

**Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.**

**Carlos Andres Cely Benavides, Cristian Andres Jaimes Dumez**

**Trabajo de grado presentando para optar por el título de Profesional en Ingeniería Civil**

**Director**

**Luz Marina Torrado Gómez**

**Magíster en geotecnia**

**Codirector**

**José Alberto Rondón**

**Magíster en geotecnia**

**Universidad Industrial De Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2025**

### **Dedicatoria**

*A Dios, por brindarme la sabiduría necesaria en aquel momento difícil de mi vida, que me permitió recordar y reforzar el luchar por los sueños que aquel niño que llegó a la Universidad tenía.*

*A mi madre, Jackeline Dumez Henao, pilar fundamental de mi vida, la persona que me enseñó el valor que tiene ser buena persona por delante de cualquier cosa, la mujer que me apoyó en cada decisión que he tomado hasta este momento y a quien espero retribuirle siempre lo dado por su gigante corazón.*

*A mi padre, Wilson Jaimes Gamboa, por su apoyo, su paciencia y sus consejos, que han sido útiles desde que tengo memoria, por amarme y estar siempre disponible para ayudarme y auxiliarme en momentos difíciles.*

*A mis hermanos, Oswaldo Jaimes Dumez y Edson Jaimes Dumez, la fuente de inspiración más grande de mi vida, el mejor ejemplo que he podido tener de personas integra, de personas que con disciplina y esfuerzo han logrado sus metas, los amo mucho más de lo que mis palabras han podido expresar y espero algún día recompensar cada gesto que han tenido conmigo.*

*A mis amigos más leales, Javier Rivera, Sebastián Velásquez y Nicole Navarro, los considero mi familia Bumanguesa, porque la palabra amistad para la cantidad de cosas que hemos vivido juntos se queda pequeña. En mí siempre tendrán a alguien disponible para oírlos y compartir triunfos, espero hagan parte de mi vida por siempre.*

**Cristian Andrés Jaimes Dumez**

**Dedicatoria**

*A Dios y su inmensa sabiduría por permitirme subsistir en la inmensidad del universo y bendecirme con su guía para seguir mi camino.*

*A mi madre, Angela Benavides por ser la mejor consejera, amiga y ser parte vital de mi vida, enseñándome y guiándome para ser una mejor persona, por brindarme su amor incondicional siendo la mujer más importante de mi vida.*

*A mi padre, Cesar Aguilar por ser ese ejemplo y enseñarme a ser el hombre que soy, por darme sus consejos y sabiduría, por su apoyo incondicional y sembrar en ese niño la vocación por mi carrera.*

*A mi hermano, Cristian Aguilar por ser ese amigo y estar en los momentos más difíciles, por aconsejarme y enseñarme su visión de la vida.*

*A esos amigos y amigas que siempre creyeron en mí y en mis ganas de salir a adelante. De mi parte y de mi compañero Cristian Andres Jaimes Dumez, un agradecimiento especial a nuestra directora, Luz Marina Torrado y al Codirector José Alberto Rondón, por su entrega y vocación, por su impecable acompañamiento y guía como docentes y futuros colegas en el desarrollo de este proyecto.*

**Carlos Andrés Cely Benavides**

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	18
1.    Objetivos.....	20
1.1    Objetivo General .....	20
1.2    Objetivos específicos .....	20
2.    Marco Teórico .....	21
2.1    Conceptos generales.....	21
2.1.1    Estabilización de suelos .....	21
2.1.2    Tipos de estabilización de suelos .....	21
2.1.3    Suelos expansivos.....	22
2.1.4    Suelos cohesivos.....	22
2.1.5    Plasticidad del suelo.....	22
2.1.6    Límites de Atterberg .....	23
2.1.6.1    Límite Líquido .....	23
2.1.6.2    Límite Plástico .....	23
2.1.6.3    Límite de Contracción.....	23
2.1.6.4    Índice de plasticidad.....	23
2.1.7    Propiedades físico-mecánicas de la fibra de fique.....	24
2.1.8    Propiedades físico-químicas de la ceniza de fique.....	24
2.1.8.1    Temperatura ideal para la reducción de biomasa.....	24
2.1.8.2    Temperatura ideal para la calcinación de la fibra de fique.....	24
2.2    Estado del arte .....	25

2.2.1	Incorporación de óxido de calcio y fibra de fique para el mejoramiento de la sub rasante en el tramo Unión Leticia Condorcocha, Junín, 2020.....	25
2.2.1.1	Objetivos .....	25
2.2.1.2	Metodología del ensayo .....	26
2.2.1.3	Resultados obtenidos .....	26
2.2.2	Análisis comparativo del comportamiento a la resistencia de un suelo fino con adición de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza de cascarilla de café. ....	26
2.2.2.1	Objetivos .....	26
2.2.2.2	Metodología del ensayo .....	27
2.2.2.3	Resultados obtenidos.....	27
3.	Metodología.....	27
3.1	Acopio de materiales.....	27
3.2	Preparación de los materiales .....	29
3.3	Caracterización del suelo según normativa colombiana INVIAS.....	31
3.3.1	Granulometría .....	31
3.3.1.1	Suelo virgen .....	33
3.3.1.2	Suelo mejorado con ceniza de Fique.....	35
3.3.2	Límites de Atterberg .....	39
3.3.2.1	Límite líquido.....	41
3.3.2.2	Límite Plástico .....	46
3.3.2.3	Índice de plasticidad.....	49
3.3.2.4	Límite de contracción.....	50

3.3.3	Proctor Modificado .....	55
3.3.3.1	Proctor suelo en estado virgen .....	57
3.3.3.2	Proctor suelo con adición de 1% de ceniza de fique .....	58
3.3.3.3	Proctor suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique .....	60
3.3.3.4	Proctor suelo con adición de 2% de ceniza de fique .....	62
3.3.4	Consolidación .....	64
3.3.4.1	Consolidación suelo en estado virgen .....	68
3.3.4.2	Consolidación suelo con adición de 1% de ceniza de fique.....	70
3.3.4.3	Consolidación suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.....	73
3.3.4.4	Consolidación suelo con adición de 2% de ceniza de fique.....	75
3.3.5	Expansión libre .....	78
3.4	Protocolo de análisis para la evaluación del potencial de expansión a partir de la adición de la ceniza de fibra de fique.....	81
4.	Análisis de resultados .....	81
4.1	Resultados de Granulometría .....	81
4.2	Resultados de Límites de Atterberg .....	84
4.3	Resultados de Proctor Modificado .....	86
4.4	Resultados de Expansión libre .....	88
4.5	Resultados Consolidación .....	90
5.	Conclusiones.....	93
6.	Recomendaciones .....	95
	Referencias bibliográficas.....	97

**Lista de figuras**

<b>Figura 1</b> .....	28
Recolección del suelo en la ladrillera Ergo, Girón. Fuente. Autoría propia .....	28
<b>Figura 2</b> .....	29
Recepción del fique proveniente del municipio de Aratoca. Fuente. Autoría propia .....	29
<b>Figura 3</b> .....	30
Pre combustión de la fibra de fique para reducción de Biomasa. Fuente. Autoría propia.....	30
<b>Figura 4</b> .....	31
Combustión de ceniza en muflas de laboratorio a temperatura controlada de 700 °C. Fuente. Autoría propia .....	31
<b>Figura 5</b> .....	33
Granulometría .....	33
<b>Figura 6</b> .....	35
Curva granulométrica para suelo en estado virgen .....	35
<b>Figura 7</b> .....	36
Curva granulométrica para suelo con adición de 1% de ceniza.....	36
<b>Figura 8</b> .....	37
Curva granulométrica para suelo con adición de 1.5% de ceniza.....	37
<b>Figura 9</b> .....	38
Curva granulométrica para suelo con adición de 2% de ceniza.....	38
<b>Figura 10</b> .....	40
Muestras ensayos de limites después de secado en horno. Fuente autoría propia .....	40
<b>Figura 11</b> .....	41
Muestra de material tamizado que pasa por el tamiz No. 40. Fuente autoría propia .....	41
<b>Figura 12</b> .....	42
Preparación de muestra húmeda y abertura de ranura. Fuente autoría propia .....	42

<b>Figura 13</b> .....	43
Gráfica límite líquido para suelo virgen. Fuente. Autoría propia .....	43
<b>Figura 14</b> .....	44
Gráfica límite líquido para suelo con ceniza 1%. Fuente. Autoría propia .....	44
<b>Figura 15</b> .....	45
Gráfica límite líquido para suelo con ceniza 1.5%. Fuente. Autoría propia .....	45
<b>Figura 16</b> .....	46
Gráfica límite líquido para suelo con ceniza 2%. Fuente. Autoría propia .....	46
<b>Figura 17</b> .....	47
Peso muestra de rollos de masa de suelo. Fuente autoría propia .....	47
<b>Figura 18</b> .....	50
Muestras después de secado en horno. Fuente autoría propia .....	50
<b>Figura 19</b> .....	51
Medición de la masa del mercurio. Fuente autoría propia.....	51
<b>Figura 20</b> .....	52
Muestra de volumen desplazado con mercurio. Fuente autoría propia.....	52
<b>Figura 21</b> .....	56
Compactación de muestra en cilindro con 5 capas a 25 golpes. Fuente autoría propia .....	56
<b>Figura 22</b> .....	56
Cápsula de suelo representativa después de compactación. Fuente autoría propia .....	56
<b>Figura 23</b> .....	58
Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo en estado virgen. Fuente autoría propia .....	58
<b>Figura 24</b> .....	60
Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia.....	60

<b>Figura 25</b> .....	62
Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia .....	
	62
<b>Figura 26</b> .....	64
Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia .....	
	64
<b>Figura 27</b> .....	65
Montaje ensayo de consolidación unidimensional. Fuente autoría propia .....	
	65
<b>Figura 28</b> .....	65
Montaje ensayo consolidación unidimensional. Fuente autoría propia .....	
	65
<b>Figura 29</b> .....	66
Ciclos de carga y descarga usados en ensayo de consolidación. Fuente autoría propia .....	
	66
<b>Figura 30</b> .....	67
Curva Deformación unitaria axial vs Raíz-Tiempo. Fuente Norma INV E-151 .....	
	67
<b>Figura 31</b> .....	69
Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo en estado virgen. Fuente autoría propia .....	
	69
<b>Figura 32</b> .....	69
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo en estado virgen. Fuente autoría propia.....	
	69
<b>Figura 33</b> .....	70
Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo en estado virgen. Fuente. Autoría propia .	
	70
<b>Figura 34</b> .....	71
Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia .....	
	71
<b>Figura 35</b> .....	72
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia .....	
	72

<b>Figura 36</b> .....	72
Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 1% de ceniza de fique.	
Fuente. Autoría propia .....	72
<b>Figura 37</b> .....	74
Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente	
autoría propia .....	74
<b>Figura 38</b> .....	74
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.	
Fuente autoría propia .....	74
<b>Figura 39</b> .....	75
Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.	
Fuente. Autoría propia .....	75
<b>Figura 40</b> .....	76
Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente	
autoría propia .....	76
<b>Figura 41</b> .....	77
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente	
autoría propia .....	77
<b>Figura 42</b> .....	77
Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 2% de ceniza de fique.	
Fuente. Autoría propia .....	77
<b>Figura 43</b> .....	79
Ensayo de expansión libre. Fuente autoría propia .....	
	79
<b>Figura 44</b> .....	81
Protocolo de análisis evaluación potencial de expansión con adición de ceniza de fibra de fique.	
Fuente autoría propia .....	81

<b>Figura 45</b> .....	83
Comparación de curvas granulométricas de suelo en estado virgen y mejorado con la ceniza de fique	83
<b>Figura 46</b> .....	83
Acercamiento comparación de curvas granulométricas de suelo en estado virgen y mejorado con la ceniza de fique .....	83
<b>Figura 47</b> .....	85
Carta de plasticidad. Fuente autoría propia.....	85
<b>Figura 48</b> .....	93
Gráfica relación de vacíos Vs esfuerzo axial efectivo para cada una de las muestras. Fuente autoría propia .....	93

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> .....	34
Resultados del ensayo de granulometría para el suelo virgen. Fuente. Autoría propia .....	34
<b>Tabla 2</b> .....	36
Resultados del ensayo de granulometría para el suelo estabilizado con 1% de ceniza de fique. Fuente. Autoría propia .....	36
<b>Tabla 3</b> .....	37
Resultados del ensayo de granulometría para el suelo estabilizado con 1.5% de ceniza de fique. Fuente. Autoría propia .....	37
<b>Tabla 4</b> .....	38
Resultados del ensayo de granulometría para el suelo estabilizado con 2% de ceniza de fique. Fuente. Autoría propia .....	38
<b>Tabla 5</b> .....	39
Porcentaje de grava, arena y finos para las muestras analizadas. Fuente. Autoría propia .....	39
Preparación de muestra húmeda y abertura de ranura. Fuente autoría propia .....	42
<b>Tabla 6</b> .....	43
Resultados del límite líquido para suelo virgen. Fuente. Autoría propia.....	43
<b>Tabla 7</b> .....	44
Resultados del límite líquido para suelo con 1 % de ceniza. Fuente. Autoría propia.....	44
<b>Tabla 8</b> .....	45
Resultados del límite líquido para suelo con 1.5 % de ceniza. Fuente. Autoría propia.....	45
<b>Tabla 9</b> .....	46
<b>Tabla 10</b> .....	48
Resultados del límite plástico para suelo virgen. Fuente. Autoría propia.....	48

<b>Tabla 11</b> .....	48
Resultados del límite plástico para suelo con 1 % de ceniza. Fuente. Autoría propia.....	48
<b>Tabla 12</b> .....	49
Resultados del límite plástico para suelo con 1.5 % de ceniza. Fuente. Autoría propia.....	49
<b>Tabla 13</b> .....	49
Resultados del límite plástico para suelo con 2 % de ceniza. Fuente. Autoría propia.....	49
<b>Tabla 14</b> .....	50
Resultados de índice de plasticidad para cada una de las muestras. Fuente. Autoría propia.....	50
<b>Tabla 15</b> .....	53
Resultados Límite de contracción para suelo virgen. Fuente. Autoría propia .....	53
<b>Tabla 16</b> .....	53
Resultados Límite de contracción para suelo con 1 % de ceniza. Fuente. Autoría propia .....	53
<b>Tabla 17</b> .....	54
Resultados Límite de contracción para suelo con 1.5 % de ceniza. Fuente. Autoría propia .....	54
<b>Tabla 18</b> .....	54
Resultados Límite de contracción para suelo con 2 % de ceniza. Fuente. Autoría propia .....	54
<b>Tabla 19</b> .....	55
Valores promedio de LL, LP, IP y LC para las muestras analizadas. Fuente. Autoría propia .....	55
<b>Tabla 20</b> .....	57
Condiciones de ensayo Proctor de suelo en estado virgen. Fuente autoría propia .....	57
<b>Tabla 21</b> .....	58
Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo en estado virgen. Fuente autoría propia .	58
<b>Tabla 22</b> .....	59
Condiciones de ensayo Proctor de suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia	59
<b>Tabla 23</b> .....	59

Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1% de ceniza de fique.	
Fuente autoría propia .....	59
<b>Tabla 24</b> .....	61
Condiciones de ensayo Proctor de suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia	
.....	61
<b>Tabla 25</b> .....	61
Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.	
Fuente autoría propia .....	61
<b>Tabla 26</b> .....	63
Condiciones de ensayo Proctor de suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia	63
<b>Tabla 27</b> .....	63
Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 2% de ceniza de fique.	
Fuente autoría propia .....	63
<b>Tabla 28</b> .....	68
Información ensayo consolidación suelo en estado virgen. Fuente autoría propia.....	68
<b>Tabla 29</b> .....	71
Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 1% de ceniza de fique.	
Fuente. Autoría propia .....	72
<b>Tabla 30</b> .....	73
Información ensayo consolidación suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia	
.....	73
<b>Tabla 31</b> .....	76
Información ensayo consolidación suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia	
.....	76

<b>Tabla 32</b> .....	80
Datos ensayo de expansión libre para cada una de las muestras de suelo. Fuente autoría propia .....	80
<b>Tabla 33</b> .....	80
Resultados ensayo de expansión libre para cada una de las muestras de suelo. Fuente autoría propia ..	80
<b>Tabla 34</b> .....	82
Porcentaje de grava, arena y finos para las muestras analizadas. Fuente. Autoría propia .....	82
<b>Tabla 35</b> .....	84
Valores promedio de LL, LP, IP y LC para las muestras analizadas. Fuente. Autoría propia .....	84
<b>Tabla 36</b> .....	86
Clasificación suelos SUCS, Fuente autoría propia .....	86
<b>Tabla 37</b> .....	87
Densidad máxima seca y Humedad optima, Fuente autoría propia .....	87
<b>Tabla 38</b> .....	90
Valores de Cs, Cs y preconsolidación de cada una de las muestras. Fuente autoría propia .....	90
<b>Tabla 39</b> .....	91
Resultados consolidación suelo en estado virgen. Fuente autoría propia .....	91
<b>Tabla 40</b> .....	91
Resultados consolidación suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia.....	91
<b>Tabla 41</b> .....	92
Resultados consolidación suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia.....	92
<b>Tabla 42</b> .....	92
Resultados consolidación suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia.....	92

## Resumen

**Título:** Evaluation of the expansion potential of a clay soil improved with fique ash \*

**Autores:** Carlos Andres Cely Benavides y Cristian Andres Jaimes Dumez\*\*

**Palabras Clave:** estabilización de suelos, ceniza de fique, suelos arcillosos, granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, consolidación unidimensional, expansión libre, sostenibilidad, residuos agroindustriales, índice de plasticidad, compresibilidad, protocolo técnico.

**Descripción:** El presente trabajo evaluó el comportamiento geotécnico de un suelo arcilloso natural tras su estabilización con cenizas obtenidas de fibra de fique, mediante la ejecución de ensayos de laboratorio bajo la normativa del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013). Se realizó la caracterización de los materiales involucrados mediante la ejecución de los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, consolidación unidimensional y expansión libre. Los resultados demostraron que la adición progresiva de ceniza en proporciones de 1 %, 1.5 % y 2 % produce una disminución general en la plasticidad, expansividad y compresibilidad del suelo, mejorando su comportamiento frente a la carga y la humedad. Se propuso un protocolo metodológico para la evaluación de residuos agroindustriales en la estabilización de suelos expansivos, destacando el potencial técnico y ambiental del uso de la ceniza de fique como material estabilizante en contextos de infraestructura rural.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Luz Marina Torrado Gómez . Ingeniero Civil, Msc geotecnia

### Abstract

**Title:** Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique\*

**Authors:** Carlos Andres Cely Benavides y Cristian Andres Jaimes Dumez\*\*

**Key Words:** soil stabilization, fique ash, clay soils, particle size distribution, Atterberg limits, Modified Proctor, oedometer consolidation, free swell, sustainability, agro-industrial residues, plasticity index, compressibility, technical protocol.

**Description:** This research assesses the geotechnical behavior of a natural clay soil stabilized with ash derived from fique fiber, through laboratory testing in accordance with the standards of the Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013). The materials involved were characterized by performing particle size distribution, Atterberg limits, Modified Proctor compaction, one-dimensional consolidation, and free swell tests. The results showed that the progressive addition of ash in proportions of 1 %, 1.5 %, and 2 % led to a general decrease in the soil's plasticity, swell potential, and compressibility, thus improving its performance under loading and moisture conditions. A methodological protocol was proposed for the evaluation of agro-industrial residues in the stabilization of expansive soils, highlighting the technical and environmental potential of fique ash as a stabilizing material in rural infrastructure contexts.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Luz Marina Torrado Gómez. Ingeniera Civil, Msc geotecnia

## Introducción

En Colombia la necesidad de mejorar los suelos para aplicaciones en la industria de la construcción debido a sus condiciones climáticas y topográficas se ha vuelto un desafío constante, especialmente en zonas con suelos de alta plasticidad que presentan problemas de estabilidad y deformación. Una de las soluciones emergentes es el uso de residuos agrícolas, como las cenizas de fique, en la estabilización y mejoramiento de suelos.

