

**ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA CENIZA DE LOCACIONES  
PETROLERAS EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS.**

**AUTOR:**

**GERMAN ANDERZON PEÑA HERNANDEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

**ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA CENIZA DE LOCACIONES  
PETROLERAS EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS.**

**GERMAN ANDERZON PEÑA HERNANDEZ**

**Trabajo de grado para optar el título de magister en ingeniera civil.**

**DIRECTOR(a):**

**Ing. MSc. LUZ MARINA TORRADO GÓMEZ**

**MAGISTER EN GEOTECNIA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2018**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado.**

---

**Firma del jurado.**

---

**Firma del jurado.**

Bucaramanga, 10/05/2018

## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi nobleza, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos por estar siempre presentes en cada momento de mi vida, acompañándome y darme fuerzas para dar lo mejor de mí.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”. Ellos siempre en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimiento es un sentimiento de gratitud, que en ocasiones se vuelve la necesidad de decirlo para reconocer un gesto amable de otra persona que es consecuencia de haber recibido algo que esperaba o que necesitaba. Por esta razón la palabra agradecimiento son para esas personas, que siempre estuvieron a mi lado y que ahora están en mi corazón, porque cada una de ellas fueron piezas fundamentales en cada paso que he dado.

Agradeciendo siempre a Dios por darme la vida y razones para vivir, quien le debo todo, porque sus decisiones siempre han sido las correctas para dar un paso adelante o ya sea para aprender de ese paso que se dio así atrás.

Por darme oportunidades laborales, por darme la oportunidad de aprender cada día más, por conocer personas trabajadoras que sol a sol están con nosotros trabajando y sacando los proyectos adelante, a los ingenieros que son superiores y nos enseñan a ser un ingeniero honesto y trabajador.

Agradecimiento a la Universidad Pontificia Bolivariana Por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesión tal hermosa con es la ingeniera civil, por darme la oportunidad de especializarme en una maestría en ingeniería civil con énfasis en suelos y recursos hídricos, por conocer a la ingeniera Luz Marina Torrado el cual fue mi directora de tesis y me enseñó muchas cosas fundamentales para ser un excelente profesional a la Ingeniera María Fernanda Serrano que fue una de las participes que me seleccionaron para iniciar la maestría primera corte.

Por darme una familia que cada vez es más grande donde su bendición siempre es su nobleza, porque me enseñaron a ser un hombre de bien, humilde y noble. Que siempre están para mí dónde quiera que estén, mis padres German y Orizaba porque son mis modelos de vida, mis hermanos Edgar y Melisa, porque en ellos veo reflejado las palabras humildad y nobleza que me alegran la vida solo por ser ellos mismos.

## TABLA DE CONTENIDO

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Objetivo General:.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos:.....</b>	<b>14</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>4. IMPACTO ESPERADO .....</b>	<b>16</b>
<b>5. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1 GENERALIDADES DE LAS ESTABILIZACIONES.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1.1. Razones Para Estabilizar Un Suelo.....</b>	<b>19</b>
<b>5.1.2. Propiedades Afectadas con la Estabilización.....</b>	<b>20</b>
<b>5.1.3. Tipos De Estabilización.....</b>	<b>20</b>
<b>5.1.4. Proceso General de la Estabilización.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1.5. Sistemas de Estabilización.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1.6. Estabilización de Suelos con Cal.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1.7. Estabilización con Asfalto. (ABc, 2007) (Rojas Esperanza &amp; Camargo Sanchez, 2004).....</b>	<b>25</b>
<b>5.1.8. Estabilización con Ácido Fosfórico y Fosfato. (S.L, 2009 ) (Rojas Esperanza &amp; Camargo Sanchez, 2004) .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1.9. Estabilización con Cloruro de Sodio (Rojas Esperanza &amp; Camargo Sanchez, 2004).....</b>	<b>26</b>
<b>5.1.10. Estabilización con Sulfato de Calcio (yeso) y Cloruro de Calcio.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1.11. Estabilización con hidróxido de sodio (soda caustica) .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1.12. Estabilización con Resina y Polímeros.....</b>	<b>27</b>
<b>5.2 REVISIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.1 Características de los Tipos de Estabilizadores a Utilizar .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2 Estabilizadores de Suelos que se van a Utilizar .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2.2.1 Ceniza proveniente de locaciones petroleras. ....</b>	<b>29</b>
<b>5.2.2.2 Donde se van a utilizar con éxito .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.2.3 Características de los Suelos Donde se Utilizarán los Estabilizantes.....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 COMPOSICIÓN DE LA ARCILLA .....</b>	<b>31</b>

5.3.1	Minerales Arcillosos .....	32
6.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	38
.....		38
6.1	Revisión Bibliográfica del Tema a Investigar. ....	39
6.2	Búsqueda de suelos con propiedades deficientes en sectores de Bucaramanga y el área metropolitana para utilizar en el estudio .....	40
6.3	Ensayos de Laboratorio Realizados .....	40
7.	<b>ESTUDIOS REALIZADOS</b> .....	46
7.1	<b>CLASIFICACION DE LOS SUELOS</b> .....	46
	<b>CARACTERIZACION GRANULOMETRICA DEL SUELO</b> .....	46
7.2	<b>LIMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO (LIMITE DE ATTERBERG)</b> .....	48
	7.2.1 Límite líquido.....	49
	7.2.2 Límite plástico.....	50
	7.2.3 Metodologías de clasificación para muestras de suelo ensayado. ....	51
	7.2.4 Clasificaciones de suelos AASHTO. ....	51
	7.2.5 Clasificaciones de suelos USCS.....	52
7.3	<b>LIMITE DE CONTRACCIÓN</b> .....	54
7.4	<b>ENSAYO DE COMPACTACION</b> .....	55
7.5.	<b>COMPACTACION CBR</b> .....	57
7.6	<b>CBR PENETRACION</b> .....	58
7.7	<b>ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE</b> .....	58
7.8.	<b>EXPANSIÓN DEL SUELO Y EXPANSION LIBRE. (INVIAS, 2013)</b> .....	60
6.1.	<b>RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ZONA LAGOS DEL CACIQUE, GRAN RESERVA</b> .....	60
6.2.	<b>RESULTADOS DE GRANULOMETRIA Y PROPIEDADES INDICE</b> .....	60
6.3.	<b>RESULTADOS DEL LIMITE DE ATTERBERG</b> .....	61
6.4.	<b>RESULTADOS LIMITE DE CONTRACCION</b> .....	62
6.5.	<b>RESULTADOS PROCTOR MODIFICADO</b> .....	63
6.6.	<b>RESULTADOS COMPACTACION CBR</b> .....	64
6.7.	<b>RESULTADOS CBR PENETRACION</b> .....	65
6.8.	<b>RESULTADOS COMPRESION SIMPLE</b> .....	65
6.9.	<b>RESULTADOS PRESION EXPANSION Y EXPANSION LIBRE</b> .....	66

6.10.	Resultados promedios de los suelos analizados del sector la <b>GRAN RESERVA, LAGOS DEL CACIQUE, Santander</b> , suelo virgen y suelos contaminados con 2%, 5% y 7% de ceniza de locaciones petroleras. ....	67
7.	<b>RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ZONA VEREDA CASUMAN, LEBRIJA, SANTANDER</b> .....	67
7.1.	<b>RESULTADOS DE GRANULOMETRIA Y PROPIEDADES INDICE</b> .....	67
	Resultados promedios de la clasificación de los suelos de la <b>vereda casuman – Lebrija, Santander</b> , contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%. ....	67
7.2.	<b>RESULTADOS DE LOS LIMITES DE ATERBERG</b> .....	68
7.3.	<b>RESULTADOS DE LOS LIMITES DE CONTRACCION</b> .....	69
7.4.	<b>RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADOS</b> .....	70
7.5.	<b>RESULTADOS COMPACTACION CBR</b> . ....	71
7.6.	<b>RESULTADOS CBR PENETRACION</b> . ....	72
7.7.	<b>RESULTADOS COMPRESION SIMPLE</b> .....	72
7.8.	<b>RESULTADOS PRESION EXPANSION SIMPLE</b> .....	73
7.9.	Resultados promedios de los suelos analizados del sector la <b>vereda casuman, Lebrija, Santander</b> , suelo virgen y suelos contaminados con 2%, 5% y 7% de ceniza de locaciones petroleras. ....	74
8.	<b>CONCLUSIONES</b> .....	75
9.	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	80
10.	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	81
11.	<b>WEB GRAFÍA</b> .....	82



**RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** ANALISIS DE LA INCIDENCIA DE LA CENIZA DE LOCACIONES PETROLERAS EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS

**AUTOR(ES):** German Anderzon Peña Hernandez

**PROGRAMA:** Maestría en Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Luz Marina Torrado Gomez

**RESUMEN**

En la Investigación realizada \\\"ANALISIS DE LA INCIDENCIA DE LA CENIZA DE LOCACIONES PETROLERAS EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS\\\" fue alternativa de aplicación para el mejoramiento de suelos expansivos, utilizando la ceniza como agente estabilizante, Aprovechando este residuo proveniente de un proceso de desorción térmico. dando resultados positivos y dando opciones de mejorar sus conclusiones.

**PALABRAS CLAVE:**

expansivos, suelos, agente, ceniza, estabilizante.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

**GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** ANALYSIS OF THE INCIDENCE OF THE ASH OF PETROLEUM LOCATIONS IN THE IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SOILS

**AUTHOR(S):** German Anderzon Peña Hernandez

**FACULTY:** Maestría en Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Luz Marina Torrado Gomez

**ABSTRACT**

In the research carried out "ANALYSIS OF THE INCIDENCE OF THE ASH OF OIL LOCATIONS IN THE IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SOILS" was an alternative application for the improvement of the expansive soils, using the ash as a stabilizing agent, taking advantage of this state coming from a process of Desorption giving positive results and giving options to improve their conclusions.

**KEYWORDS:**

expansive, soils, agent, ash, improvement.

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## INTRODUCCIÓN

En el estudio de investigación se analizó los procesos de estabilización de los suelos con cal y cemento, se aplicó el mismo procedimiento de ensayos y procesos de manejo para el control de las mezclas con diferentes porcentajes de ceniza, se realiza un enfoque más profundo de investigación de los suelos expansivos corresponden a lugares de precipitaciones y humedades altas. El estudio está enfocado en la ciudad de Bucaramanga provenientes de los siguientes sectores: barrió el cacique y municipio de Lebrija, estos son sitios estratégicos para el desarrollo del proyecto.

En el estudio de investigación se realizó la caracterización granulométrica a los suelos mezclados con la ceniza y suelos vírgenes, con base a la norma de la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (INV E-123-13.) Por otra parte, se inició con el lavado de la muestra por el tamiz número 200, consecutivamente se secó al horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante mínimo 24 horas, al siguiente día se retiró del horno e iniciamos con el tamizado.

Luego se tuvieron las muestras secas se eligieron tamices para el tipo de suelo, siendo consecutivo en su orden, siendo así se realizar el tamizado respectivo. tomando la masa del material retenido en cada tamiz y con base a los datos adquiridos se inicia los cálculos y llenado de los formatos de resultados y así se analiza su clasificación.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de la **zona lagos de cacique, gran reserva, Santander** se realizó los promedios de la clasificación de los suelos, contando con la clasificación de suelo contaminado, suelo sin contaminación al 2%, 5% y 7%. También se realizaron ensayos de la **vereda casuman- Lebrija Santander** con una clasificación de suelo sin contaminación, y suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Los suelos o partículas minerales, han sido en nuestro entorno un elemento importante para el método constructivo de vías, taludes, rellenos, etc. Adicionalmente los suelos son materiales con comportamientos muy variados dependiendo su grado, desarrollo y sus características, según su origen. Los principales usos de los suelos corresponden al sector constructivo, pero en muchas ocasiones estos suelos presentan propiedades mecánicas

desfavorables para su uso, por lo cual recobra importancia la estabilización de estos mismos a través de algunas técnicas como, por ejemplo: cemento, cal, asfalto, ceniza, ácido fosfórico y fosfato, entre otras. (REBASA, 2013)

Tradicionalmente para la estabilización de los suelos se recurre al uso de (cal y cemento portland) puesto que estos materiales se comportan como unos de los estabilizadores más fuertes con que se cuentan en la actualidad, se ha encontrado que con el método tradicional que es (compactación T.N – subrasante de blanco – base hidráulica – impregnación y liga – carpeta asfáltica) se obtienen capas de hasta 85 cm de materiales compactados, mientras que con el método estabilización con cal (Arcilla y arena fina limos estabilizados con oxido de calcio al 6% con el peso seco suelto del material – Base hidráulica – impregnación y liga – carpeta asfáltica) se obtienen capas de 36 cm de materiales compactados, lo que trae como consecuencia una disminución de más del 50% que con un método tradicional. Lo mismo suele suceder en la estabilización de los suelos con el cemento portland. (REBASA, 2013)

Estas pueden ser unas de las desventajas en la aplicación de estas estabilizaciones con cal y cemento, (problemas de seguridad en su aplicación, la hidratación requiere de un cuidado especial, no es práctico para suelos húmedos, los costos de aplicación son altos, el peso volumétrico lo hace que sea más costoso). (REBASA, 2013)

Actualmente las cenizas provenientes del sector de hidrocarburos se disponen a cielo abierto, provocando graves daños en la capa vegetal. El uso de estos residuos en la construcción de obras civiles, significaría una contribución al equilibrio ambiental. Es por esto que para el presente trabajo se tiene como propósito implementar el uso de cenizas provenientes de locaciones petroleras para estabilizar suelos de baja capacidad portante (específicamente arcillas), teniendo en cuenta que la composición química de la ceniza se asemeja en algunas propiedades al cemento. Se desea obtener resultados similares o mejores a los encontrados en las estabilizaciones realizadas con este material. Sin embargo, en eventos de precipitación, el agua que se logra infiltrar en las capas inferiores de un pavimento remueve las partículas finas que contienen los agregados provocando pérdida de la capacidad de soporte de la subrasante. Estas aguas posteriormente continúan el ciclo hidrológico, ya sea convirtiéndose en aguas subterráneas o en escorrentía superficial, debido a esto, es obligación sin importar el agente estabilizante que se utiliza, y en este caso preciso, conociendo el origen de la ceniza, verificar si los fluidos lixiviados por la subrasante presentan contenidos contaminantes para el medio ambiente. (Mateus, 2015)

Otras de las alternativas aplicables para el mejoramiento de suelos expansivos corresponden al uso de cenizas. En la actualidad, la industria petrolera genera ceniza proveniente del proceso de desorción térmica de las aguas de explotación,

produciendo alrededor de 25 toneladas de ceniza (Serrano, 2013), cuya disposición causa graves problemas ambientales, como lo son la contaminación de la atmósfera, impacto en los ecosistemas y principalmente efectos adversos que puede condicionar en la salud. Por lo tanto, se propone la alternativa de uso de la ceniza de locaciones petroleras para ofrecer una opción en el uso de este residuo y analizar la eficiencia en estabilización de los suelos expansivos mediante el uso de éstas ceniza.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Colombia, Santander se presentan fallas en los suelos asociados principalmente a la expansividad y a la humedad, además existen precipitaciones altas y no hay control de recolección de aguas, éstas son acumuladas dentro del suelo presentando un proceso de deterioro en la obra. Los suelos se encuentran fracturas, fisuras de las vías y derrumbes de taludes. El desuso y no aprovechamiento de las cenizas o residuo sólido producto de la industria petrolera cobra importancia en las técnicas de estabilización de los suelos con ceniza aplicable en suelos expansivos.

Los sitios donde se requiere realizar un enfoque más profundo de investigación de los suelos expansivos corresponden a lugares de precipitaciones y humedades altas. El estudio está enfocado a la ciudad de Bucaramanga provenientes de los siguientes sectores: barrió el cacique y municipio de Lebrija, estos son sitios estratégicos para el desarrollo del proyecto.

Dentro de las alternativas para el mejoramiento de suelos expansivos se plantea el uso de cenizas. En la actualidad la industria petrolera genera ceniza proveniente del proceso de desorción térmica de las aguas de explotación, produciendo toneladas de residuo sólido, cuya disposición causa graves problemas ambientales. Por lo tanto, se propone la alternativa de uso y aprovechamiento de la ceniza de locaciones petroleras para ofrecer una opción en el uso de la ceniza y analizar la eficiencia en estabilización de los suelos expansivos mediante las cenizas, cal y cemento.

## 2. OBJETIVOS

### 1.1 Objetivo General:

- Evaluar los suelos expansivos mejorados con cenizas provenientes del proceso de desorción térmica de lodos de locaciones petroleras.

### 1.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar las muestras de los suelos seleccionados para la determinación de los suelos expansivos sin utilizar ningún estabilizante.
- Caracterizar las muestras de los suelos arcillosos expansivos usando el estabilizante en este caso “**ceniza**” al 2%, 5% y 7% utilizando las técnicas de los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, logrando una teoría esperada para la estabilidad volumétrica.
- Evaluar y comparar el comportamiento mecánico de suelos mejorados al 2%, 5% y 7% de cada uno de los suelos que fueron seleccionados.
- Evaluar con cual porcentaje de “**ceniza**” se encuentran resultados positivos a la estabilidad de los suelos.
- Proponer alternativas de solución para el aprovechamiento de la ceniza con base a los resultados del proyecto.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Con base al proyecto de investigación realizado con la ceniza o residuo sólido producto de la industria petrolera y mediante un proceso de desorción térmica de las aguas de explotación. Esta aplicarla a suelos que sufren fallas de expansión y estabilidad. También se evidencia las pocas técnicas de estabilización de suelos, el desaprovechamiento del recurso, cenizas acumuladas y los costos.

Por otra parte, se observó su composición físico-química de la ceniza con el fin de saber los componentes contaminantes que tienen al momento del proceso. Se especula que la ceniza tiene las mismas características y componentes de la cal y el cemento, que los hacen grandes estabilizadoras de suelos expansivos e inestables.

En el estudio de investigación se analizó los procesos de estabilización de los suelos con cal y cemento, se aplicó el mismo procedimiento de ensayos y procesos de manejo para el control de las mezclas con diferentes porcentajes de ceniza.

Una vez finalizado el proceso de estudio correspondiente a las propiedades mecánicas de los suelos estabilizados, se realizó un proceso teórico-práctico con bases a todas las mezclas. Además, se ejecutó una práctica de absorción de agua en cada una de las muestras observando así el comportamiento físico-químico de cada uno de los residuos descargados. Con el objetivo de analizar la calidad de dichos residuos. Las muestras de agua contaminada se estudiaron y se analizaron los resultados y así se realizó el proceso químico se puede mejorar la calidad de los suelos.

El estudio sirve en el ámbito científico para el aprovechamiento de los materiales residuales de un proceso térmico. Sus componentes químicos de los residuos que se filtran en aguas subterráneas llegando a ríos, los cuales ocasionan

contaminación, causando enfermedades a los seres humanos y animales, por esta razón se analizó que el residuo mejora las propiedades de los suelos y es una alternativa que favorece el medio ambiente, económico y social.

#### **4. IMPACTO ESPERADO**

La sensibilización de los futuros profesionales sobre los problemas que atañen a su entorno es una labor adelantada por los medios de comunicación y por las redes sociales. Sin embargo, es fundamental el papel del docente para orientar a los estudiantes sobre las mejores prácticas asociadas al ejercicio profesional con las cuales se proporcionen soluciones técnicamente viables y económicamente factibles a distintas problemáticas presentadas en el medio.

Este trabajo se centra en la presentación de la estructura metodológica diseñada para la divulgación del conocimiento que se adquirió con las pruebas mecánicas asociadas a la valoración de la ceniza de locaciones petroleras para estabilización de suelos.

Verificar la viabilidad de estudio del suelo con ceniza mejorando las condiciones del suelo y sus componentes mecánicas y el uso de un residuo extraído del proceso de desorción térmica de las aguas de explotación provenientes de locaciones petroleras, la profundización de este proceso de materializar la ceniza como estabilizador al igual que la cal y el cemento también se tiene gran importancia en los impactos ambientales.

La ceniza volante proveniente de calderas de carbón como material principal de producción de energía y las demandas del consumidor aumentan las cantidades de ceniza. La ceniza es un producto compuesto principalmente de sílice de color canela donde sus partículas son esféricas, la ceniza volante contiene aproximadamente una gran parte de mercurio, donde al momento de realizar contacto con las aguas subterráneas, los peces están contaminados al igual que los animales y los seres humanos que tengan acceso a estas fuentes.

Por otra parte, se espera que la ceniza que se va a trabajar en el proyecto de investigación para el mejoramiento de suelos con la ceniza provenientes de locaciones petroleras, también contenga cantidades de mercurio donde se realizara un estudio para el control de este contaminante.



Por otro lado, al ejecutar en mayor escala las técnicas mejoradas, se corre el riesgo de que no se registren los mismos resultados que al nivel de investigación. En este caso se ha considerado el monitoreo y evaluación permanente de los resultados para realizar sobre la marcha, en conjunto con el proyecto de Investigación, las adecuaciones y modificaciones que se requiera, manteniendo en su mejor nivel los resultados para los seres humanos y los animales.

