suelo y el cálculo del índice de plasticidad si se conoce el límite líquido del mismo suelo.
I.N.V. E-180	Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (Sistema AASHTO)	Este es utilizado para describir la textura y tamaño de las partículas de suelo, en este caso es utilizado para caracterizar el material de la rasante.
I.N.V. E-181	Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería	Este es utilizado para describir la textura y tamaño de las partículas de

NORMA	NOMBRE DEL ENSAYO	FINALIDAD
		suelo, en este caso es utilizado para caracterizar el material de la rasante.
I.N.V. E-148	CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada	Esta norma describe el proceso a llevar a cabo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte de california, comúnmente conocido debido a su origen, como CBR (California Bearing Ratio).
I.N.V. E-142	Relaciones humedad-peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)	Este método se emplea para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados en un molde de unas dimensiones establecidas con un martillo de 4.54 Kg. Que cae desde una altura de 457 mm.
I.N.V. E-152	Compresión inconfiada en muestras de suelos	Esta norma describe el ensayo para determinar la resistencia no confinada de suelos cohesivos, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación.
ASTM-D1739-98.	Método de prueba estándar para la recolección y medición de la caída de polvo.	Este método de prueba cubre un procedimiento para la recolección de polvo y su medición.

Fuente: Autores

6.5. MARCO GEOGRÁFICO

El área de estudio que abarca el proyecto se encuentra ubicada en el departamento del Meta, en el kilómetro 73 de la vía que comunica el municipio de Puerto López con el municipio de Puerto Gaitán, más exactamente 1 km adentro de la vereda las leonas, zona veredal conformada por fincas agrícolas y ganaderas que cuentan con una vía terciaria como acceso.



Figura 6-1 Localización del área de estudio
Fuente: Google Earth

7. METODOLOGÍA

El desarrollo de la presente investigación es de tipo cualitativo y comparativo, en donde a través de la implementación de diferentes agentes estabilizantes en campo se busca identificar la alternativa que mejore las propiedades de la red vial terciaria del departamento del Meta de una manera práctica. La investigación está enmarcada de primera mano por la recopilación de información de investigaciones y proyectos que se encuentran en el entorno del que hace parte el objeto general del estudio, seguida por el análisis del efecto de los estabilizantes en el suelo de la zona de estudio y los ensayos realizados, determinando el estabilizante que mejore las propiedades de soporte del suelo presente en las vías terciarias de la Región.

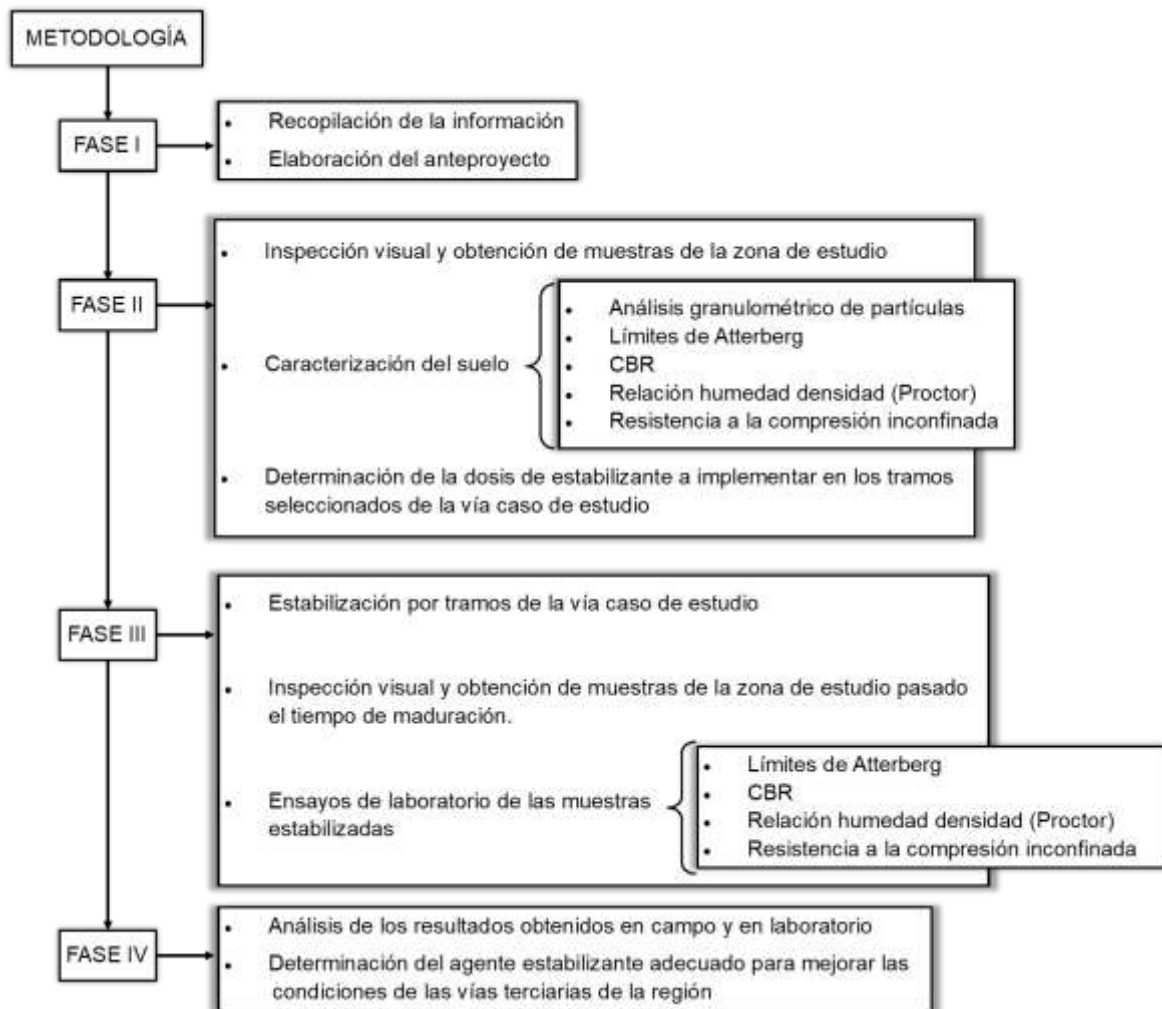


Figura 7-1 Descripción Metodológica
Fuente: Autores

7.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

7.1.1 Fase I

En esta fase se contemplaron las actividades relacionadas con la recolección de información referente al tema de estudio, que a su vez facilitó la elaboración del anteproyecto partiendo de la problemática inicial, la cual correspondió a la comparación de agentes estabilizantes que puedan llegar a brindar beneficios al suelo que funciona como superficie de pavimento en las vías terciarias en el departamento del Meta. Se realizó una indagación a profundidad en diferentes fuentes literarias y académicas en busca de datos y artículos con alguna relación en el tema que permitieron adquirir los conocimientos básicos y conocer los estabilizantes que existen, su eficiencia y los métodos de aplicación, conocimientos que dieron paso al cumplimiento de las expectativas y objetivos que se tenían planteados inicialmente para la elaboración de la presente investigación.