El uso de las cenizas de fique, subproducto de dicha industria, ofrecen un enfoque sostenible para la mejora de las propiedades del suelo, como la expansividad, lo que las convierte en un recurso valioso para su aprovechamiento en el sector de la construcción.

El fique, una fibra natural cultivada principalmente en Colombia, es particularmente común en la región de Santander, lo que brinda una oportunidad única para aprovechar un recurso local en soluciones sostenibles de ingeniería. Santander, ha sido históricamente productora de fique, lo que subraya la importancia de su aprovechamiento, no solo como producto comercial, sino también como un subproducto para el mejoramiento de suelos en proyectos constructivos. La valorización de los residuos de fique puede generar un impacto positivo tanto en términos ambientales como económicos para la región.

Estudios recientes han explorado el uso de fibras naturales y sus derivados para la mejora de suelos, destacando que estas contribuyen de manera significativa a la reducción de la expansividad y mejora de la resistencia en suelos arcillosos.

El presente trabajo de grado evaluó el potencial de expansión de un suelo arcilloso en estado natural y analizó su comportamiento al ser mejorado con la adición de cenizas de fique dado que la expansividad de los suelos es una propiedad crítica, ya que puede afectar la capacidad portante del terreno y provocar asentamientos diferenciales que comprometan la estabilidad de las estructuras construidas sobre ellos.

El estudio se desarrolló mediante la ejecución de ensayos de laboratorio conforme a las normas del Instituto Nacional de Vías (Instituto Nacional de Vías,2013), en dos fases: una correspondiente al suelo en estado virgen y otra en la que se aplicaron diferentes porcentajes de ceniza de fique. Con ello, se buscó establecer si la incorporación de este residuo agrícola contribuía significativamente a reducir el índice de expansividad del suelo, mejorando su comportamiento geotécnico y su aplicabilidad en obras de infraestructura, particularmente en zonas rurales donde el acceso a estabilizantes industriales es limitado. El enfoque de esta investigación respondió a un interés técnico como ambiental, al promover el uso de materiales locales y sostenibles que puedan integrarse en soluciones prácticas y replicables en proyectos de construcción de bajo costo.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con ceniza de fibra de fique mediante ensayos de laboratorio.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Establecer un protocolo de análisis para la evaluación de las cenizas a partir de la adición de fibra de fique, en base al estado del arte.
- Ejecutar ensayos de laboratorio al suelo arcilloso antes y después de mejorarlo con cenizas de fique para conocer su expansividad.
- Evaluar la influencia de la ceniza a partir de fibra de fique sobre el potencial de expansión en un suelo arcilloso.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Conceptos generales

#### 2.1.1 Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es un conjunto de técnicas que tienen como objetivo mejorar las propiedades físicas, químicas o mecánicas de un suelo natural para hacerlo más apto en términos de resistencia, durabilidad y comportamiento volumétrico, especialmente en obras de infraestructura vial, cimentaciones, rellenos o terraplenes. Su aplicación busca corregir características indeseables como alta plasticidad, baja capacidad de carga, alta compresibilidad o excesiva sensibilidad a la humedad.

Según la Administración Federal de Carreteras (FHWA, 2021), la estabilización se ha convertido en una herramienta fundamental en proyectos de ingeniería civil por su capacidad para reducir costos, disminuir tiempos de ejecución y reutilizar materiales disponibles en sitio, promoviendo prácticas sostenibles.

#### 2.1.2 Tipos de estabilización de suelos

Los métodos de estabilización pueden clasificarse en mecánicos, químicos, físicos o combinados, dependiendo del tipo de modificación que se desea alcanzar:

**Estabilización mecánica:** Consiste en mejorar la resistencia del suelo mediante mezclas granulométricas o compactación intensiva, sin introducir aditivos. Se modifica la estructura interna del suelo, mejorando su densidad y reducción de vacíos.

**Estabilización química:** Involucra la incorporación de agentes químicos o materiales aditivos (como cal, cemento, cenizas, escorias, etc.) que reaccionan con las partículas del suelo, generando productos cementantes que modifican su estructura mineralógica y comportamiento. Es el tipo de estabilización abordado en este estudio, mediante la adición de ceniza obtenida a partir de fibra de fique, la cual se espera actúe como un estabilizante parcial con comportamiento puzolánico.

**Estabilización física:** Incluye el uso de geo sintéticos, mallas o membranas para contener o reforzar el suelo, sin alterar su composición.

**Estabilización por procesos térmicos o eléctricos:** Se utiliza en casos muy específicos, como la congelación artificial o el calentamiento por corrientes eléctricas, para controlar humedad o modificar temporalmente la resistencia del suelo.

### **2.1.3 Suelos expansivos**

Son suelos arcillosos inestables en presencia de humedad, ya que su característica principal es experimentar cambios de volumen cuando varía su contenido de líquido, lo que resulta problemático en obras civiles, debido a que el suelo, al estar compuesto de materiales muy susceptibles a desmoronarse con la presencia de agua, provocaría la tendencia a la fractura o el colapso de las edificaciones que se encuentren sobre él (Celis y Martínez, 2015).

### **2.1.4 Suelos cohesivos**

Un suelo cohesivo se caracteriza por la presencia significativa de partículas finas, como arcillas y limos, que le confieren propiedades de cohesión y plasticidad. Estos suelos pueden ser granulares con contenido de arcilla o limo orgánico, o bien estar compuestos predominantemente por arcillas o limos orgánicos sin componentes granulares. La cohesión en estos suelos se debe a las fuerzas de atracción entre las partículas finas, lo que les permite mantenerse unidas incluso en ausencia de presión externa. Esta característica influye en su comportamiento mecánico, afectando aspectos como la resistencia al corte y la compresibilidad. (Cardona & Sarache, 2014)

### **2.1.5 Plasticidad del suelo**

La plasticidad del suelo, es un indicador clave de su capacidad para deformarse sin fracturarse, está estrechamente relacionada con su comportamiento expansivo. Los suelos con alta plasticidad tienden a experimentar cambios significativos en volumen cuando varía el contenido de humedad, lo que aumenta el riesgo de daños en las estructuras construidas sobre ellos. Por lo tanto, la reducción del índice de

plasticidad es uno de los principales objetivos en la estabilización de suelos, y diversos estudios han mostrado que el uso de cenizas agrícolas puede ser una solución efectiva para lograrlo (Gupta & Kumar, 2016).

La determinación de las propiedades de los suelos evaluados se realiza mediante la ejecución de ensayos de laboratorio, entre los cuales se encuentran los siguiente:

### **2.1.6 Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg son parámetros fundamentales en la caracterización de suelos finos, que permiten identificar sus transiciones de estado en función del contenido de humedad, Albert Atterberg originalmente incluían seis "límites de consistencia" para suelos finos límite superior del flujo viscoso, límite líquido, límite de pegajosidad, límite de cohesión, límite plástico y límite de contracción, (Instituto Nacional de Vias,2013)

#### **2.1.6.1 Límite Líquido**

Según norma INV E-125, el límite líquido (LL) es el contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados líquido y plástico.

#### **2.1.6.2 Límite Plástico**

Según norma INV E-126, el límite plástico (LP) es el contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido.

#### **2.1.6.3 Límite de Contracción**

El límite de contracción (LC) indica el contenido de humedad por debajo del cual el volumen del suelo permanece constante al secarse.

#### **2.1.6.4 Índice de plasticidad**

Según norma INV E-126, representa el rango de contenidos de agua dentro del cual un suelo se comporta plásticamente y se calcula numéricamente como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

$$IP = LL - LP \quad ec1$$

### **2.1.7 Propiedades físico-mecánicas de la fibra de fique**

La fibra de fique, es una fibra vegetal dura, larga y de baja flexibilidad. Presenta un alto contenido de holocelulosa (74.36%) y un contenido moderado de lignina (14.23%) y pectina (6.15%), lo que le confiere una estructura rígida y resistencia mecánica. Desde el punto de vista físico-mecánico, esta fibra presenta un módulo de Young entre 8.0 y 24.0 GPa, una resistencia a la tracción que oscila entre 200 y 600 MPa, un diámetro de fibra entre 150 y 320  $\mu\text{m}$ , densidad de 0.6 a 1.1  $\text{g/cm}^3$ , y una elongación máxima de 6.0 a 10.0%. (Rendón & Ramírez, 2023).

### **2.1.8 Propiedades físico-químicas de la ceniza de fique**

#### **2.1.8.1 Temperatura ideal para la reducción de biomasa**

La biomasa utilizada para generación de energía puede someterse a distintos procesos de pretratamiento térmico que mejoran sus propiedades como combustible. Dos de los más relevantes son la torrefacción y la explosión por vapor. En el caso de la torrefacción, la biomasa se calienta a temperaturas de aproximadamente 225 a 275  $^{\circ}\text{C}$ , lo que permite evaporar el agua y parte de los compuestos volátiles, generando un producto más denso energéticamente e hidrofóbico. Por otro lado, la tecnología de explosión por vapor utiliza vapor presurizado a temperaturas de entre 200 y 250  $^{\circ}\text{C}$ , con presiones de 20 a 40 bar, para romper la estructura de la biomasa, facilitando su manejo y mejorando su comportamiento en la combustión. Ambos procesos permiten obtener un combustible más eficiente y comparable al carbón en aplicaciones industriales y de generación eléctrica. (IEA Bioenergy, 2019).

#### **2.1.8.2 Temperatura ideal para la calcinación de la fibra de fique**

La temperatura óptima de calcinación de la fibra de fique para obtener ceniza con propiedades puzolánicas adecuadas se sitúa entre 400  $^{\circ}\text{C}$  y 600  $^{\circ}\text{C}$ . A temperaturas cercanas a los 400  $^{\circ}\text{C}$ , durante un tiempo de 6 horas, se produce una combustión uniforme con mínima fracción carbonosa y una mayor superficie específica, lo que mejora la reactividad de la ceniza en mezclas con cemento. Esto permite

conservar la estructura amorfa de la sílice, condición esencial para que la ceniza actúe como adición puzolánica en materiales de construcción (Cardona & Sarache, 2014).

La técnica de calcinación también es un aspecto diferenciador, debe realizarse de forma controlada con el objetivo de eliminar casi por entero la fracción orgánica, con temperaturas superiores a los 650 ° C (Evi Aprianti et. al, 2015), (Chagas et. al, 2009). En este sentido, Hwang y Chandra describen claramente el efecto de la temperatura, la técnica de calcinación y su propio efecto en la biomasa de la cascara de arroz (Hwang & Chandra, 2002).

Por otra parte, estudios sobre residuos similares, como la cáscara de arroz, indican que calcinaciones a 600 °C conservan la estructura amorfa de la sílice, mientras que temperaturas superiores a 700 °C promueven la cristalización, disminuyendo su capacidad de reacción con compuestos del cemento. Además, tiempos prolongados de exposición térmica pueden acelerar este proceso, afectando negativamente las propiedades reactivas del material calcinado (Montero Flores, 2019).

## **2.2 Estado del arte**

### **2.2.1 Incorporación de óxido de calcio y fibra de fique para el mejoramiento de la sub rasante en el tramo Unión Leticia Condorcocha, Junín, 2020**

#### **2.2.1.1 Objetivos**

El objetivo de la tesis fue determinar la influencia de la incorporación de óxido de calcio y ceniza de fibra de fique sobre las propiedades de la subrasante en el tramo Unión Leticia – Condorcocha, Junín, durante el año 2020. Los objetivos específicos se centraron en evaluar cómo distintas dosificaciones de estos materiales (2.5%, 3.5%, 4.5% para el óxido de calcio; 4.5%, 6.5%, 8.5% para la ceniza de fique) afectan tres aspectos fundamentales del suelo: su plasticidad, su compactación y su resistencia, con el fin de establecer mejoras que optimicen el soporte estructural en carreteras no pavimentadas (Taype & Vega, 2020, pp. 1–4).

### **2.2.1.2 Metodología del ensayo**

El estudio siguió un enfoque cuantitativo con diseño cuasi experimental, ya que se manipularon intencionalmente las variables independientes (óxido de calcio y ceniza de fique) para observar su efecto sobre la variable dependiente (subrasante). Debido a las restricciones impuestas por la pandemia de COVID-19, se utilizó la técnica de análisis documental, recopilando datos de investigaciones previas. Se aplicó interpolación numérica para calcular resultados bajo diferentes porcentajes de aditivos.

La población fue el tramo vial entre Unión Leticia y Condorcocha, y la muestra consistió en 4 calicatas en 2 km, seleccionadas mediante muestreo no probabilístico. Los ensayos utilizados incluyeron los límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR (California Bearing Ratio), procesados mediante hojas de cálculo y representaciones gráficas (Taype & Vega, 2020, pp. 16–22).

### **2.2.1.3 Resultados obtenidos**

Los resultados mostraron que la adición de óxido de calcio redujo el índice de plasticidad del suelo en 17.75%, 23.00% y 27.00%, mientras que la ceniza de fique lo redujo en 6.97%, 10.9% y 5.24%. En cuanto a la compactación, se evidenció un incremento en la densidad seca del suelo: con óxido de calcio fue de 0.08, 0.09 y 0.1 g/cm<sup>3</sup>; con ceniza de fique, de 0.02, 0.04 y 0.01 g/cm<sup>3</sup>. En términos de resistencia, medida mediante el CBR, los valores aumentaron en 5.45%, 8.26% y 12.26% para el óxido de calcio, y en 2.22%, 4.40% y 2.05% para la ceniza de fique. Estos resultados confirmaron que ambos materiales mejoran las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante, siendo el óxido de calcio el que mostró mayor efectividad general (Taype & Vega, 2020, pp. vii–viii, 23–56).

## **2.2.2 Análisis comparativo del comportamiento a la resistencia de un suelo fino con adición de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza de cascarilla de café.**

### **2.2.2.1 Objetivos**

La investigación se enfoca en analizar el comportamiento de la resistencia de suelos mejorados con cenizas de cascarilla de café (CCC) y cascarilla de arroz (CCA), buscando determinar la viabilidad de

estos desechos agroindustriales como estabilizadores de suelos. Los objetivos específicos incluyen identificar los tipos de ensayos de laboratorio realizados y comparar los resultados de resistencia para determinar cuál aditivo ofrece la mejor relación costo/calidad. (Laguna Peñaloza & Chacón Charcas, 2020)

#### **2.2.2.2 Metodología del ensayo**

La metodología empleada es de tipo descriptivo con un enfoque comparativo, utilizando ensayos de laboratorio basados en las normas técnicas de INVIAS-2013. Los ensayos realizados incluyen la Relación Humedad-Densidad (Proctor Modificado), Ensayo de Soporte de California (CBR), Módulo Resiliente (MR), Compresión Inconfinada (RCI) y Triaxial, aplicados a muestras de suelo con adiciones de CCC y CCA. (Laguna Peñaloza & Chacón Charcas, 2020)

#### **2.2.2.3 Resultados obtenidos**

Los resultados de los ensayos permitieron evaluar y comparar las propiedades de los suelos mejorados, considerando aspectos como la estabilidad, durabilidad, resistencia y plasticidad. Se analizaron los efectos de la adición de CCC en porcentajes de 4% - 10% y de CCA en un 12%, identificando los aumentos de resistencia y determinando los porcentajes óptimos para mejorar el comportamiento de los suelos. (Laguna Peñaloza & Chacón Charcas, 2020)

### **3. Metodología**

#### **3.1 Acopio de materiales**

Como punto de partida para el desarrollo experimental del presente trabajo, fue necesario identificar y recolectar las materias primas requeridas para la ejecución de los ensayos de laboratorio. Se estableció como objetivo conseguir un suelo arcilloso representativo de la región y una fuente confiable de fibra de fique, insumo agrícola propuesto para la estabilización del suelo.

El material arcilloso fue obtenido en la ladrillera Ergo, ubicada en el municipio de Girón, departamento de Santander. Esta zona fue seleccionada por su disponibilidad de suelos con características

representativas de suelo arcilloso común en la región. El suelo fue recolectado directamente en el sitio y se documentó mediante registro fotográfico, como se evidencia en la Figura 1, con el fin de respaldar la trazabilidad del material utilizado en los ensayos posteriores.

### Figura 1

*Recolección del suelo en la ladrillera Ergo, Girón. Fuente. Autoría propia*



Por otro lado, la fibra de fique fue adquirida en el municipio de Aratoca, Santander, reconocido por su tradición agrícola en el cultivo y procesamiento de esta fibra natural. La obtención del fique se realizó a través de productores locales, quienes enviaron el material seco, listo para ser transformado y reducido a ceniza para su uso en el laboratorio. En la Figura 2 se muestra el estado en que fue recibido el material, lo cual permitió verificar su adecuada conservación y presentación.

**Figura 2**

*Recepción del fique proveniente del municipio de Aratoca. Fuente. Autoría propia*



Ambos materiales fueron almacenados adecuadamente hasta su preparación para los ensayos, lo cual aseguró la integridad y representatividad de las muestras. Esta etapa permitió dar inicio al proceso de caracterización del suelo y su posterior mejoramiento con ceniza de fique.

**3.2 Preparación de los materiales**

Para la obtención de la ceniza de fique, se partió de la fibra seca previamente recolectada en el municipio de Aratoca, Santander. Inicialmente, se intentó realizar la incineración directa de la fibra en las muflas disponibles en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Sin embargo, se presentaron inconvenientes debido a la limitada capacidad de estas muflas, lo que impedía procesar volúmenes significativos de fibra de fique de manera eficiente.

Ante esta situación, se consultó con profesionales del área de ingeniería química, quienes sugirieron la posibilidad de reducir el volumen de la biomasa mediante una pre combustión controlada. Siguiendo esta recomendación, se procedió a realizar una quema previa de la fibra de fique en un entorno controlado, con el objetivo de disminuir su volumen y facilitar su posterior incineración en las muflas del laboratorio. Este

procedimiento permitió obtener una biomasa pretratada que, al ser sometida a la combustión final en las muflas, generó la ceniza requerida para los ensayos de estabilización del suelo como se observa en la Figura 3.

Este enfoque de pretratamiento térmico está respaldado además por estudios que indican que la reducción de volumen y la eliminación de componentes volátiles no afectan negativamente las propiedades fisicoquímicas de la ceniza resultante, y por el contrario, mejoran su eficiencia en procesos de conversión energética (IEA Bioenergy, 2019).

### **Figura 3**

*Pre combustión de la fibra de fique para reducción de Biomasa. Fuente. Autoría propia*



Según lo identificado en el estado del arte, la temperatura óptima para la incineración de biomasa vegetal como la fibra de fique se encuentra en un rango entre 600 °C y 800 °C, con un tiempo de exposición de aproximadamente tres horas, lo cual asegura la eliminación de materia orgánica sin degradar los componentes minerales útiles, como la sílice (Taype Sánchez & Vega Cahuana, 2020).

En este trabajo, se empleó una temperatura controlada de 650 °C en la mufla de laboratorio durante tres horas, siguiendo estas recomendaciones técnicas.