Finalmente, si bien el programa de medio ambiente y sus proyectos son los que mayores efectos positivos pueden tener en el medio ambiente regional, también son los que requieren de una mayor modificación de las políticas y prioridades nacionales anteriores, para poder alcanzar los resultados previstos.

## **5. MARCO TEÓRICO**

### **5.1 GENERALIDADES DE LAS ESTABILIZACIONES**

Desde la antigüedad existía ya la estabilización de variados tipos de suelos para cimientos, siendo los métodos empleados muy primitivos. A través de los años han desarrollados gran variedad de especificaciones técnicas para seleccionar los materiales adecuados para la construcción de obras civiles y obtenidos a costos razonables en relación con beneficios de la obra.

Considerando que hoy en día los materiales de construcción que cumplen con esos requisitos necesarios, se han vuelto escasos y muy costosos para conseguir, el ingeniero civil a la hora de tratar con suelos no adecuados para sus obras de ingeniería, por no cumplir con los requisitos especificados contempla las siguientes opciones. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010).

- Admitir el suelo natural y efectuar el diseño con las características propias del suelo.
- Resolver total o parcialmente el suelo y sustituirlo por el suelo de condiciones adecuadas.
- Alterar o cambiar las propiedades mecánicas del suelo mediante un método de estabilizaciones, el cual permita adecuar sus propiedades a las condiciones del proyecto.

Esta última alternativa constituye el objetivo general de la estabilización de suelos. Este proceso comienza con la caracterización de los suelos estado natural, seguido por la formulación del proceso que mejore sus propiedades para el que se cumplan las especificaciones de la obra.

Cabe señalar que el uso de materiales in situ es una alternativa que ofrece la ventaja de la reducción de tiempo de construcción y costos de acarreo; sin embargo, la mayoría de los materiales in situ no proporcionan una cimentación adecuada sin un cierto tratamiento y considerado que es muy costoso remover el material para reemplazarlo por otro, es ahí cuando la estabilización del suelo adquiere importancia dentro de la realización de un proyecto determinado.

Las propiedades físico – mecánicas del suelo se pueden alterar de muchas maneras, como pueden ser por medio mecánicos, drenajes, medio eléctricos, cambio de temperatura, o adiciones de agentes estabilizantes, se debe tener cuidado siempre con la gran diversidad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos.

También se debe tener una clara evaluación de las propiedades de que se desea mejorar, decisión correcta, acerca de la conveniencia de la estabilización. Entre las principales propiedades de unos suelos que interesan a unos ingenieros podemos contar a las siguientes. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

- Compresibilidad
- Resistencia mecánica
- Permeabilidad
- Estabilidad volumétrica
- Durabilidad.

Por otro lado, el uso de la estabilización de suelos no es solamente como una medida de correctiva sino también como medida preventiva o de seguridad contra condiciones adversas que se desarrollen durante la construcción o durante la vida de la estructura.

Para el proceso para estabilizar suelos se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Diagnóstico de las propiedades de los suelos de proceder a estabilizarlos: se termina entonces la prioridad de estabilizarlos teniendo en cuenta el futuro uso de los suelos.
- Los tipos de estabilización depende de sus efectividades en lograr el mejoramiento en las propiedades de los suelos, si el tipo de estabilización es disponible en el sitio de construcción, y teniendo en cuenta, las variables económicas.
- También se han observado muchos daños en la infraestructura vial ocasionados por deterioro de afirmado o daños en base o subbase debido a la expansión de la matriz porosa. Este hecho se evidencia principalmente en suelos de tipo expansivos que, al contacto con el agua, cambian su forma afectando cimentaciones de todo tipo de obra, por ejemplo, en Bogotá existen obras que sufren serios asentamientos que evidenciaron grietas. Estos daños son causados por asentamientos generados en suelos expansivos. (INVIAS, 2012).
- Por otra parte, existe un producto como la ceniza volante CV, que consisten en residuos sólidos provenientes de la combustión de materiales como el carbón, pet-coke, madera, de la incineración de residuos sólidos y del proceso de fundición. En cuanto a la composición de la ceniza volante ésta posee las propiedades químicas del dióxido de silicio y óxido de calcio, componentes que posee el Cemento y la Cal, las cuales permiten que se produzca el endurecimiento de este material debido principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio puesto que estos materiales pulverizados y mezclados con las partículas minerales y agua formando una superficie de pasta y endurecida por medio de reacciones químicas y procesos de hidratación y que a su vez conserva su resistencia, estabilidad y su forma física. (Gutiérrez, 2015)

#### **5.1.1. Razones Para Estabilizar Un Suelo.**

Para estabilizar los suelos obedece a algunos o varios

- Subrasante de condiciones pobres, con posibilidad de cambios volumétricos excesivos, baja capacidad de soporte y altas deformaciones frente a la aplicación de cargas.
- Mejorar los materiales de base

- Control de materiales de base
- Control de humedad, control de polvo.
- Disminución de asentamientos de estructura.
- Disminución de potencial de expansión y contracción de los suelos.
- Aumentar la resistencia de los suelos, reducir la permeabilidad de ciertos suelos.

### **5.1.2. Propiedades Afectadas con la Estabilización.**

Entre las propiedades afectadas al realizarse la estabilización de un suelo se puede citar la compresibilidad (presentada especialmente en finos); la resistencia mecánica que lo general es baja en suelos finos húmedos, finos con alto porcentaje de materia orgánica y granulares con gradación pobre (los suelos finos son más sensibles a la humedad pues le deber su resistencia a la cohesión, mientras que en los suelos granulares, el Angulo de fricción es la característica primordial para determinar la resistencia); la permeabilidad que se plantea en dos problemas básicos: lo relacionado con la presión de poros y con el flujo de agua a través del suelo; la durabilidad que es la resistencia a los procesos de interiorización erosión y abrasión, es una propiedad cuya diferencia es más notoria en los costos de mantenimiento que en las fallas estructurales. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

En soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos es común aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, apoyar la estructura a profundidad tales que no se registren alta variación en la humedad o tratar de impermeabilizar el suelo por medio de una membrana o compactación, buscando pesos volumétricos altos, debe tenerse presente que la humedad de compactación juega también con un papel muy importante en el fenómeno de los cambios volumétricos altos, pues si bien que una arcilla altamente densificada ofrece una alta impermeabilidad, existe la probabilidad de que una vez que dicha arcilla se sature alcance presiones de expansión más alta, a medida que se vaya compactando con menor humedad. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

Otra manera de modificar la arcilla expansiva, transformándola en una masa rígida y granular cuyas partículas lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla, es por medios químicos o térmicos.

### **5.1.3. Tipos De Estabilización.**

La estabilización puede ser básicamente mecánica, química y fisicoquímica; sin embargo, existe otros métodos que, aunque son costosos, está siendo sometidos a arduas investigaciones, ellos son los llamados térmicos y eléctricos. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

- **Estabilización mecánica:** es el mejoramiento del suelo por cambio de graduación, consiste en mezclar dos o más suelos naturales para obtener un material compuesto que sea superior a cualquier de sus componentes. El método incluye también la adición de roca triturada o el tamizado para remover las partículas de cierto tamaño que son perjudiciales para fines ingenieriles. Este tipo de estabilización se lleva a cabo por compactación, vibración y uso de explosivos. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)
- **Estabilización química:** la estabilización química consiste en unir las partículas con agentes cementante, acción que se produce por medio de una reacción química al interior del suelo. Tal reacción no incluye necesariamente las partículas del suelo, aunque en la unión si están implicadas las fuerzas intermoleculares del mismo. Entre los agentes químicos más utilizados se encuentran el cemento portland, asfalta cloruro de sólido, ceniza volante, cloruro de calcio y desperdician de fábrica del papel; estos materiales se usan para modificar la plasticidad, controlar el cambio volumen y mejorar la resistencia. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)
- **Estabilización fisicoquímica:** consiste en cambiar las propiedades de los granos del suelo, principalmente de los minerales arcillosos y de su agua absorbida. La estructura atómica de la arcilla puede cambiar los cationes absorbidos en su película superficial, las caolinitas son susceptibles de intercambiar sus cationes que se las montmorillonitas y las illitas poseen la propiedad en grado intermedio; la capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los minerales arcillosos, es decir la capacidad aumenta si el pH es menor. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

#### 5.1.4. Proceso General de la Estabilización.

Se denomina estabilización de los suelos al proceso por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo de los mismos. Se define simplemente, la estabilización, como el proceso artificial por el que las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, disminuyendo la calidad de vacíos, utilizando para ello métodos mecánicos, químicos (como en este caso) y fisicoquímicos.

El diseño de estabilizaciones con aditivos, consiste en primer término en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo, así como el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño resulta aún más complicado por la gran dificultad que existe al tratar de juzgar adecuadamente los efectos inmediatos y permanentes que producirán en el suelo diferentes tipos de agentes, por ejemplo, un cemento portland puede rigidizar el suelo mientras un asfalto lo hace flexible. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

Se debe tener en cuenta las características que se desean en el suelo estabilizado, condiciones que nos pueden indicar la importancia relativa de propiedades tales como la resistencia a la compresión, resistencia a agentes abrasivos, trabajabilidad del suelo, etc., es indispensable también conocer de antemano las características originales del suelo que se pretenden estabilizar, para poder predecir el resultado que se lograra con la adición del agente estabilizante.

#### **5.1.5. Sistemas de Estabilización.**

**Estabilización de suelos con cemento.** (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

Los fenómenos químicos que ocurren entre suelos y cemento, cuando ambos se mezclan con el apropiado contenido de agua, aun no son comprendidos del todo, pero básicamente parece que consiste en reacciones de cemento con los componentes silicosos de los suelos, que producen conglomerantes que logan a las gravas, arenas y limos; este es el efecto básico en los suelos gruesos. Además, el hidrato del calcio que se forma como consecuencia del contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio, muy ávidos de agua, que la toman de la que existe entre las laminillas de arcilla; el resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y la plasticidad del suelo arcilloso, así como el aumento en su resistencia y su durabilidad. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

La reacción favorable suelo cemento se ve muy impedida o nulificada cuando el primero contiene material orgánico, pues los ácidos orgánicos poseen gran validez por los iones de calcio que lidera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento en los suelos gruesos o la estabilización de las partículas laminares en las arcillas. Por esta razón las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en un suelo no sobrepase 1.2 % en peso, si ha de ser considerado para ser estabilizado con cemento. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

También es nociva la presencia en el suelo de sulfato de calcio, de magnesio y u otras sustancias acidas, pues privan a los aglomerantes de la humedad necesaria para su función.

El efecto del cemento en los suelos arcillosos resulta más complicado y peor comprendiendo que en los suelos más gruesos, por esta razón se vería conveniente ser más cuidadoso y con una alta calidad en su aplicación de este aditivo. Parece ser que el primer lugar se produce un efecto primario en el que

la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos hidratados de calcio, hidróxido de calcio e iones cal, que elevan la concentración de electrolitos de agua intersticial, aumentando su pH, viene a continuación un proceso secundario en dos fases. En la primera se produce un intercambio iónico entre los iones calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, todo lo cual tiene a floccular a la propia arcilla. En la segunda fase, tiene lugar reacciones químicas puzolanas entre la cal y los elementos que componen los cristales de arcilla. Los elementos silicios, y lumínicos reaccionan con los puestos cálcicos para formar elementos cementantes: el resultado final de esta reacción es la transformación de una estructura arcillosa orejanamente flocculada y vaporosa, en un agregado resistente. En esta misma segunda fase, el hidróxido de calcio que se va consumiendo puede reponerse por la cal que se lidera durante el proceso primario de hidratación del cemento. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

En las superficies expuestas al aire, el calcio se carbonata, con el correspondiente efecto de cemento adicional entre las partículas de arcilla.

Las arcillas montmorillonitas son, a la larga, las más reactivas ante el cemento, seguidas de las ilitas y de las caolinitas, sin embargo, aumento de resistencia del material ante la estabilización no demuestra seguir leyes tan sencillas y de hecho parece acercarse más bien inversamente proporcional a la reactividad de la arcilla.

El grado de pulverización de las arcillas se refleja en la reactividad, que aumenta con aquel; en montmorillonitas e ilitas, la incorporación previa al cemento de pequeños porcentajes de la cal favorece la pulverización de la arcilla y facilita la incorporación posterior del cemento. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

Prácticamente todos los tipos de cemento son útiles para estabilización de suelos y normalmente se emplean los de fraguado y resistencia normales.

Cualquier suelo que no tenga cantidades exclusivas de material orgánica poder ser tratado con cemento para mejorar su comportamiento mecánico (resistencia, etc.); las únicas limitaciones estriban en lo que difícil que pueda resultar un adecuado mezclado del cemento, lo que llega a ser muy difícil en arcillas suaves y húmedas.

#### **5.1.6. Estabilización de Suelos con Cal.**

La estabilización de suelos con cal parece ser la forma más antigua de mejoramiento de suelos. (Rojas Esperanza & Camargo Sánchez 2004). Hay

evidencia que la vía Apia, acceso a la antigua ROMA. Se construyó y se utilizó esta técnica. En términos generales la estabilización con cal hidratada son bastantes similares a la estabilización con cemento, pero hay dos aspectos de diferencia que conviene destacar.

1. La cal tiene un aspecto de aplicación que se extiende mucho más hacia los materiales más arcillosos que el cemento y, en contrapartida, se extiende algo menos hacia el lado de los materiales granulares de naturaleza fricciónate.
2. En algunos casos la estabilización con cal se usa como pretratamiento de suelo.

La cal: la forma más usual de la cal empleada en la estabilización es hidratada, óxidos o hidróxidos de calcio. La cal viva se usa frecuencia en pretratamiento con los suelos húmedos.

La cal se prepara generalmente calentado carbonato de calcio, muchas veces bajo la forma de calizas naturales, hasta que pierden su bióxido de carbono y devienen en óxidos de calcio; el material resultante es la cal viva, muy inestable y ávida de agua, lo que hace su manejo y almacenamiento, lo que suele hidratarse de inmediato.

Para formar la cal estabilizante no es preciso partir de calizas puras, si no que pueden tolerarse algunas impurezas. **En la siguiente tabla No 01 Propiedad de la Cal.** se expresa los requisitos que suelen pedirse a la materia prima para formar la cal estabilizante.

**Tabla No. 01 - Propiedad de la Cal**

<b>Propiedad</b>	<b>Cal Viva CaO</b>	<b>Cal hidratada Ca(OH)<sub>2</sub></b>
Óxidos de calcio Magnesio	No menos de 92%	No menos de 95%
Bióxidos de carbono en el horno	No mas de 3%	No mas de 5%
Fuera del horno	No mas de 10%	No mas de 7%

**Fuente:** Propiedad de la cal. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

Reacciones: el efecto básico de la cal es la constitución de silicatos de calcio que se forma por acciones química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar los compuestos cementantes.



Hay dos tipos de cementantes químicas entre la cal y el suelo:

1. Una reacción que es inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo, lo que deprime su doble capa, a causa del incremento en la concentración de cationes en el agua; a la vez ocurre otro efecto que tiene a expandir la doble capa por el alto pH de la cal.
2. Una reacción que tiene lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente de tipo de suelo que en ella intervengan; en esto, la estabilización con cal difiere muchos a la estabilización con cemento. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

**Propiedades:** la cal tiene poco efecto en el suelo muy orgánicos o en suelos sin arcilla. Tiene máximo efecto en gravas arcillosas, en las que puede producir mezclas inclusive más resistentes que las que se obtendrían con cemento. Ha tenido su utilización más frecuente en arcillas plásticas, a las que hace, adicionalmente más trabajables y fáciles de compactar, razón por el cual se usa frecuentemente como pretratamiento, anterior a una estabilización con cemento, además de los muchos de muchos casos en que se usa como estabilizante definitivo. El efecto de la cal en las arcillas es más rápido en las montmorillonitas que las colinitas y en las primeras de cal logra un resultado mucho más espectacular en el aumento de la resistencia y sobre todo, en la disminución de la plasticidad. En las arcillas, la cal tiene también un importante efecto en la consecución de estabilidad volumétrica ante el agua. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

En la estabilización con cal debe evitarse el uso de agua acidas. El agua de mar se ha usado para compactar el suelo-cal con frecuencia, pero debe evitarse allí donde se vaya a colocar un riego de sello asfáltico sobre la capa tratada, pues la cristalización de las sales desprenderá el sello, la cantidad de agua que se emplee está regida por los procedimientos de compactación, pero si se usa cal viva pudieran requerirse cantidades adicionales de agua en suelos con menos de 50% de contenido natural de dicho elemento.

Generalmente la estabilización con cal se aplica cuando se busca mejorar las características de plasticidad y resistencia de suelos arcillosos.

#### **5.1.7. Estabilización con Asfalto.** (ABc, 2007) (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

El mejoramiento de las propiedades de los suelos con el asfalto y productos asfálticos es una técnica socorrida y frecuente muy efectiva. Son tres los tipos que se ha usado para este fin:

1. Productos bituminosos, que son sistemas anhidros de hidrocarburos totalmente solubles en bisulfuro del carbono.
2. Productos asfálticos, procedentes de la destilación y refinamiento del petróleo o asfalto naturales, más raramente.
3. Productos residuo de la destilación destructiva de materiales orgánicos, tales como el carbón, ciertos aceites, lignitos, turbas y maderas (alquitranes).

Los productos asfálticos y bituminosos en general, son normalmente demasiado viscosos para que se puedan incorporar directamente a los suelos, por ello han de usarse calentados, emulsificador en agua (emulsiones) o rebajados con un solvente, volátil, como la gasolina.

Las emulsiones y asfaltos rebajados son los productos más usados en estabilizaciones de suelos, pero se usan también alquitranes rebajados. Los rebajados más usuales son los de fraguado lento y medio, pero en las arenas se han usado también los de fraguado rápido con éxito.

#### **5.1.8. Estabilización con Ácido Fosfórico y Fosfato.** (S.L, 2009 ) (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

La estabilización con estos productos esta en gran parte en la fase experimental y es probable que nunca pase de ella, puesto que lo hasta ahora investigado indica que estos productos han de incorporarse en porcentajes similares a los que requiere el cemento o la cal y su precio es varias veces más grande.

Parece ser que la ventana más importante de estos estabilizantes están en los buenos resultados que se obtiene con cloritas, ante las que el cemento y la cal rinden resultados desfavorables.

Los estabilizantes fosfóricos limitan su acción a suelos ácidos y no son efectivos en los alcalinos, en los limos, ni en las arenas. Otra dificultad de estos estabilizantes está en su manipulación, que es difícil, aunque en general no son sustancias tóxicas.

#### **5.1.9. Estabilización con Cloruro de Sodio** (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

Frecuentemente se ha usado el cloruro de sodio como estabilizante de acción no muy durable o como ayuda en la superficie de deslizamiento contra el polvo.

El cloruro de sodio es efectivo en todos los suelos, aunque mucho en los que contienen materia orgánica. Su efecto en producir reacciones coloidales y en

alterar las características de agua contenida en el suelo. Normalmente actúa como floculante y suele ayudar en la compactación.

Un uso muy particular, pero prometedor de la sal común es la disminución de permeabilidad que produce en muchas arcillas, lo que la hace útil para tratar las expansivas. La sal también beneficia la resistencia de los suelos, así como el comportamiento de los suelos ante la congelación.

La principal desventaja de estos tratamientos es que la sal es muy soluble y, por lo tanto, fácilmente es lavada; por esto al principio se le adjudicó la calificación de no durabilidad.

#### **5.1.10. Estabilización con Sulfato de Calcio (yeso) y Cloruro de Calcio.**

El efecto de estas sustancias, sus ventajas y desventajas son muy similares a las del cloruro de sodio, pero es común que su efecto en la compactación sea mucho menos marcado, así como su efecto sobre la permeabilidad, a la que a veces hacen aumentar, con lo que aumenta mucho la remoción por lavado. El yeso se ha usado con frecuencia como aditivo en mezclas de suelo-cemento para acelerar su fraguado. Pero aún está utilizando debe ser contemplada con reserva por los problemas de florescencia. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

#### **5.1.11. Estabilización con hidróxido de sodio (soda caustica)**

La primera ventaja es en la facilidad con que se aplica y en el efecto que parece tener para ayudar a la compactación de los suelos.

La principal desventaja de la soda está en su causticidad, que puede ser un peligro para los operadores y en el hecho de que carbonata en el aire muy rápidamente y pierde su poder. (Solano Rico & Niño Carreño, 2010)

#### **5.1.12. Estabilización con Resina y Polímeros.**

Estos compuestos son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión de componentes orgánicos, a los que se denominan monómeros. El polímero natural tiene la forma de resina la incorporación de los polímeros a suelos se hace de dos maneras se añade los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, en solución o en emulsión.

El vinsol es la resina que más frecuentemente se ha utilizado como estabilizante, sobre todo en Europa. Los resultados que con ella se han obtenido son variables, pero alentadores; su acción se circunscribe a la de estabilizante de la mezcla ante la acción del agua, esta es en general la reacción de todas las resinas y polímeros.