7.1.2 Fase II

En esta fase estuvo contemplada por la inspección visual de la misma y la toma de muestras de suelo para su caracterización.

7.1.2.1 Toma de muestras

En esta etapa la muestra de suelo obtuvo por medio de una excavación a una profundidad aproximada de 0.2 m del nivel de la rasante (base de la estructura de pavimento). En primera instancia por medio de un procedimiento visual, el material obtenido se identificó y describió en el lugar de su extracción. Una vez obtenido el material granular se procedió a realizar su caracterización.

7.1.2.2 Caracterización del material granular

Luego de obtener el material granular de la zona de estudio se llevaron a cabo los diferentes ensayos que se presentan a continuación, con el fin de conocer las características del material en estudio.

Tabla 7-1 Ensayos de caracterización

NOMBRE DEL ENSAYO	NORMA
Determinación de los tamaños de partículas de los suelos	I.N.V. E-123
Determinación del límite líquido de los suelos	I.N.V. E-125
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	I.N.V. E-126
Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (Sistema AASHTO)	I.N.V. E-180

NOMBRE DEL ENSAYO	NORMA
Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería	I.N.V. E-181
CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada	I.N.V. E-148
Relaciones humedad-peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)	I.N.V. E-142
Compresión inconfiada en muestras de suelos	I.N.V. E-152
Inspección visual y medición de caída de polvo	N/A

Fuente: Autores

7.1.2.3 Dosis de estabilizantes

La dosis de cada uno de los estabilizantes implementados en las muestras de suelo y en los tramos seleccionados de la vía se presentan a continuación:

Tabla 7-2 Área de Intervención

Longitud	10.0 m
Ancho	6.0 m
Espesor	0.10 m
Volumen	6 m ³

Fuente: Autores

Tabla 7-3 Dosificaciones

Agente estabilizante	Dosis	Definida por
Cal	3.0%	Manual de estabilización de suelo tratado con cal [20]
Cemento	2.0%	Proveedor (argos) [21]
Silicato de sodio	3.0%	Trabajo final para título de maestría en ingeniería geotécnica u. Nacional.[17]
Aceite sulfonado	0.5%	Proveedor (EstaVías) [22]

Fuente: Autores

7.1.3 Fase III

Esta fase está conformada en primera parte por la aplicación de los agentes estabilizantes sobre la superficie de la vía caso de estudio, la cual se llevó a

cabo de forma manual. Posteriormente, pasados 20 días desde la aplicación de los estabilizantes acorde a la recomendación de la literatura y proveedores se realizó una inspección visual de la vía y se realizó la toma de muestras de suelo para su caracterización. En esta fase se realizó los ensayos de laboratorio llevados a cabo en la fase anterior exceptuando el proceso de determinación de los tamaños de partículas del suelo.

7.1.4 Fase IV

Esta fase tuvo como objetivo el tratamiento y análisis adecuado de los datos obtenidos en las fases anteriores facilitando la comparación con claridad de cada uno de los agentes estabilizantes implementados para el desarrollo del proyecto, ya que mediante esto se puede identificar cuál de las sustancias empleadas presenta mejores condiciones en campo, logrando así, ofrecer una análisis base que sirva como una guía para futuras implementaciones de agentes estabilizantes en la región de la Orinoquia o en materiales similares al intervenido.

7.2. POBLACIÓN, MUESTRAS, VARIABLES E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

7.2.1 Material granular

El material granular fue extraído de la vía terciaria “vereda las leonas”, ubicada entre el municipio de puerto López y puerto Gaitán en el departamento del Meta, con el fin de conocer sus características antes y después de que se realizara el proceso de estabilización del tramo seleccionado.

7.2.2 Ensayos de laboratorio

Para identificar el agente estabilizante que permitió obtener mejores resultados en el comportamiento mecánico del suelo se debieron realizar una serie de ensayos de laboratorio que facilitaron el análisis del comportamiento del suelo, implementando en campo y en laboratorio los elementos y procedimientos estipulados por la norma para cada uno de ellos.

8. ETAPA 1 (CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR)

El material de estudio fue extraído de la vía terciaria “vereda las leonas”, ubicada entre el municipio de puerto López y puerto Gaitán en el departamento del Meta.



Figura 8-1 Zona de estudio
Fuente: Autores

La sección transversal de la vía cuenta con un ancho de calzada de seis (6) metros, de los cuales dos (2) metros del costado derecho y uno (1) del costado izquierdo se encuentran cubiertos por vegetación.

El material que conforma la superficie de rodadura presenta las siguientes características:

Tabla 8-1 Contenido de Humedad – Suelo Natural

	Muestra N°	W1-Muestra Húmeda (g)	W2-Muestra Seca (g)	Contenido de Humedad ω (%)
Superficie de Rodadura	1	835	691	21%
	2	825	673	23%
Contenido de Humedad (%)				22%

Fuente: Autores

Tabla 8-2 Descripción Visual – Suelo Natural

Angulosidad	La muestra de suelo no presenta partículas gruesas visibles
Forma	La muestra de suelo no presenta partículas gruesas visibles
Color	La muestra presenta un color terracota oscuro debido a que presenta humedad
Olor	La muestra de suelo no presenta un olor característico al momento de extraerla
Condición de humedad	La muestra se encuentra: Húmeda
Consistencia	

	El suelo presente una consistencia Dura, ya que el pulgar no deja marca en el suelo y solo lo penetra la uña
Cementación	El suelo presenta una cementación débil ya que los bloques de material conglomerado por causa de la humedad se rompen con poca presión
Estructura	La muestra de suelo presenta un solo color y apariencia uniforme, pero al momento de extraerla se forman pequeños terrones o bloques debido a que es un material cohesivo
Tamaño máximo de la partícula	La muestra está compuesta por partículas finas
Comentarios adicionales	El suelo contaba con la presencia de raíces

Fuente: Autores

8.1. EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS

Los especímenes para utilizar en los procedimientos determinados por los ensayos I.N.V. E-148 y I.N.V. E-152 fueron extraídos de forma manual, cumpliendo con las especificaciones requeridas para las muestras de suelo.

8.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

El ensayo de granulometría por tamizado (I.N.V. E-123) para la caracterización del suelo por el tamaño de partículas fue realizado con una muestra inicial de 1 Kg. Este proceso determinó que el suelo presente en la zona de estudio tiene una composición del 0.07% de gravas, un 81.31% de arenas y un 18.62% de finos (figura 8-1), obteniendo como porcentaje de pérdidas en el procedimiento de un 0.3% del material (3 gr).