#### **Figura 4**

*Combustión de ceniza en muflas de laboratorio a temperatura controlada de 650 °C. Fuente. Autoría propia*



### **3.3 Caracterización del suelo según normativa colombiana INVIAS**

Los ensayos descritos en esta sección fueron realizados en los laboratorios de suelos de la empresa INGEAS SAS ubicado en el municipio de Floridablanca, Santander

#### **3.3.1 Granulometría**

Con el objetivo de determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo y establecer su clasificación granulométrica, se realizó el ensayo de granulometría de acuerdo con lo estipulado en la norma INV E-123-13 del Instituto Nacional de Vías (Instituto Nacional de Vías, 2013). Este procedimiento fue aplicado tanto al suelo en estado natural como a las mezclas de suelo con ceniza de fique, a diferentes porcentajes de adición.

Para cada condición (suelo virgen, suelo con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza), se ejecutaron tres ensayos independientes, con el fin de obtener valores representativos y generar un promedio confiable de los resultados, el cual fue utilizado para la clasificación final.

Cada ensayo inició con 600 gramos de suelo seco al aire. En el caso de las mezclas, este peso incluía ya el porcentaje correspondiente de ceniza de fique. El material fue sometido a un proceso de secado en horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C durante un período de 24 horas, asegurando la eliminación completa de la humedad. Posteriormente, se registró el peso seco y se procedió a realizar el lavado del suelo con el propósito de eliminar el material fino (partículas que pasan el tamiz N° 200), tal como lo requiere la norma cuando se trabaja con suelos cohesivos.

Una vez lavado, el material fue secado nuevamente en horno bajo las mismas condiciones, y se registró su peso seco después de lavado. A continuación, se procedió a ejecutar el tamizado mecánico, empleando una serie de tamices con aberturas normalizadas en orden descendente (desde el tamiz N° 4 hasta el N° 200), a través de un agitador por un tiempo mínimo de 10 minutos, como se ilustra en la Figura 5.

**Figura 5***Granulometría*

El peso retenido en cada tamiz fue determinado con balanza de precisión y expresado como porcentaje del peso total seco, permitiendo construir la curva de distribución granulométrica. Los datos resultantes de los tres ensayos por cada tipo de muestra fueron promediados para presentar una tabla representativa por cada condición del suelo, con el fin de facilitar la comparación técnica entre el suelo natural y los suelos estabilizados con la ceniza.

Para la clasificación del porcentaje de gravas, arenas y finos se hace uso de las ecuaciones (2), (3), (4)

$$\%Finos = \%pasa \text{ No. } 200 \quad \text{ec2}$$

$$\%Gravas = 100\% - (\%pasa \text{ No. } 4) \quad \text{ec3}$$

$$\%Arenas = 100\% - (\%Gravas + \%Finos) \quad \text{ec4}$$



**3.3.1.1 Suelo virgen**

Con base en los procedimientos descritos en 3.3.1, se realizó el ensayo de granulometría para el suelo en estado natural (sin estabilizar), con el propósito de determinar su distribución granulométrica y establecer su clasificación preliminar. Se llevaron a cabo tres repeticiones independientes del ensayo, cuyos resultados fueron promediados y consolidados en una única tabla representativa para facilitar su interpretación técnica.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del ensayo, incluyendo el peso seco inicial de la muestra, el peso seco posterior al lavado (utilizado para el análisis granulométrico), los porcentajes retenidos en cada tamiz, los porcentajes que pasan, y la clasificación correspondiente del suelo según los criterios del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

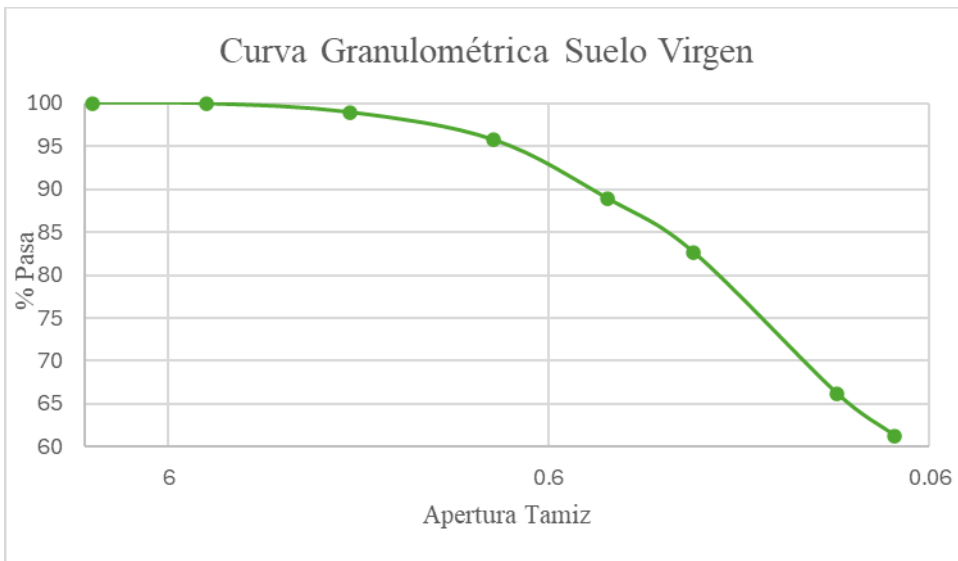
**Tabla 1**

*Resultados del ensayo de granulometría para el suelo virgen.*

 		<b>Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.</b>		<b>Fecha V: 12/05/2025</b> <b>Versión: 01</b> <b>Tabla 1.</b>	
<b>Gradación Suelo Virgen</b>					
<b>Peso Muestra Seca (Gramos)</b>			572		
<b>Peso Muestra Seca Tras Lavar (Gramos)</b>			223.5		
<b>Tamiz (Pulgadas)</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Peso Retenido (Gr)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Pasa</b>	
0.375	9.5	0	0.00	100	
4	4.76	0.4	0.07	99.93	
10	2	5.8	1.01	98.92	
20	0.84	18.3	3.20	95.72	
40	0.42	39.3	6.87	88.85	
60	0.25	35.7	6.24	82.60	
140	0.105	93.8	16.40	66.21	
200	0.074	27.9	4.88	61.33	
<b>Pasa 200</b>		350.8	61.33	0.00	

<b>%Gravas</b>	0.07
<b>%Arenas</b>	38.60
<b>%Finos</b>	<b>61.33</b>

**Figura 6***Curva granulométrica para suelo en estado virgen*

De acuerdo con los datos obtenidos, se identificó que el porcentaje de material que pasa el tamiz N° 200 es de 61.33%. Este valor supera el umbral del 50 %, lo que permite clasificar el material como un suelo fino. En consecuencia, su clasificación no puede determinarse únicamente por la granulometría, sino que debe completarse con los resultados de los límites de plasticidad, a través del uso de la carta de plasticidad, conforme a los lineamientos establecidos por el método SUCS (Instituto Nacional de Vías, 2013).



### 3.3.1.2 Suelo mejorado con ceniza de Fique

Adicionalmente, se realizaron ensayos de granulometría para las mezclas de suelo con adición de ceniza de fique en tres proporciones diferentes: 1 %, 1.5 % y 2 %. En cada uno de estos casos, se efectuaron tres repeticiones del ensayo, cuyos resultados fueron promediados para obtener una representación estadísticamente confiable de la distribución granulométrica de las muestras.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2 (1 % de ceniza), Tabla 3 (1.5 % de ceniza) y Tabla 4 (2 % de ceniza), donde se incluyen el peso seco inicial de la muestra, el peso seco posterior al lavado, los porcentajes retenidos por tamiz, los porcentajes que pasan, y la clasificación preliminar del suelo conforme al sistema SUCS.

Tabla 2

Resultados del ensayo de granulometría para el suelo estabilizado con 1% de ceniza de fique.

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 2.	
Gradación Suelo + 1% Ceniza Fique					
Peso Muestra Seca (Gramos)			573.5		
Peso Muestra Seca Tras Lavar (Gramos)			234.9		
Tamiz (Pulgadas)	Tamiz (mm)	Peso Retenido (Gr)	% Retenido	% Pasa	
0.375	9.5	0	0.00	100	
4	4.76	1	0.17	99.83	
10	2	6	1.05	98.78	
20	0.84	18.2	3.17	95.61	
40	0.42	40.6	7.08	88.53	
60	0.25	39.6	6.90	81.62	
140	0.105	100.5	17.52	64.10	
200	0.074	24.6	4.29	59.81	
Pasa 200		343	59.81	0.00	

%Gravas	0.17
%Arenas	40.02
%Finos	59.81

Figura 7

Curva granulométrica para suelo con adición de 1% de ceniza

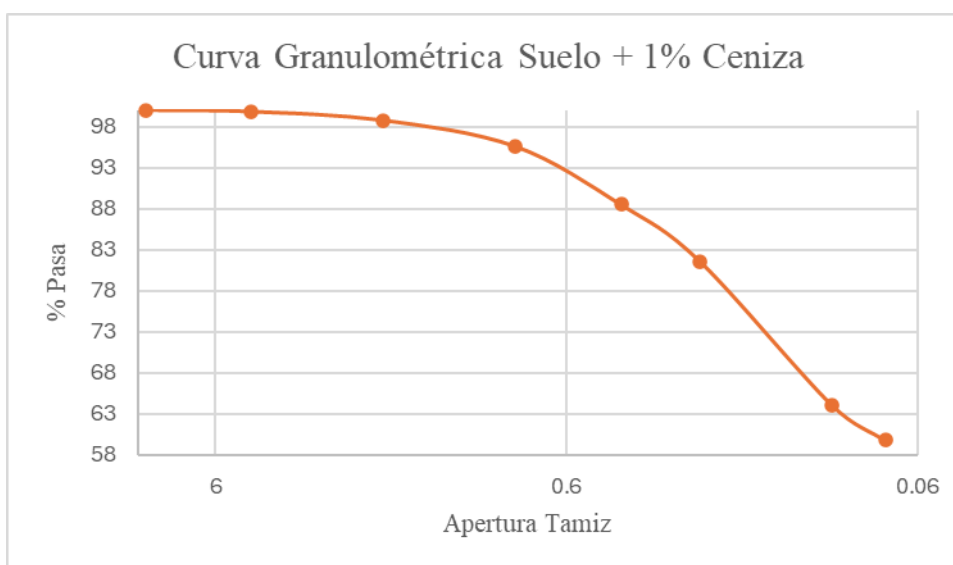




Tabla 3

Resultados del ensayo de granulometría para el suelo estabilizado con 1.5% de ceniza de fique.

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 3.	
<b>Gradación Suelo + 1.5% Ceniza Fique</b>					
Peso Muestra Seca (Gramos)				573.5	
Peso Muestra Seca Tras Lavar (Gramos)				235.2	
Tamiz (Pulgadas)	Tamiz (mm)	Peso Retenido (Gr)	% Retenido	% Pasa	
0.375	9.5	0	0.00	100	
4	4.76	1.2	0.21	99.79	
10	2	6.6	1.15	98.64	
20	0.84	18.2	3.17	95.47	
40	0.42	40.5	7.06	88.40	
60	0.25	41.6	7.25	81.15	
140	0.105	96.3	16.79	64.36	
200	0.074	27	4.71	59.65	
Pasa 200		342.1	59.65	0.00	

%Gravas	0.21
%Arenas	40.14
%Finos	59.65

Figura 8

Curva granulométrica para suelo con adición de 1.5% de ceniza

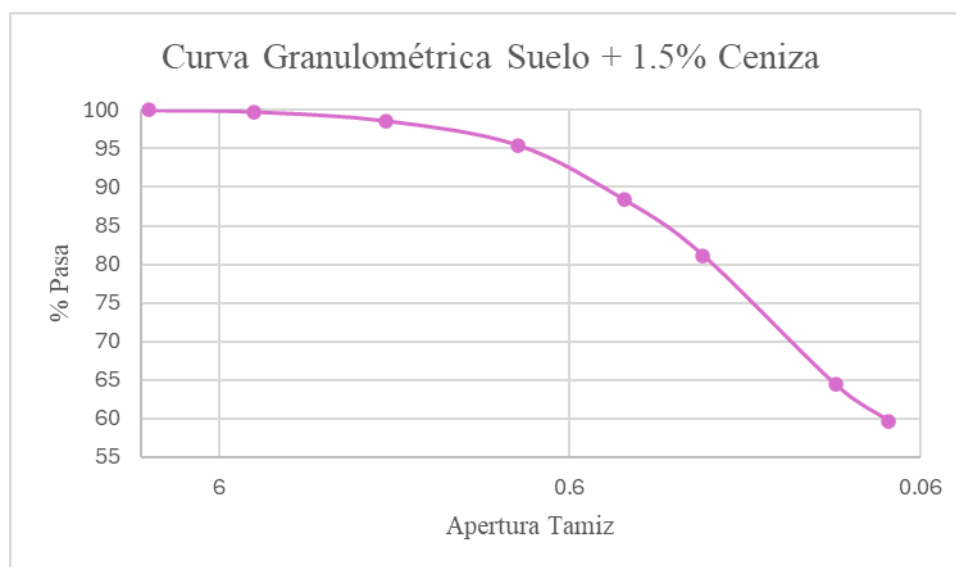




Tabla 4

Resultados del ensayo de granulometría para el suelo estabilizado con 2% de ceniza de fique.

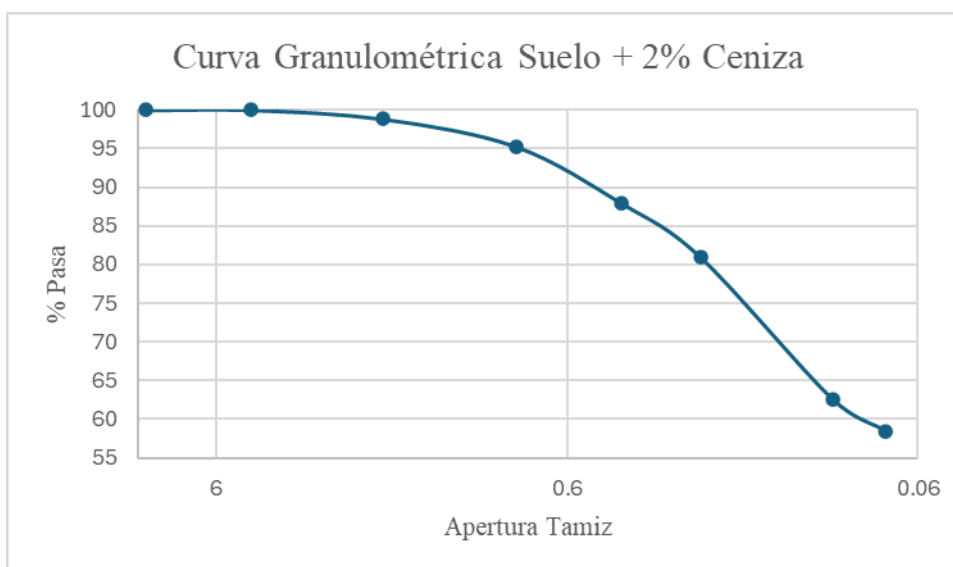
 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 4.	
<b>Gradación Suelo + 2% Ceniza Fique</b>					
Peso Muestra Seca (Gramos)				573.5	
Peso Muestra Seca Tras Lavar (Gramos)				246.4	
Tamiz (Pulgadas)	Tamiz (mm)	Peso Retenido (Gr)	% Retenido	% Pasa	
0.375	9.5	0	0.00	100	
4	4.76	0	0.00	100.00	
10	2	6.7	1.17	98.83	
20	0.84	20.4	3.56	95.27	
40	0.42	42.2	7.36	87.92	
60	0.25	40.2	7.01	80.91	
140	0.105	105.5	18.40	62.51	
200	0.074	23.4	4.08	58.43	
Pasa 200		335.1	58.43	0.00	

%Gravas	0.00
%Arenas	41.57
%Finos	58.43

Figura 9

Curva granulométrica para suelo con adición de 2% de ceniza





Se presenta una tabla resumen que muestra los porcentajes de grava, arena y finos para cada uno de los tipos de suelo analizados: suelo virgen, y mezclas con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique. Esta información permite observar de manera clara el comportamiento granulométrico general de cada muestra

y reafirma la tendencia de clasificación como suelos finos, dada la predominancia de material que pasa el tamiz N° 200.

**Tabla 5**

*Porcentaje de grava, arena y finos para las muestras analizadas.*

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.			Fecha V: 12/05/2025
					Versión: 01
					Tabla 5.
<b>Resumen y Comparación Granulométrica</b>					
Tamiz (mm)	% Pasa Virgen	% Pasa Suelo 1	% Pasa Suelo 1.5	% Pasa Suelo 2	
9.5	100.00	100.00	100.00	100.00	
4.76	99.93	99.83	99.79	100.00	
2	98.92	98.78	98.64	98.83	
0.84	95.72	95.61	95.47	95.27	
0.42	88.85	88.53	88.40	87.92	
0.25	82.60	81.62	81.15	80.91	
0.105	66.21	64.10	64.36	62.51	
0.074	61.33	59.81	59.65	58.43	
<b>%Gravas</b>	0.07	0.17	0.21	0.00	
<b>%Arenas</b>	38.60	40.02	40.14	41.57	
<b>%Finos</b>	<b>61.33</b>	<b>59.81</b>	<b>59.65</b>	<b>58.43</b>	

En los tres casos, se observó que el porcentaje de material que pasa el tamiz N° 200 supera el 50 %, lo cual indica que todas las muestras corresponden a suelos finos. Al igual que en el caso del suelo virgen, esto implica que la clasificación definitiva del material no puede establecerse únicamente con base en los resultados granulométricos, y por tanto, debe complementarse con los resultados de los ensayos de límites de plasticidad y su representación en la carta de plasticidad, según el método SUCS (Instituto Nacional de Vías, 2013).

### 3.3.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg corresponden a parámetros fundamentales en la caracterización de suelos finos, ya que permiten determinar los estados de consistencia que un suelo puede presentar en función de su contenido de humedad. Estos límites comprenden el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el límite de contracción (LC). A partir de ellos, se calculan indicadores como el índice de plasticidad (IP), los cuales son esenciales para la clasificación de suelos en sistemas como el SUCS y AASHTO.

Estos límites son especialmente relevantes para suelos clasificados como finos, como se identificó en la sección de granulometría, y son necesarios para completar la clasificación del suelo utilizando la carta de plasticidad del sistema SUCS (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Los ensayos fueron realizados siguiendo las normas del Instituto Nacional de Vías INV E-125-13, INV E-126-13 e INV E-127-13, en donde se describen los procedimientos técnicos para la determinación de estos parámetros, en la Figura 10 se muestra el compendio de muestras de los ensayos realizados en las secciones 3.3.2.1 y 3.3.2.2 después de secado en horno.

### Figura 10

*Muestras ensayos de limites después de secado en horno. Fuente autoría propia*



Para cada una de las muestras se tamizo 250g de muestra y se tomó la representativa que pasa por el tamiz N° 40 tanto para el suelo en estado virgen como para el suelo con la adición de cada uno de los porcentajes de ceniza de fique como se ilustra en la Figura 11.

**Figura 11**

*Muestra de material tamizado que pasa por el tamiz No. 40. Fuente autoría propia*

**3.3.2.1 Límite líquido**

El ensayo de límite líquido se realizó de acuerdo con la norma INV E-125-13, utilizando el dispositivo de copa de Casagrande

El procedimiento consistió en preparar una pasta homogénea con distintas cantidades de humedad, colocándola en la copa y realizando cortes rectos para determinar el número de golpes necesarios para cerrar una ranura de 13 mm. Este proceso se repitió para diferentes humedades, obteniendo una relación entre número de golpes y contenido de humedad, que permitió interpolar el valor del límite líquido correspondiente a 25 golpes, como se ilustra en la Figura 12.