Los contenidos de resina y polímeros fluctúan normalmente entre 1% y 2% y únicamente pueden usarse con suelos ácidos. Otra desventaja del producto es su degradación bacteriana, que limita su vida.

Estabilización con ceniza proveniente de locaciones petroleras por medio de una absorción térmica. Dentro de las alternativas de mejoramiento de suelo expansivo está el uso de ceniza generada del proceso de desorción térmica de las aguas de explotación, produciendo ceniza cuya disposición causa graves problemas ambientales. Por lo tanto, se propone la alternativa de uso de la ceniza de locaciones petroleras para ofrecer una opción en el uso de este residuo y comparar la eficiencia en estabilización con el uso de ceniza de centrales hidroeléctrica, cal y cemento.

Para analizar la factibilidad del uso de esta ceniza se realizó una serie de ensayos de mecánica de suelos y otros especializados, entre las cuales se encuentran: clasificación y determinación de las propiedades mecánicas al suelo virgen, propiedades físico-mecánicas y químicas de la ceniza, mezclas entre suelos y ceniza, los cuales permitió concluir si este material puede ser usado en el sector constructivo. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004)

A su vez las tesis trabajadas con diferentes agentes estabilizadores como: cal, cemento, aceite, ceniza volante, suelos mezclados con ceniza con subgrado, ceniza volante mezcladas con cal, arcilla, suelos orgánicos mezclados con cal y cemento con porcentajes de 2% al 6%, ceniza volante mezclados con cal, heno de trigo-tipo arcilloso mezclados con cal, ceniza, aditivos químicos, diferentes componentes de la ceniza volantes tales como alúmina, hierro, oxido, de hierro, oxido de calcio, titanio, catalizadores, cerámica, vidrio, geo polímeros, germanio, galio, material poroso y zeolita mezclados con suelo, suelos mezclados con cal, yeso natural y cascara de arroz, mezclas con suelos de baja y alta plasticidad más ceniza volante, suelos arcillosos mezclados con humo de sílice y muchos suelos más tratados con agentes estabilizados servirán de base investigativa para dar un solución a los problemas constructivos y ambientales. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004).

## **5.2 REVISIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS**

### **5.2.1 Características de los Tipos de Estabilizadores a Utilizar**

La ceniza proveniente de locaciones petroleras se genera de un proceso de desorción térmica de las aguas de explotación, El término “desorción térmica” se usa en la industria del manejo de desechos para describir los métodos de remoción de hidrocarburos del suelo o de los cortes por medio del calentamiento de material contaminado. Esta tecnología se usó primero para tratar la contaminación en suelos, en plantas químicas, refinerías, y por el derrame en oleoductos en las cuales la recuperación de hidrocarburos fue de poca importancia comparada con la remoción de hidrocarburos en suelos. Esta tecnología ha sido exitosamente adaptada para el manejo de desechos de perforación por medio del enfoque en el cumplimiento de regulaciones y la minimización de desechos. El recuadro que se encuentra a continuación contiene un listado de métodos competitivos para el tratamiento de cortes contaminados con petróleo y su impacto en los objetivos fundamentales del manejo de desechos. (Britpave, 2004) De acuerdo a su estado de presentación del estabilizador este es sólido (polvo) y respecto a su origen es químico. Los componentes principales de la ceniza son sílice, alúmina, óxido ferroso, óxido de calcio. (carreteras, 2007) En general esta permite mejorar las características físico-mecánicas de los suelos como:

- El índice de plasticidad de los suelos estabilizados disminuye respecto del índice de plasticidad del suelo original y por consiguiente también disminuye su Límite Líquido.
- El C.B.R aumenta después del tratamiento en cantidades porcentuales significativas.

## **5.2.2 Estabilizadores de Suelos que se van a Utilizar**

### **5.2.2.1 Ceniza proveniente de locaciones petroleras.**

Características:

- Aspecto sólido
- Color negro grisáceo
- Olor característico

Beneficios ofertados / requerimiento de suelos a estabilizar

- Reducir índice de plasticidad
- Reducir límite líquido
- Reducir permeabilidad
- Incrementar la densidad del suelo
- Incrementar la resistencia a compresión

- Mejorar la capacidad de soporte de carga

### **5.2.2.2 Donde se van a utilizar con éxito**

Inicialmente se propuso una búsqueda de todos los sectores de Colombia donde existan problemas de estabilidad del suelo, por lo tanto, se encontraron numerosos sitios donde efectivamente se tiene un gran porcentaje de un suelo de bajas propiedades mecánicas y alta expansividad e inestabilidad en los sentidos, el cual genera una gran problemática en la construcción de carreteras, cimentaciones, muros, taludes y muchas más construcciones que dependen del suelo. Debido inicialmente de tipo económico y de traslado de materiales suelos, se concluyó que lo más factible para la investigación fue implementarlo en Bucaramanga y su área metropolitana, el cual se seleccionaron dos sectores estratégicos el cual logramos realizar los estudios y ensayos propuestos por la investigación.

### **5.2.2.3 Características de los Suelos Donde se Utilizarán los Estabilizantes**

Se conocen como suelos expansivos aquellos que presentan expansiones o contracciones, ósea cambios de volumen cuando varía su humedad o contenido de agua. Los materiales de arcilla, tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de agua y retenerla debido a su estructura, el agua produce el incremento del volumen en el material mencionado anteriormente y también una drástica reducción del volumen cuando el agua que retenía se seca. (<https://es.slideshare.net/avinashshaw18/ggbs-40989217>) Efectos de escoria granulada de alto horno de tierra (GGBS) sobre la fuerza y propiedades de hinchamiento de caolinita estabilizada con cal en presencia de sulfatos.

Los suelos expansivos resultan ser un gran problema para la construcción, porque los incrementos del volumen no se presentan de una manera uniforme, sino todo lo contrario al producirse incrementos en distintas zonas y al momento de contraerse generan asentamientos, que pueden dañar severamente las estructuras. (<https://es.slideshare.net/avinashshaw18/ggbs-40989217>)

El contenido de humedad es un factor muy importante cuando se habla de la expansión de suelos ya que nos puede indicar donde se podrían presentar expansión si se tiene materiales arcillosos. Además, la humedad es el elemento que hace posible el fenómeno de la expansión, ya que si no hay variación en el contenido de humedad del suelo, por más montmorillonita que contenga una arcilla, no se presentará un cambio en los valores volumétricos. (<https://es.slideshare.net/avinashshaw18/ggbs-40989217>)

Una de las causas por las que se presentan los suelos expansivos son las condiciones climáticas, que influyen de manera directa al comportamiento de estos suelos. Una expansión se genera debido al agua, por lo que es más propenso a encontrar suelos expansivos en áreas donde las lluvias sean moderadas y frecuentes. Otro factor importante es la presencia de aguas subterráneas que se filtran de la superficie. (<https://es.slideshare.net/avinashshaw18/ggbs-40989217>)

Características del suelo a estabilizar: me preocupa este tema.

- Tamiz pasa 200 superior a 50%
- Limite liquido superior a 50
- Índice de plasticidad superior a 25

### 5.3 COMPOSICIÓN DE LA ARCILLA

Las arcillas son principalmente partículas submicrónicas de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. **Como muestra la tabla No. 2. Límites de tamaño de suelos separados**, las arcillas se definen como partículas menores a 0.002 mm. En algunos casos, las partículas de tamaño entre 0.002 y 0.005 mm también se denominan arcillas. Las partículas se clasifican como arcilla con base en su tamaño y no contienen minerales arcillosos. Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” (Grim, 1953). (La plasticidad es la propiedad tipo masilla de las arcillas cuando contienen cierta cantidad de agua). Los suelos no arcillosos pueden contener partículas de cuarzo, feldespato o mica, suficientemente pequeñas para caer dentro de la clasificación de las arcillas. Por consiguiente, es apropiado para las partículas de suelo menos que 2  $\mu$  o 5  $\mu$  como se definen bajo diferentes sistemas, ser llamadas partículas tamaño arcilla en vez de arcillas. Las partículas de arcilla son en su mayoría de tamaño coloidal (<1  $\mu$ ) con 2  $\mu$  de límite superior.

**Tabla No. 02 - Límites de tamaño de suelos separados**

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

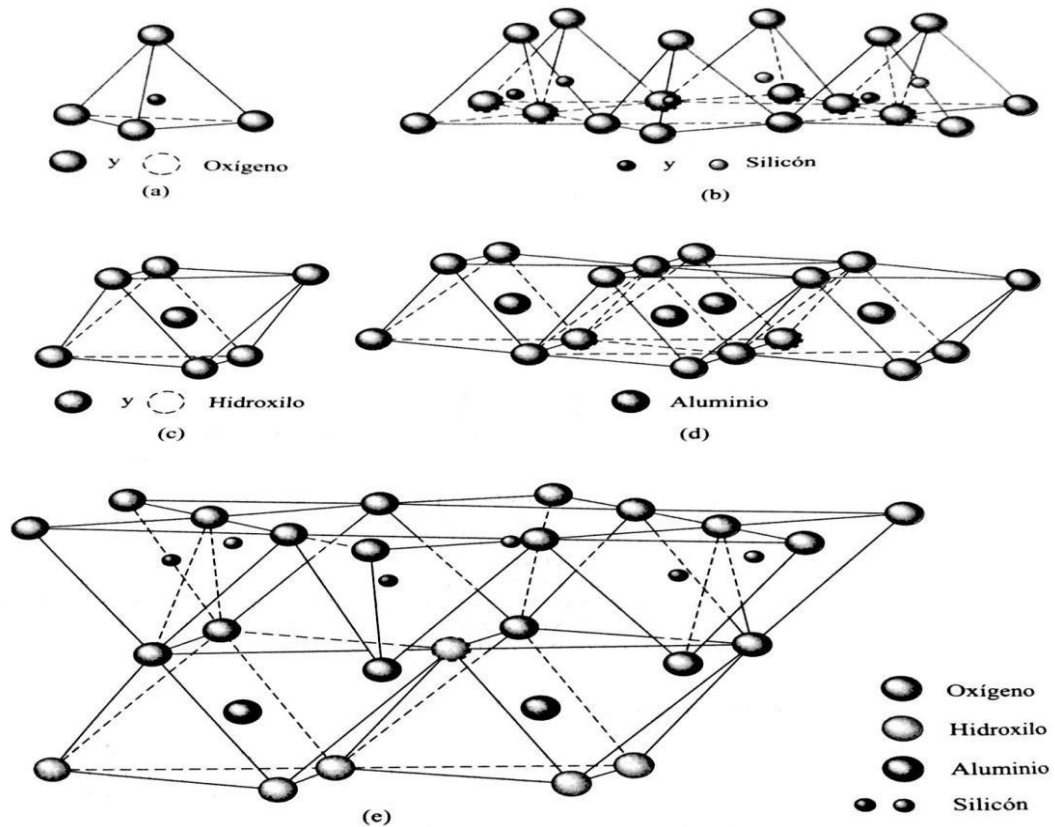
Fuente: (Das, 2001).

### 5.3.1 Minerales Arcillosos

Los minerales arcillosos son complejos silicatos de aluminio compuesto de una o dos unidades básicas: 1) tetraedro de sílice y 2) octaedro de alúmina. Cada tetraedro consiste en cuatro átomos de oxígenos que rodean a un átomo de silicio (figura No. 01). La combinación de unidades de tetraedros de sílice da una lámina de sílice (figura No. 01). Tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros vecinos. Las unidades octaédricas consisten en seis hidroxilos que rodean un átomo de aluminio (figura No. 01), y la combinación de las unidades octaédricas de hidroxilos de aluminio una lámina octaédrica (**también llamada lamina de gibbsita; figura No. 01**). En ocasiones el magnesio reemplaza los átomos de aluminio en las unidades octaédricas; en tal caso, la lámina octaédrica se llama lámina de brucita. (Rojas Esperanza & Camargo Sanchez, 2004).



**Figura 1 - Tetraedro de sílice; (b) lamina de sílice; (c) octaedro de alúmina (óxido de aluminio); (d) lamina octaédrica (gibbsita); (e) lamina Elemental de sílice-gibbsita (según Grim, 1959).**



**Fuente:** (Leaming, 1959)

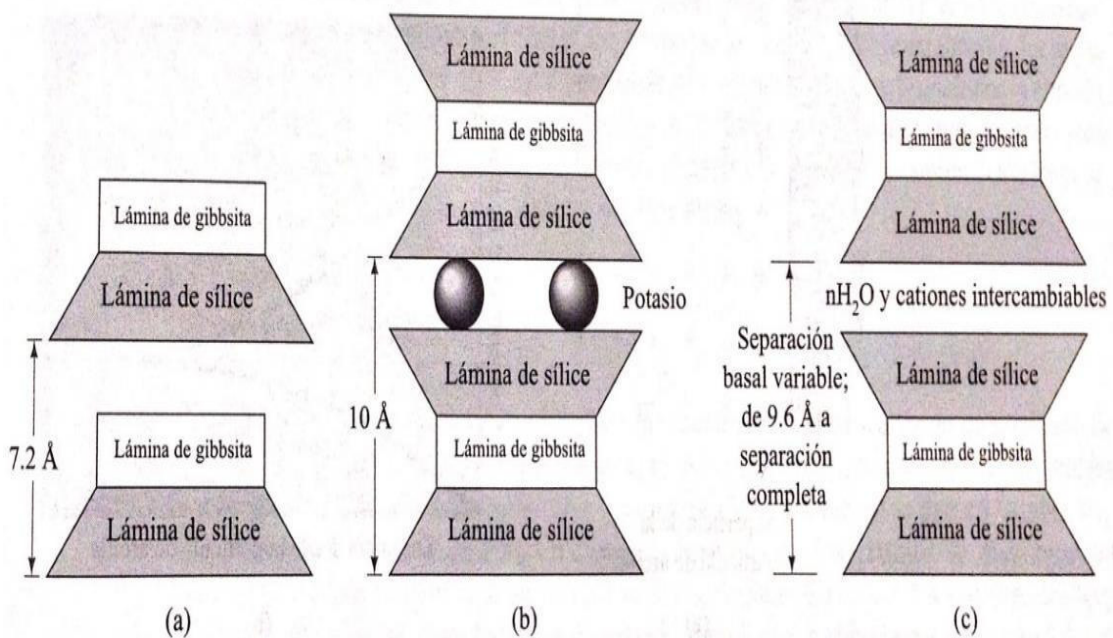
En una lámina de sílice, cada átomo de silicio con una valencia positiva de cuatro está unido a cuatro átomos de oxígeno con una valencia negativa total de ocho. Pero, cada átomo de oxígeno en la base del tetraedro está unido a dos átomos de silicio; significa que el átomo superior de oxígeno de cada tetraedro tiene una carga de valencia negativa de uno por ser contrabalanceada. Cuando la lámina de sílice es colocada sobre la lámina octaédrica, como muestra la figura No. 01, esos átomos de oxígeno reemplazan a los hidroxilos para satisfacer sus enlaces de valencia. (Leaming, 1959)

La caolinita consiste en capas repetidas de láminas elementales de sílice-gibbsita, **como muestra la figura No. 02**. Cada capa es aproximadamente 7.2 Å de espesor y se mantienen unidas entre sí por enlaces hidrogénicos. La caolinita ocurre como placas, cada una con una dimensión lateral de 1000 a 20,000 Å y un espesor de 100 a 1000 Å. El área superficial de las partículas de caolinita por masa unitaria es aproximadamente de 1.5 m<sup>2</sup>/g. el área superficial por masa unitaria se define como superficie específica. (Leaming, 1959)

La illita consiste en una lámina de gibbsita enlazada a dos láminas de sílice, una arriba y otras abajo (**figura No. 02**), y es denominada a veces mica arcillosa. Las capas de illita están enlazadas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para balancear los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por silicio en las láminas tetraédricas. La sustitución de un elemento por otro, sin cambio en la forma cristalina, se conoce como sustitución isomorfa. Las partículas de illita tienen generalmente dimensiones que varían entre 1000 y 5000 Å y espesor de 50 a 500 Å. La superficie específica de las partículas es aproximadamente de 800 m<sup>2</sup>/g. (Leaming, 1959)

La monmorilonita tiene una estructura similar a la illita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice (figura No. 02). En la monmorilonita hay sustitución isomorfa de magnesio y hierro por aluminio en las láminas octaédricas. Los iones de potasio no están aquí presentes como en el caso de la illita y una gran cantidad de agua es atraída hacia los espacios entre las capas. Las partículas de monmorilonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 50 Å. La superficie específica es aproximadamente de 800 m<sup>2</sup>/g. (Leaming, 1959)

**Figura 2 - Diagrama de las estructuras de (a) caolinita; (b) illita; (c) monmorilonita.**



**Fuente:** (Leaming, 1959)

Además de caolinita, illita y monmorilonita, otros minerales arcillosos comunes generalmente encontrados son clorita, haloista, vermiculita y atapulita.

Las partículas de arcilla llevan una carga neta negativa sobre la superficie, resultado de una sustitución isomorfa y de una ruptura en la comunidad de la

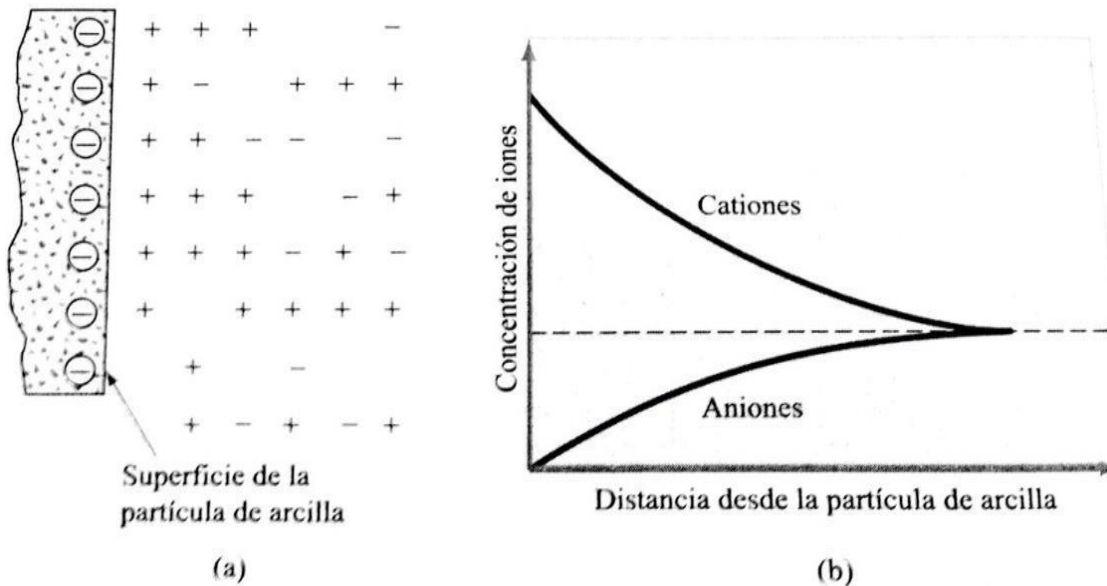
estructura en sus bordes. Cargas negativas mayores se derivan de superficies específicas mayores. Algunos lugares cargados positivamente ocurren también en los bordes de las partículas. (Leaming, 1959)

En arcilla seca, la carga negativa es balanceada por cationes intercambiables, como  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , que rodean a las partículas mantenidas juntas por atracción electroestática. Cuando se agrega agua a la arcilla, esos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. A esto se le llama capa difusa doble (**figura No. 03**). La concentración de cationes decrece con la distancia desde la superficie de la partícula (**figura No. 03**). (Leaming, 1959)

Las moléculas de agua son polares. Los átomos de hidrogeno no están dispuestos de manera simétrica alrededor de un átomo de oxígeno; más bien, forman un ángulo de enlace de 105. En consecuencia, una molécula de agua actúa como una pequeña barra con carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, y esto se conoce como dipolo. (Leaming, 1959)

El agua dipolar es atraída por la superficie cargada negativamente de las partículas de arcilla y por los cationes en la capa doble. Los cationes a su vez son atraídos a las partículas de suelo. Un tercer mecanismo por el cual el agua es atraída a las partículas de arcilla es el enlace hidrogenico, en el que los átomos de hidrogeno en las moléculas de agua son compartidos con átomos de oxígeno sobre la superficie de la arcilla. Algunos cationes parcialmente hidratados en el agua de poros son también atraídos a la superficie de las partículas de arcilla. Estos cationes atraen a las moléculas de agua dipolar, la fuerza de atracción entre el agua y la arcilla decrece con la distancia desde la superficie de las partículas. Toda el agua mantenida unida a las partículas de arcilla por fuerza de atracción se conoce como agua de capa doble. La capa interior del agua de capa doble, que se mantiene unida muy fuertemente por la arcilla, se conoce como agua absorbida y es más viscosa que el agua libre. La orientación del agua alrededor de las partículas de arcilla da a los suelos arcillosos sus propiedades plásticas. (Leaming, 1959)

Figura 3 - Capa doble difusa.