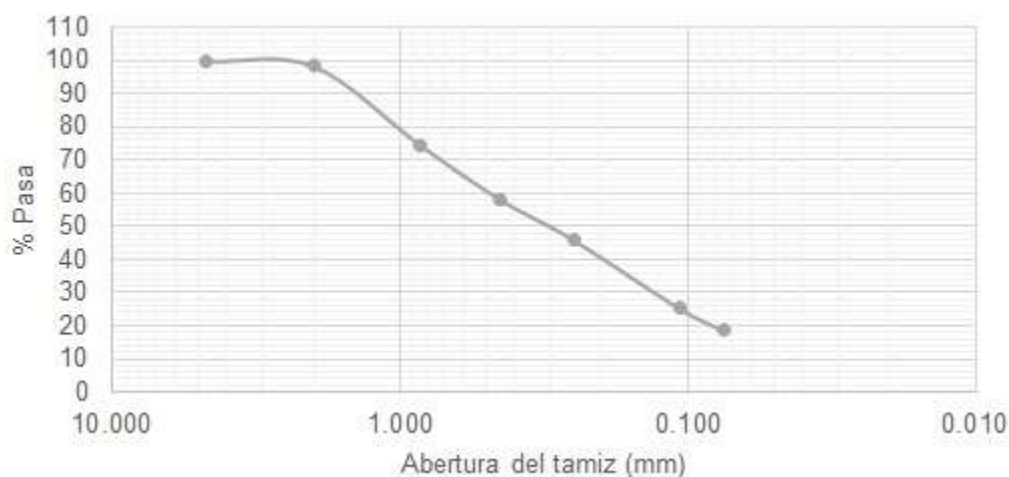


Figura 8-2 Granulometría por tamizado
Fuente: Autores

Según los datos obtenidos en la granulometría del material granular, no pueden ser determinados los coeficientes de curvatura y uniformidad (C_c y C_u respectivamente) mediante la relación de los coeficientes D_{60} , D_{30} y D_{10} ya que el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 corresponde al 18,62% y no puede ser calculado el valor de referencia D_{10} .

Respecto a la fracción de finos, que corresponde al 18.62% de la muestra inicial caracterizada por tamizado, el ensayo de sedimentación por hidrómetro (I.N.V. E-123) determinó un 57.77% de arcillas y un 44.23% de limos (figura 8.1.2) equivalentes a un 10.38% y 8.24% respectivamente de la muestra inicial utilizada en el proceso de tamizado.

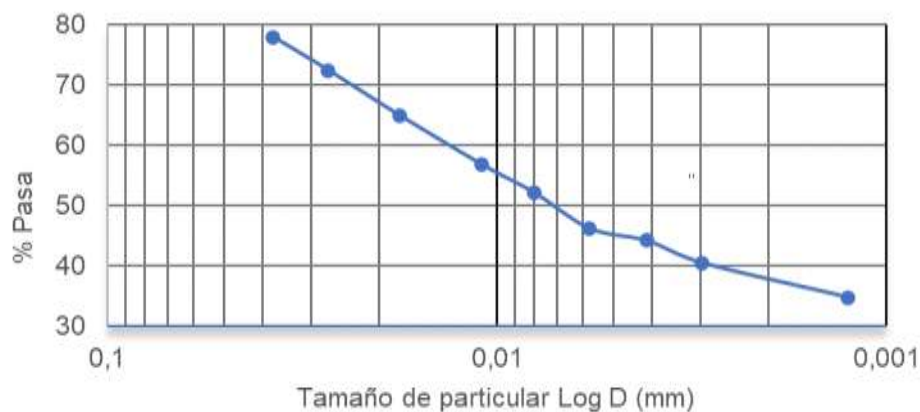


Figura 8-3 Granulometría por hidrómetro
Fuente: Autores

Por medio de la determinación de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad para el suelo en condiciones naturales por medio de los ensayos I.N.V. E-125 y I.N.V. E-126, se observa que el material de la vía caso de estudio es plástico, esto debido a el material fino que se encuentra presente en su composición.



Figura 8-4 Determinación del límite líquido
Fuente: Autores



Figura 8-5 Determinación del límite plástico
Fuente: Autores

Tabla 8-3 Características de plasticidad

Suelo Natural	LL (%)	LP (%)	IP (%)
	37	31	6

Fuente: Autores



Figura 8-6 Curva de fluidez en estado natural
Fuente: Autores

El material granular perteneciente a la vía tramo de estudio, según la norma I.N.V. E-180 - Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (Sistema AASHTO), presenta un porcentaje que pasa por el tamiz N°200 menor al 35%, es por esto que corresponde a un suelo granular y según los valores de límite líquido e índice de plasticidad este material pertenece al grupo A-2-4 (3) siendo un suelo constituido comúnmente por gravas y arenas arcillosas limosas, teniendo un comportamiento general como subrasante de excelente a bueno. Por otra parte, Según la norma I.N.V. E-180 - Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería, el suelo corresponde a un limo arenoso de baja plasticidad con indicios de grava (ML).

8.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para el ensayo determinado por la norma I.N.V. E-148 La siguiente grafica refleja los resultados obtenidos en la prueba de CBR que fue realizada en laboratorio a un espécimen en condiciones naturales y sin ninguna alteración de algún tipo de estabilizante.



Figura 8-7 Muestra de material para ensayo de CBR
Fuente: Autores

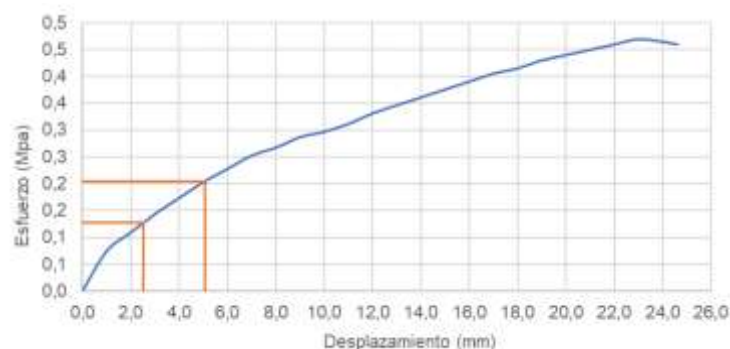


Figura 8-8 CBR Inalterado en estado natural
Fuente: Autores

Obteniendo como resultado, que el suelo en estado natural cuenta con un CBR de 1.98% analizados según la gráfica obtenida en laboratorio.

Para la determinación de la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo (I.N.V. E-142) se presenta la gráfica donde se relacionan los datos de peso unitario seco vs la humedad del suelo. Para el correspondiente cálculo, se procuró llevar el suelo a concentraciones de humedad del 7%, 10%, 13% y 14% que nos facilitarían por medio de la relación humedad-peso unitario seco en los suelos la determinación de los valores deseados.