**Figura 12**

*Preparación de muestra húmeda y abertura de ranura. Fuente autoría propia*



El ensayo fue realizado para cada una de las siguientes condiciones: suelo virgen, suelo con 1 % de ceniza, suelo con 1.5 % y suelo con 2 % de ceniza, en todos los casos se realizaron tres repeticiones y se hizo el cálculo del resultado uso de las ecuaciones (5), (6), (7) para calcular el peso del agua, peso de suelo seco y porcentaje de humedad los promedios se presentan en las siguientes tablas:

$$\text{Peso del agua} = (\text{Peso Recipiente} + SH) - (\text{Peso Recipiente} + SS) \quad (5)$$

$$\text{Peso suelo seco} = (\text{Peso Recipiente} + SS) - (\text{Peso Recipiente}) \quad (6)$$

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso suelo seco}} \times 100 \quad (7)$$

Tabla 6

Resultados del límite líquido para suelo virgen.



 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 6.
<b>Límite Líquido Suelo Virgen</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Nº de golpes</b>	27	26	16	
<b>Nº Recipiente</b>	10	1	3	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	19.71	23.1	21.27	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	17.46	20.44	18.4	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	10.84	13.25	10.91	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	6.62	7.19	7.49	
<b>Peso Agua (gr)</b>	2.25	2.66	2.87	
<b>% Humedad</b>	33.99	37.00	38.32	

Figura 13

Gráfica límite líquido para suelo virgen. Fuente. Autoría propia

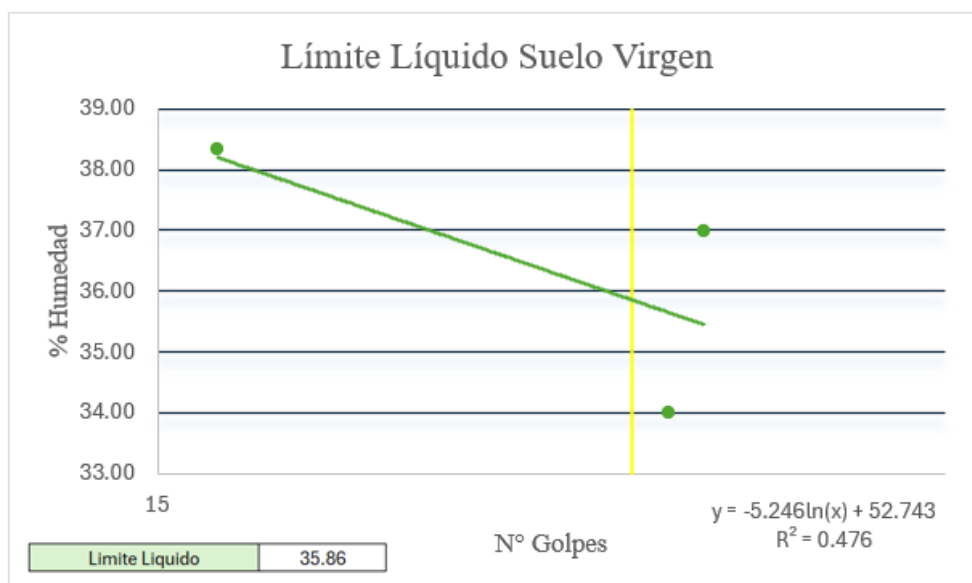


Tabla 7

Resultados del límite líquido para suelo con 1 % de ceniza.



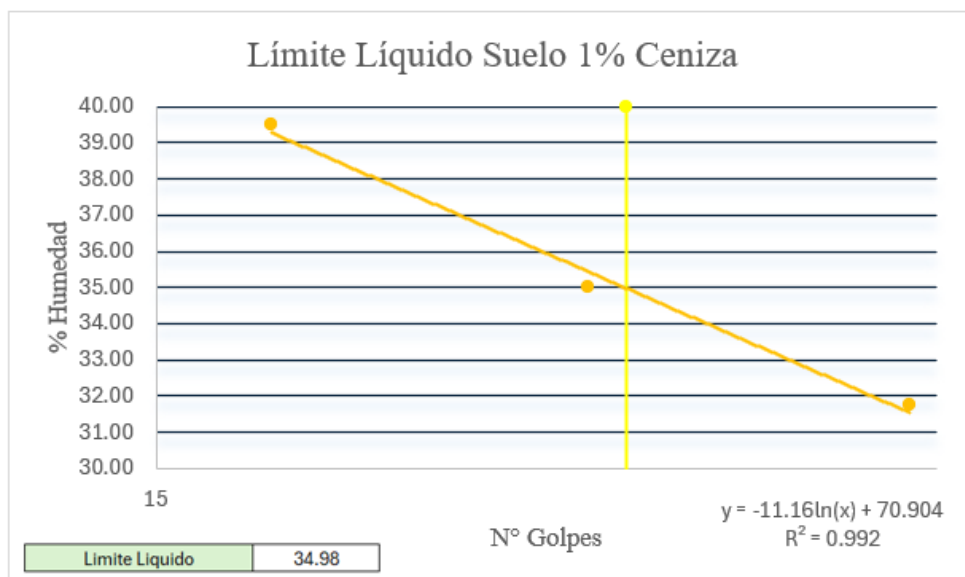
 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.			Fecha V: 12/05/2025
					Versión: 01
					Tabla 7.
<b>Límite Líquido Suelo 1% Ceniza</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		
<b>Nº de golpes</b>	34	24	17		
<b>Nº Recipiente</b>	20	14	2		
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	20.31	20.18	22.04		
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	18.05	17.77	19		
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	10.93	10.89	11.3		
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	7.12	6.88	7.7		
<b>Peso Agua (gr)</b>	2.26	2.41	3.04		
<b>% Humedad</b>	31.74	35.03	39.48		



Figura 14

Gráfica límite líquido para suelo con ceniza 1%. Fuente. Autoría propia



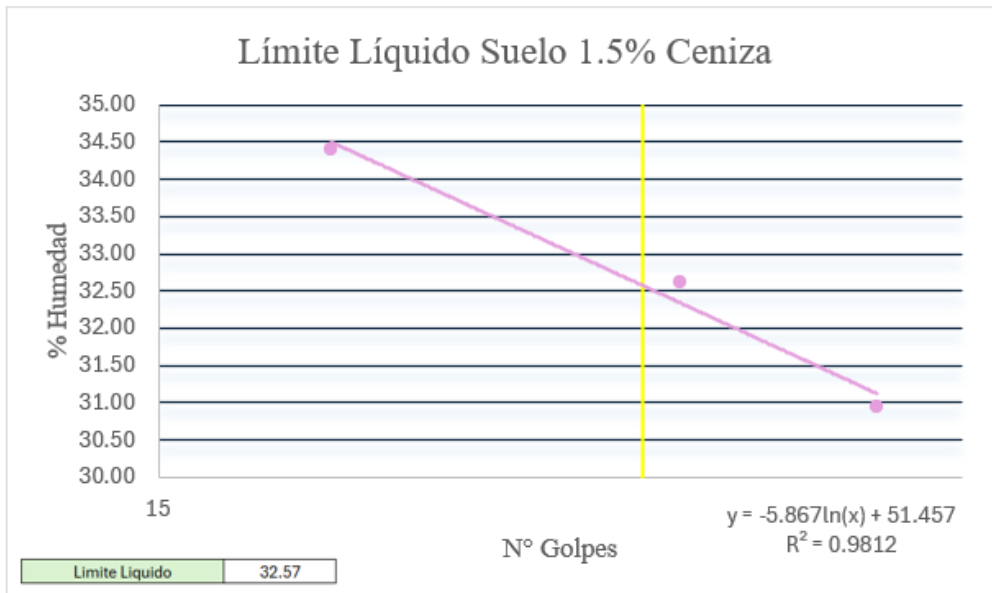
**Tabla 8**

*Resultados del límite líquido para suelo con 1.5 % de ceniza.*

 	<b>Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.</b>		<b>Fecha V:</b> <b>12/05/2025</b> <b>Versión: 01</b> <b>Tabla 8.</b>
	<b>Límite Líquido Suelo 1.5% Ceniza</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Nº de golpes</b>	32	26	18
<b>Nº Recipiente</b>	16	13	9
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	21.83	18.8	18.39
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	19.36	16.84	16.46
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	11.38	10.83	10.85
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	7.98	6.01	5.61
<b>Peso Agua (gr)</b>	2.47	1.96	1.93
<b>% Humedad</b>	30.95	32.61	34.40


**Figura 15**

*Gráfica límite líquido para suelo con ceniza 1.5%. Fuente. Autoría propia*



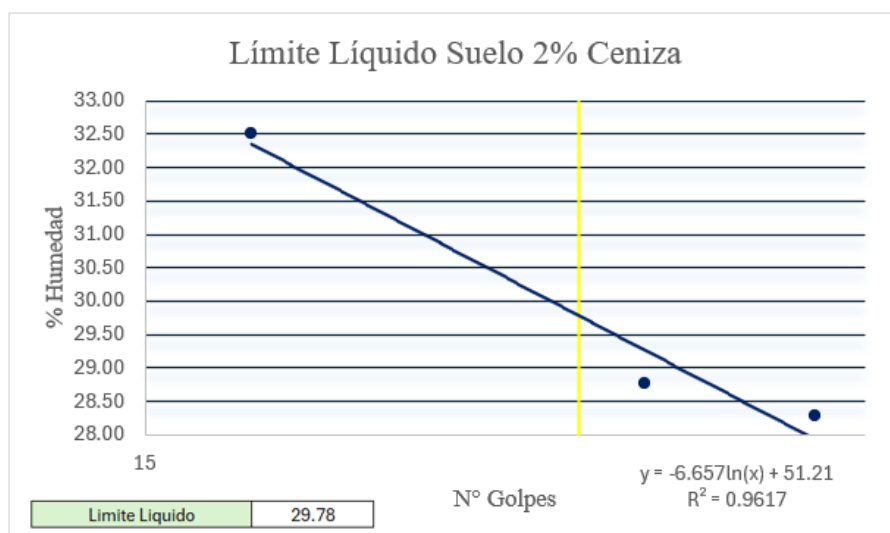
**Tabla 9**

Resultados del límite líquido para suelo con 2 % de ceniza.

		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		
				
		Fecha V: 12/05/2025		
		Versión: 01		
		Tabla 9.		
Límite Líquido Suelo 2% Ceniza				
	1	2	3	
Nº de golpes	33	27	17	
Nº Recipiente	11	30	18	
Peso Recipiente + SH (gr)	18.87	18.24	19.42	
Peso Recipiente+ SS (gr)	17.15	16.73	17.33	
Peso Recipiente (gr)	11.07	11.48	10.9	
Peso Suelo Seco (gr)	6.08	5.25	6.43	
Peso Agua (gr)	1.72	1.51	2.09	
% Humedad	28.29	28.76	32.50	

**Figura 16**

Gráfica límite líquido para suelo con ceniza 2%. Fuente. Autoría propia



### 3.3.2.2 Límite Plástico

El ensayo de límite plástico se llevó a cabo conforme a la norma INV E-126-13. Consistió en tomar una porción de suelo que, al ser amasada, pudiera formar cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro sin que se agrietaran. El contenido de humedad al cual el suelo pierde su plasticidad y comienza

a desmoronarse se consideró como el límite plástico, en la Figura 17 se ilustra la aplicación del ensayo y su posterior toma de datos.

### Figura 17

*Peso muestra de rollos de masa de suelo. Fuente autoría propia*



Al igual que con el límite líquido, se realizaron tres repeticiones por cada una de las condiciones analizadas y se calcula el peso del agua, peso de suelo seco y porcentaje de humedad haciendo uso de las ecuaciones (5), (6), (7) mencionadas en la sección 3.3.2.1 los promedios se presentan en las siguientes tablas: Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 10

Resultados del límite plástico para suelo virgen.



 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.	Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 10.
<b>Límite Plástico Suelo Virgen</b>			
<b>N° Recipiente</b>	19	16	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	13.76	13.06	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	12.34	12.33	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	6.1	6.21	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	6.24	6.12	
<b>Peso Agua (gr)</b>	1.42	0.73	
<b>% Humedad</b>	22.76	11.93	
<b>Límite Plástico</b>	<b>17.34</b>		

Tabla 11

Resultados del límite plástico para suelo con 1 % de ceniza.



 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.	Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 11.
<b>Límite Plástico Suelo 1% Ceniza</b>			
<b>N° Recipiente</b>	1	15	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	15.98	14.01	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	14.5	12.96	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	6.42	6.22	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	8.08	6.74	
<b>Peso Agua (gr)</b>	1.48	1.05	
<b>% Humedad</b>	18.32	15.58	
<b>Límite Plástico</b>	<b>16.95</b>		

Tabla 12

Resultados del límite plástico para suelo con 1.5 % de ceniza.





 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.	Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 12.
<b>Límite Plástico Suelo 1.5% Ceniza</b>			
<b>Nº Recipiente</b>	7	3	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	12.88	13.03	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	12.01	12.15	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	6.23	6.14	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	5.78	6.01	
<b>Peso Agua (gr)</b>	0.87	0.88	
<b>% Humedad</b>	15.05	14.64	
<b>Límite Plástico</b>	<b>14.85</b>		

Tabla 13

Resultados del límite plástico para suelo con 2 % de ceniza.

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.	Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 13.
<b>Límite Plástico Suelo 2% Ceniza</b>			
<b>Nº Recipiente</b>	11	8	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	11.69	14.15	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	10.97	13.33	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	5.96	7.51	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	5.01	5.82	
<b>Peso Agua (gr)</b>	0.72	0.82	
<b>% Humedad</b>	14.37	14.09	
<b>Límite Plástico</b>	<b>14.23</b>		


### 3.3.2.3 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) fue calculado como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) para cada condición del suelo, de acuerdo con la ecuación (1) mencionada en la sección 2.1.4.4.

Este índice permite evaluar la plasticidad del suelo y es esencial para su clasificación en la carta de plasticidad. Los valores obtenidos se integrarán en un análisis comparativo entre las diferentes proporciones de ceniza, con el fin de evaluar cómo varía la plasticidad del suelo al modificar su composición, en la Tabla 14 se muestran los resultados para cada una de las muestras:

**Tabla 14**

*Resultados de índice de plasticidad para cada una de las muestras.*

		<b>Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.</b>		<b>Fecha V: 12/05/2025</b> <b>Versión: 01</b> <b>Tabla 14.</b>
<b>Indices de Plasticidad</b>				
<b>Tipo Suelo</b>	<b>L.L.</b>	<b>L.P.</b>	<b>I.P.</b>	
<b>Suelo Virgen</b>	35.86	17.34	<b>18.51</b>	
<b>Suelo 1% Ceniza</b>	34.98	16.95	<b>18.03</b>	
<b>Suelo 1.5% Ceniza</b>	32.57	14.85	<b>17.72</b>	
<b>Suelo 2% Ceniza</b>	29.78	14.23	<b>15.55</b>	

### 3.3.2.4 Límite de contracción

El ensayo de límite de contracción fue realizado conforme a la norma INV E-127-13, mediante la utilización de mercurio como fluido de desplazamiento. Se prepararon muestras de suelo con humedad superior al límite líquido, que fueron colocadas en cápsulas metálicas y secadas hasta peso constante como se ilustra en la Figura 18.

**Figura 18**

*Muestras después de secado en horno. Fuente autoría propia*



Posteriormente, se determinó el volumen de la muestra de mercurio midiendo su peso como se ilustra en la Figura 19, utilizando la densidad del mercurio  $\rho = 13.55 \text{ g/cm}^3$  (Instituto Nacional de Vías,2013) se calculó el volumen  $V = 55.28 \text{ cm}^3$  con este volumen inicial se partió para el cálculo del límite de contracción midiendo el volumen desplazado de cada una de las muestras secas sumergidas en mercurio como se ilustra en la Figura 20.

### Figura 19

*Medición de la masa del mercurio. Fuente autoría propia*



**Figura 20**

*Muestra de volumen desplazado con mercurio. Fuente autoría propia*



Para cada una de las muestras se midió la masa desplazada que, junto con la masa seca, permitió calcular el límite de contracción (LC) como el contenido de humedad correspondiente al punto en que el volumen del suelo ya no disminuye pese a continuar el secado. Las tablas que se presentan a continuación contienen los resultados promedios obtenidos para cada muestra:

Tabla 15

Resultados Límite de contracción para suelo virgen.



 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.	Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 15.
<b>Límite Contracción Suelo Virgen</b>			
Tapa	7	1	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	39.41	44.99	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	30.48	35.12	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	8.27	8.28	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	22.21	26.84	
<b>Peso Agua (gr)</b>	8.93	9.87	
<b>Peso Desplazado (gr)</b>	184.37	202.62	
<b>Volumen inicial V (Cm<sup>3</sup>)</b>	55.28	55.28	
<b>Volumen Final Vo (Cm<sup>3</sup>)</b>	13.61	14.95	
<b>% Humedad</b>	40.21	36.77	
<b>LC</b>	42.08	38.28	
	<b>LC</b>	<b>40.18</b>	

Tabla 16

Resultados Límite de contracción para suelo con 1 % de ceniza.



 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.	Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 16.
<b>Límite Contracción Suelo 1% Ceniza</b>			
Tapa	3	10	
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	41.01	41.02	
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	31.27	32.77	
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	8.61	8.04	
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	22.66	24.73	
<b>Peso Agua (gr)</b>	9.74	8.25	
<b>Peso Desplazado (gr)</b>	204.99	237.51	
<b>Volumen inicial V (Cm<sup>3</sup>)</b>	55.28	55.28	
<b>Volumen Final Vo (Cm<sup>3</sup>)</b>	15.13	17.53	
<b>% Humedad</b>	42.98	33.36	
<b>LC</b>	44.76	34.89	
	<b>LC</b>	<b>39.82</b>	

Tabla 17

Resultados Límite de contracción para suelo con 1.5 % de ceniza.





 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 17.	
<b>Límite Contracción Suelo 1.5% Ceniza</b>					
Tapa	2	4			
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	43.07	46.61			
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	33.6	37.26			
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	8.36	8.59			
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	25.24	28.67			
<b>Peso Agua (gr)</b>	9.47	9.35			
<b>Peso Desplazado (gr)</b>	225.67	218.15			
<b>Volumen inicial V (Cm<sup>3</sup>)</b>	55.28	55.28			
<b>Volumen Final Vo (Cm<sup>3</sup>)</b>	16.65	16.10			
<b>% Humedad</b>	37.52	32.61			
<b>LC</b>	39.05	33.98			
	<b>LC</b>		<b>36.51</b>		

Tabla 18



Resultados Límite de contracción para suelo con 2 % de ceniza.

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 18.	
<b>Límite Contracción Suelo 2% Ceniza</b>					
Tapa	5	6			
<b>Peso Recipiente + SH (gr)</b>	45.9	47.18			
<b>Peso Recipiente+ SS (gr)</b>	37.92	38.95			
<b>Peso Recipiente (gr)</b>	8.35	8.32			
<b>Peso Suelo Seco (gr)</b>	29.57	30.63			
<b>Peso Agua (gr)</b>	7.98	8.23			
<b>Peso Desplazado (gr)</b>	204.99	237.51			
<b>Volumen inicial V (Cm<sup>3</sup>)</b>	55.28	55.28			
<b>Volumen Final Vo (Cm<sup>3</sup>)</b>	15.13	17.53			
<b>% Humedad</b>	26.99	26.87			
<b>LC</b>	28.34	28.10			
	<b>LC</b>		<b>28.22</b>		

Con el objetivo de facilitar la comparación entre los distintos tipos de suelo evaluados, a continuación, se presenta una tabla resumen con los valores promedio obtenidos en los ensayos de límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP) y límite de contracción (LC) para el suelo en estado natural y para las mezclas con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique. Esta síntesis permite observar la influencia que tiene la adición de ceniza sobre las propiedades de consistencia del suelo, lo cual es fundamental para su clasificación y para la evaluación de su comportamiento en condiciones de humedad variable.