Fuente: (Leaming, 1959)

Los suelos a estabilizar con ceniza fueron extraídos de Bucaramanga, sitios la mesa de los santos (vía chicamocha real, también se extrajo de dos sitios distintos como en villa Liliana y vía frente de portal del chicamocha) de Lebrija en la vereda Cusaman y en el municipio el centro vía barranca, también se extrajo unos materiales de Medellín para realizar los ensayos de clasificaciones, pero se piensa que se debería estudiar inicialmente los suelos del departamento de Santander que pueden ser los tres sitios que se nombraron inicialmente donde se puede caracterizar el material ya que cumplen con las condiciones para ser estudiadas. (Leaming, 1959)

Se realizó la caracterización de los materiales para denominar la expansividad que lo comprender y así dar inicio a diseño de los set-up para la experimentación de los suelos arcillosos como presión expansión, compactación, proctor modificado, resistencia a la compresión y CBR.

Una vez se tenga la caracterización y los diseños de Set-up algunos de estos sitios serán descartados por materiales similares, suelos no expansivos, relleno o materiales de baja plasticidad. (Leaming, 1959)

Puede que los materiales no contengan los elementos necesarios para llegar hacer 100% suelos expansivos por esta razón se le realizara un tratamiento de agregado de bentonita, [6] La bentonita es una roca compuesta por más de un tipo de minerales, aunque son las esmectitas sus constituyentes esenciales y las que le confieren sus propiedades características. (Leaming, 1959)

Los productos comerciales de bentonitas se clasifican en términos generales como:

Montmorillonitas: Arcillas esmécticas con una estructura de capas. El ion aluminio predomina en la estructura, pero puede ser reemplazado por otro ion metálico formando una gran variedad de minerales.

Bentonita: Describe generalmente una arcilla compuesta esencialmente de Montmorillonita. (Leaming, 1959)

Bentonita sódica: Es una montmorillonita que se encuentra en forma natural y que contiene un alto nivel de iones de sodio. Se hincha al mezclarse con el agua.

También se conoce como "Wyoming Bentonita" o "Western Bentonita".

Bentonita cálcica: Es una montmorillonita en la que el catión intercambiable predominante es el calcio. No exhibe la capacidad de hinchamiento de la bentonita sódica, pero tiene propiedades absorbentes. También es llamada "Southern, Texas o Mississippi Bentonita". (Anaya Gomez, 2007)

La ceniza proveniente de locaciones petroleras se le realizara un análisis de propiedades mecánicas tales como: peso específico, consistencia normal, finura y tiempos de fraguado a su vez un análisis químico el cual dará un resultado esperado para seguir con el tratamiento de la mezcla de suelos de tipos expansivos con ceniza.

## 6. METODOLOGÍA.

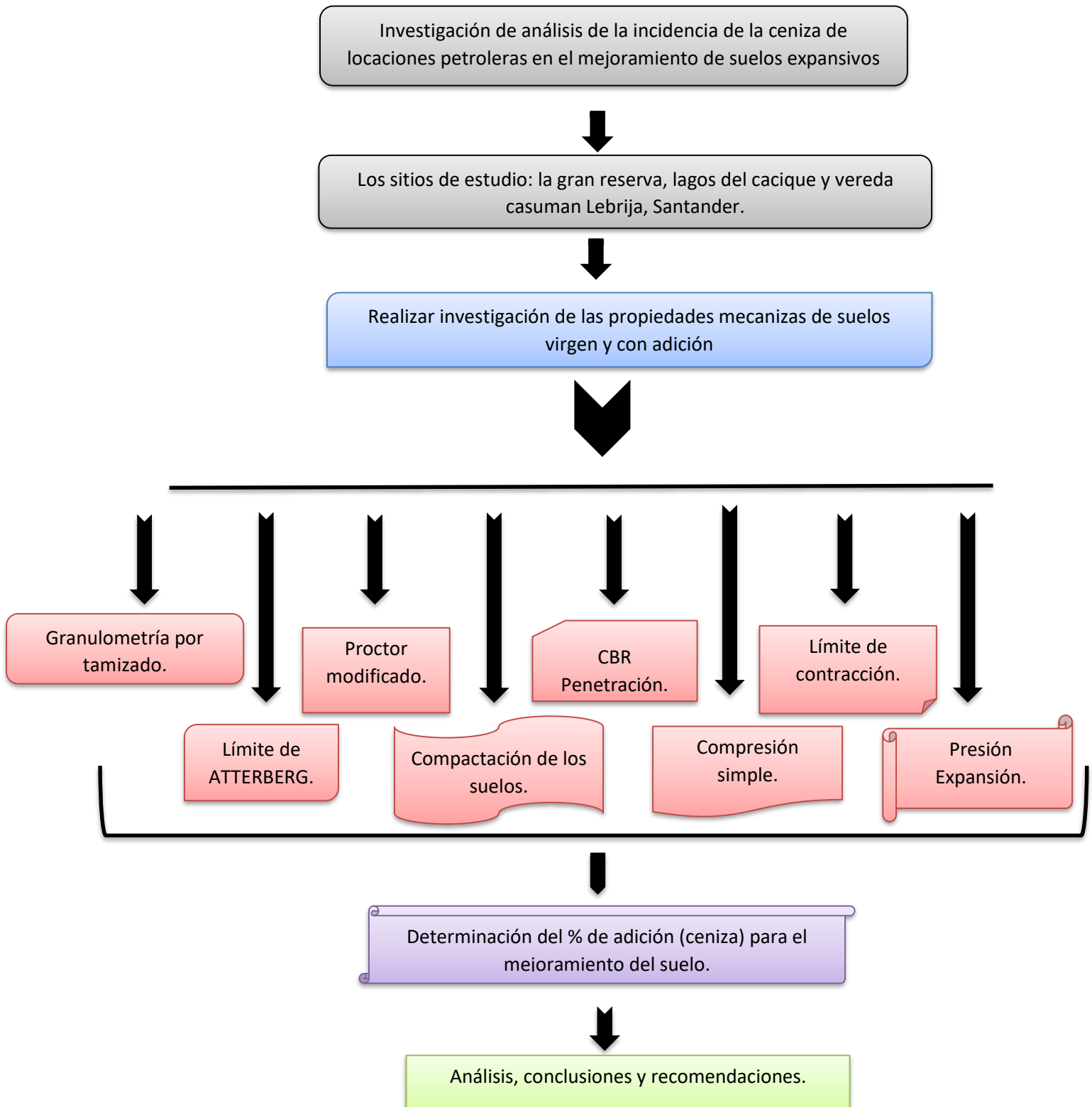


Figura 5.

La metodología que se ejecutó y como se muestra en la figura No 5, inicia con la decisión de realizar una búsqueda de trabajos similares. Por otra parte, se identificaron los sitios de estudio como son: **“la gran reserva, lagos del cacique- Bucaramanga y vereda casuman Lebrija, Santander.”**

Los lugares escogidos para este estudio están ubicados en **Lebrija- Santander**, el cual a futuro se pueden construir una vía de acceso. El otro lugar es **lagos del cacique llamado gran reserva** – Bucaramanga, el cual realizo la construcción residencial de apartamentos y tuvieron muchos problemas de cimentación.

Luego definidos los sitios para los extraer los materiales de suelos, se empieza con los ensayos de suelos para hacer los respectivos análisis, con fin de cumplir con los objetivos del proyecto de investigación. Para los ensayos se adiciono un porcentaje óptimo de ceniza, Los resultados obtenidos de los ensayos se muestra en la tabla No 03 Campo muestral.

**Tabla 3. – campo muestral**

ENSAYOS	S. VIRGEN	SUELOS 2%	SUELOS 5%	SUELOS 7%	TOTAL
PROCTOR MODIFICADO	6	6	6	6	24
COMPACTACION CBR	6	6	6	6	24
CBR CR. PENETRACION 1	6	6	6	6	24
	6	6	6	6	24
CBR CR. PENETRACION 2	6	6	6	6	24
	6	6	6	6	24
CBR CR. PENETRACION 3	6	6	6	6	24
	6	6	6	6	24
CBR CR. PENETRACION TOTAL	6	6	6	6	24
	6	6	6	6	24
	6	6	6	6	24
GRANULOMETRIA	6	6	6	6	24
LL - LP - IP	6	6	6	6	24
COMPRESION SIMPLE	6	6	6	6	24
LIMITE DE CONTRACCION	6	6	6	6	24
PRESION EXPASION	6	6	6	6	24
EXPANSION LIBRE	6	6	6	6	24
					<b>408</b>

## 6.1 Revisión Bibliográfica del Tema a Investigar.

Se realizó mediante tesis, artículos e investigaciones sobre el tema de mejoramiento de los suelos expansivos, en donde se encontraron tesis de

grado y artículos relacionados con el tema de estabilización con cal, cemento, aceite, polímeros, etc.

## **6.2 Búsqueda de suelos con propiedades deficientes en sectores de Bucaramanga y el área metropolitana para utilizar en el estudio**

Para identificar los sectores de donde se podía extraer el material se basó en la información proveniente de INGEOMINAS en sus planchas geológicas e información de estudios de suelos previamente realizados, los cuales se encuentra en los diferentes buscadores.

De acuerdo a lo investigado se encontraron inicialmente varios sitios donde se podría utilizar los suelos para el estudio entre los cuales se mencionan varios sectores: vía Málaga, municipio de San Gil, el Socorro, la Mesa de los Santos, Lebrija, Comfenalco, Ruitoque y el Cacique. Se inició la búsqueda de tal forma que se pudiera extraer materiales para realizar los ensayos de clasificación y así conocer el tipo de suelo.

Finalmente se extrajo materiales de los siguientes sectores: El Cacique y el municipio de Lebrija a los cuales se les realizó ensayos para clasificación.

## **6.3 Ensayos de Laboratorio Realizados**

Los ensayos realizados a los suelos de estudio fueron los siguientes:

- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos
- Determinación del límite líquido de los suelos
- Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo normal de compactación)
- Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR)
- Compresión inconfiada en muestras de suelos
- Determinación de los factores de contracción de los suelos.
- Determinación de suelos expansivos.

A continuación, se describe brevemente dichos ensayos.

- **LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS I.N.V. E 126– 13 (INVIAS, 2013)**

El límite plástico o de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del



cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

Un valor observado o calculado de un límite de un suelo debe redondearse a la "unidad más cercana".

El método de moldeado manual de rollos de suelo debe ser dado por el procedimiento normativo indicado en esta norma. Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la cual pueden formarse rollos de suelo de unos 3mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos rollos se desmoronen. (INVIAS, 2012)

- **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS I.N.V. E – 125-13 (INVIAS,2013)**

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.

Para los fines de esta especificación, cualquier valor observado o calculado deberá aproximarse a la "unidad más cercana".

Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es de responsabilidad de quien la emplee, el establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicación de limitaciones regulatorias con anterioridad a su uso. (MarcadorDePosición2)

- **RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO NORMAL DE COMPACTACIÓN) I.N.V. E – 141 -13 (INVIAS, 2013)**

Los siguientes métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado con un martillo de 2.5 kg (5.5 lb) que cae desde una altura de 305 mm (12"). Se han previsto cuatro procedimientos alternativos de la siguiente forma:

Método A – Un molde de diámetro 101.6 mm (4"): material de un suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) (Secciones 3 y 4)

Método B – Un molde de diámetro 152.4 mm (6"): material de suelo que pasa tamiz de 4.75 mm (No.4) (Secciones 5 y 6).

Método C – Un molde de diámetro 101.6 mm (4"): material de suelo que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Secciones 7 y 8)

Método D – Un molde de diámetro 152.4 mm (6") material de suelo que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Secciones 9 y 10).

En las especificaciones se debe indicar el método por usar para el material que se va a ensayar. Si no se especifica ninguno, regirá el Método A.

Este método de ensayo se aplica a mezclas de suelos que tienen el 40% o menos retenido en el tamiz de 4.75mm (No 4) al usar los Métodos A o B, y 30% o menos de retenido en el tamiz de 19mm (3/4") cuando se emplee el Método C o el D. El material retenido en estos tamices deberá ser definido como sobre tamaños (partículas gruesas).

Si el material a ensayarse tiene partículas gruesas en un porcentaje superior al 5% y el resultado es usado para el control de compactación de suelos debe hacer correcciones a la densidad seca máxima de acuerdo con la norma INV E-228 a fin de comparar la densidad seca del terreno con la densidad seca máxima de compactación correspondiente al material total utilizado en terreno.

Si las tolerancias máximas especificadas de sobre tamaños se exceden, se debe usar otros métodos para el control de compactación. Nota 1.– Un método para diseño y control de compactación de tales suelos consiste en usar un relleno de prueba para determinar el grado de compactación requerido y el método para obtener dicha compactación. Se emplea luego un método de especificación para controlar la compactación, especificando el tipo y tamaño del equipo de compactación, el espesor de la capa y el número de pasadas. Instituto Nacional de Vías E 141 – 2

Los valores establecidos en unidades SI deben ser considerados como norma. Las unidades utilizadas en esta norma para la masa unitaria seca son dadas en kg/m<sup>3</sup>.

Esta norma no pretende considerar los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien emplee esta norma el establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y el determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

- **RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) I.N.V. E – 148 – 13 (INVIAS, 2013).**

Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte de

California, que es muy conocido debido a su origen, como CBR (California Bering Ratio). Este método de ensayo está proyectado, aunque no limitado, para la evaluación de la resistencia de materiales cohesivos que contengan tamaños máximos de partículas de menos de 19 mm (3/4”).

Cuando se van a ensayar materiales con contenidos máximos de tamaños de partículas mayores de 19 mm (3/4”), este método de ensayo provee la forma de modificar la gradación del material, de manera que el usado para las pruebas pase todo por el tamiz de 19.0 mm (3/4”) a la vez que mantiene constante la fracción del total de la grava entre 75 mm (3”) y 4.75 mm (No.4). Aunque tradicionalmente éste método de preparación de especímenes ha sido empleado para evitar el error inherente en la prueba de materiales que contienen partículas gruesas en el equipo de prueba de CBR, el material modificado puede tener propiedades de resistencia significativamente diferentes a las del material original. Sin embargo, una gran base de experiencia se ha desarrollado usando este método para materiales en los cuales la gradación ha sido modificada y están en uso métodos satisfactorios de diseño, basados en los resultados de pruebas usando este procedimiento.

La experiencia ha demostrado que los resultados del CBR para aquellos materiales que contienen porcentajes sustanciales de partículas retenidas en el tamiz 4.75 mm (No.4), son más variables que los de materiales más finos. En consecuencia, se puede requerir más pruebas para estos materiales con el fin de establecer un CBR confiable.

El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad. Las masas unitarias secas de los especímenes corresponden generalmente a un porcentaje de la masa unitaria seca máxima del ensayo normal (INV E – 141), o del modificado (INV E – 142); pero también se puede operar en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno.

Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es de responsabilidad de quien la emplee, el establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicabilidad de limitaciones regulatorias, con anterioridad a su uso. Instituto Nacional de Vías E 148 – 2.

## **USO Y SIGNIFICADO**

Este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, súbbase y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido en esta prueba forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles.

Para aplicaciones en las cuales el efecto del contenido de agua de compactación sobre el CBR es bajo, tales como materiales de grano grueso sin cohesión, o cuando se permita una tolerancia en relación con el efecto de diferentes contenidos de agua de compactación en el procedimiento del diseño, el CBR se puede determinar al contenido óptimo de agua de un esfuerzo de compactación especificado. La masa unitaria seca especificada corresponde, generalmente, al porcentaje mínimo de compactación permitido al usar las especificaciones para compactación en el campo.

Para aplicaciones en las cuales el efecto del contenido de agua de compactación sobre el CBR se desconoce, o en las cuales se desea tener en cuenta su efecto, el CBR se determina para un rango de contenidos de agua, usualmente el permitido para compactación en el campo empleando las especificaciones existentes para tal fin.

El criterio para la preparación de especímenes de prueba de materiales auto cementantes (y otros), los cuales ganan resistencia con el tiempo, se debe basar en una evaluación de ingeniería geotécnica. Los materiales de auto cementantes, deben curarse apropiadamente hasta que se pueda medir relaciones de soporte representativas de las condiciones de servicio a largo plazo, de acuerdo con el criterio del Ingeniero.

- **COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS I.N.V. E – 152 – 13 (INVIAS, 2013)**

### **OBJETO**

El objeto de esta norma es indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión encofinada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remodeladas, aplicando carga axial, usando cualquiera de los métodos de resistencia controlada o deformación controlada. Este ensayo se emplea únicamente para suelos cohesivos, ya que en un suelo carente de cohesión no puede formarse una probeta sin confinamiento lateral. Este ensayo no es un sustituto del ensayo compresión triaxial no consolidado no drenado descrito en la norma INV E – 153.

Resistencia a la compresión encofinada, es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo, cilíndrica o prismática, falla en el ensayo de compresión simple.

Los valores en unidades SI deben considerarse como norma. Los valores en paréntesis son de información, únicamente.

Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es de responsabilidad de quien la emplee, el

establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicación de limitaciones regulatorias, con anterioridad a su uso.

- **DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS I.N.V. E – 127-13 (INVIAS, 2013)**

## **OBJETO**

Este método de ensayo tiene como propósito obtener datos por medio de los cuales se pueden calcular las siguientes constantes de los suelos: a) Límite de contracción, b) relación de contracción, c) cambio de volumen, d) contracción lineal.

Lo siguiente se aplica a todos los límites especificados en esta norma: Con el propósito de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor observado o un valor calculado debe ser redondeado “a la unidad más cercana”.

Los valores expresados en unidades SI deben considerarse como los normativos.

Precaución – El mercurio es una sustancia peligrosa que puede causar efectos nocivos en la salud si su vapor se inhala por mucho tiempo, o si se pone en contacto con la piel. Siempre que se use mercurio deberán adoptarse las siguientes precauciones: · Mantenerlo en un recipiente de cristal sellado e irrompible. · Trabajar siempre en un área bien ventilada. · Evitar el contacto directo con el mercurio y usar guantes. · Evitar el esparcimiento incontrolado de partículas, efectuando la parte del ensayo que requiera uso de mercurio en un recipiente grande que pueda recoger lo que se derrame durante el ensayo · Las partículas no controladas deben limpiarse de la mejor manera posible, empleando un procedimiento que resulte idóneo.

## **USO Y SIGNIFICADO**

Los factores de contracción cubiertos por este método de ensayo se pueden determinar únicamente en suelos básicamente finos (cohesivos), que presenten resistencia cuando se secan al aire.

Se supone normalmente que el término límite de contracción en porcentaje, expresado como un contenido de agua, representa la cantidad de agua necesaria para llenar los vacíos de un suelo cohesivo dado, cuando se halle en su relación de vacíos más baja, obtenido ese valor por secado (generalmente en Instituto Nacional de Vías E 127 - 2 el horno). Así, el concepto del límite de contracción se puede emplear para evaluar el potencial

de contracción, es decir, la posibilidad que se desarrolle grietas en obras que incluyen suelos cohesivos.

- **DETERMINACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS (PRESION EXPANSION Y EXPANSION LIBRE) I.N.V. E – 132 – 13 (INVIAS, 2013)**

Esta norma se refiere a un método para determinar si un suelo es potencialmente expansivo, así como a los métodos para predecir la magnitud del hinchamiento que se pueda producir.

Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es de responsabilidad de quien la emplee, el establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicabilidad de limitaciones regulatorias, con anterioridad a su uso.

## **7. ESTUDIOS REALIZADOS.**

### **7.1 CLASIFICACION DE LOS SUELOS.**

#### **CARACTERIZACION GRANULOMETRICA DEL SUELO**

Se realizó la clasificación granulométrica a los suelos mezclados con la ceniza y suelos vírgenes, con base a la norma de la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (INV E-123-13.)

Se inició con el lavado de la muestra por el tamiz número 200, consecutivamente se secó al horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante mínimo 24 horas, al siguiente día se retiró del horno e iniciamos con el tamizado.

Una vez se tuvieron las muestras secas se eligieron tamices para el tipo de suelo, siendo consecutivo en su orden, siendo así se realizar el tamizado respectivo. Tomando la masa del material retenido en cada tamiz.

Ya teniendo los datos en los formatos iniciamos con los cálculos y llenado de los formatos de resultados y así analizar su clasificación.

Foto 1 - Realización de Ensayos de Tamizado (Granulometría)



Fuente: German Anderzon Peña Hernández

**Foto 2 - Muestras para realizar la clasificación y límites de Atterberg**



**Fuente:** German Anderzon Peña Hernández

## **7.2 LIMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO (LIMITE DE ATTERBERG)**

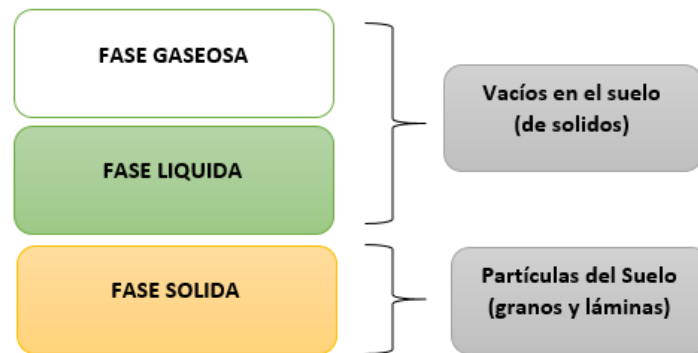
Los límites se basan en el concepto de que, en un suelo fino, es decir, cuando más del 50% de la muestra pasa el tamiz 200. Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg. Originalmente, Albert Atterberg definió seis “límites de consistencia” para suelos finos: límite superior del flujo viscoso, límite líquido, límite pegajosidad, límite de cohesión, límite plástico y, en algunas referencias, también al límite de contracción. En el uso actual de la ingeniería el término se aplica solamente a los límites líquido y plástico, y en algunas referencias también al límite de contracción.