Figura 8-9 Ensayo Proctor
Fuente: Autores

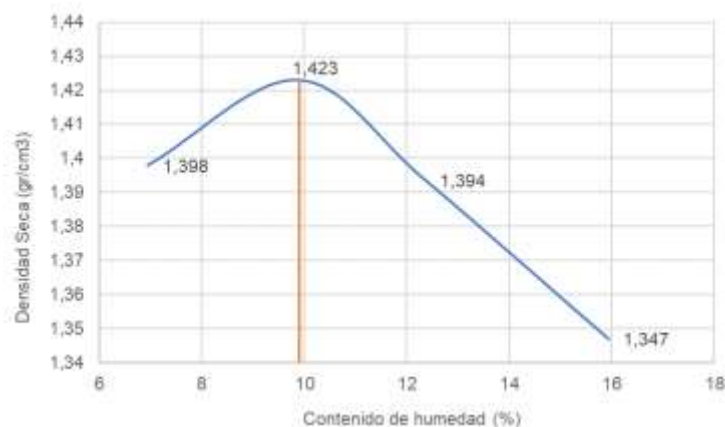


Figura 8-10 Proctor modificado en estado natural
Fuente: Autores

En este caso se obtuvo como resultado una densidad seca máxima de 1.423 (gr/cm^3) con un contenido de humedad del 9.9%

Para el ensayo de compresión inconfiada en muestras de suelos (I.N.V. E-152), la siguiente grafica corresponde a los resultados obtenidos en las probetas inalteradas extraídas en campo sin la aplicación de ningún estabilizante que modificara sus condiciones naturales, obteniendo como resultado un esfuerzo máximo 0.16 MPa, una resistencia no drenada 0.08 MPa y un módulo de elasticidad de 2.18 MPa.



Figura 8-11 Ensayo Compresión Inconfiada
Fuente: Autores

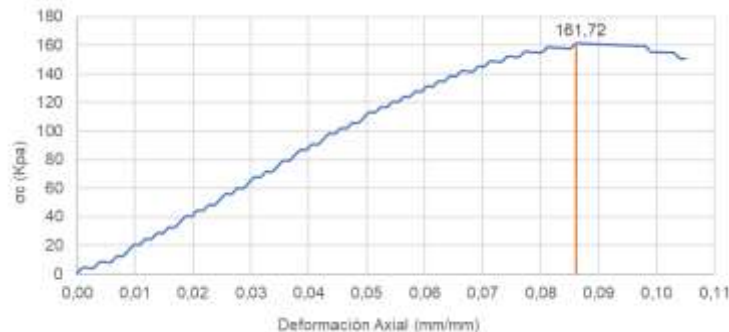


Figura 8-12 Compresión inconfiada suelo natural
Fuente: Autores

9. ETAPA 2 (CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR ESTABILIZADO)

A continuación, se presentan los resultados de los laboratorios realizados pasado el periodo de maduración de 20. La determinación de las cantidades correspondientes a las dosis de estabilizante se presenta a continuación.

Tabla 9-1 Dosificación

Peso específico seco	1.500 gr/cm ³
Peso específico Total	1.649 gr/cm ³
Humedad óptima	9.9%
Peso del agua	0.149 gr/cm ³
Volumen por estabilizar	6 m ³
Peso del agua	891 kg
Arcillas	10.38%
Cal	3.0%
3.00 Kg	
Cemento	2.0%
18.00 Kg	
Silicato de sodio	3.0%
3.00 Kg	
3000 ml	
Aceite sulfonado	0.50%
0.46 Kg	
462.62 ml	

Fuente: Autores

La cantidad de estabilizante a utilizar en cada uno de los tramos de la vía está determinada por el agua de compactación requerida para alcanzar la humedad óptima y el porcentaje de arcillas por el que está compuesto el suelo de la superficie de rodadura ya que este es el material que se busca estabilizar y sobre el cual cada uno de los agentes estabilizantes tiene efecto.



Figura 9-1 Aplicación del estabilizante
Fuente: Autores

9.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Por medio de la determinación de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad para el suelo estabilizado por medio de los ensayos I.N.V. E-125 y I.N.V. E-126, se observa que el material de la vía caso de estudio presenta reducción en su plasticidad.

Tabla 9-2 Características de plasticidad del suelo natural y estabilizado

	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Suelo Natural	37	31	6
Suelo Estabilizado con Aceite Sulfonado	35	31	4
Suelo Estabilizado con Silicato de Sodio	27	26	1
Suelo Estabilizado con Cal	28	28	0
Suelo Estabilizado con Cemento	28	28	0

Fuente: Autores

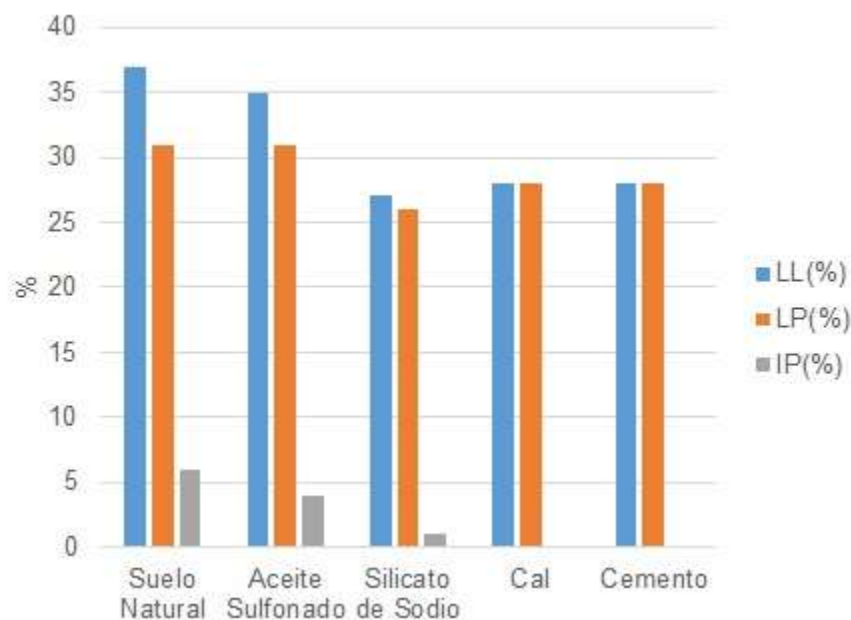


Figura 9-2 Comportamiento de las características de plasticidad del suelo natural y estabilizado

9.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para el ensayo de CBR inalterado, basado en la norma I.N.V. E-148 y con una presión de 0.2" (5.087mm) después de haber pasado los 20 días de maduración de los agentes estabilizantes (aceite sulfonado en un 0.5%, silicato de sodio en un 3%,

cal en un 3% y cemento en un 2%). Se observó que al realizar los gráficos estos no presentaban cambios en su curvatura y por consiguiente no requerían corrección.