**Tabla 19**

*Valores promedio de LL, LP, IP y LC para las muestras analizadas.*

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 19.	
L.L, L.P, I.P, L.C					
Tipo Suelo	L.L.	L.P.	I.P.	L.C.	
Suelo Virgen	35.86	17.34	18.51	40.18	
Suelo 1% Ceniza	34.98	16.95	18.03	39.82	
Suelo 1.5% Ceniza	32.57	14.85	17.72	36.51	
Suelo 2% Ceniza	29.78	14.23	15.55	28.22	

### 3.3.3 Proctor Modificado

Con el objetivo de determinar la humedad óptima de compactación y la densidad seca de las muestras de suelo virgen y las que tienen adición de ceniza de fique, se realizó el ensayo Proctor Modificado conforme a la norma INV E-142-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013). Este ensayo es fundamental para establecer las condiciones ideales de compactación del suelo, y para analizar cómo varía esta respuesta al incorporar diferentes porcentajes de ceniza de fique.

Se preparan 2500g de muestra seca que pasa por el tamiz No.4 (4.75mm) para cada una de las cuatro condiciones de mezcla: suelo virgen y mezclas con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique. Para cada condición, se compactó el suelo en un molde cilíndrico estandarizado, en cinco capas de igual espesor, aplicando 25 golpes por capa con un martillo de 10 libras, que cae desde una altura de 45.72 cm, tal como lo estipula la norma INV E-142-13 como se muestra en la Figura 21.

**Figura 21**

*Compactación de muestra en cilindro con 5 capas a 25 golpes. Fuente autoría propia*



Posteriormente se sacó una muestra representativa, se pesó el suelo compactado en el molde para obtener el peso húmedo de la muestra para llevarlo al horno durante 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C y se repite el proceso dos veces más para cada una de las muestras (suelo virgen, 1%, 1.5%, 2%) como se muestra en la Figura 22.

**Figura 22**

*Cápsula de suelo representativa después de compactación. Fuente autoría propia*



A continuación, se presentan los resultados representativos a cada una de las muestras de ensayo.

### 3.3.3.1 Proctor suelo en estado virgen

En Tabla 20 se presentan las condiciones del ensayo, que para la muestra se hicieron 3 mediciones con el fin de obtener una mejor correlación de datos teniendo un peso del molde de 3545g con un volumen de  $956 \text{ cm}^3$ , donde se reporta los pesos de las muestras utilizadas, en la Tabla 21 se muestran los cálculos para la determinación de la humedad seca y determinación del porcentaje de humedad, estos cálculos se extraen en la Figura 23.

**Tabla 20**

*Condiciones de ensayo Proctor de suelo en estado virgen.*

Numero de Capas	5			
Golpes por Capa	25	Molde No	5	
Peso del Martillo	10 lb	Volumen molde(cm)	956.0	
Altura de caída	18 plg	Peso Molde (gr)	3545	
ENSAYO	1	2	3	
<b>DETERMINACION DE LA DENSIDAD</b>				
Peso molde + Suelo Húmedo (g)	5535	5643	5613	
Cápsula N°	163	77	35	
Peso cap. y s. húmedo (g)	84.15	90.51	83.84	
Peso cap. y s. seco (g)	77.67	81.17	73.42	
Peso cap. (g)	6.98	5.79	5.42	
<b>Humedad spedy</b>	<b>9.17</b>	<b>12.39</b>	<b>15.32</b>	<b>0.00</b>

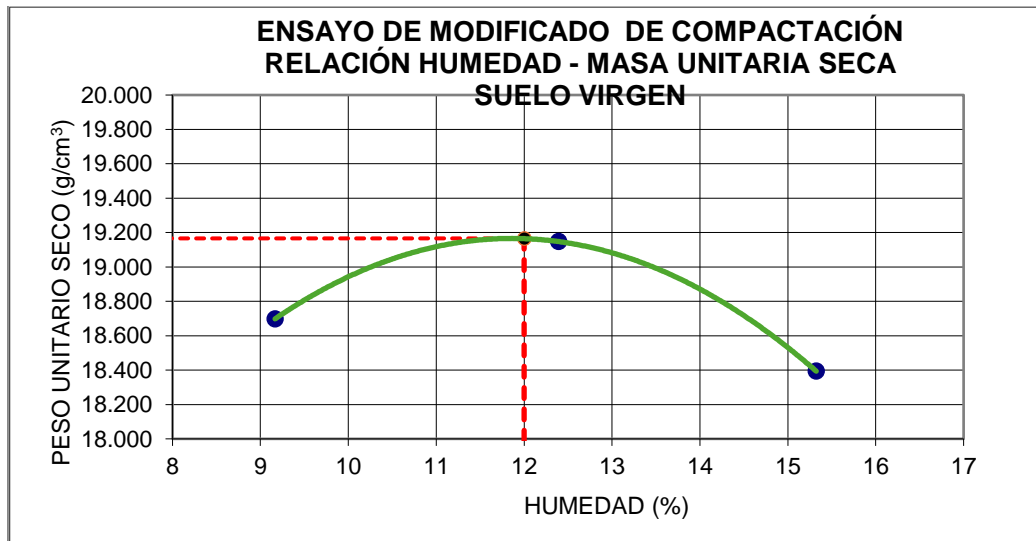
**Tabla 21**

Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo en estado virgen.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD			
ENSAYO	1	2	3
Peso molde + Suelo Húmedo (g.)	5535	5643	5613
Peso Suelo Húmedo (g.)	1990	2098	2068
Peso específico húmedo (g/cm <sup>3</sup> )	2.081	2.194	2.163
Peso específico seco (g/cm <sup>3</sup> )	1.907	1.953	1.876
Peso específico seco (Kn/m <sup>3</sup> )	18.698	19.148	18.394
DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD			
Cápsula N°	163	77	35
Peso cap. y s. húmedo (g.)	84.15	90.51	83.84
Peso cáp. y s. seco (g.)	77.67	81.17	73.42
Peso cáp. (g.)	6.98	5.79	5.42
Peso agua (g.)	6.48	9.34	10.42
Humedad (%)	9.17	12.39	15.32

**Figura 23**

Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo en estado virgen. Fuente autoría propia



Obteniendo así:

**Densidad máxima seca:** 1,954 g/cm<sup>3</sup>(19,166 KN/m<sup>3</sup>)

**Humedad óptima:** 12 %

### 3.3.3.2 Proctor suelo con adición de 1% de ceniza de fique

En Tabla 22 se presentan las condiciones del ensayo para la muestra con adición de ceniza de fique del 1%, que para la muestra se hicieron 3 mediciones con el fin de obtener una mejor correlación de datos

teniendo un peso del molde de 3545g con un volumen de  $956 \text{ cm}^3$ , donde se reporta los pesos de las muestras utilizadas, en la Tabla 23 se muestran los cálculos para la determinación de la humedad seca y determinación del porcentaje de humedad, estos cálculos se extraen en la Figura 24.

**Tabla 22**

*Condiciones de ensayo Proctor de suelo con adición de 1% de ceniza de fique*

Numero de Capas	5			
Golpes por Capa	25	Molde No	5	
Peso del Martillo	10 lb	Volumen molde(cm)	956.0	
Altura de caída	18 plg	Peso Molde (gr)	3545	
ENSAYO	1	2	3	
<b>DETERMINACION DE LA DENSIDAD</b>				
Peso molde + Suelo Húmedo (g)	5502	5639	5576	
Cápsula N°	3	27	10	
Peso cap. y s. húmedo (g)	89.83	83.28	60.68	
Peso cap. y s. seco (g)	82.84	74.99	52.88	
Peso cap. (g)	5.63	5.57	4.61	
<b>Humedad spedy</b>	<b>9.05</b>	<b>11.94</b>	<b>16.16</b>	<b>0.00</b>

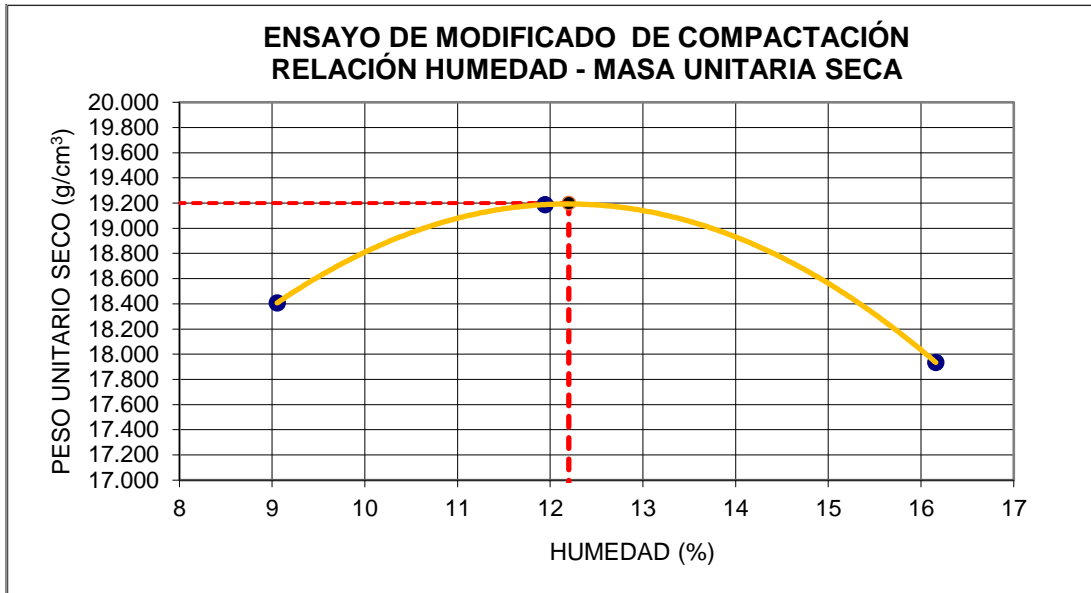
**Tabla 23**

*Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1% de ceniza de fique.*

<b>DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD</b>					
ENSAYO	1	2	3	4	5
Peso molde + Suelo Húmedo (g.)	5502	5639	5576		
Peso Suelo Húmedo (g.)	1957	2094	2031		
Peso específico húmedo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.047	2.190	2.124		
Peso específico seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.877	1.957	1.829		
Peso específico seco ( $\text{Kn}/\text{m}^3$ )	18.407	19.188	17.935		
<b>DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD</b>					
Cápsula N°	3	27	10		
Peso cap. y s. húmedo (g.)	89.83	83.28	60.68		
Peso cáp. y s. seco (g.)	82.84	74.99	52.88		
Peso cáp. (g.)	5.63	5.57	4.61		
Peso agua (g.)	6.99	8.29	7.80		
Humedad (%)	9.05	11.94	16.16		

**Figura 24**

*Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia*



Obteniendo así:

**Densidad máxima seca:** 1,958 g/cm<sup>3</sup>(19,200 KN/m<sup>3</sup>)

**Humedad óptima:** 12.2 %

### 3.3.3.3 Proctor suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique

En Tabla 24 se presentan las condiciones del ensayo para la muestra con adición de ceniza de fique del 1.5%, que para la muestra se hicieron 3 mediciones con el fin de obtener una mejor correlación de datos teniendo un peso del molde de 3545g con un volumen de 956 cm<sup>3</sup>, donde se reporta los pesos de las muestras utilizadas, en la Tabla 25 se muestran los cálculos para la determinación de la humedad seca y determinación del porcentaje de humedad, estos cálculos se extraen en la Figura 25.

**Tabla 24***Condiciones de ensayo Proctor de suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.*

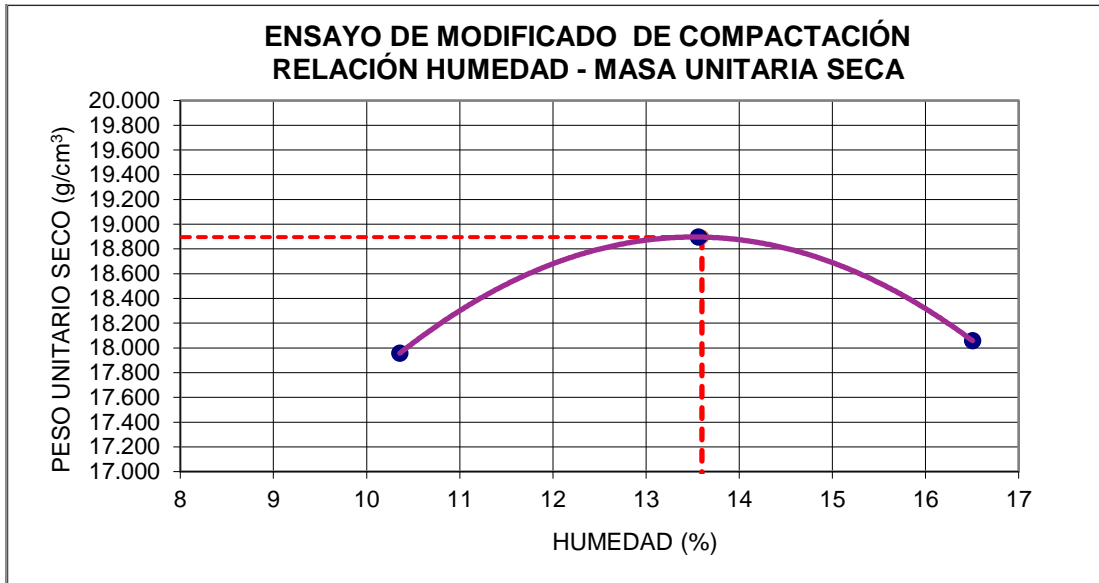
Numero de Capas	5			
Golpes por Capa	25	Molde No	5	
Peso del Martillo	10 lb	Volumen molde(cm)	956.0	
Altura de caída	18 plg	Peso Molde (gr)	3545	
ENSAYO	1	2	3	
<b>DETERMINACION DE LA DENSIDAD</b>				
Peso molde + Suelo Húmedo (g)	5477	5637	5596	
Cápsula N°	38	37	9	
Peso cap. y s. húmedo (g)	98.73	97.25	83.52	
Peso cap. y s. seco (g)	89.97	86.29	72.47	
Peso cap. (g)	5.39	5.46	5.52	
<b>Humedad speddy</b>	<b>10.36</b>	<b>13.56</b>	<b>16.50</b>	<b>0.00</b>

**Tabla 25***Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.*

Numero de Capas	5			
Golpes por Capa	25	Molde No	5	
Peso del Martillo	10 lb	Volumen molde(cm)	956.0	
Altura de caída	18 plg	Peso Molde (gr)	3545	
ENSAYO	1	2	3	
<b>DETERMINACION DE LA DENSIDAD</b>				
Peso molde + Suelo Húmedo (g)	5477	5637	5596	
Cápsula N°	38	37	9	
Peso cap. y s. húmedo (g)	98.73	97.25	83.52	
Peso cap. y s. seco (g)	89.97	86.29	72.47	
Peso cap. (g)	5.39	5.46	5.52	
<b>Humedad speddy</b>	<b>10.36</b>	<b>13.56</b>	<b>16.50</b>	<b>0.00</b>

**Figura 25**

*Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia*



Obteniendo así:

**Densidad máxima seca:** 1,927 g/cm<sup>3</sup>(18.896 KN/m<sup>3</sup>)

**Humedad óptima:** 13.6 %

#### 3.3.3.4 Proctor suelo con adición de 2% de ceniza de fique

En Tabla 26 se presentan las condiciones del ensayo para la muestra con adición de ceniza de fique del 2%, que para la muestra se hicieron 3 mediciones con el fin de obtener una mejor correlación de datos teniendo un peso del molde de 3545g con un volumen de 956 cm<sup>3</sup>, donde se reporta los pesos de las muestras utilizadas, en la Tabla 27 se muestran los cálculos para la determinación de la humedad seca y determinación del porcentaje de humedad, estos cálculos se extraen en la Figura 26.

**Tabla 26***Condiciones de ensayo Proctor de suelo con adición de 2% de ceniza de fique.*

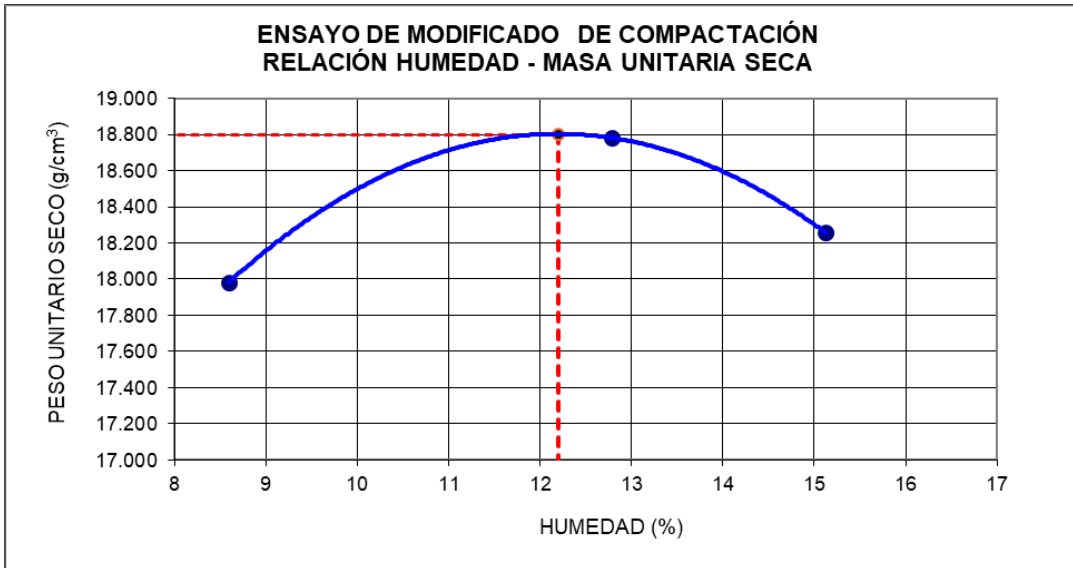
Numero de Capas	5			
Golpes por Capa	25	Molde No	5	
Peso del Martillo	10 lb	Volumen molde(cm)	956.0	
Altura de caída	18 plg	Peso Molde (gr)	3545	
ENSAYO	1	2	3	
<b>DETERMINACION DE LA DENSIDAD</b>				
Peso molde + Suelo Húmedo (g)	5449	5610	5594	
Cápsula N°	9	37	38	
Peso cap. y s. húmedo (g)	99.89	88.56	72.67	
Peso cap. y s. seco (g)	92.42	79.14	63.83	
Peso cap. (g)	5.52	5.44	5.39	
<b>Humedad spedy</b>	<b>8.60</b>	<b>12.78</b>	<b>15.13</b>	<b>0.00</b>

**Tabla 27***Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 2% de ceniza de fique.*

<b>DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD</b>					
ENSAYO	1	2	3	4	5
Peso molde + Suelo Húmedo (g.)	5449	5610	5594		
Peso Suelo Húmedo (g.)	1904	2065	2049		
Peso específico húmedo (g/cm <sup>3</sup> )	1.992	2.160	2.143		
Peso específico seco (g/cm <sup>3</sup> )	1.834	1.915	1.862		
Peso específico seco (Kn/m <sup>3</sup> )	17.984	18.781	18.256		
<b>DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD</b>					
Cápsula N°	9	37	38		
Peso cap. y s. húmedo (g.)	99.89	88.56	72.67		
Peso cáp. y s. seco (g.)	92.42	79.14	63.83		
Peso cáp. (g.)	5.52	5.44	5.39		
Peso agua (g.)	7.47	9.42	8.84		
Humedad (%)	8.60	12.78	15.13		

**Figura 26**

*Relación Humedad-Masa unitaria seca Resultados densidad seca y % de humedad Proctor de suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia*



### 3.3.4 Consolidación

El ensayo de consolidación se realizó siguiendo la norma INV E-151 (Instituto Nacional de Vías, 2013), con el objetivo de determinar la deformación unidimensional y el comportamiento de compresibilidad del suelo bajo cargas verticales. Para ello se empleó un edómetro con muestras cilíndricas compactadas en laboratorio, saturadas previamente durante 24 horas y dispuestas para el ensayo como se muestra en la Figura 27 y Figura 28. Los ciclos de carga aplicados fueron 4 de carga (I, II, III, IV) y 2 de descarga (V, VI) como se muestra en la Figura 29, registrando la deformación vertical en función del tiempo durante cada aplicación. Los resultados permitieron calcular parámetros como el índice de compresibilidad ( $C_c$ ), índice de Re compresión ( $C_s$ ) y esfuerzo de pre consolidación.