**Límite líquido:** cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande.

**Límite plástico:** cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

**Límite de retracción o contracción:** cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.



**Fuente:** German Anderzon Peña Hernández

### 7.2.1 Límite líquido.

El límite líquido se refiere al punto en el cual el suelo fino pasa de estado plástico a estado líquido adicionándosele agua. Este ensayo se realizó siguiendo la norma “determinación del límite líquido de los suelos” (INV E – 125 – 13).

La determinación del límite líquido interviene en varios sistemas de clasificación de suelos. El límite líquido solo, o en conjunto con el límite plástico y el índice de plasticidad son usados para establecer importantes propiedades ingenieriles como la compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, expansión, contracción y resistencia al corte.

Una porción de suelo de aproximadamente 100 gramos que pase el tamiz de 425 de  $\mu\text{m}$  (No. 40), se esparce sobre una cazuela de bronce, como la que aparece en la figura 4 llamada copa de Casagrande, que es dividida en dos partes con un ranurador, permitiendo que estas dos partes se vuelvan a unir como resultados de los golpes de la caída de la cazuela sobre una base.

Se tomaron varios puntos teniendo en cuenta que la cantidad de golpes necesarios para cerrar la abertura este cerca de 25 golpes. Se dibujó la curva de fluidez, que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes, el contenido de agua se dibujó como ordenada en escala aritmética y el

número de golpes como abscisa en escala logarítmica. La gráfica de fluidez es una línea de tendencia recta que pasa lo más cerca posible de los tres o más puntos tomados. El límite líquido se establece como el contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes.

**Foto 3 - Copa de Casagrande.**



Fuente: (grande, 2015)

### **7.2.2 Límite plástico.**

El límite plástico ( $L_p$ ,  $w_p$ ) es el contenido de agua en el suelo expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido. Este ensayo se desarrolló bajo el seguimiento de la norma “Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos” (INV E 126 – 13). También se obtuvo a partir del mismo ensayo el índice de plasticidad que se define como el rango de contenidos de agua dentro del cual un suelo se comporta plásticamente, se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

El ensayo se realizó igualmente sobre una porción de suelo que pasara el tamiz de 425 de  $\mu\text{m}$  (No. 40), es un procedimiento corto y sencillo pero que debe ser realizado con algunas precauciones para obtener resultados más precisos.

Se determinó presionando porciones de suelo húmedo con una consistencia en la cual este no se pegara en las manos para formar rollos de 3.2 mm ( $3/8$ ”) de diámetro, hasta que disminuyera su contenido de agua hasta el nivel en que aparecen fisuras o se desmorona el rollo, el límite plástico es la humedad más baja con la cual los rollos no se fisuran ni se desmoronan.

Tanto el límite líquido como límite plástico son números enteros. Si alguno de los dos no se puede determinar o si el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, se establece que el suelo es no plástico, NP.

**Foto 4 - Rollo límite plástico.**



**Fuente:** Propia

### **7.2.3 Metodologías de clasificación para muestras de suelo ensayado.**

Para realizar la clasificación del suelo se utilizaron dos metodologías reconocidas, unificadas y aplicadas a nivel internacional como lo son la AASHTO y la USCS.

### **7.2.4 Clasificaciones de suelos AASHTO.**

Para la aplicación de este método será necesario un mínimo de datos en cuanto tiene que ver con granulometrías y límites del suelo en cuestión, posteriormente estos datos son introducidos a la figura a continuación mostrada.

**Tabla 4 – Sistema de clasificación AASHTO**

Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos del total pasa el tamiz No 200)							Materiales limo-arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentaje de material que pasa el tamiz No 10 No 40 No 200	50 max 30 max 15 max	50 max 25 max	51 min 10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa el tamiz No 40 Límite Líquido, $w_L$ Índice Plástico, $I_p$				40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min
Índice de Grupo	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max

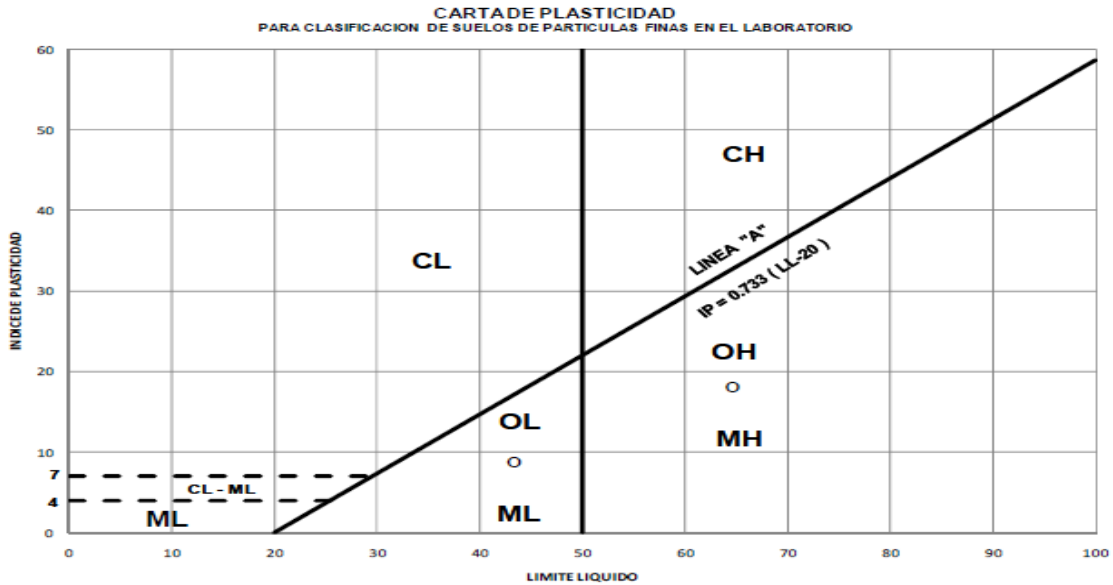
**Fuente:** Fundamentos de la mecánica de suelos, Juárez Badillo tomo 1.

La clasificación por medio de la figura antes mostrada consistió en la iteración de los resultados previos ya nombrados del suelo, para definir el grupo al que pertenece con determinadas características. Dado el caso que los datos no se encuentren dentro de los rangos establecidos se pasa al siguiente ítem hasta lograr ubicar el suelo dentro de uno de los grupos.

### 7.2.5 Clasificaciones de suelos USCS.

De igual forma esta metodología requiere de datos previos de ensayos básicos como granulometría y límites del suelo en cuestión. Dado que el suelo ensayado es un suelo fino predeterminadamente escogido y soportado por la determinación del tamaño de las partículas, solo se utilizará la parte correspondiente a la carta de plasticidad del mismo.

**Figura 4 – Carta de plasticidad metodología USCS.**



**Fuente:** Fundamentos de la mecánica de suelos, Juárez Badillo tomo 1.

Con los valores de limite liquido e índice de plasticidad se ingresa señalando una coordenada la cual, dada la figura anterior, definirá que tipo de suelo es y por lo tanto las características ya conocidas típicas del mismo.

**Foto 5 - Ensayos de límite liquido de los suelos.**





Fuente: Propia

### 7.3 LIMITE DE CONTRACCIÓN.

El límite de contracción es el contenido máximo de agua, por debajo del cual un secado adicional no causa una disminución de volumen de la muestra de suelo, pero por encima del cual un incremento en el contenido de agua si produce un aumento en el volumen de la masa de suelo.

El límite de contracción es una forma de significativa de ocupar la cantidad necesaria para llenar los vacíos de un suelo cohesivo, cuando se tenga un proceso de saturación y halla una relación de vacíos que la necesita por medio de un secado

Técnicamente el límite de contracción es una forma básica que se puede emplear y evaluar el potencial de contracción para relacionarlas en el desarrollo de problemas como grietas en obras que incluyan suelos cohesivos.

El desarrollo del ensayo se hace bajo el seguimiento de la norma “Determinación de los factores de contracción de los suelos” (INV E – 127 -13).

Foto No. 06 - Ensayo límite de contracción.



Fuente: Propia

El recipiente tiene una capacidad de contracción, el cual es el volumen de la masa de suelo húmedo, que se determinó llenando el recipiente con mercurio.

El volumen del mercurio se determinó, conteniendo en el recipiente de contracción determinando la masa del mercurio que llena el recipiente, dividiéndola entre su densidad ( $13.55 \text{ g/cm}^3$ ) y el volumen de la masa de suelo húmedo.

Seguido de llenar el recipiente de contracción con capas y los respectivos golpes se dejaron las muestras a temperatura ambiente aproximadamente de 3 a 5 horas, el cual se observó un color más claro de las muestras, el cual se ubicaron las probetas con las muestras dentro del horno a una temperatura de  $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas.

Después de haber pasado el tiempo sugerido en el horno, se retiran las muestras y se presionan cada muestra sobre una probeta rebosado el mercurio, obteniendo el volumen de mercurio desplazado, ya que con este dato se realizaron los respectivos cálculos para encontrar el límite de contracción.

#### **7.4 ENSAYO DE COMPACTACION.**

En mecánica de los suelos, el ensayo de compactación proctor es uno de los más importantes de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. A través de él es posible determinar la densidad seca máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, a una energía de compactación determinada.

Existen dos tipos de ensayos “Ensayo proctor Standard” y el “ensayo de proctor modificado”. El cual la diferencia está variando sus números de golpes, cambio de alturas de los golpes, pesos del martillo y numero de capas. El objetivo de este ensayo es medir la capacidad de soporte que tiene un terreno al momento de estudiarse y diseñarse al igual de su construcción.

El ensayo consiste en compactar una porción de suelo en un cilindro con volumen conocido. Haciéndole variar la humedad para obtener la curva que relaciona la humedad y la densidad seca máxima a determinada energía de compactación.

Ambos ensayos se deben al ingeniero que les da nombre, Ralph R. Proctor (1933), y determinan la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos, en determinadas condiciones de humedad y energía.

Foto 7 - Herramientas a utilizar.



Fuente: Propia

**METODO:** A

**DIAMETRO DEL MOLDE:** 101.6 mm (4")

**MATERIAL:** Pasa de tamiz 5.75 mm (No. 4)

**GOLPES POR CAPA:** 25

**USO:** si el 25% o menos de la masa de material queda retenida en el tamiz de 4.75mm (No 4) sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre el 5% y el 25% de la masa A, pero se requiere la corrección por sobre tamaños y, en estén caso, el uso de método A no reportada ninguna ventaja.

**OTRO USO:** si este método requisito de granulometría no se puede cumplir, se deben usar los métodos B o C.

La preparación de las muestras se inició recopilando un aproximado de 20 kilos de material por cada uno de las seis mezclas de los diferentes porcentajes de ceniza más los dos materiales sin contaminación.

Los materiales se mezclaron con agua con un porcentaje variable entre 5% y 20%, para aumentar la humedad y así realizar los ensayos de proctor, se mezclaron dividiendo la muestra en cuatro y mezclando estos cuatro materiales en los distintos porcentajes de agua y dejando curando hasta el otro día y así realizar el ensayo.



**Foto 8 - Ensayo de compactación CBR y Proctor Modificado.**



**Fuente: Propia**



**Fuente: propia**

### **7.5. COMPACTACION CBR.**

Determinación de la capacidad de soporte CBR del suelo, la finalidad de este ensayo, determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio con una humedad optima y niveles de compactación variable, el ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un % de la relación de soporte. El CBR está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundada determinada, expresada en profundidad y con igual velocidad y con igual velocidad, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una velocidad de deformación unitaria de 1.27 mm/min. Se toman lecturas de carga versus penetración cada 0.64 mm de penetración hasta llegar a un valor de 5.0 mm a partir del cual se toman lecturas con velocidades de penetración de 2.5 mm/min hasta obtener una penetración total de 12.7 mm.

Resultados obtenidos por el ensayo de compactación dependiendo de las lecturas de cargas para saber la expansión de la muestra y demostrar cuanto es su resistencia y a la compresión y cambio de volumen.

### **7.6 CBR PENETRACION.**

Ensayo para calcular el CBR para una penetración de 0.01 pulgadas (carga patrón 3000 psi) para los mismo 6 ensayos, grafica de la curva CBR % versus densidad seca gr/cm<sup>3</sup>, de los **suelos de la Vereda Casuman – Lebrija, suelo virgen.**

Resultados de los promedios Compactación CBR, CBR penetración los límites de contracción los suelos de la **vereda casuman, Lebrija, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

### **7.7 ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE.**

El ensayo de compresión no confinada, también conocido con el nombre de ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniáxica, es muy importante en Mecánica de Suelos, ya que permite obtener un valor de carga última del suelo, el cual, como se verá más adelante se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un valor más preciso, ya que entrega un resultado conservador. Este ensayo puede definirse en teoría como un caso particular del ensayo triaxial. Es importante comprender el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, ya que es en ellos o sobre ellos que se van a fundar las estructuras, ya sean puentes, edificios o carreteras, que requieren de una base firme, o más aún que pueden aprovechar las resistencias del suelo en beneficio de su propia capacidad y estabilidad, siendo el estudio y la experimentación las herramientas para conseguirlo, y finalmente poder predecir, con una cierta aproximación, el comportamiento ante las cargas de estas estructuras. Debido a la compleja y variable naturaleza de los suelos, en especial en lo referido a la resistencia al esfuerzo cortante, existen muchos métodos de ensayo para evaluar sus características. Aun cuando se utilizan otros métodos más representativos, como el triaxial, el ensayo de compresión simple cumple el objetivo buscado, sin tener que hacer un método tan complejo ni usar un equipo que a veces puede ser inaccesible, lo que significa menor costo. Este método de ensayo es aplicable solo a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. Los suelos secos friables, los materiales fisurados, laminados, los limos, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada. (INVIAS, 2013)

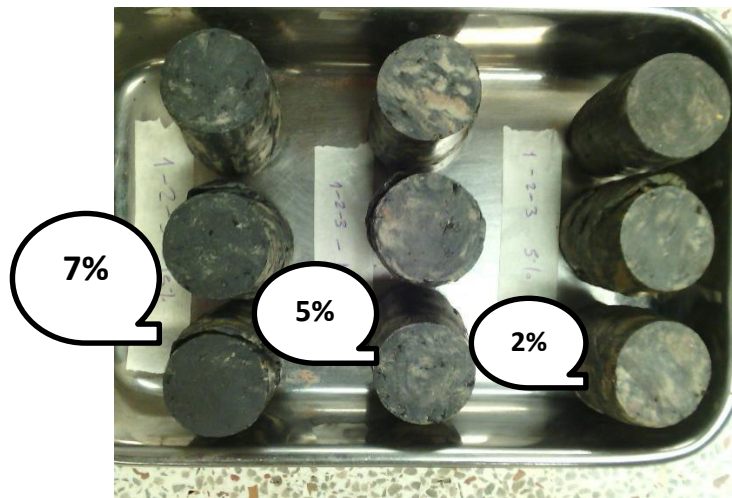
El ensayo de compresión simple se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo a la compresión no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación y utilizando una muestra

de suelo inalterada tallada en forma de cilindro, generalmente con una relación alto/diámetro igual a 2. Esta prueba tiene la ventaja de ser de fácil realización y de exigir equipo relativamente sencillo, en comparación con las pruebas triaxial, si se desea ir al fondo de los mecanismos de falla que tienen lugar; por el contrario, los resultados de la prueba son de fácil aplicación a los trabajos de rutina, por lo menos en apariencia. a.(INVIAS,2013)

También se determinará la resistencia por medio de carga triaxial con control de deformación. a. (INVIAS, 2013)

El ensayo se desarrolló bajo el seguimiento de la norma “Compresión inconfiada en muestras de suelo” (INV E 152 – 13).

**Foto 9 - Máquina de compresión simple.**



**Fuente: Propia**

## **7.8. EXPANSIÓN DEL SUELO Y EXPANSION LIBRE. (INVIAS, 2013)**

El índice de expansión libre es el aumento de volumen que sufre un suelo son restricciones externas, cuando se sumerge en agua. Los suelos finos, en especial los cohesivos, se expanden o se contraer a medida que pasan del estado seco al estado húmedo o viceversa. Esta alteración de humedad puede producir cambios volumétricos que crean movimientos, provocando reacciones en las estructuras causando graves agrietamientos en pavimentos, pisos, muros y cimentaciones.

Todos los tipos de suelos donde se quieren realizar trabajos de cualquier tipo de estructura o estabilización deber ser examinados y estudiados a tiempo con el fin de analizarlos y saber el uso apropiado para utilizarlos con los materiales adecuados.

El ensayo de expansión se realizó bajo el seguimiento de la norma “Determinación de suelos expansivos” (INV E – 132 – 13).

Se tomaron dos probetas de 25 ml de capacidad, en la cuales se agregaron 5 gr de suelo, después de secado, en cada una. Posteriormente una probeta fue llenada con agua y la otra con Kerosene, ambas fueron mezcladas hasta observar todas las partículas de suelo suspendidas en el líquido. Luego de 24 horas de reposo, se toman las medidas del material sedimentado en cada probeta y se procedió a realizar los cálculos especificados en la norma.

Este ensayo fue realizado en la parte final de la presente investigación en pro de realizar una comparación entre la muestra inalterada y la muestra alterada con el porcentaje óptimo para el parámetro aquí descrito, del que depende la estabilidad de muchas obras civiles con el fin de establecer si hay mejora o no con la adición de la ceniza estabilizante.

Resultados de los promedios de los ensayos presión expansión y expansión libre de los suelos de la **GRAN RESERVA, LAGOS DEL CACIQUE, Santander**, contando con la clasificación de suelo sin contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

### **6.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ZONA LAGOS DEL CACIQUE, GRAN RESERVA**

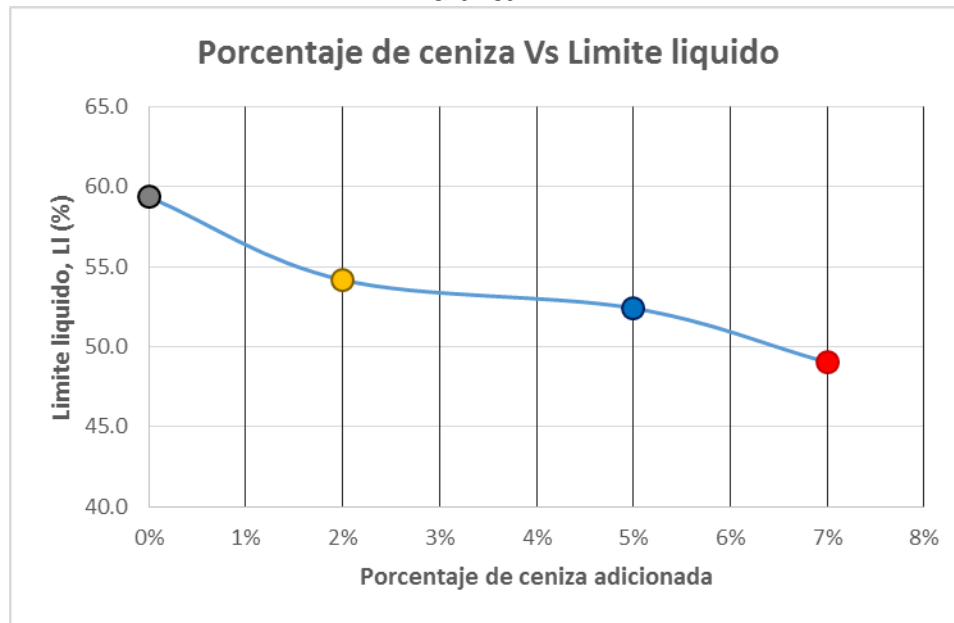
### **6.2. RESULTADOS DE GRANULOMETRIA Y PROPIEDADES INDICE**

Resultados de los promedios de la clasificación de los suelos de la **Gran Reserva – lagos del cacique, Santander**, contando con la clasificación de suelo sin contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 1.

GRAN RESERVA LAGOS DEL CACIQUE					
Condición del suelo		Suelo Virgen 0%	Suelos al 2%	Suelo al 5%	Suelo al 7%
Granulometría	Gravas (%)	0.42	0.48	0.49	0.57
	Arenas (%)	39.45	41.01	46.00	46.82
	Finos (%)	60.55	58.99	54.00	52.88
Limite liquido, LI (%)		59.38	54.18	52.41	49.02
Indice de pasticidad, IP (%)		21.98	28.38	30.61	28.35
Clasificacion (SUCS)		CH	CH	CH	CL

Grafica 1.