Tabla 9-3 CBR del suelo natural y estabilizado
% CBR

Natural	1.98%
Aceite sulfonado	3.88%
Silicato de sodio	4.84%
Cal	8.05%
Cemento	5.51%

Fuente: Autores

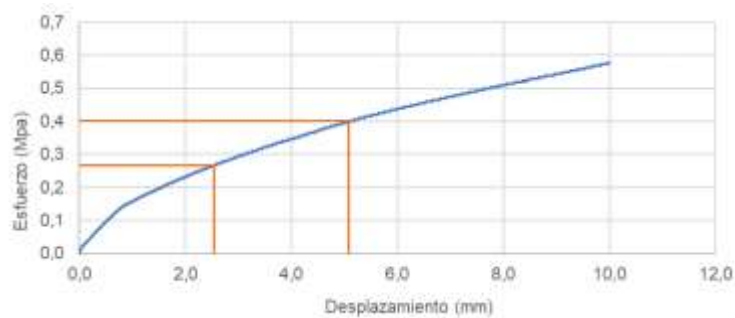


Figura 9-3 CBR Inalterado - Aceite sulfonado
Fuente: Autores

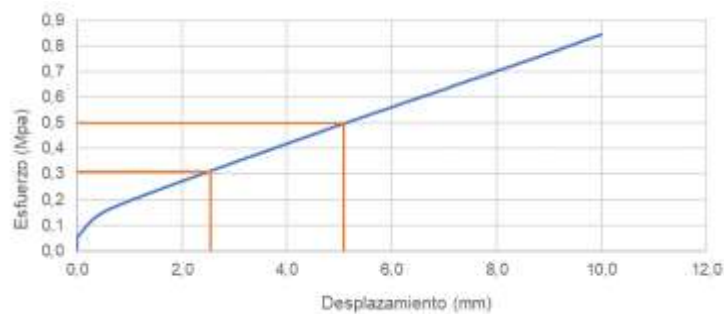


Figura 9-4 CBR Inalterado - Silicato de sodio
Fuente: Autores

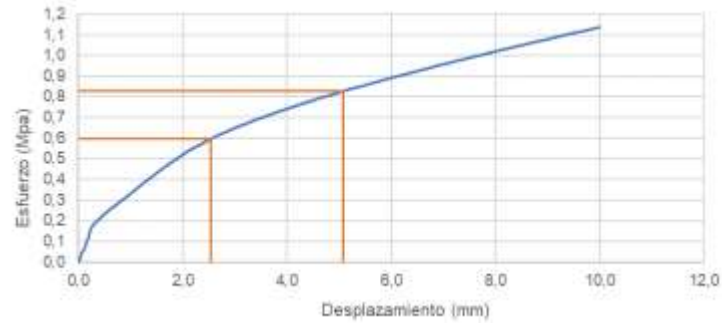


Figura 9-5 CBR Inalterado - Cal
Fuente: Autores

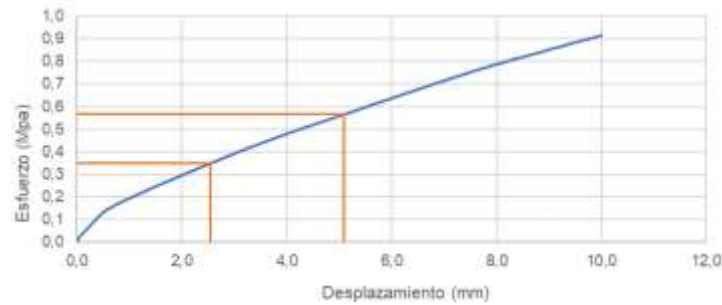


Figura 9-6 CBR Inalterado - Cemento
Fuente: Autores.



Figura 9-7 Valore de CBR inalterado para muestras estabilizadas
Fuente: Autores



Figura 9-8 Ensayo CBR
Fuente: Autores

Para los ensayos realizados en laboratorio de Proctor modificado según la norma I.N.V. E-142 y usando como referencia las humedades de 7%, 10%, 13% y 16% para la elaboración de estos habiendo pasado los 20 días de maduración de los agentes estabilizantes (aceite sulfonado en un 0.5%, silicato de sodio en un 3%, cal en un 3% y cemento en un 2%), se presentan los siguientes resultados.

Tabla 9-4 Proctor modificado del suelo natural y estabilizado

	Densidad Máxima (gr/cm³)	Humedad Óptima (%)
Natural	1,423	9,9
Aceite sulfonado	1,58	20,4
Silicato de sodio	1,602	13,5
Cal	1,514	12,8
Cemento	1,486	11,4

Fuente: Autores



Figura 9-9 Procedimiento ensayo Proctor modificado
Fuente: Autores

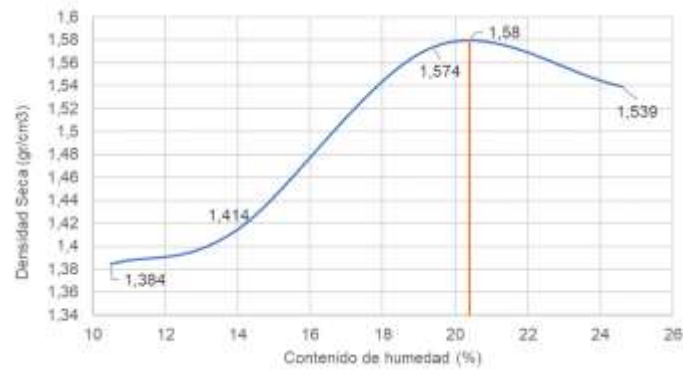


Figura 9-10 Proctor modificado estabilizado con aceite sulfonado
Fuente: Autores

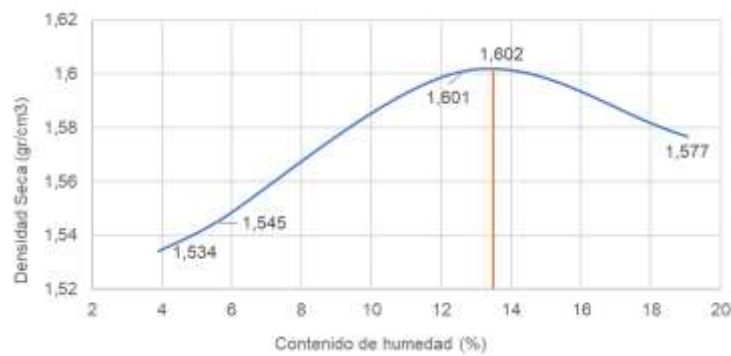


Figura 9-11 Proctor modificado estabilizado con silicato de sodio
Fuente: Autores



Figura 9-12 Proctor modificado estabilizado con cal
Fuente: Autores.