**Figura 27**

*Montaje ensayo de consolidación unidimensional. Fuente autoría propia*



**Figura 28**

*Montaje ensayo consolidación unidimensional. Fuente autoría propia*



**Figura 29**

*Ciclos de carga y descarga usados en ensayo de consolidación. Fuente autoría propia*

Escalón de Carga	Esfuerzo Axial (kPa)
0	5
I	49
II	99
III	198
IV	395
V	99
VI	5

Una vez determinado los ensayos se hacen uso de las siguientes ecuaciones tomadas de la norma

INV-E 151 donde su resultado se verá a más detalle en las secciones posteriores:

$$\% \text{Humedad inicial } (W_0) = \frac{M_{T0} - M_d}{M_d} * 100 \quad \text{ec5}$$

$$\% \text{Humedad final } (W_f) = \frac{M_{Tf} - M_d}{M_d} * 100 \quad \text{ec6}$$

$$\text{Volumen sólidos } (V_s) = \frac{M_d}{G * \rho_w} \quad \text{ec7}$$

$$\text{Altura equivalente sólidos } (H_s) = \frac{V_s}{G * A} \quad \text{ec8}$$

$$\text{Relación de vacíos inicial } (e_0) = \frac{H_0 - H_s}{H_s} \quad \text{ec9}$$

$$\text{Relación de vacíos final } (e_f) = \frac{H_f - H_s}{H_s} \quad \text{ec10}$$

$$\text{Grado de saturación inicial } (S_0) = \frac{(M_{T0} - M_d)}{A * \rho_w * (H_0 - H_s)} * 100 \quad \text{ec11}$$

$$\text{Grado de saturación final } (S_f) = \frac{(M_{Tf} - M_d)}{A * \rho_w * (H_f - H_s)} * 100 \quad \text{ec12}$$

Donde:

$M_{T0}$  = Masa total de espécimen antes del ensayo, g

$M_{Tf}$  = Masa total de espécimen después del ensayo, g

$M_d$  = Masa seca del espécimen, g

$G$  = Gravedad específica de sólidos

$\rho_w$  = Densidad del agua de poros

$A$  = Área del espécimen

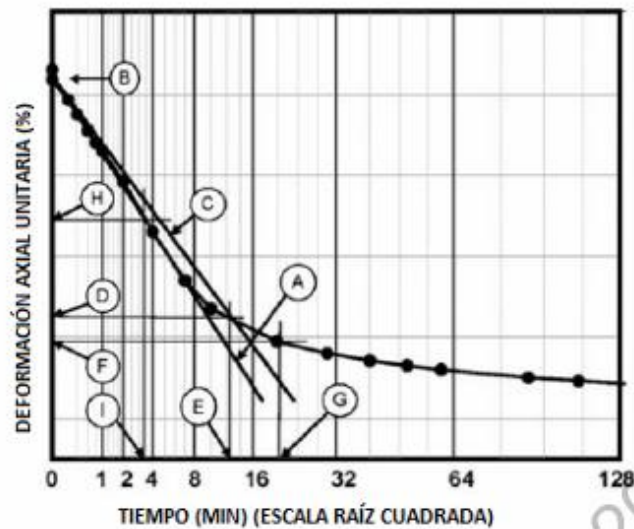
$H_0$  = Altura inicial del espécimen

$H_f$  = Altura final del espécimen

Además, para los ciclos de carga y descarga obtenidos en el montaje del edómetro se gráfica la deformación unitaria axial (%) vs raíz tiempo siguiendo el procedimiento 2 especificado en la norma INV E-151, como se muestra en la Figura 30.

### Figura 30

Curva Deformación unitaria axial vs Raíz-Tiempo. Fuente Norma INV E-151



### 3.3.4.1 Consolidación suelo en estado virgen

Se realizó el ensayo de consolidación con una muestra de 2500g intacta moldeada según su humedad óptima y densidad seca obtenida en el Proctor modificado para cuatro ciclos de carga y dos ciclos de descarga, además se hace uso de los valores de la Tabla 28 para proceder con los cálculos.

A continuación, se presenta las curvas de consolidación para el primer ciclo de carga y el primer ciclo de descarga Figura 31 y Figura 32 respectivamente, las demás curvas de consolidación para sus respectivos ciclos de carga se presentan en el Anexo 1 “Memorias de cálculo Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique”

**Tabla 28**

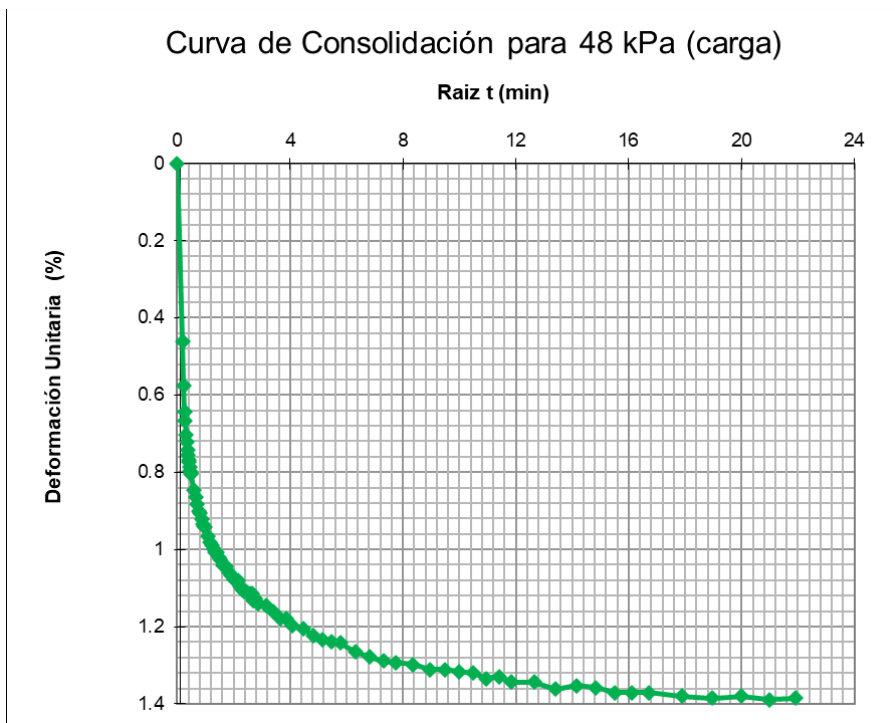
*Información ensayo consolidación suelo en estado virgen.*

Diámetro de la muestra, $d$ :	5.1	mm	Gravedad Especifica, $G_s$ :	2.60
Area de la Muestra, $A$ :	20.19	cm <sup>2</sup>	Masa Seca, $M_s$ :	80.80 g.
Altura de la muestra, $H_0$ :	2.17	cm	Ultima Medición, $M_e$ :	0.1174 cm
densidad, $\rho_s$ (inicial):	1.82	g/cm <sup>3</sup>	densidad, $\rho$ (final):	2.27 g/cm <sup>3</sup>
Altura de Sólidos,	1.41	cm	$h_m - h_s =$	0.76 cm

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	12.17	Humedad	16.75
Relación de Vacíos ( $e_v$ )	1.173	Relación de Vacíos	0.967
Saturación ( $S_v$ )	63.58		129.81
Porosidad	54.0%	Porosidad	49.2%
Poros Llenos con Agua	34.32	Poros Llenos con Agua	63.83
Poros Llenos con Aire	33.78	Poros Llenos con Aire	63.34
Altura de sólidos (cm)	1.41	Altura de sólidos	1.54
Altura de Agua (cm)	0.5	Altura de Agua	0.7
Altura de Aire (cm)	0	Altura de Aire	0
Ultima Medición antes del desmonte	0.1174	Ultima Medición antes del desmonte	0.1174

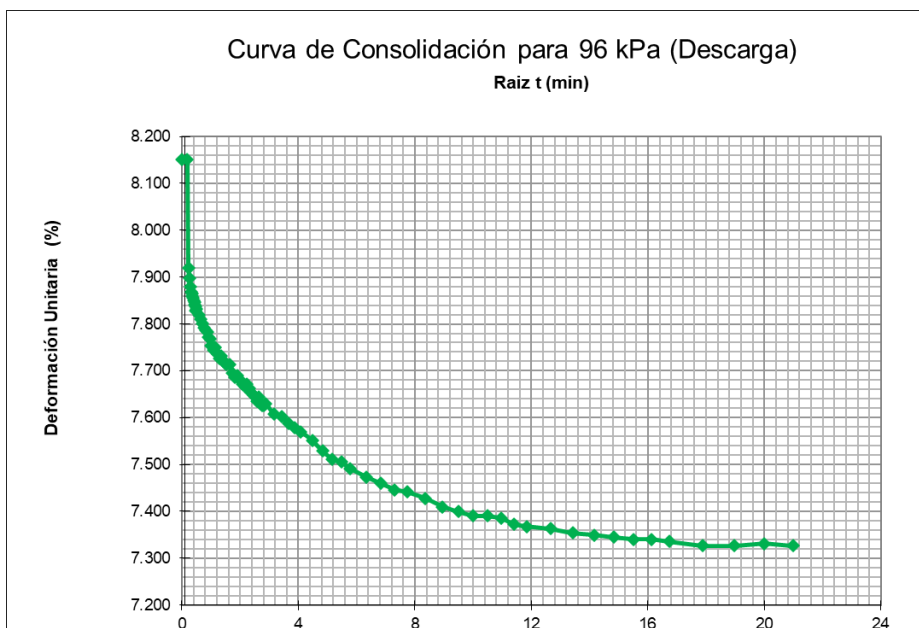
**Figura 31**

*Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo en estado virgen. Fuente autoría propia*



**Figura 32**

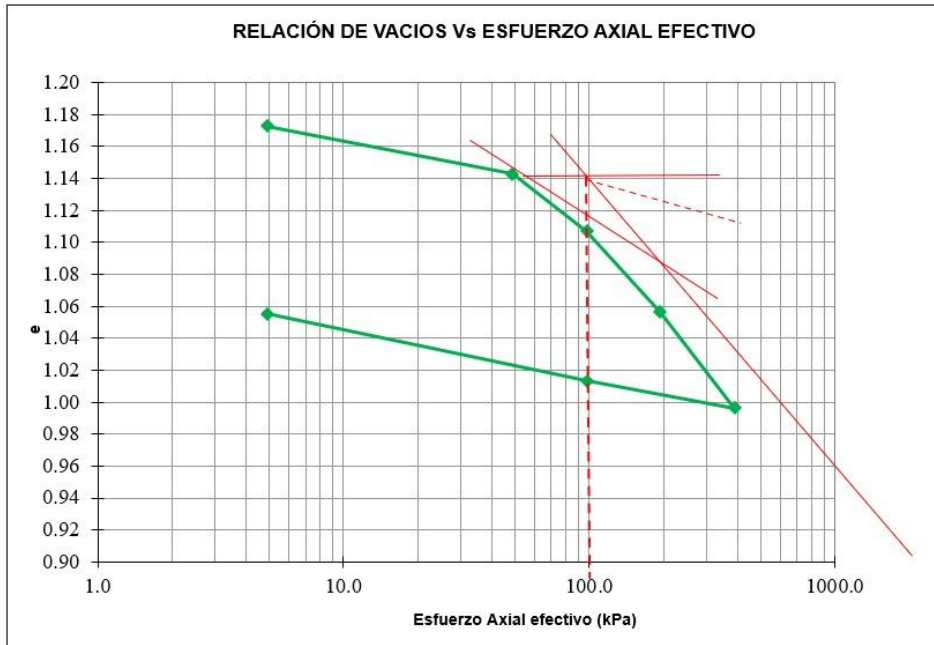
*Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo en estado virgen. Fuente autoría propia*



Haciendo uso de las ecuaciones descritas en el apartado 3.3.4, se grafica la curva de relación de vacíos vs esfuerzo axial efectivo como se presenta en la Figura 33.

**Figura 33**

*Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo en estado virgen. Fuente. Autoría propia*



De esta curva se obtiene el índice  $C_s$ ,  $C_c$  y esfuerzo de pre consolidación:

$$C_c = 0.1996$$

$$C_s = 0.0311$$

$$\text{Esfuerzo de pre consolidación} = 80 \text{ Kpa}$$

### 3.3.4.2 Consolidación suelo con adición de 1% de ceniza de fique

La muestra se preparó con 2475g de suelo y el porcentaje de 1% de adición de ceniza (25g), según su humedad óptima y densidad seca obtenida en el Proctor modificado para cuatro ciclos de carga y dos ciclos de descarga, además se hace uso de los valores de la Tabla 29 para proceder con los cálculos.

A continuación, se presenta las curvas de consolidación para el primer ciclo de carga y el primer ciclo de descarga Figura 34 y Figura 35 respectivamente, las demás curvas de consolidación para sus respectivos ciclos de carga se presentan en el Anexo 1 “Memorias de cálculo Evaluación del potencial de

expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique”, se compactó según la humedad óptima y densidad seca obtenidas previamente en el ensayo Proctor modificado obteniendo:

**Tabla 29**

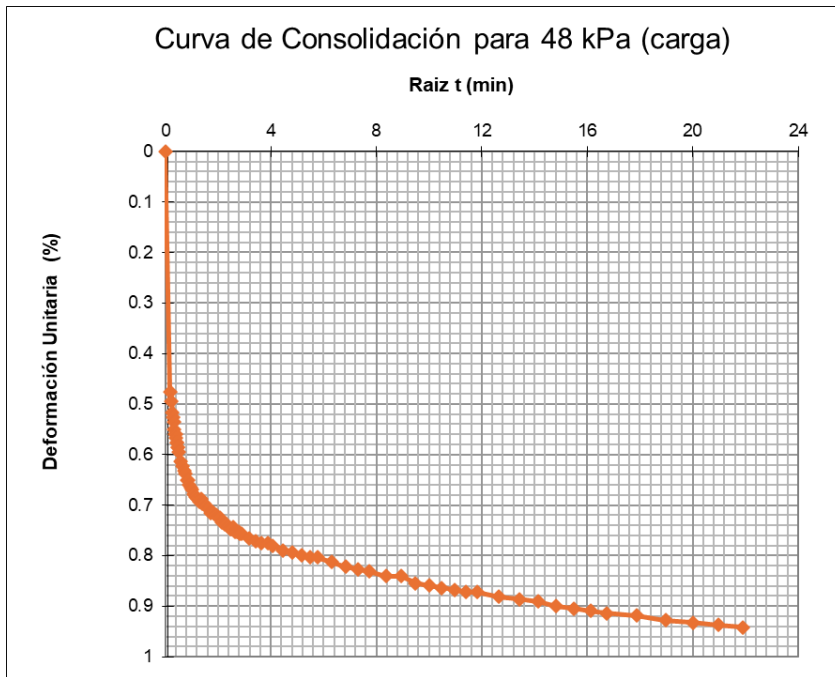
*Información ensayo consolidación suelo con adición de 1% de ceniza de fique.*

Diámetro de la muestra, $d$ :	5.0	mm	Gravedad Especifica, $G_s$ :	2.60
Area de la Muestra, $A$ :	19.85	cm <sup>2</sup>	Masa Seca, $M_d$ :	83.48 g.
Altura de la muestra, $H_0$ :	2.17	cm	Ultima Medición, $M_e$ :	0.0730 cm
densidad, $p_s$ (inicial):	1.96	g/cm <sup>3</sup>	densidad, $r$ (final):	2.35 g/cm <sup>3</sup>
Altura de Sólidos,	1.52	cm	$h_m - h_z =$	0.65 cm

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	12.17	Humedad	16.83
Relación de Vacíos ( $e_v$ )	1.166	Relación de Vacíos	1.026
Saturación ( $S_w$ )	79.56	Saturación	148.94
Porosidad	53.8%	Porosidad	50.6%
Poros Llenos con Agua	42.83	Poros Llenos con Agua	75.43
Poros Llenos con Aire	42.29	Poros Llenos con Aire	74.93
Altura de sólidos (cm)	1.52	Altura de sólidos	1.62
Altura de Agua (cm)	0.5	Altura de Agua	0.7
Altura de Aire (cm)	0	Altura de Aire	0
Ultima Medición antes del desmonte	0.0730	Ultima Medición antes del desmonte	0.0730

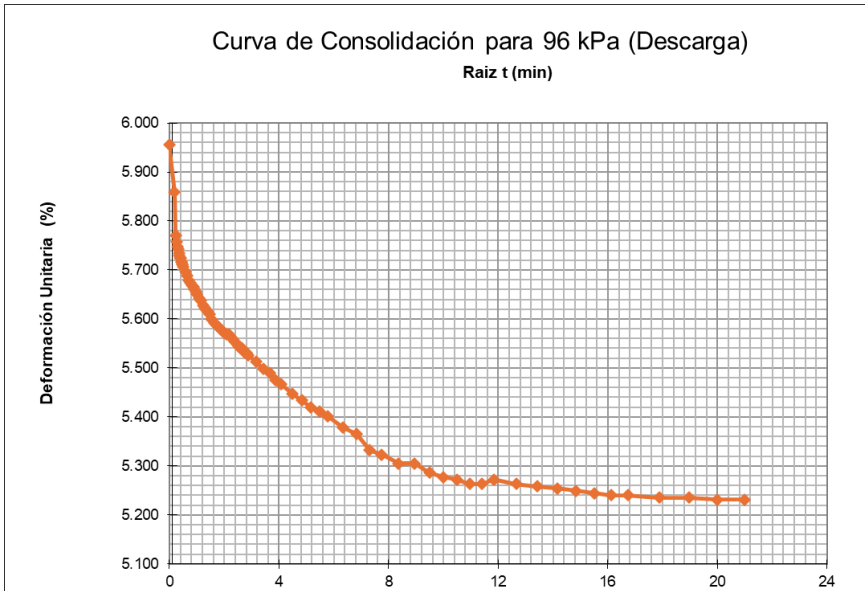
**Figura 34**

*Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia*



**Figura 35**

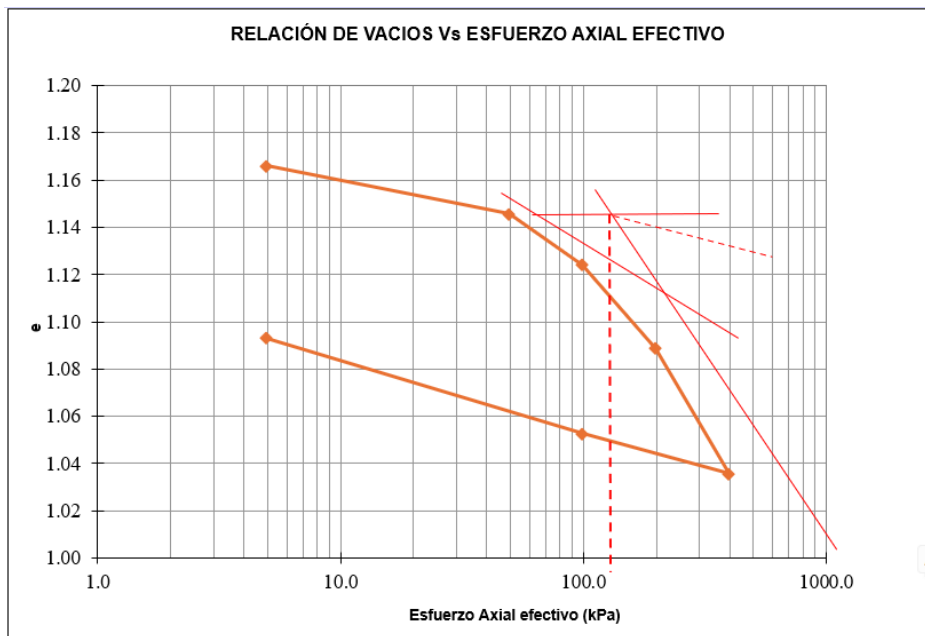
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente autoría propia



Haciendo uso de las ecuaciones descritas en el apartado 3.3.4, se grafica la curva de relación de vacíos vs esfuerzo axial efectivo como se presenta en la Figura 36.