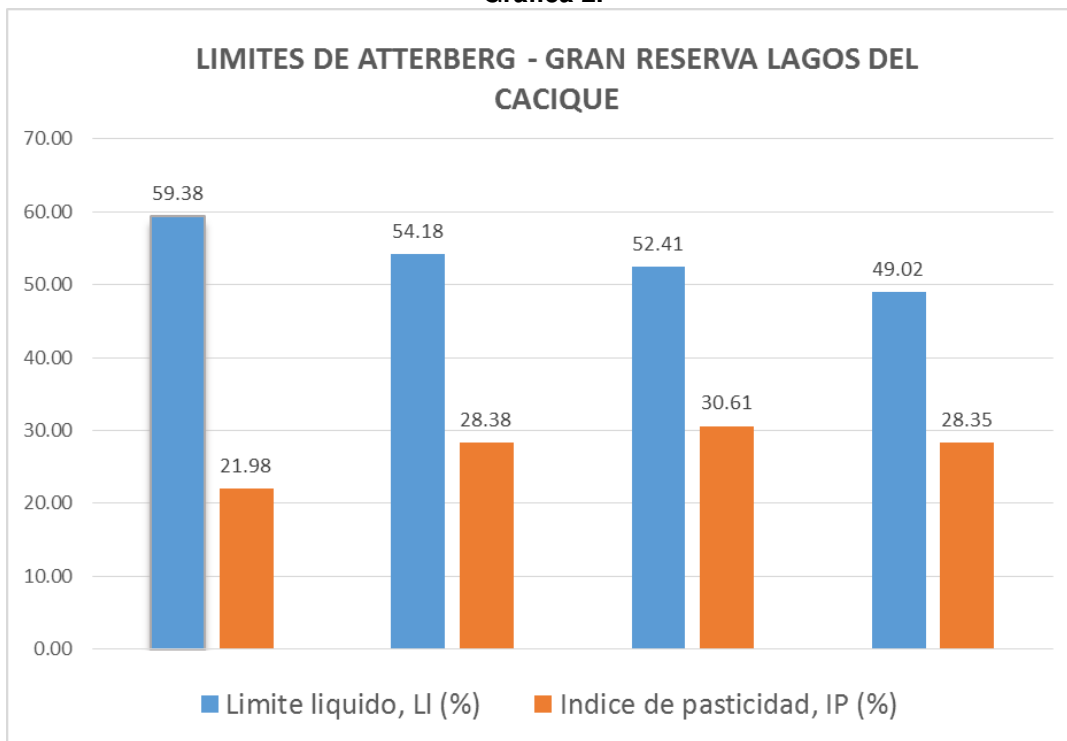
### 6.3. RESULTADOS DEL LIMITE DE ATTERBERG

Resultados de los promedios de los límites de Atterberg los suelos de la **GRAN RESERVA, LAGOOS DEL CACIQUE, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

**Tabla 2.**

GRAN RESERVA LAGOS DEL CACIQUE		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO - INDICE PLASTICIDAD	Limite liquido, LI (%)	59.38	54.18	52.41	49.02
	Indice de pasticidad, IP (%)	21.98	28.38	30.61	28.35

**Grafica 2.**



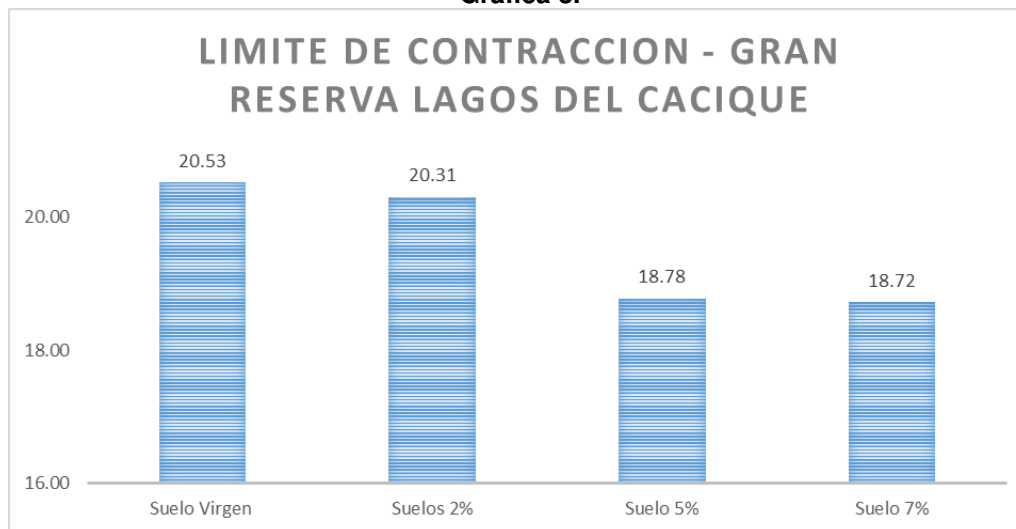
#### 6.4. RESULTADOS LIMITE DE CONTRACCION

Resultados de los promedios de los límites de contracción los suelos de la **GRAN RESERVA, LAGOS DEL CACIQUE, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

**Tabla 3.**

GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
LIMITE DE CONTRACCION	LC	20.53	20.31	18.78	18.72

**Grafica 3.**



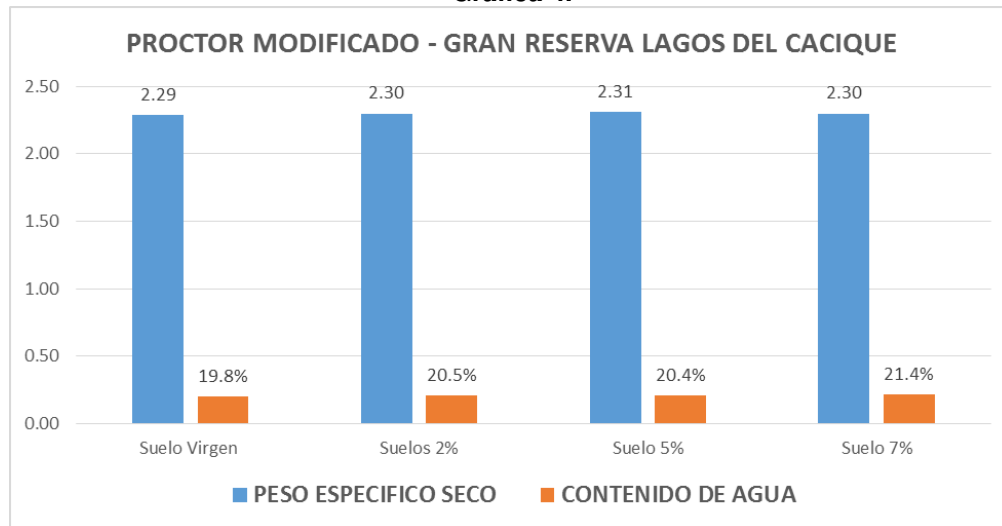
## 6.5. RESULTADOS PROCTOR MODIFICADO

Resultados de los promedios de Compactación CBR, CBR penetración. Los suelos de la **GRAN RESERVA, LAGOS DEL CACIQUE, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

**Tabla 4**

PROCTOR MODIFICADO					
GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%	Unidades
PESO ESPECIFICO SECO	2.29	2.30	2.31	2.30	gr/cm3
CONTENIDO DE AGUA	19.8%	20.5%	20.4%	21.4%	%

**Grafica 4.**



**6.6. RESULTADOS COMPACTACION CBR.**

**Tabla 5.**

GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
COMPACTACION CBR	mm	2.88	4.72	6.10	6.85

**Grafica 5.**





## 6.7. RESULTADOS CBR PENETRACION.

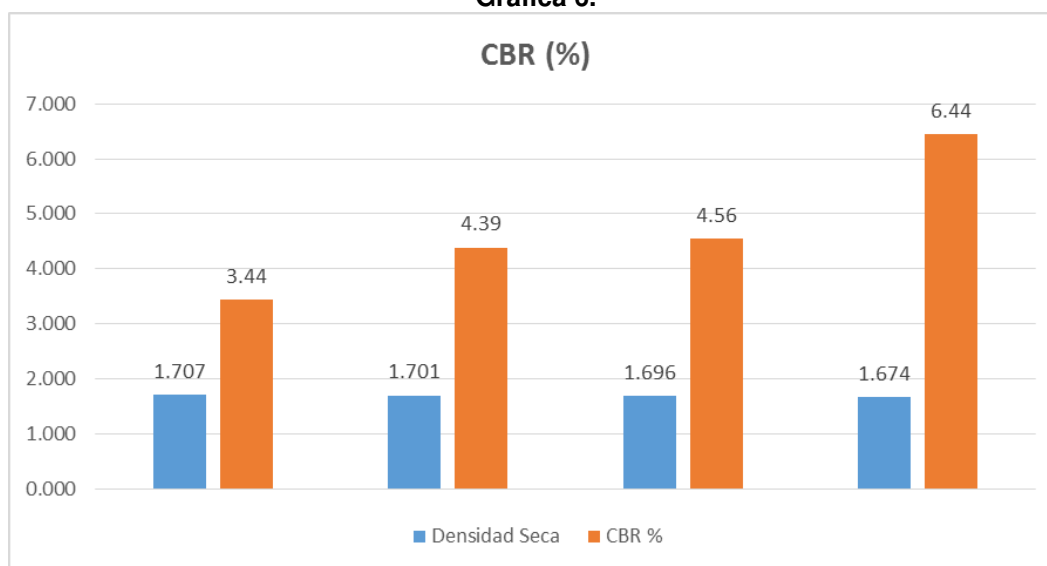
Ensayo para calcular el CBR para una penetración de 0.01 pulgadas (carga patrón 3000 psi) para los mismo 6 ensayos, grafica de la curva CBR % versus densidad seca gr/cm<sup>3</sup>, de los **suelos Gran Reserva – Lagos del cacique**.

Resultados de los promedios Compactación CBR, CBR penetración los límites de contracción los suelos de la **Gran Reserva lagos del cacique**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 6.

GRAN RESERVA LAGOS DEL CACIQUE		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
CBR %	Densidad Seca	1.707	1.701	1.696	1.674
	CBR %	3.44	4.39	4.56	6.44

Grafica 6.



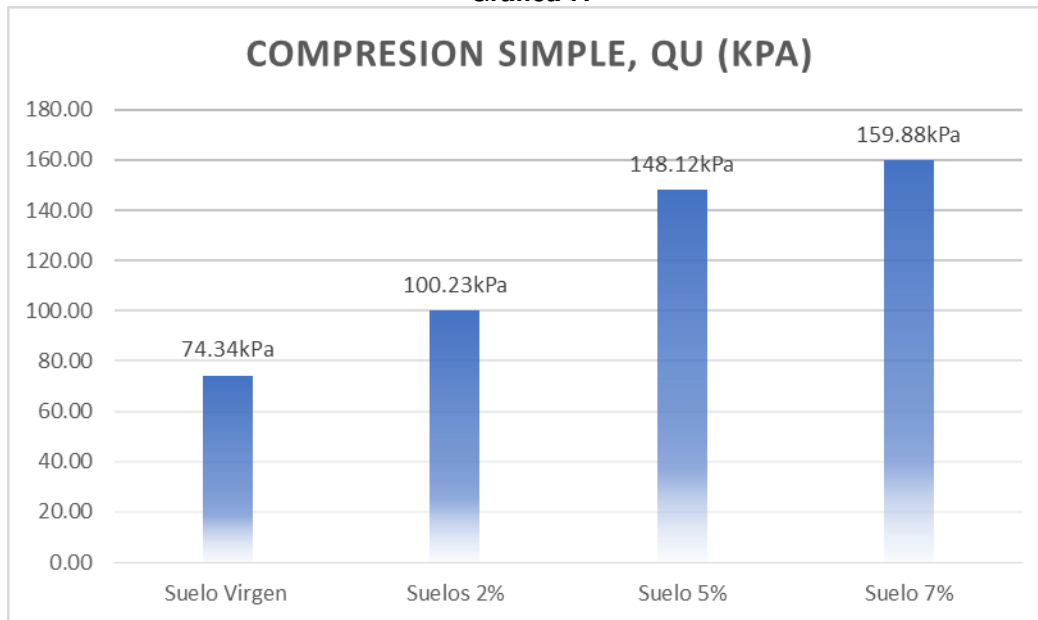
## 6.8. RESULTADOS COMPRESION SIMPLE

Resultados de los promedios del ensayo de compresión simple de los suelos de la **GRAN RESERVA, LAGOOS DEL CACIQUE, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 7.

GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
COMPRESION SIMPLE, qu (kPa)	74.34	100.23	148.12	159.88

**Grafica 7.**

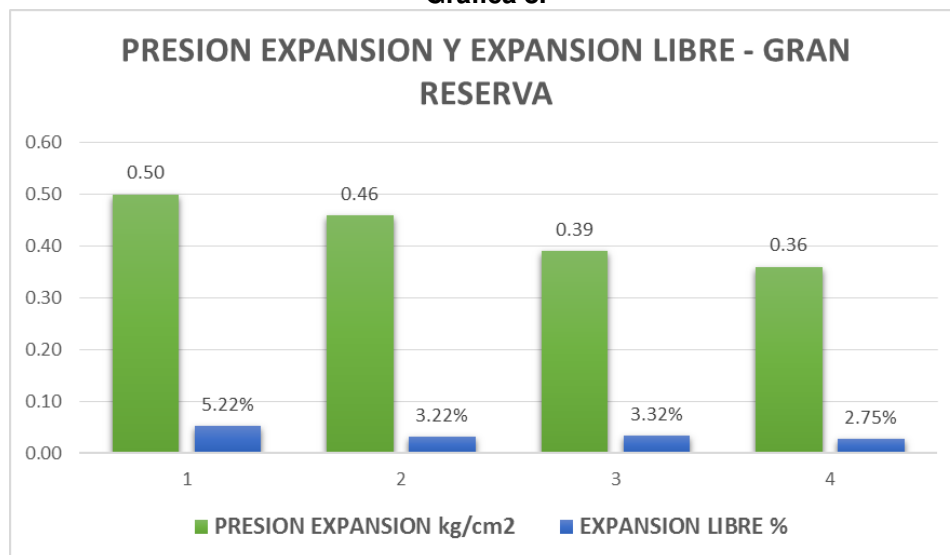


### 6.9. RESULTADOS PRESION EXPANSION Y EXPANSION LIBRE

**Tabla No 8.**

GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
<b>PRESION EXPANSION kg/cm2</b>	0.50	0.46	0.39	0.36
<b>EXPANSION LIBRE %</b>	5.22%	3.22%	3.32%	2.75%

**Grafica 8.**



**6.10.** Resultados promedios de los suelos analizados del sector la **GRAN RESERVA, LAGOS DEL CACIQUE, Santander**, suelo virgen y suelos contaminados con 2%, 5% y 7% de ceniza de locaciones petroleras.

**Tabla 9.**

GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE						
ENSAYOS			SUELO VIRGEN	SUELO CON EL 2%	SUELO CON EL 5%	SUELO CON EL 7%
1	GRANULOMETRIA %	Gravas	0.42	0.48	0.49	0.57
		Arenas	39.45	41.01	46.00	46.82
		Finos	60.55	58.99	54.00	52.88
		Clasificación (SUCS)	CH	CH	CH	CL
2	LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO - INDICE PLASTICIDAD	Limite liquido, LI (%)	59.38	54.18	52.41	49.02
		Indice de pasticidad, IP (%)	21.98	28.38	30.61	28.35
3	COMPACTACION CBR	mm Expansión	6.85	6.10	4.72	2.88
4	PROCTOR MODIFICADO	γd Max	2.29 Gr/cm <sup>3</sup>	2.30 Gr/cm <sup>3</sup>	2.31 Gr/cm <sup>3</sup>	2.30 Gr/cm <sup>3</sup>
		W Opt	0.20	0.21	0.20	0.21
5	CBR %	Densidad Seca	1.707	1.674	1.696	1.701
		CBR %	3.44	4.39	4.56	6.44
6	COMPRESION SIMPLE	qu	14.2 N/mm <sup>2</sup>	10.34 N/mm <sup>2</sup>	11.3 N/mm <sup>2</sup>	7.6 N/mm <sup>2</sup>
7	LIMITE DE CONTRACCION	LC (%)	20.53	20.31	18.78	18.72
8	PRESION EXPASION	PRE. EXP	0.5 kg/cm <sup>2</sup>	0.46 Kg/cm <sup>2</sup>	0.39 Kg/cm <sup>2</sup>	0.36 Kg/cm <sup>2</sup>
	EXPANSION LIBRE	EXP. LIBRE (%)	0.052	0.032	0.033	0.028

**7. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ZONA VEREDA CASUMAN, LEBRIJA, SANTANDER.**

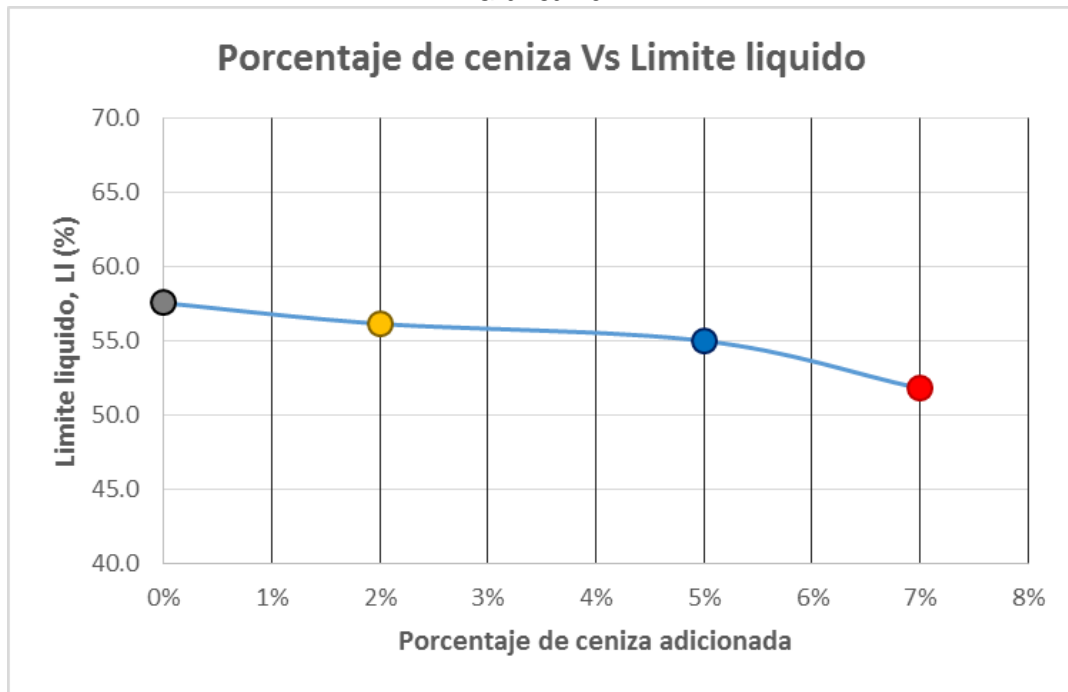
**7.1. RESULTADOS DE GRANULOMETRIA Y PROPIEDADES INDICE**

Resultados promedios de la clasificación de los suelos de la **vereda casuman – Lebrija, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 10.

VEREDA CASUMAN					
Condición del suelo		Suelo Virgen 0%	Suelos al 2%	Suelo al 5%	Suelo al 7%
Granulometría	Gravas (%)	0.30	0.20	0.20	0.20
	Arenas (%)	36.80	40.60	42.30	44.60
	Finos (%)	61.40	58.60	57.40	55.20
Limite liquido, LI (%)		57.56	56.16	55.00	51.79
Indice de pasticidad, IP (%)		34.87	25.92	32.84	30.08
Clasificación (SUCS)		CH	CH	CH	CL

Grafica 10.