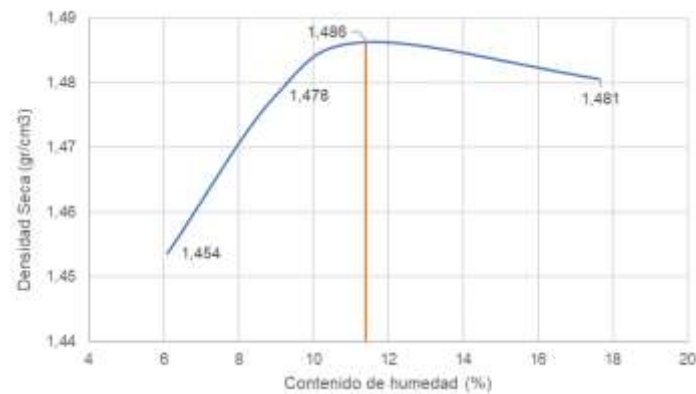


Figura 9-13 Proctor modificado estabilizado con cemento
Fuente: Autores



Figura 9-14 Valores de Proctor modificado para muestras estabilizadas
Fuente: Autores

Para los ensayos realizados en laboratorio de compresión inconfiada basados en la norma I.N.V. E-152 se presenta los siguientes resultados.

Tabla 9-5 Compresión inconfiada del suelo natural y estabilizado

	Esfuerzo máximo (MPa)	Resistencia no drenada (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Natural	0,162	0,081	2,180
Aceite sulfonado	0,189	0,095	2,819
Silicato de sodio	0,120	0,060	1,813
Cal	0,301	0,150	4,422
Cemento	0,197	0,098	4,364

Fuente: Autores

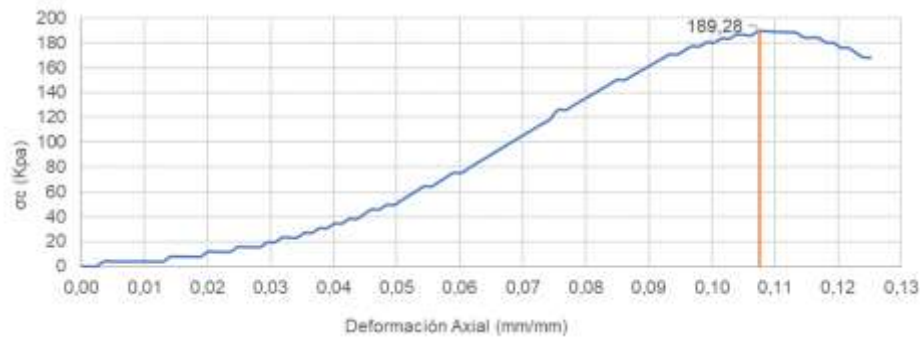


Figura 9-15 Compresión inconfiada estabilizado con aceite sulfonado

Fuente: Autores

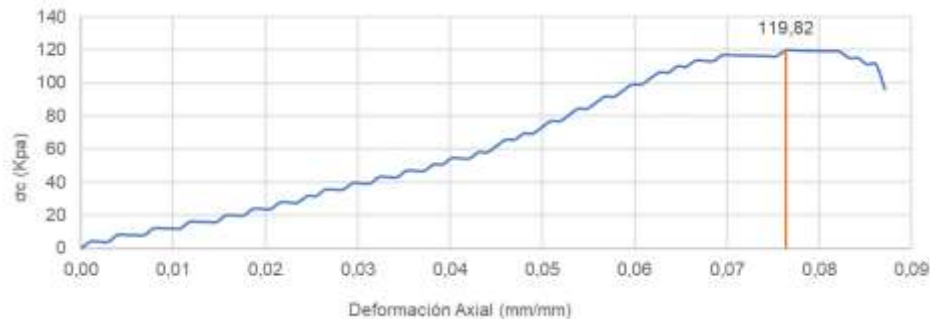


Figura 9-16 Compresión inconfiada estabilizado con silicato de sodio

Fuente: Autores.

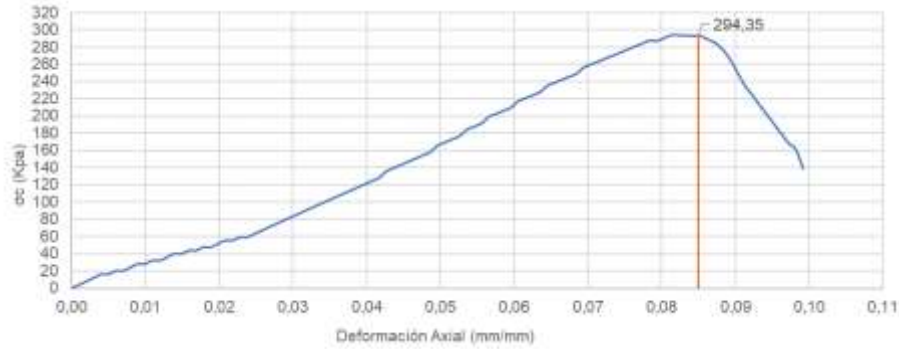


Figura 9-17 Compresión inconfiada estabilizado con cal
Fuente: Autores

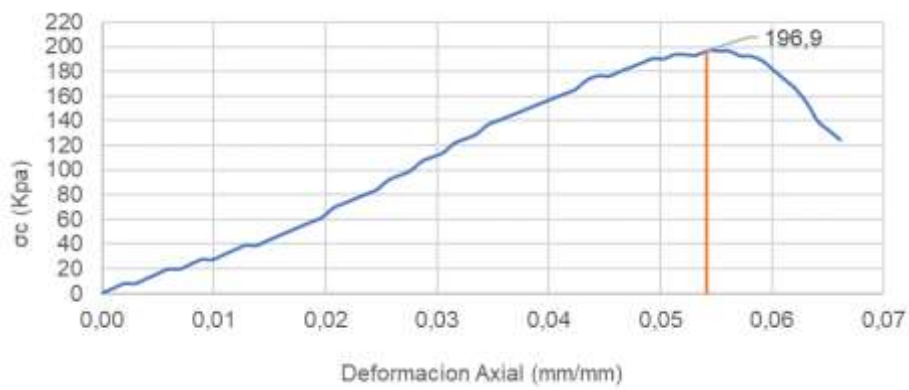


Figura 9-18 Compresión inconfiada estabilizado con cemento
Fuente: Autores



Figura 9-19 Valores de compresión inconfiada para muestras estabilizadas
Fuente: Autores

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La vía caso de estudio no cuenta con sistemas de drenaje como bombeo o cunetas que permitan la evacuación del agua de la superficie de rodadura, además, al ser una vía terciaria está expuesta a los factores ambientales y climáticos; el departamento del Meta y los municipios aledaños a la zona la mayoría de los meses del año están marcados por lluvias significativas. Las lluvias en las vías terciarias promueven su deterioro cuando no se encuentran los elementos geométricos necesarios para que la estructura se mantenga en óptimas condiciones y desafortunadamente este caso se presenta mayoría de las vías pertenecientes a este grupo.