**Figura 36**

Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 1% de ceniza de fique. Fuente. Autoría propia



De esta curva se obtiene el índice  $C_s$ ,  $C_c$  y esfuerzo de pre consolidación:

$$C_c = 0.1751$$

$$C_s = 0.0300$$

$$\text{Esfuerzo de pre consolidación} = 90 \text{ Kpa}$$

### 3.3.4.3 Consolidación suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique

La muestra se preparó con 2462.5g de suelo y el porcentaje de 1.5% de adición de ceniza (37.5g), según su humedad óptima y densidad seca obtenida en el Proctor modificado para cuatro ciclos de carga y dos ciclos de descarga, además se hace uso de los valores de la Tabla 30 para proceder con los cálculos.

A continuación, se presenta las curvas de consolidación para el primer ciclo de carga y el primer ciclo de descarga Figura 37 y Figura 38 respectivamente, las demás curvas de consolidación para sus respectivos ciclos de carga se presentan en el Anexo 1 “Memorias de cálculo Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique”, se compactó según la humedad óptima y densidad seca obtenidas previamente en el ensayo Proctor modificado obteniendo:

**Tabla 30**

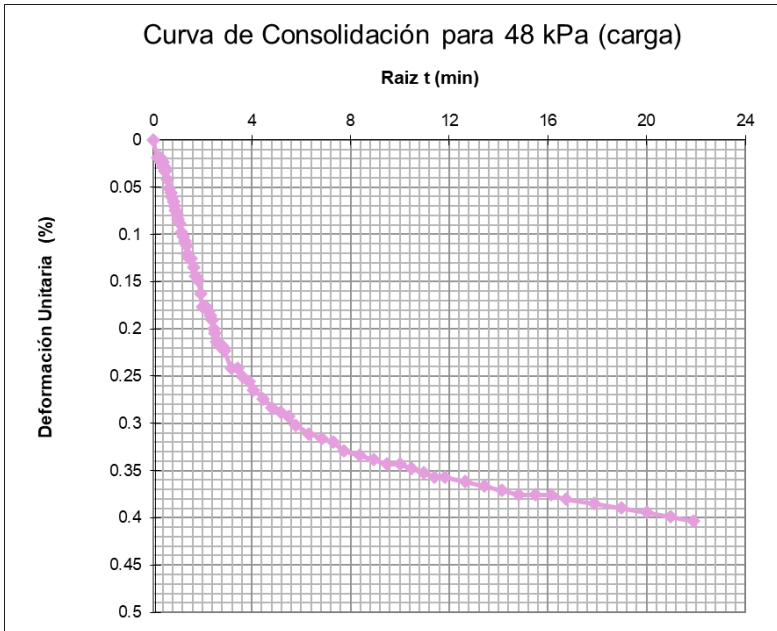
*Información ensayo consolidación suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.*

Diámetro de la muestra, $d$ :	5.1	mm	Gravedad Específica, $G_s$ :	2.60
Area de la Muestra, $A$ :	20.54	cm <sup>2</sup>	Masa Seca, $M_d$ :	83.48 g.
Altura de la muestra, $H_0$ :	2.16	cm	Última Medición, $M_e$ :	0.0678 cm
densidad, $\rho_d$ (inicial):	1.90	g/cm <sup>3</sup>	densidad, $\rho$ (final):	2.27 g/cm <sup>3</sup>
Altura de Sólidos,	1.46	cm	$h_m - h_s =$	0.69 cm

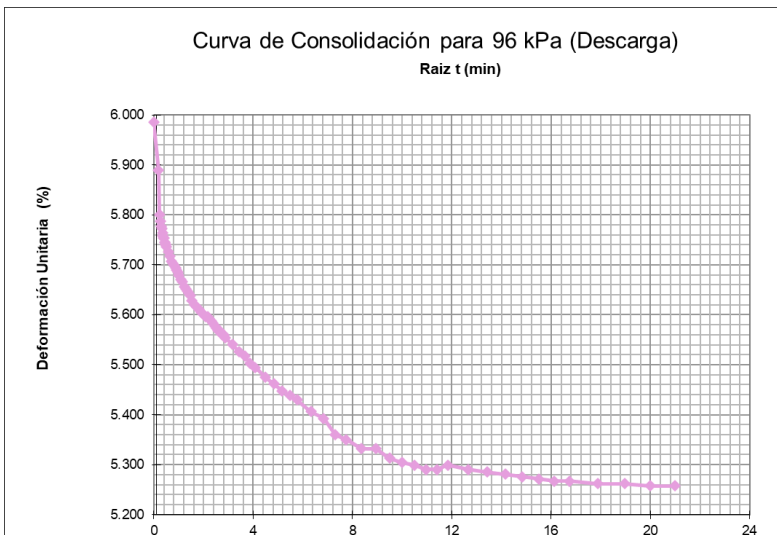
ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	9.96	Humedad	16.83
Relación de Vacíos ( $e_0$ )	1.155	Relación de Vacíos	1.020
Saturación ( $S_0$ )	59.12	Saturación	130.52
Porosidad	53.6%	Porosidad	50.5%
Poros Llenos con Agua	31.69	Poros Llenos con Agua	65.90
Poros Llenos con Aire	31.15	Poros Llenos con Aire	65.39
Altura de sólidos (cm)	1.46	Altura de sólidos	1.56
Altura de Agua (cm)	0.4	Altura de Agua	0.7
Altura de Aire (cm)	0	Altura de Aire	0
Última Medición antes del desmonte	0.0678	Última Medición antes del desmonte	0.0678

**Figura 37**

Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia

**Figura 38**

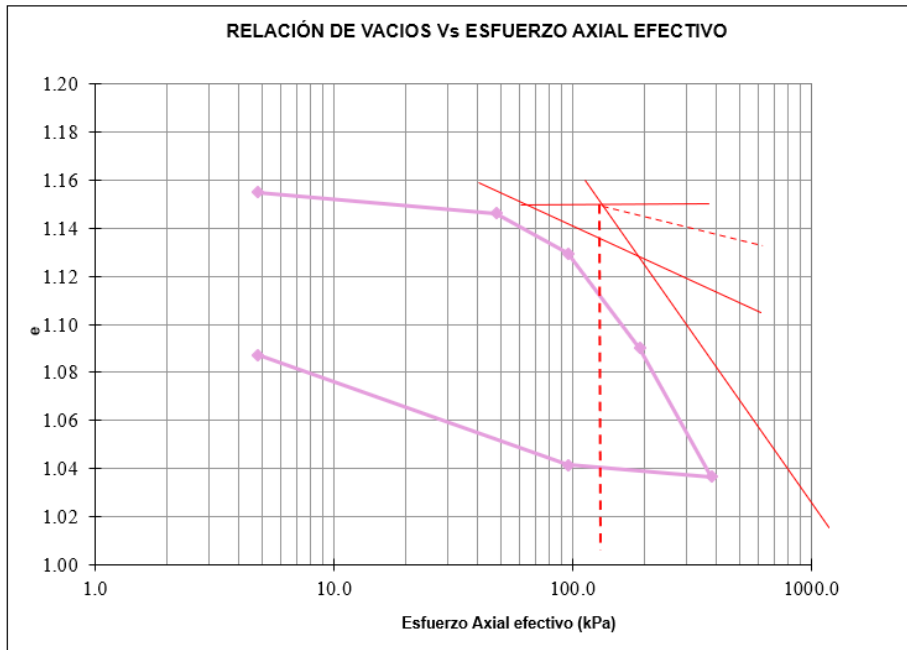
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique. Fuente autoría propia



Haciendo uso de las ecuaciones descritas en el apartado 3.3.4, se grafica la curva de relación de vacíos vs esfuerzo axial efectivo como se presenta en la Figura 39.

**Figura 39**

Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.  
Fuente. Autoría propia



De esta curva se obtiene el índice  $C_c$ ,  $C_s$  y esfuerzo de pre consolidación:

$$C_c = 0.1763$$

$$C_s = 0.0264$$

Esfuerzo de pre consolidación = 90 Kpa

#### 3.3.4.4 Consolidación suelo con adición de 2% de ceniza de fique

La muestra se preparó con 2450g de suelo y el porcentaje de 2% de adición de ceniza (50g), según su humedad óptima y densidad seca obtenida en el Proctor modificado para cuatro ciclos de carga y dos ciclos de descarga, además se hace uso de los valores de la Tabla 31 para proceder con los cálculos.

A continuación, se presenta las curvas de consolidación para el primer ciclo de carga y el primer ciclo de descarga Figura 40 y Figura 41 respectivamente, las demás curvas de consolidación para sus respectivos ciclos de carga se presentan en el Anexo 1 “Memorias de cálculo Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique”, se compactó según la humedad óptima y densidad seca obtenidas previamente en el ensayo Proctor modificado obteniendo:

**Tabla 31**

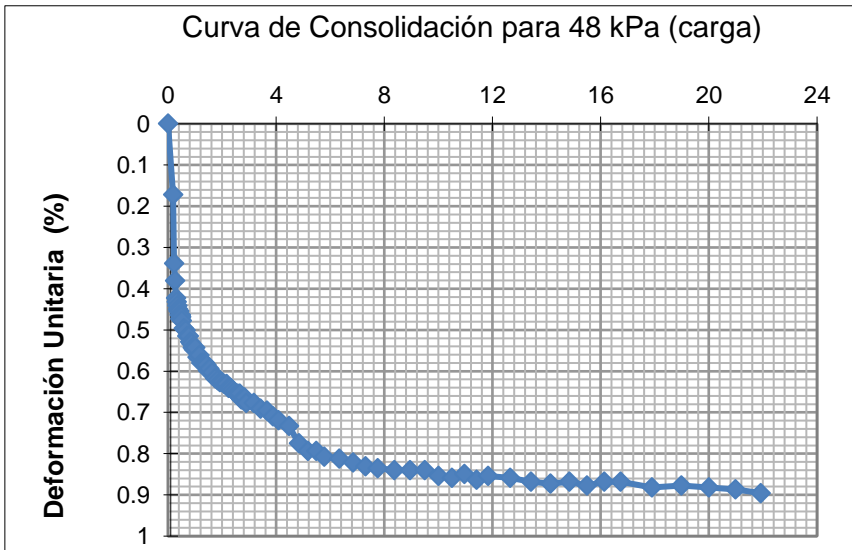
Información ensayo consolidación suelo con adición de 2% de ceniza de fique.

Diámetro de la muestra, $d$ :	5.1	mm	Gravedad Específica, $G_s$ :	2.60
Area de la Muestra, $A$ :	20.48	cm <sup>2</sup>	Masa Seca, $M_s$ :	80.80 g.
Altura de la muestra, $H_0$ :	2.16	cm	Ultima Medición, $M_e$ :	0.0778 cm
densidad, $\rho_s$ (inicial):	1.95	g/cm <sup>3</sup>	densidad, $\rho$ (final):	2.22 g/cm <sup>3</sup>
Altura de Sólidos,	1.50	cm	$h_m - h_s =$	0.66 cm

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	12.79	Humedad	16.75
Relación de Vacíos ( $e_0$ )	1.155	Relación de Vacíos	1.064
Saturación ( $S_w$ )	81.59	Saturación	118.10
Porosidad	53.6%	Porosidad	51.5%
Poros Llenos con Agua	43.73	Poros Llenos con Agua	60.88
Poros Llenos con Aire	43.19	Poros Llenos con Aire	60.36
Altura de sólidos (cm)	1.50	Altura de sólidos	1.52
Altura de Agua (cm)	0.5	Altura de Agua	0.7
Altura de Aire (cm)	0	Altura de Aire	0
Ultima Medición antes del desmonte	0.0778	Ultima Medición antes del desmonte	0.0778

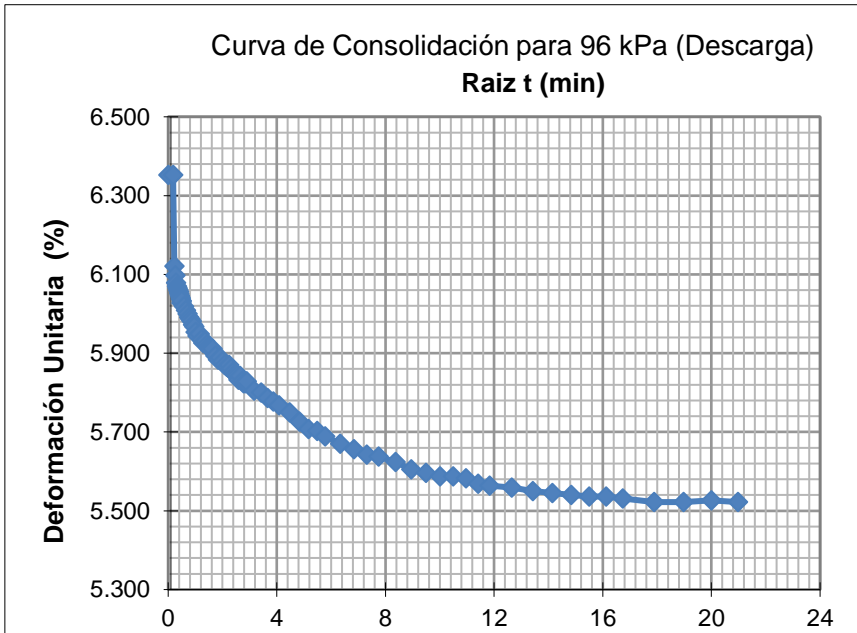
**Figura 40**

Curva consolidación ciclo I de carga (48 Kpa) suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia



**Figura 41**

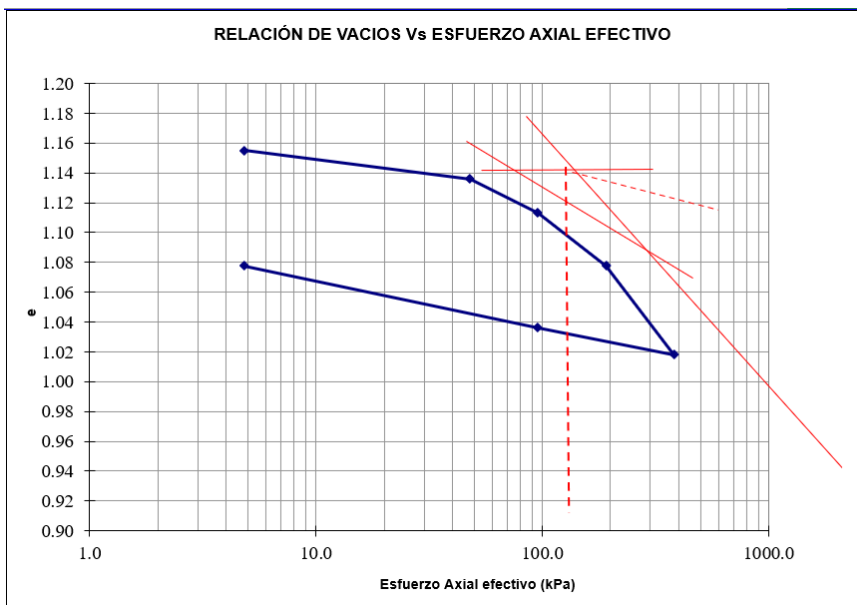
Curva consolidación ciclo I de descarga (96 Kpa) suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente autoría propia



Haciendo uso de las ecuaciones descritas en el apartado 3.3.4, se grafica la curva de relación de vacíos vs esfuerzo axial efectivo como se presenta en la Figura 42.

**Figura 42**

Curva Relación de vacíos vs Esfuerzo axial efectivo suelo con adición de 2% de ceniza de fique. Fuente. Autoría propia



De esta curva se obtiene el índice  $C_c$ ,  $C_s$  y esfuerzo de pre consolidación:

$$C_c = 0.1979$$

$$C_s = 0.0310$$

$$\text{Esfuerzo de pre consolidación} = 100 \text{ Kpa}$$

### 3.3.5 Expansión libre

El ensayo de expansión libre se realizó con el propósito de determinar la capacidad de hinchamiento del suelo cuando se encuentra en contacto con el agua, sin estar sometido a carga externa. Este procedimiento permite identificar el comportamiento expansivo de los suelos finos, especialmente en aquellos que presentan actividad plástica. En el presente estudio, se aplicó tanto al suelo virgen como a las mezclas estabilizadas con ceniza de fique en proporciones de 1 %, 1.5 % y 2 %.

El procedimiento se desarrolló conforme a los lineamientos de la norma INV E-132-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013). Para cada condición del suelo se realizaron tres repeticiones, con el fin de garantizar la validez estadística de los resultados y generar un promedio representativo.

La metodología consistió en llenar un molde de consolidación con una muestra de suelo previamente tamizada por el tamiz N° 40 y compactada con una presión mínima. Posteriormente, el molde fue colocado dentro de una cápsula con agua destilada, permitiendo que el suelo absorbiera agua libremente durante un período continuo de 24 horas. Transcurrido este tiempo, se midió el incremento vertical de la muestra, correspondiente al fenómeno de expansión como se muestra en la Figura 43.

**Figura 43**

*Ensayo de expansión libre. Fuente autoría propia*



La expansión libre porcentual se calculó con base en la diferencia entre la altura final y la altura inicial de la muestra, según la siguiente expresión:

$$\text{Expansión Libre (\%)} = \frac{h_f - h_i}{h_i} \times 100$$

Donde:

$h_i$ : altura inicial de la muestra (mm)

$h_f$ : altura final de la muestra después de 24 h de inmersión (mm)


Este ensayo permitió evaluar la variación del comportamiento expansivo del suelo en su estado natural frente a las condiciones estabilizadas, lo cual resulta fundamental para el análisis del efecto de la ceniza de fique sobre la estabilidad volumétrica del material.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de expansión libre para las distintas condiciones de suelo analizadas: suelo virgen y mezclas con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique. Para cada condición se realizaron tres repeticiones, cuyos resultados individuales fueron promediados con el fin de obtener un valor representativo del comportamiento expansivo de cada muestra. Esta información

es clave para evaluar la influencia de la ceniza de fique en la estabilidad volumétrica del suelo y su tendencia a hinchamiento frente a la presencia de humedad y se evidencia en la Tabla 32, además de los resultados mostrados en la Tabla 33.