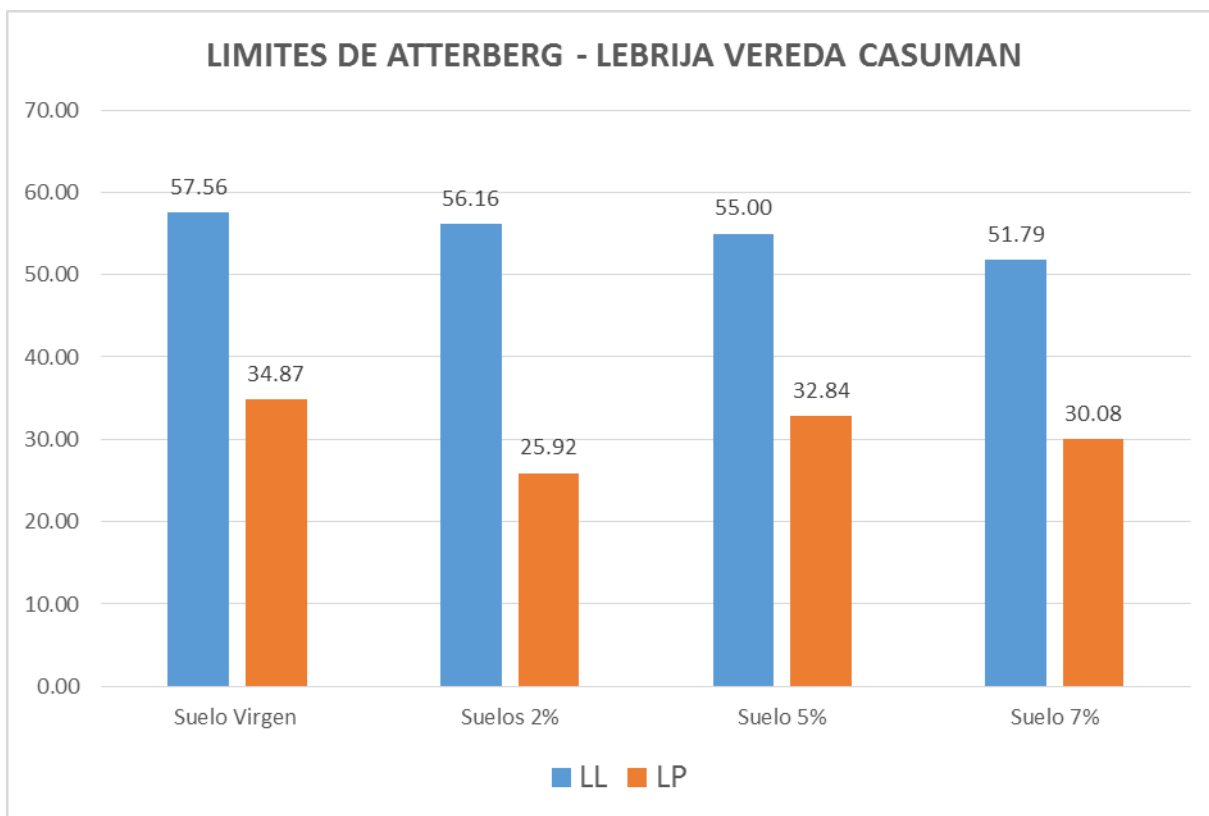
## 7.2. RESULTADOS DE LOS LIMITES DE ATERBERG

Resultados de los promedios de los límites de Atterberg los suelos de la **vereda casuman – Lebrija, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 11.

LEBRIJA - VEREDA CASUMAN		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO - INDICE PLASTICIDAD	LL	57.56	56.16	55.00	51.79
	LP	34.87	25.92	32.84	30.08

Grafica 11.



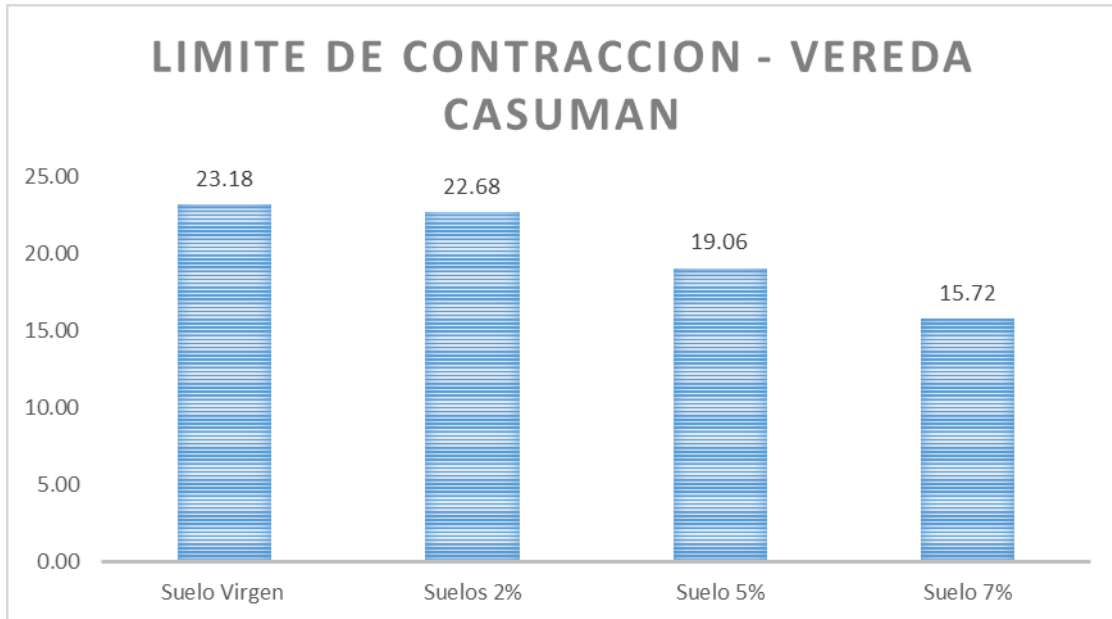
### 7.3. RESULTADOS DE LOS LIMITES DE CONTRACCION.

Resultados de los promedios de los límites de contracción los suelos de la **vereda casuman, Lebrija, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

**Tabla 12.**

LEBRIJA - VEREDA CASUMAN		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
LIMITE DE CONTRACCION	LC %	23.18	22.68	19.06	15.72

**Grafica 12.**



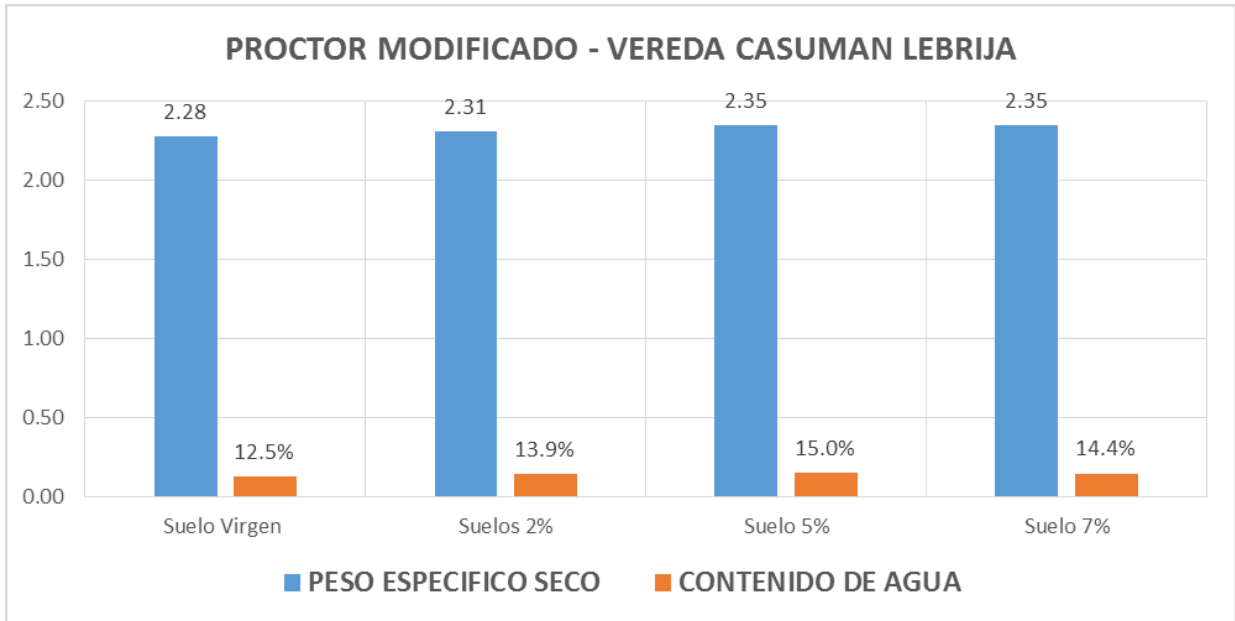
#### **7.4. RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADOS**

Resultados de los promedios de Compactación CBR, CBR penetración. Los suelos de la **VEREDA CASUMAN, LEBRIJA SANTANDER**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

**Tabla 13.**

<b>PROCTOR MODIFICADO</b>					
<b>VEREDA CASUMAN - LEBRIJA</b>	<b>Suelo Virgen</b>	<b>Suelos 2%</b>	<b>Suelo 5%</b>	<b>Suelo 7%</b>	<b>Unidades</b>
<b>PESO ESPECIFICO SECO</b>	2.28	2.31	2.35	2.35	gr/cm3
<b>CONTENIDO DE AGUA</b>	12.5%	13.9%	15.0%	14.4%	%

**Grafica 13.**

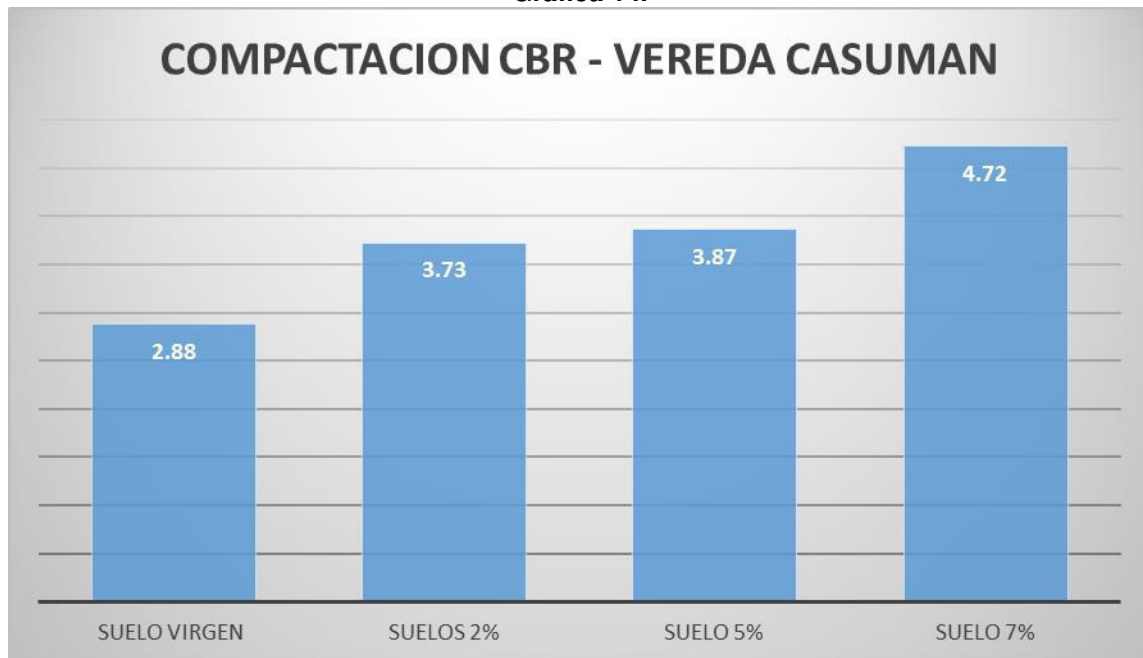


**7.5. RESULTADOS COMPACTACION CBR.**

**Tabla 14.**

VEREDA CASUMAN - LEBRIJA		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
<b>COMPACTACION CBR</b>	mm	2.88	3.73	3.87	4.72

**Grafica 14.**

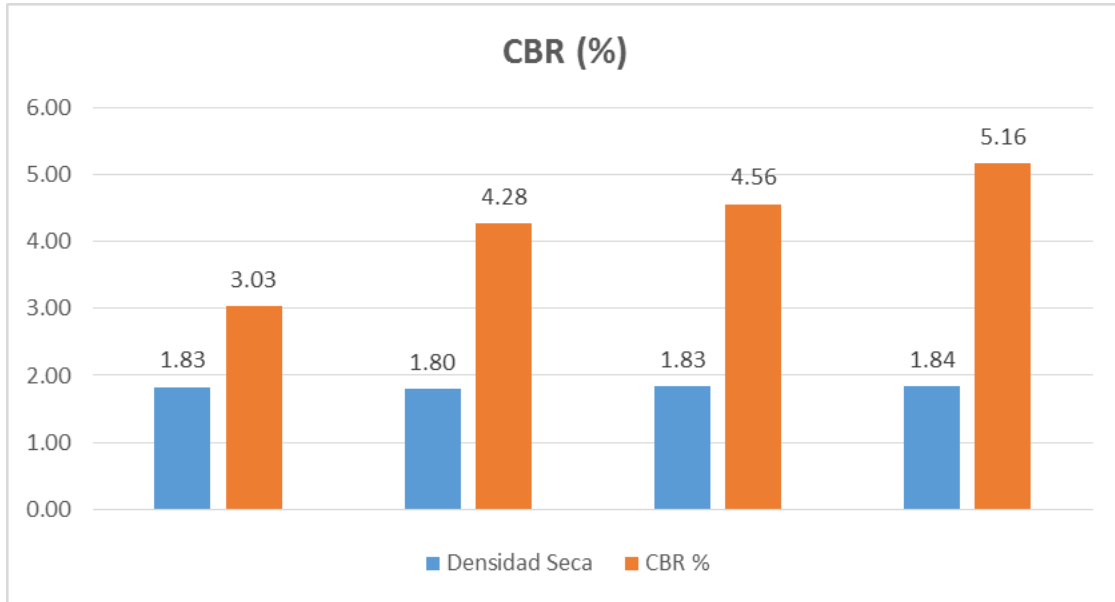


## 7.6. RESULTADOS CBR PENETRACION.

Tabla 15.

VEREDA CASUMAN - LEBRIJA		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
CBR %	Densidad Seca	1.83	1.80	1.83	1.84
	CBR %	3.03	4.28	4.56	5.16

Grafica 15.



## 7.7. RESULTADOS COMPRESION SIMPLE

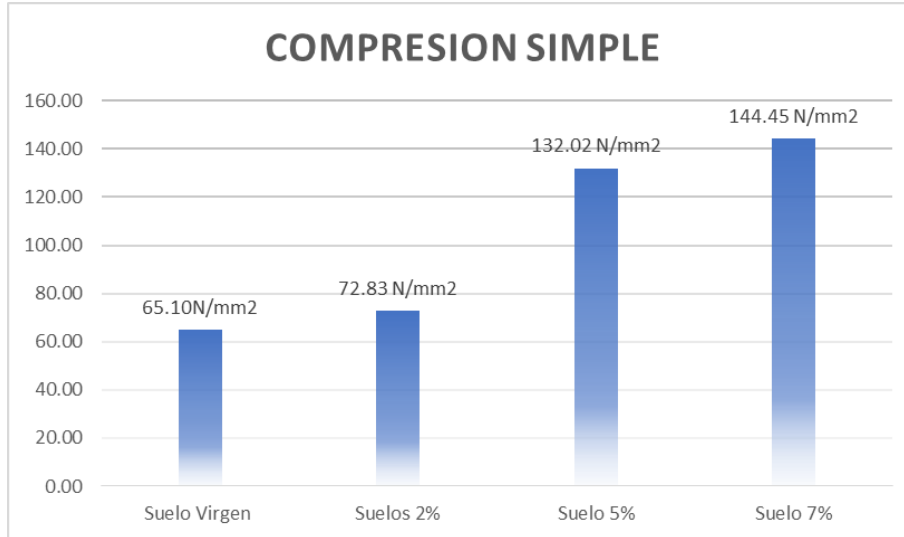
Resultados de los promedios del ensayo de compresión simple los suelos de la **vereda casuman, Lebrija, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 16.

LEBRIJA - VEREDA CASUMAN	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
COMPRESION SIMPLE	65.10	72.83	132.02	144.45



Grafica 16.



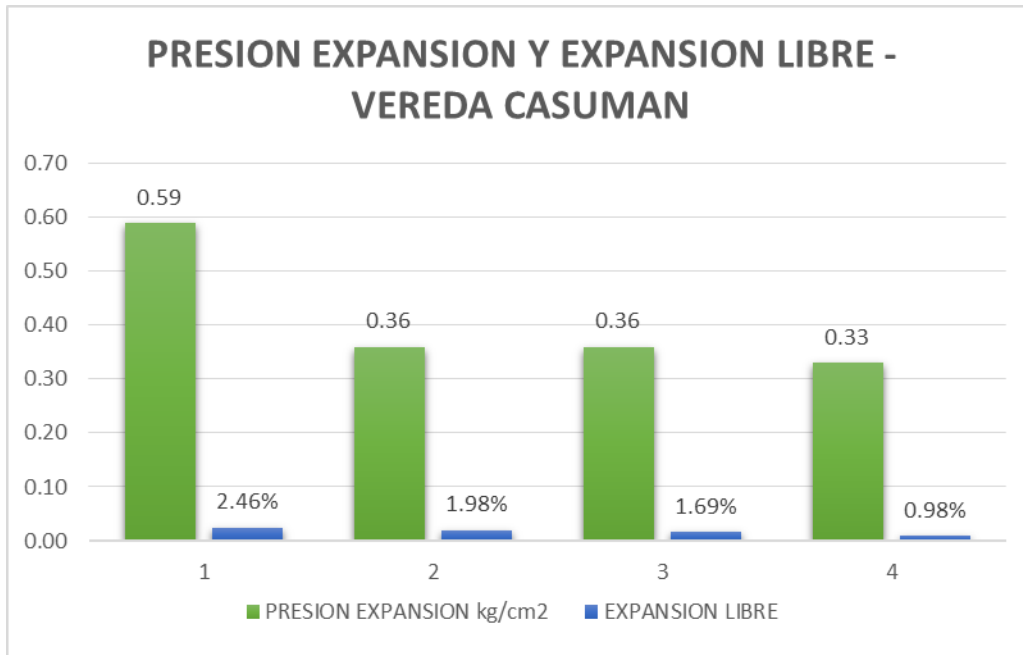
### 7.8. RESULTADOS PRESION EXPANSION SIMPLE

Resultados de los promedios del ensayos de presión expansión y expansión libre de los suelos de la **vereda casuman, Lebrija, Santander**, contando con la clasificación de suelo contaminación, suelo con contaminación al 2%, 5% y 7%.

Tabla 17.

LEBRIJA - VEREDA CASUMAN	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
PRESION EXPANSION kg/cm <sup>2</sup>	0.59	0.36	0.36	0.33
EXPANSION LIBRE	2.46%	1.98%	1.69%	0.98%

Grafica .17



**7.9. Resultados promedios de los suelos analizados del sector la vereda casuman, Lebrija, Santander, suelo virgen y suelos contaminados con 2%, 5% y 7% de ceniza de locaciones petroleras.**

**Tabla 18.**

BEREDA CASUMAN - LEBRIJA						
ENSAYOS		SUELO VIRGEN	SUELO CON EL 2%	SUELO CON EL 5%	SUELO CON EL 7%	
1	GRANULOMETRIA	Gravas	0.30	0.20	0.20	0.20
		Arenas	36.80	40.60	42.30	44.60
		Finos	61.40	58.60	57.40	55.20
		Clasificacion (SUCS)	CH	CH	CH	CL
2	LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO - INDICE PLASTICIDAD	Limite liquido, LI (%)	57.56	56.16	55.00	51.79
		Indice de pasticidad, IP (%)	34.87	25.92	32.84	30.08
3	COMPACTACION CBR	mm Expansi3n	4.72	3.87	3.73	2.88
4	PROCTOR MODIFICADO	γd Max	2.28	2.31	2.35	2.35
		W Opt	0.13	0.14	0.15	0.14
5	CBR %	Densidad Seca	1.830	1.799	1.832	1.836
		CBR %	3.03	4.28	4.56	5.16
6	COMPRESION SIMPLE	qu	10.90	9.50	9.30	5.60
7	LIMITE DE CONTRACCION	LC (%)	23.18	22.68	19.06	15.72
8	PRESION EXPASION	PRE. EXP	0.36	0.33	0.36	0.59
	EXPANSION LIBRE	EXP. LIBRE (%)	0.025	0.020	0.017	0.010

## 8. CONCLUSIONES

- Los materiales provenientes de las localidades “Gran Reserva y Vereda Casuman”, se caracterizaron mediante ensayos de granulometría con lavado y límites de Atterberg (Limite líquido, Limite de plasticidad e Índice de Plasticidad), resultando:

Gran Reserva.

- Clasificación SUCS. CH (Suelo virgen, Suelo al 2%, Suelo al 5%); CL (Suelo al 7%).
- Clasificación AASHTO. A-5 (Todos los materiales).

**Tabla 1.**

GRAN RESERVA LAGOS DEL CACIQUE					
Condición del suelo		Suelo Virgen 0%	Suelos al 2%	Suelo al 5%	Suelo al 7%
Granulometría	Gravas (%)	0.42	0.48	0.49	0.57
	Arenas (%)	39.45	41.01	46.00	46.82
	Finos (%)	60.55	58.99	54.00	52.88
Limite liquido, LI (%)		59.38	54.18	52.41	49.02

Vereda Casuman.

- Clasificación SUCS. CH (Suelo virgen, Suelo al 2%, Suelo al 5%); CL (Suelo al 7%).
- Clasificación AASHTO. A-5 (Todos los materiales).