El suelo estabilizado para cada uno de los agentes químicos presentó mejoras en sus características, para el tramo estabilizado con aceite sulfonado se puede observar que existe una reducción en la plasticidad del material, en donde se presenta una disminución en los valores del límite líquido e índice de plasticidad del 5.4% y 33.3% respectivamente. En el caso del silicato de sodio se observó que la plasticidad disminuyó en mayor proporción, siendo este el agente estabilizante que tuvo un mayor efecto sobre el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, presentando reducciones del 27%, 26% y 83.3% respectivamente. La cal y el cemento, al igual que el silicato de sodio presentaron una considerable reducción en la plasticidad del material, pero en este caso ambos estabilizantes redujeron en la misma proporción los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en un 24.3%, 9.3% y 100% respectivamente.

Realizando la comparación del suelo estabilizado con el suelo en condiciones naturales, se evidencia que cada uno de los agentes estabilizantes mejoraron la capacidad de soporte del suelo, el estabilizante con mejores resultados es la cal, en donde la capacidad de soporte del suelo o su CBR aumenta en un 370.11% en comparación con el silicato de sodio, aceite sulfonado y cemento quienes presentaron una mejoría de un 144.57%, 109.78% y 176.09% respectivamente. De la misma forma, los estabilizantes influyeron en el aumento de las propiedades analizadas en el ensayo de Proctor modificado. En este caso, a diferencia del ensayo de CBR el silicato de sodio es la sustancia que presenta un mejor resultado en su densidad seca máxima con un aumento de 12.58% en relación con el aceite sulfonado, cemento y cal los cuales promovieron un aumento del 11.01%, 4.43% y 6.39% respectivamente. Por último, para el ensayo de compresión confinada, al igual que en el ensayo de CBR, la cal es el agente estabilizante que presenta los mejores resultados en cuanto a esfuerzo máximo con un aumento del 81.48% superando los valores encontrados en el aceite sulfonado y cemento los cuales corresponden a 16.67% y 21.6% respectivamente y una disminución en el silicato de sodio 25.93%.

11. RESULTADOS E IMPACTOS

11.1. RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados que se esperan obtener con el desarrollo del proyecto son:

Tabla 11-1 Resultados esperados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Caracterización del material granular	Laboratorio	Objetivo específico 1
Estabilización en campo por tramos, inspección visual y análisis del comportamiento de los estabilizantes	Documento	Objetivo específico 2 Objetivo específico 4
Análisis de las muestras estabilizadas terminado el tiempo de maduración	Documento	Objetivo específico 3
Identificación del agente estabilizante óptimo para el suelo de la región	Documento	Objetivo específico 5
Artículo científico	Publicación en revista de ingeniería	Objetivo específico 5

Fuente: Autores

11.2. IMPACTOS

El suelo es el material más importante en el campo de la Ingeniería Civil, ya que es la fundación de los proyectos que se desarrollan en la búsqueda del desarrollo de la sociedad. En el caso de las vías terciarias, el suelo es el pavimento por el cual los vehículos deben transitar, pero comúnmente esta estructura no presenta las características adecuadas para su funcionamiento. La estabilización del suelo con la ayuda de agentes estabilizantes como: la cal, el cemento, el silicato de sodio y el aceite sulfonado nos permite adaptar el suelo a nuestras necesidades de una manera económica, de fácil adquisición y con un bajo impacto ambiental. Estos últimos factores pueden incentivar a los entes encargados de la supervisión y mantenimiento de estas vías para que se dé una mayor implementación de estos métodos y de esta manera beneficiar el desarrollo de la población beneficiada.

Tabla 11-2 Impactos

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Social	Por medio de la Intervención a la red vial terciaria que abarque los resultados de esta investigación, mejorar la calidad de vida de la	Asegurar que las vías terciarias de la región presenten las características adecuadas para su funcionamiento.	Largo

	población rural e impulsar su economía.		
Ambiental	Los agentes estabilizantes mejoran las propiedades del suelo presente en la zona de intervención, evitando la necesidad de obtener un material diferente que cumpla las características necesarias para el adecuado funcionamiento de la vía.	Disminuir el transporte de altos volúmenes de material de excavación, y el uso de material de préstamo.	Largo
Económico	Los entes gubernamentales responsables del buen estado de las vías terciarias reducirán los gastos en los que incurren para realizar mantenimiento a la red vial que abarque los resultados de esta investigación.	Disminuir los costos de mantenimiento de la red vial terciaria y promover la inversión por parte de los entes gubernamentales en las mismas.	Largo
Técnico	Innovar en los métodos de estabilización de suelos con presencia de arcillas en la región.	Generar una alternativa de estabilización que optimice el proceso y mejore las condiciones del suelo con presencia de arcilla en la región.	Largo
Académico	El desarrollo del presente proyecto favorece el proceso de construcción de conocimientos dentro del campo de la Ingeniería Civil.	Generar nuevos conocimientos que beneficien la práctica de la ingeniería en la región.	Corto

Fuente: Autores

12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

12.1. CONCLUSIONES

La estabilización de suelos es una actividad que tiene como principal objetivo mejorar las condiciones tanto químicas como físicas de un suelo existente, adicionando diferentes tipos de agentes siendo más comunes la cal y el cemento por las mejoras que presentan al poco tiempo de su aplicación en la rasante y subrasante para obtener las ventajas de la estabilización como lo son, aprovechar los suelos de baja calidad, evitar la extracción y rellenos con nuevos materiales, reducir la sensibilidad del agua en el material, aumentar la resistencia y obtener una base firme y sólida para una estructura de pavimento. Las investigaciones con fines de analizar y determinar cuál es la mejor alternativa para mantener la integridad de las vías terciarias en nuestro país son pocas, de acuerdo con la información recolectada para el desarrollo de la presente investigación son muy pocos los estudios que involucran la estabilización del material en campo y la estabilización de suelos con presencia de arcillas. Producto de este proyecto, después aplicar directamente en campo los agentes estabilizantes en una vía con las condiciones predominantes de una carretera perteneciente a la red vial terciaria de la región de la Orinoquía y de analizar los ensayos bajo especificaciones INVIAS 2013, se concluyó:

El suelo presente en la vía caso de estudio, a través de los ensayos de caracterización y basados en la norma I.N.V E-180 (Sistema AASHTO), pertenece al grupo A-2-4 (3) y teniendo en cuenta la norma I.N.V E-181 (SUCS) adquiere el nombre de limo arenoso de baja plasticidad con indicios de grava (ML) teniendo un comportamiento general como subrasante de excelente a bueno. A través su estabilización con aceite sulfonado, silicato de sodio, cal y cemento con porcentajes de dosificación del 0.5%, 3%, 3% y 2% respectivamente, basados en los fabricantes y en estudios previamente realizados, se registró una mejoría en las características físicas y mecánicas del suelo, por medio de los ensayos de caracterización bajo las especificaciones INVIAS. Se puede observar que todos los estabilizantes producen un efecto positivo, ya que mejoran las propiedades o características del suelo en factores como la resistencia o la reducción de la plasticidad, en donde la cal y el cemento reducen este último factor en la misma proporción, presentando reducciones del 24.3%, 9.3% y 100% en los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad respectivamente.