**Tabla 10.**

VEREDA CASUMAN					
Condición del suelo		Suelo Virgen 0%	Suelos al 2%	Suelo al 5%	Suelo al 7%
Granulometría	Gravas (%)	0.30	0.20	0.20	0.20
	Arenas (%)	36.80	40.60	42.30	44.60
	Finos (%)	61.40	58.60	57.40	55.20
Limite liquido, LI (%)		57.56	56.16	55.00	51.79

De acuerdo a estos resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio (ver tabla # 1 y 10), se puso a afirmar que los materiales provenientes de estas localidades son suelos de alta plasticidad en su estado natural, que a medida que se adiciona la ceniza, este mejora sus propiedades índices, mostrando una disminución en la plasticidad del material, mejorando la condición de fluidez al interactuar con el agua, ya que el paso del estado líquido al plástico de estos materiales fueron optimizados.

La grafica # 1 y 10, se muestra la disminución de las plasticidades de los materiales para todos los materiales.

Por tanto se pudo observar que el comportamiento del suelo mezclado al 7% pasó a ser un suelo de alta plasticidad a un suelo de plasticidad media, por lo que se puede decir que al mezclar más porcentaje de ceniza disminuye la plasticidad del suelo.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de compresión inconfiada de los diferentes materiales mezclados con ceniza de locaciones petroleras (ver tabla y grafica # 7 y 16), se puede definir que el comportamiento mecánico bajo carga axial mejoró a medida que se aumentó el porcentaje de adición. Estos ensayos de esfuerzo deformación son fundamentales en el campo de la geotecnia para definir la consistencia de los suelos cohesivos, en la tabla N. 19, se muestran los parámetros de consistencia definidos por la norma INVIAS.

**Tabla 7.**

GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
COMPRESION SIMPLE, $q_u$ (kPa)	74.34	100.23	148.12	159.88

**Tabla16**

LEBRIJA - VEREDA CASUMAN	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
COMPRESION SIMPLE	65.10	72.83	132.02	144.45

**Tabla. 19**

CONSISTENCIA DEL SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA	
	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
Muy Blanda	< 0,25	< 25
Blanda	0,25 - 0,50	25 - 50
Mediana	0,50 - 1,00	50 - 100
Firme	1,00 - 2,00	100 - 200
Muy Firme	2,00 - 4,00	200 - 400
Dura	> 4,00	> 400

**Fuente: Norma I.N.V. E-152**

De acuerdo a esta tabla, para ambos materiales provenientes de las dos locaciones, estos suelos vírgenes que se encontraban en una consistencia del suelo mediana

que esta entre 50Kpa y 100Kpa mejoraron en su resistencia a la compresión axial al ser mezclados con ceniza de locaciones petroleras en un 7%, cambiando su resistencia a la compresión de una consistencia de suelo mediana a una consistencia de suelo firme que se encuentra entre 100Kpa y 200Kpa.

- Con el fin de obtener la densidad máxima de compactación del suelo en estudio con los diferentes porcentajes de mezclado con la ceniza de locaciones petroleras (2%, 5% y 7%), se realizó el ensayo de proctor modificado, en los cuales se obtuvieron los resultados mostrados en las Tablas y graficas # 4 y #13. Con estos valores obtenidos ponemos determinar que la densidad del suelo se mantiene al aumentar el porcentaje de ceniza, sin embargo para obtener esta misma compactación se deberá aumentar el porcentaje de humedad del suelo. Esto quiere decir que al aumentar el porcentaje de ceniza la plasticidad del suelo disminuye (es menos plástico), es por ello que para alcanzar la humedad optima de compactación se debe utilizar mayor porcentaje de humedad.

**Tabla 4**

PROCTOR MODIFICADO					
GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%	Unidades
PESO ESPECIFICO SECO MAXIMO	2.29	2.30	2.31	2.30	gr/cm3
CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMO	19.8%	20.5%	20.4%	21.4%	%

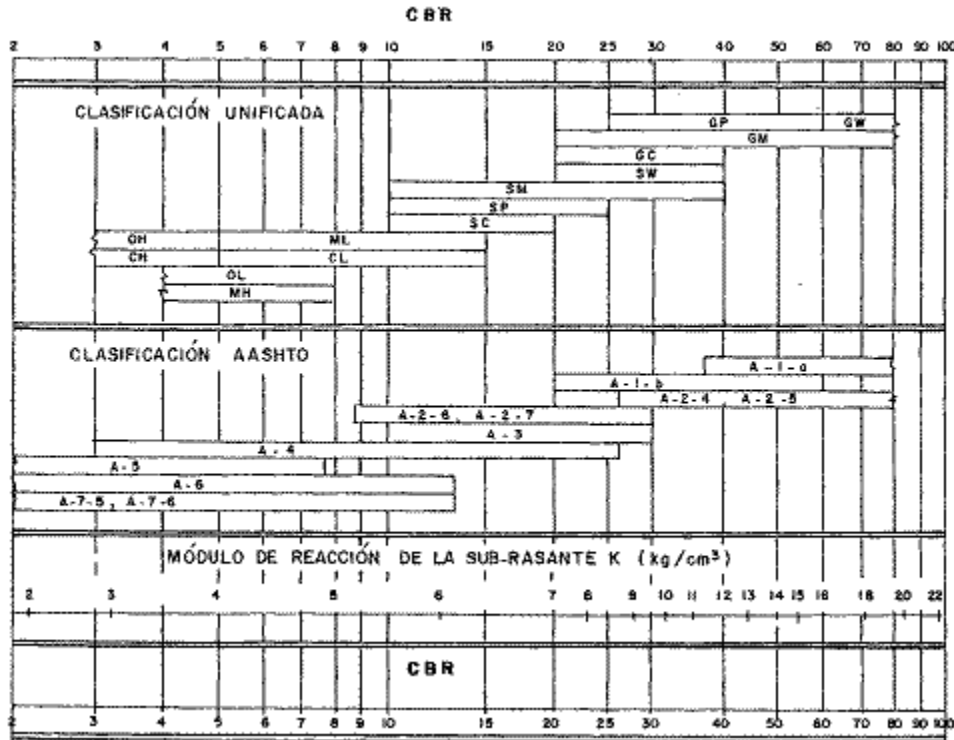
**Tabla 13**

PROCTOR MODIFICADO					
VEREDA CASUMAN - LEBRIJA	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%	Unidades
PESO ESPECIFICO SECO MAXIMO	2.28	2.31	2.35	2.35	gr/cm3
CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMO	12.5%	13.9%	15.0%	14.4%	%

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de proctor modificado para los suelos virgen, suelo al 2%, 5% y 7%, arrojaron valores similares en la densidad máxima en relación con la humedad Optima, por lo tanto podemos afirmar que al aumentar el porcentaje de ceniza de locaciones petroleras este material no mejora su porcentaje de compactación con respecto a la condición en su estado natural.
- Con el fin de evaluar la resistencia de los suelos, el ensayo difundido en nuestro medio es el de CBR (relación californiana de soporte), en nuestro caso realizamos ensayos de laboratorio cumpliendo la norma AASHTO T193-63. Debido a la importancia de este ensayo se han establecido relaciones empíricas entre las diversas medidas de resistencia como la que se muestra

en la figura 3.5 del libro de Alfonso Montejo Fonseca (INGENIERIA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS), Universidad Católica de Colombia.

Fuente Propia



- Figuras 3.5. Montejo, Alfonso (INGENIERIA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS), Universidad Católica de Colombia.

Teniendo en cuenta los resultados del ensayo de CBR realizados (ver tablas y graficas # 5 y #14), para el material de gran reserva se obtuvieron resultados de resistencia del suelo entre 2.88 (suelo virgen) a 6.85 (suelos mezclados con 7% de ceniza de locaciones petroleras), y para el material de la Vereda Casuman se obtuvieron valores de resistencia entre 2.88 (suelo virgen) a 4.72 (suelo mezclados con 7% de ceniza de locaciones petroleras), lo cual nos indica que los valores de resistencia del suelo van aumentando directamente proporcional al valor del porcentaje de adición de la ceniza de locaciones petroleras, lo cual comparando los resultados obtenidos con la figura 3.5 de Montejo, Alfonso (INGENIERIA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS), Universidad Católica de Colombia, los suelos de clasificación CH y/o A-5, tienen valores de CBR entre 2 a 5, rangos en los cuales se encuentran los suelos ensayados. Sin embargo se pudo apreciar que al mayor porcentaje de ceniza de localizaciones petroleras (7%), los suelos tienen clasificación CL y/o A-5, y para un suelo de clasificación CL, los valores de CBR se encuentran entre 5 a 15, rangos en los cuales se encuentran los resultados.

**Tabla 5**

<b>GRAN RESERVA - LAGOS DEL CACIQUE</b>		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
<b>COMPACTACION CBR</b>	mm	2.88	4.72	6.10	6.85

**Tabla 14**

<b>VEREDA CASUMAN - LEBRIJA</b>		Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
<b>COMPACTACION CBR</b>	mm	2.88	3.73	3.87	4.72

- Por otra parte cabe decir que el (%) porcentaje de ceniza donde se obtuvieron resultados más favorables es del 7%, ya que dan resultados que mejoran las propiedades del suelo.
- Dado a que la expansividad se produce exclusivamente en los suelos arcillosos, es de suma importancia evaluar los resultados de estos ensayos para conocer el porcentaje de hinchamiento o cambios volumétricos que pueden presentar estos materiales, por lo tanto de acuerdo a estos resultados se pudo observar que al mezclar el material del sitio con las cenizas de locaciones petroleras (lagos del cacique y vereda casuman), estos disminuyeron su potencial de hinchamiento tal como se muestra en las siguientes tablas (8 y 17):

**Tabla 8.**

<b>LEBRIJA - VEREDA CASUMAN</b>	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
<b>PRESION EXPASION kg/cm2</b>	0.59	0.36	0.36	0.33
<b>EXPANSION LIBRE</b>	2.46%	1.98%	1.69%	0.98%

**Tabla 17**

<b>LEBRIJA - VEREDA CASUMAN</b>	Suelo Virgen	Suelos 2%	Suelo 5%	Suelo 7%
<b>PRESION EXPASION kg/cm2</b>	0.36	0.33	0.36	0.59
<b>EXPANSION LIBRE</b>	2.46%	1.98%	1.69%	0.98%

- Se puede afirmar que las cenizas de locaciones petroleras mejoran el potencial expansivo de estos suelos, en un eventual caso de alterar su estado de humedad natural y mitigar los posibles daños causados en caso de ser utilizados como materiales de soporte en obras de ingeniería.

## 9. RECOMENDACIONES

- Estos análisis y resultados obtenidos están sujetos a los suelos mezclados al 2%-5%-7% y por ende para poder determinar una condición óptima, se debe realizar este mismo procedimiento en otros porcentajes de mezcla para evaluar su comportamiento, ya que es posible que disminuyan o cambie desfavorablemente el cambio de los suelos.
- Teniendo en cuenta que este material de mezclado, disminuye la plasticidad de los suelos, como en este caso de los suelos finos de gran reserva y de casuman, se recomienda adicionarle a la mezcla con cemento, para mejorar aún más sus propiedades de los suelos y saber cuál es el % de cemento y ceniza necesario dar un mejor mejoramiento al suelo de alta plasticidad.
- Dado a que este material de mezclado, disminuye la plasticidad de los suelos, como en este caso de los suelos finos de gran reserva y de casuman, se recomienda adicionarle a la mezcla cal, para mejorar aún más sus propiedades de los suelos y saber cuál es el % de cal y ceniza necesario dar un mejor mejoramiento al suelo de alta plasticidad.
- También se puede realizar un mezclado con material granular para ver qué tan flexible es y cómo es su comportamiento de la mezcla en estos tipos de suelos, si su comportamiento es a favor o no.
- Se recomienda ensayos de permeabilidad del suelo mezclado con la ceniza, para poder identificar en que porcentaje este tipo de mezclado podría garantizar la permeabilidad del suelo, si este fuera ser utilizado como base o Sub-base, para la construcción de una vía y así impedir el paso del agua para no afectar el grado de compactación y de esta manera se podrán ahorrar la utilización de geo membrana y/o Geo membrana.



## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Britpave. Suelos estabilizados como sub-base o base para las carreteras y otros pavimentos. BP/08, Britpave, Guildford, Reino Unido; 2004. 8 p.
2. Dirección General de Carreteras. HA 74/07, Tratamiento de relleno y material de recubrimiento utilizando cal o cemento o ambos. Manual de diseño para carreteras y puentes, vol. 4 Sección 1: Movimiento de tierras, parte 6, HMSO, Londres, Reino Unido; 2007.
3. S. Silvestre, JM Kinuthia, RB Robinson, I. Humphreys.
4. Efectos de escoria granulada de alto horno de tierra (GGBS) sobre la fuerza y propiedades de hinchamiento de caolinita estabilizada con cal en presencia de sulfatos.
5. Denis robin ruano lopez Estabilización de los suelos cohesivos por medio de arenas volantes y cal viva, Guatemala Septiembre de 2012.
6. E.garzon (1), p.j sanchez-soto (2), m. raigon (3) y a.ruiz-conde (2), Efectos de la compactación y estabilización con cemento y cal en las propiedades mecánicas de filitas, Almería, 2006.
7. Quintana creso, enrique.. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos, Universidad Nacional de Córdoba, 2005.
8. Denis robín ruano lopez, Estabilización de los suelos cohesivos por medio de arenas volantes y cal viva, Guatemala Septiembre de 2012.

## 11. WEB GRAFÍA

1. EICS, Estudiantes de Investigación Científica de Suelos, YOHANALIZ GUERRA, Ceniza Volante para estabilización de suelos, Evento Redcolcin 2013, [http://eicssantotomas.blogspot.com/2013/05/blog-post\\_8736.html](http://eicssantotomas.blogspot.com/2013/05/blog-post_8736.html) [Consulta: 1 abril de 2014].
2. IECA, Componentes y propiedades del cemento, [https://www.ieca.es/gloCementos.asp?id\\_rep=179](https://www.ieca.es/gloCementos.asp?id_rep=179) [consulta: 2 de abril de 2014].
3. Estabilización de los suelos con cal, [http://anfagal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Estabilizacion\\_de\\_suelos\\_con\\_cal-REBASA-PresentacionA.pdf](http://anfagal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estabilizacion_de_suelos_con_cal-REBASA-PresentacionA.pdf) [Consulta: 12 de mayo de 2014].
4. ANAYA GÓMEZ, PABLO F. Estabilización de suelos, [http://anfagal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Presentacion\\_Suelos\\_CALIDRA\\_SLP.pdf](http://anfagal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Presentacion_Suelos_CALIDRA_SLP.pdf) [consulta: 12 de mayo de 2014].
5. Estabilización de los suelos con cal, [http://anfagal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Estabilizacion\\_de\\_Suelos/Estabilizacion\\_de\\_suelos\\_con\\_cal-REBASA-PresentacionA.pdf](http://anfagal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estabilizacion_de_suelos_con_cal-REBASA-PresentacionA.pdf) [consulta: 12 de mayo de 2014].
6. Blissett, Rowson R.S, N.A, July de 2012, Una revision de la Utilizacion de multiples components de ceniza volantes de carbon, ScienceDirect, Volumen 97, <http://www.sciencedirect.com/consultaremotu.upb.edu.co/science/article/pii/S0016236112002335>, painas 1-23 [Consulta: 15 de mayo de 2014].
7. CRISTIAN ARANEDA, CENIZA VOLANTE....¿Un problema o una oportunidad?, 18 Marzo 2011, <http://ambiental.unab.cl/2011/03/cenizas-volantes%E2%80%A6-%C2%BFun-problema-o-una-oportunidad/> [Consulta: 20 de mayo de 2014]
8. ¿Cuáles son los peligros de la ceniza volante?, Copyright © 2009-2014 Salud All rights reserved, <http://es.265health.com/public-health->

safety/environmental-health/1008072025.html#.U3xG8\_I5Ng0 [Consulta: 20 de mayo de 2014]

9. CRISTIAN ARANEDA, CENIZA VOLANTE....¿Un problema o una oportunidad?, 18 Marzo 2011, <http://ambiental.unab.cl/2011/03/cenizas-volantes%E2%80%A6-%C2%BFun-problema-o-una-oportunidad/> [consulta: 20 de mayo de 2014]
10. ¿Cuáles son los peligros de la ceniza volante?, Copyright © 2009-2014 Salud All rights reserved, [http://es.265health.com/public-health-safety/environmental-health/1008072025.html#.U3xG8\\_I5Ng0](http://es.265health.com/public-health-safety/environmental-health/1008072025.html#.U3xG8_I5Ng0) [Consulta: 20 de mayo de 2014]
11. [1]GLOBAL OIL, Resources  
<http://www.globaloilresources.net/index.php/procesos-de-desorcion-termica>  
[Consulta: 20 de Agosto de 2014]
12. Carthy, Csetenyi, Sachdeva, Dhinr, MJ, LJ, A, RK. (2011). Identificar el papel de las propiedades de cenizas volantes para minimizar sulfato tirón en suelos estabilizados con cal, ScienceDirect, Volumen 92, issue, <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0016236111004066?np=y> [Consulta: 27 Julio de mayo de 2016]
13. Kalkan, E, (2011), Impacto de los ciclos de humedecimiento – secado en el comportamiento de hinchamiento de los suelos arcillosos modificados por humo de sílice. Aplicada Arcilla Ciencia, Volumen 52, Numero 4. <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0169131711001244> [Consulta: 28 Julio de mayo de 2016]
14. Bin-Shanfique, Rahaman, Yaykiran, Asfar, S, K, M, I. (2009), El rendimiento a largo plazo de las dos cenizas volantes estabilizado subbases de suelo de grano fino, recursos, conservación y reciclaje, volumen 54, número 10, <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0921344909002687> [Consulta: 01 Agosto de 2016]
15. Blisset, Rowon, RS, NA (2012), Una revisión de la utilización de múltiples componentes de ceniza volante de carbón, Combustible, volumen 97. <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0016236112002335> [Consulta: 01 Agosto de 2016]

16. Mohamed, A (2012) Mejoras de las propiedades de hinchamiento de la arcilla con las fibras de heno, construcción y materiales de construcción, volumen 38.  
<http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S095006181200623X> [Consulta: 05 Agosto de 2016]
17. Seco, Ramirez, Miqueleiz, Garcia, A, F, L, B, (2010). Estabilización de suelos expansivos para uso en la construcción. Aplicada de arcilla Ciencia, volumen 51, numero 3.  
<http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0169131710004436> [Consulta: 05 Agosto de 2016]
18. Saride, Puppala, Chikyala, S, A, S (2013) Inflamación-se encoge y los comportamientos de resistencia de la cal y el cemento estabilizadas arcillas expansivas orgánicos. Aplicada arcilla ciencia Volumen 85,  
<http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0013795214000453> [Consulta: 18 Agosto de 2016]
19. Consoli, Rocha, Silvani, N, C, C (2014) La elaboración de las dosis para las mezclas de ceniza de cal del suelo de exclusión aérea sobre la base de resistencia a la tracción controlar ecuaciones, Construcción y materiales de construcción, Volumen 55.  
<http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0950061814000786> [Consulta: 18 Agosto de 2016]
20. Trivedi, Nair, Lyyunni, J, S, C (2013). Utilización optima de ceniza volante para la Estabilizacion de la sub-grade del suelo utilizado algoritmo genético, Procedia Ingeniería, Volumen 51,  
<http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S1877705813000350> [Consulta: 19 Agosto de 2016]
21. McCarthy, Csetenyi, Sanchdeva, Dhir, M, L, A, R (2014). Ingeniería y durabilidad propiedades de ceniza volantes tratadas suelos sulfato devengan estabilizados con cal, Volumen 174,  
<http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0013795214000453> [Consulta: 19 Agosto de 2016]
22. Espimosa, G, 7 de junio. 2011, PROPUESTA DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DEL SUELO, UTILIZANDO ESTABILIZANTES (TERRAZYME Y ZIMPLEX PZ – 22X, EN PROPORCIONES DE: 1LT POR 33 M3 DE SUELO Y 1LT POR 30 M3 DE

SUELO), EN SUELOS DE FUNDACIÓN DE MATRIZ LIMOSA, slideshare, <http://es.slideshare.net/GERARDOHENRY/propuesta-del-mejoramiento-de-las-propiedades-fsico-mecnicas-del-suelo-utilizando-estabilizantes-terrazyme-y-zimplex-pz-22x-en-proporciones-de-1lt-por-33-m3-de-suelo-y-1lt-por-30-m3-de-suelo-en-suelos-de-fundacin-de-matriz-limosa-o-arcillos> [paginas 1-27] [Consulta: 15 de septiembre de 2016].

23. Garcia Martinez, F. E, Preciado Miranda, J. R, 25 de Noviembre de 2012, SUELOS EXPANSIVOS, <http://suelosexpansivosntic1.blogspot.com/Paginas> [1-10]. <http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-las-bentonitas-7708.htm> [Consulta: 22 de octubre de 2016].

24. Ahmaruzzaman, M, (2009), Una revisión sobre la utilización de ceniza volante, Avence en energía y ciencia de la combustión, Volumen 36, numero 3. <http://www.sciencedirect.com.consultaremota.upb.edu.co/science/article/pii/S0360128509000604> [Consulta: 22 de octubre de 2016].