La cal es el agente estabilizante que permite obtener mejores resultados en el comportamiento mecánico del suelo, ya que evaluando los resultados de los ensayos de CBR inalterado en cada uno de los tramos y realizando la comparación del suelo encontrado en condiciones naturales, se evidencia que promovió un aumento en el CBR del suelo y mejoro la capacidad de soporte respecto al CBR natural en un 370.11%. Con respecto a los ensayos realizados de compresión confinada se puede volver a evidenciar que la cal es el estabilizante que presenta los mejores resultados en cuanto a esfuerzo máximo, causando un aumento del 81,48% respecto a los valores encontrados en el suelo natural, pese a que en los

resultados obtenidos del ensayo de Proctor modificado la cal produjo un aumento de la densidad seca en un 6.4% ocupando una tercera posición entre los agentes estabilizantes, el silicato de sodio fue la sustancia que manifestó un mejor resultado en su densidad seca máxima con un aumento de 12.58%.

La cal como agente estabilizante, favorece en mayor proporción las propiedades del suelo presente en la zona caso de estudio, es decir, presenta una mayor efectividad en el suelo tratado, superando los resultados obtenidos con las otras tres sustancias y promovió un aumento significativo de las propiedades actuales del suelo que conforma la vía caso de estudio, además, el costo aproximado para la estabilización por metro cuadrado es de 50 COP, valor que se encuentra por debajo del precio de estabilizar el suelo con cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado siendo 153 COP, 516 COP, 771 COP, respectivamente (precios acorde al proveedor).

Debido a las condiciones climáticas de lluvia que predominaron en la zona de estudio durante el periodo de desarrollo del presente proyecto, días anteriores a las visitas de campo que fueron realizadas para la inspección de la zona de estudio, extracción de muestras, estabilización del suelo, no fue posible llevar a cabo las pruebas para observar la producción de polvo causada por el paso de los vehículos antes y después de realizar el proceso de estabilización e impidiendo establecer si cada uno de los estabilizantes pudo haber generado mejorías en esta característica para el suelo presente en la zona de estudio.

12.2. TRABAJOS FUTUROS

Para futuros trabajos se recomienda analizar el comportamiento de la cal, mediante un análisis de caracterización física y comportamiento del suelo incluyendo nuevamente los ensayos de laboratorios realizados en el presente proyecto, con el fin de determinar la dosis óptima de cal para lograr que brinde quizá un mejor resultado en los diferentes ensayos y poder disponer de esta información como referencia para futuros trabajos e intervenciones que involucren el mismo tipo de suelos.

Realizar la estabilización implementando un sistema de aplicación diferente, con el objetivo de conocer si los usos de metodologías diferentes logran brindar mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. S. Amaya, «Colombia tiene un promedio de 94% de todas sus vías terciarias en mal estado,» *La Republica*, vol. 1, n° 1, p. 2, 2019.
- [2] DNP, «Plan Maestro De La Orinoquia,» Departamento nacional de planeación, Colombia, 2016.
- [3] ARCGIS, «Servicio geológico colombiano,» Arcgis, 12 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=56f650f4456e4c95b9358e973944cf10&extent=-87.858,-6.6949,-55.4043,14.107>.
- [4] A. C. Leal Acosta, *La economía local creció 3,3% en 2019 frente a 2018 y la suma total alcanzó \$1.062 billones. El financiero también fue de los que más aportaron*, Bogotá, 2020.
- [5] L. Narvaez, «vías terciarias: motor del desarrollo económico rural,» *Revista de ingeniería*, n° 45, pp. 80-87, 2017.
- [6] J. F. Camacho Tauta, O. J. Reyes Ortiz, C. Mayorga Antolínez y D. F. Mendez G., «evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 16, n° 2, pp. 45-53, 2006.
- [7] W. A. Valle Areas, «Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos,» Universidad politécnica de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [8] B. M. Das, «Principios de Ingeniería de Cimentaciones.,» de *Principios de Ingeniería de Cimentaciones.*, Mexico D.F, Thomson Editores, 2001, p. 862.
- [9] W. Chavarro Acuña y C. Molina Pinzón, «evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de Tránsito,» universidad católica de Colombia, Bogotá, 2015.
- [10] J. C. Galindo Torres y E. A. Avellaneda Moreno, «análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos. Como trabajo de investigación para optar el título de ingeniero civil,» Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, 2016.
- [11] J. Gómez Tapias, N. E. Montes Ramírez, Á. Navia Guevara y H. Diederix, «Mapa Geológico de Colombia 2015,» Servicio Geológico Colombiano, Bogotá D.C., 2015.
- [12] Calcinor, «Calcinor,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-desuelos/>.
- [13] J. E. Páez Ruano y L. F. Díaz Cruz, «influencia de la adición de aceite sulfonado en la respuesta dinamica a pequeñas deformaciones de un material granular arcilloso,» Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C., 2019.
- [14] E. T. Maty, «scribd,» 03 06 2018. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/368301088/Definicion-Del-Suelo-Desde-EIPunto-de-La-Ingenieria-Civil>.

- [15] Diatom, «Diatom,» Diatom, 20 05 2011. [En línea]. Available: <https://diatom.com.br/es-ES/productos/silicato/silicato-de-sodio>. [Último acceso: 02 08 2020].
- [16] A. P. Olaya Bulla, «Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Bucaramanga, Santander, 2018.
- [17] O. J. Caballero Chaves, «Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2017.
- [18] W. Y. Pérez Ardila y J. Torres Valenzuela, «Estudio de la cal y el cloruro de sodio como agentes estabilizadores de suelos arcillosos en propiedades como la resistencia y expansividad,» Universidad de Santander, Bucaramanga, Santander, 2015.
- [19] P. Garnica Anguas, A. Pérez Salazar, J. A. Gómez López y E. Y. Obil Veiza, «Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terretres,» Queretaro, Mexico, 2002.
- [20] Nacional Lime Association, «manual de estabilización del suelo tratado con cal,» Nacional Lime Association, 2004.
- [21] ARGOS, «360 en concreto,» [En línea]. Available: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/caracteristicas-del-suelo-cemento-que-y-para-que>. [Último acceso: 29 09 2020].
- [22] EstaVias, «Aceite Naftalenico Sulfonado Estabilizador Electroquímico de Arcillas,» EstaVias, Bogotá.

ANEXOS

ANEXO A
DESCRIPCIÓN VISUAL

ANEXO B
CONTENIDO DE HUMEDAD

ANEXO C
ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS
DEL SUELO

ANEXO D
DOSIS

ANEXO E
PROCTOR

ANEXO F
CBR

ANEXO G
COMPRESIÓN INCONFINADA