**Tabla 32**

*Datos ensayo de expansión libre para cada una de las muestras de suelo.*

		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.			Fecha V: 12/05/2025		Versión: 01	
		Datos Expansión Libre						
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso Muestra (g)	Lectura Dial	No. cápsula	Peso cápsula	Peso suelo humedo+cáp.	Peso suelo seco+cáp.
<b>Virgen</b>	5.03	2.17	94.53	1	106	20.88	118.41	104.36
<b>1%</b>	5.07	2.17	89.70	0.52	104.00	20.60	114.93	101.4
<b>1.5%</b>	5.114	2.16	92.61	0.46				
<b>2.0%</b>	5.106	2.15	96.85	0.39				

**Tabla 33**

*Resultados ensayo de expansión libre para cada una de las muestras de suelo.*

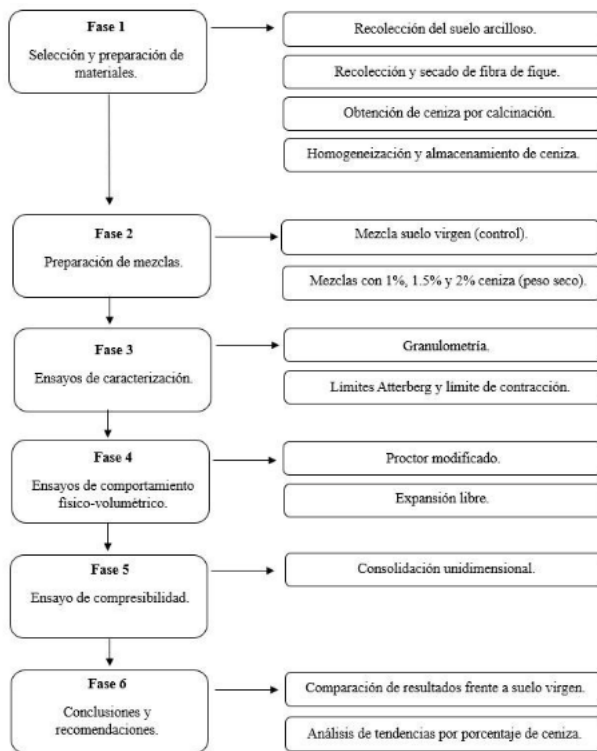
		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.				Fecha V: 12/05/2025		Versión: 01	
		RESUMEN DENSIDAD MAXIMA SECA Y HUMEDAD OPTIMA							
EXPANSION LIBRE									
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso Muestra (g)	Densidad ad (g/cm <sup>3</sup> )	Lectura Dial Final	ΔL (cm)	Expansión Libre (%)	Humedad Final (%)	
<b>Virgen</b>	5.03	2.17	94.53	2.20	0.562	0.056	2.59	16.83	
<b>1%</b>	5.07	2.17	89.70	2.04	0.515	0.052	2.37	16.75	
<b>1.50%</b>	5.11	2.16	92.61	2.09	0.459	0.046	2.13	16.83	
<b>2.00%</b>	5.11	2.15	96.85	2.20	0.390	0.039	1.81	16.75	

### 3.4 Protocolo de análisis para la evaluación del potencial de expansión a partir de la adición de la ceniza de fibra de fique

Esta fase contempla la aplicación de un protocolo experimental diseñado en la metodología para determinar el efecto de la adición de ceniza de fibra de fique en el comportamiento expansivo de un suelo como se muestra en la Figura 44.

**Figura 44**

*Protocolo de análisis evaluación potencial de expansión con adición de ceniza de fibra de fique.  
Fuente autoría propia*



## 4. Análisis de resultados



### 4.1 Resultados de Granulometría

Los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría muestran la influencia progresiva de la adición de ceniza de fique en la distribución de tamaños de partícula del suelo. Tal como se presenta en la Tabla

34, los porcentajes de gravas y arenas se mantienen relativamente estables, mientras que el porcentaje de finos se mantiene alto en todas las muestras, superando el 50 %. Esto confirma que todos los suelos analizados, tanto el suelo virgen como aquellos tratados con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza, se clasifican como suelos finos, de acuerdo con el sistema SUCS y los criterios de la norma INV E-123-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013).

**Tabla 34**

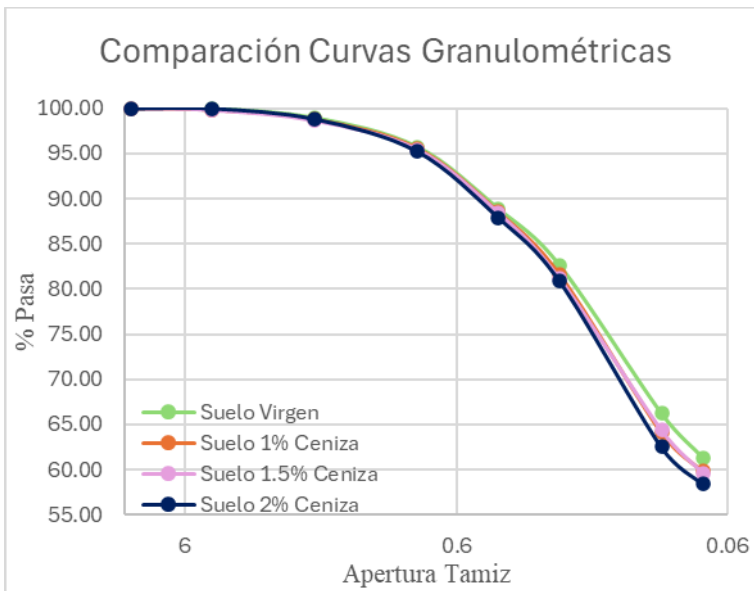
*Porcentaje de grava, arena y finos para las muestras analizadas.*

 		<b>Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.</b>			<b>Fecha V: 12/05/2025</b> <b>Versión: 01</b> <b>Tabla 5.</b>
<b>Resumen y Comparación Granulométrica</b>					
Tamiz (mm)	% Pasa Virgen	% Pasa Suelo 1	% Pasa Suelo 1.5	% Pasa Suelo 2	
9.5	100.00	100.00	100.00	100.00	
4.76	99.93	99.83	99.79	100.00	
2	98.92	98.78	98.64	98.83	
0.84	95.72	95.61	95.47	95.27	
0.42	88.85	88.53	88.40	87.92	
0.25	82.60	81.62	81.15	80.91	
0.105	66.21	64.10	64.36	62.51	
0.074	61.33	59.81	59.65	58.43	
<b>%Gravas</b>	0.07	0.17	0.21	0.00	
<b>%Arenas</b>	38.60	40.02	40.14	41.57	
<b>%Finos</b>	<b>61.33</b>	<b>59.81</b>	<b>59.65</b>	<b>58.43</b>	

En la Figura 45 se muestra la curva granulométrica comparativa de las cuatro muestras. Se observa que las curvas de los suelos con adición de ceniza no presentan una separación significativa en el rango general, lo cual indica que la incorporación de la ceniza no alteró de manera drástica la distribución global de partículas. Sin embargo, en la zona final de las curvas que corresponde a las aberturas de tamiz más pequeñas y, por tanto, a la fracción de mayor fineza se presenta una ligera variación en el porcentaje de material que pasa.

**Figura 45**

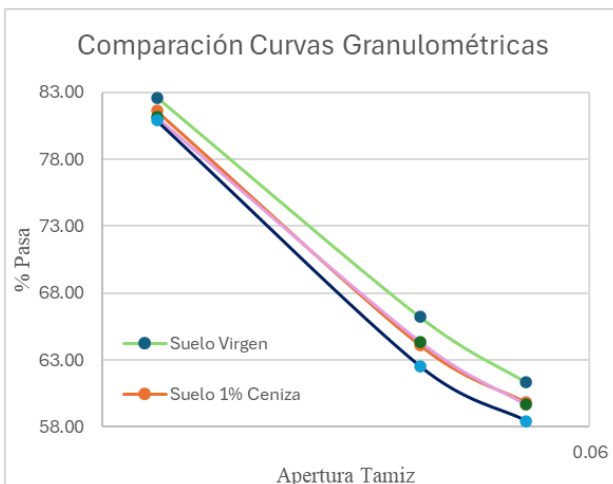
*Comparación de curvas granulométricas de suelo en estado virgen y mejorado con la ceniza de fique*



La Figura 46 que representa un enfoque ampliado de la porción final de la curva granulométrica, revela que el suelo virgen presenta un porcentaje ligeramente mayor de material fino que el suelo con 1 % de ceniza. Esto puede interpretarse como una pequeña reducción de finos tras la incorporación de la ceniza, posiblemente atribuida a un efecto de dilución o dispersión mecánica, aunque la diferencia no es significativa desde el punto de vista granulométrico.

**Figura 46**

*Acercamiento comparación de curvas granulométricas de suelo en estado virgen y mejorado con la ceniza de fique*



Dado que el porcentaje de finos permanece superior al 50 % en todos los casos, se infiere que la granulometría no es suficiente para definir la clasificación completa del suelo por lo cual se complementará según resultados de límites de Atterberg, los cuales permitirán establecer el tipo de suelo fino según su ubicación en la carta de plasticidad.



#### 4.2 Resultados de Límites de Atterberg

Tal como se concluyó a partir del análisis granulométrico, las muestras de suelo virgen y mezclas con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique presentan un porcentaje de finos superior al 50 %, por lo cual deben clasificarse como suelos finos, y su clasificación definitiva depende de los límites de plasticidad, conforme a la carta de plasticidad del sistema SUCS (Instituto Nacional de Vías, 2013).

En la Tabla 35 se muestran los valores promedio obtenidos para el límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP) y límite de contracción (LC) de cada una de las condiciones de suelo. Como se evidencia, tanto el límite líquido como el índice de plasticidad disminuyen progresivamente con el aumento del porcentaje de ceniza. Específicamente, el límite líquido desciende de 35.86 % a 29.78 %, y el índice de plasticidad de 18.51 a 15.55. Esta tendencia refleja una reducción en la plasticidad del suelo, lo cual puede atribuirse a una interacción física y posiblemente química entre el suelo y la ceniza de fique.

**Tabla 35**

*Valores promedio de LL, LP, IP y LC para las muestras analizadas.*

 		<b>Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.</b>		<b>Fecha V: 12/05/2025</b> <b>Versión: 01</b> <b>Tabla 19.</b>	
<b>L.L, L.P, I.P, L.C</b>					
<b>Tipo Suelo</b>	<b>L.L.</b>	<b>L.P.</b>	<b>I.P.</b>	<b>L.C.</b>	
<b>Suelo Virgen</b>	35.86	17.34	18.51	40.18	
<b>Suelo 1% Ceniza</b>	34.98	16.95	18.03	39.82	
<b>Suelo 1.5% Ceniza</b>	32.57	14.85	17.72	36.51	
<b>Suelo 2% Ceniza</b>	29.78	14.23	15.55	28.22	

La ceniza podría estar actuando como un agente de estabilización parcial, reduciendo la capacidad del suelo de retener agua estructural, por tanto, limitando su comportamiento plástico. Esto concuerda con observaciones en la literatura sobre adiciones de cenizas vegetales en suelos finos, donde una disminución

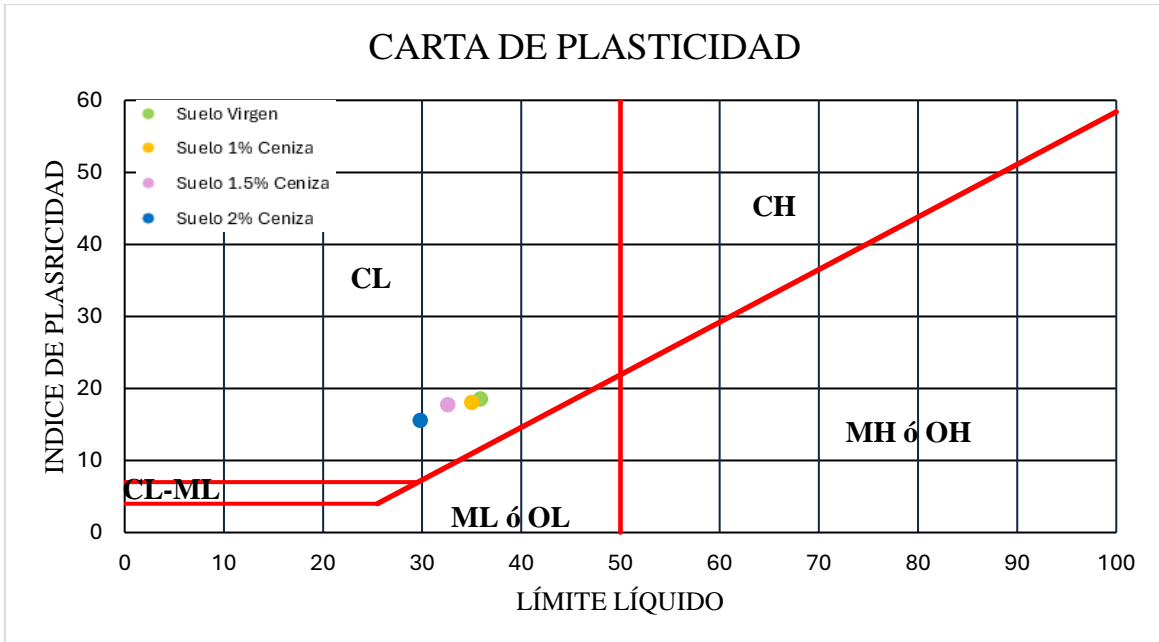
del IP indica una mejora en la trabajabilidad y control volumétrico del material (Laguna Peñaloza & Chacón Charcas, 2020).

Por otro lado, el límite de contracción (LC) también muestra una disminución progresiva de 40.18 % a 28.22 %, lo que sugiere una menor susceptibilidad del suelo al agrietamiento o retracción durante el secado, comportamiento esperable en un suelo parcialmente estabilizado.

La Figura 47 muestra la ubicación de los cuatro tipos de suelo dentro de la carta de plasticidad. Todos los puntos se ubican en la zona correspondiente a los suelos inorgánicos de baja plasticidad (CL), por encima de la línea A, y por debajo del umbral de límite líquido del 50 %. Esta ubicación confirma que, a pesar de la adición de ceniza y la ligera mejora en los valores de plasticidad, los suelos se mantienen dentro de la misma clasificación general como arcillas inorgánicas de baja plasticidad, aunque con un comportamiento cada vez menos plástico a medida que se incrementa el porcentaje de ceniza.

**Figura 47**

*Carta de plasticidad. Fuente autoría propia*




Si bien los resultados obtenidos muestran una tendencia descendente en los valores de límite líquido, índice de plasticidad y límite de contracción con el aumento del porcentaje de ceniza de fique, es importante considerar que los porcentajes de adición utilizados en este estudio (1 %, 1.5 % y 2 %) son

moderadamente bajos en comparación con otras investigaciones en estabilización de suelos finos. Estudios como el de Laguna Peñaloza y Chacón Charcas (2020), entre otros, reportan el uso de porcentajes de ceniza vegetal entre 5 % y 15 %, con efectos más marcados en la reducción de plasticidad y mejora en parámetros de resistencia.

Por tanto, los resultados aquí obtenidos podrían interpretarse como un comportamiento inicial positivo, que sugiere que, de mantenerse esta tendencia, la utilización de porcentajes más altos de ceniza de fique podría conducir a una estabilización más efectiva del suelo. Esto abre la posibilidad de realizar estudios posteriores que incluyan mayores dosificaciones del aditivo y posiblemente activadores químicos complementarios, con el fin de evaluar su potencial completo como material estabilizante, en la Tabla 36 se muestra la clasificación de suelo para cada una de las muestras analizadas.

**Tabla 36**


*Clasificación suelos SUCS, Fuente autoría propia*

		<b>Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.</b>	<b>Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01 Tabla 28.</b>
<b>Tipo de suelo</b>			
<b>Suelo de estudio</b>		Suelo Arcilloso de Baja Plasticidad	
<b>Suelo virgen</b>		Suelo Arcilloso de Baja Plasticidad	
<b>Suelo 1% de ceniza</b>		Suelo Arcilloso de Baja Plasticidad	
<b>Suelo 1.5% de ceniza</b>		Suelo Arcilloso de Baja Plasticidad	
<b>Suelo 2% de ceniza</b>		Suelo Arcilloso de Baja Plasticidad	

### 4.3 Resultados de Proctor Modificado

En la Tabla 37 se resumen los valores de densidad máxima seca y humedad óptima obtenidos para el suelo virgen y las tres mezclas tratadas con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique. A partir del análisis de estos datos se identifican tendencias que permiten correlacionar el comportamiento de compactación con las propiedades físicas e índices plásticos determinados previamente.

**Tabla 37***Densidad máxima seca y Humedad óptima.*

				Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.		Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01	
		RESUMEN DENSIDAD MAXIMA SECA Y HUMEDAD OPTIMA					
		SUELO VIRGEN	SUELO 1% CENIZA	SUELO 1.5% CENIZA	SUELO 2% CENIZA		
DENSIDAD MAXIMA SECA (G/CM3)		1.954	1.958	1.927	1.917		
HUMEDAD OPTIMA (%)		12	12.2	13.6	12.2		

La mezcla con 1 % de ceniza presentó una ligera mejora en la densidad máxima seca respecto al suelo virgen (1.958 g/cm<sup>3</sup> frente a 1.954 g/cm<sup>3</sup>), lo cual sugiere un efecto favorable inicial con la adición de ceniza. Este comportamiento podría estar asociado a los resultados de granulometría, donde se evidenció una reducción leve en el porcentaje de finos respecto al suelo sin mejorar, lo que favorecería la disminución de vacíos entre partículas durante la compactación.

Además, en los ensayos de límites de Atterberg se observó una reducción discreta en el índice de plasticidad (IP), lo que implica una menor cohesión relativa entre partículas finas, facilitando el acomodo mecánico durante la aplicación de energía de compactación.

Sin embargo, al aumentar el porcentaje de ceniza a 1.5 % y 2 %, se observó una disminución progresiva en la densidad máxima seca (1.927 y 1.917 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente). Esta tendencia sugiere que la incorporación de cantidades mayores de ceniza puede generar un efecto de dilución del suelo arcilloso activo, reemplazando partículas cohesivas con un material más poroso y liviano, afectando negativamente la densidad alcanzable. Esta hipótesis se ve respaldada por el comportamiento registrado en los límites de plasticidad, donde si bien el IP continuó disminuyendo, se mantuvieron valores que indican una presencia significativa de finos activos, lo cual, combinado con una mayor porosidad de la mezcla, puede haber limitado el grado de compactación alcanzado.

En cuanto a la humedad óptima, se observó un incremento al pasar del suelo virgen (12 %) a las mezclas con 1.5 % (13.6 %) y 2 % de ceniza (12.2 %). Este comportamiento es coherente con un aumento en la superficie específica de la mezcla debido a la incorporación de la ceniza, que tiende a retener mayor

cantidad de agua para permitir una lubricación adecuada durante el proceso de compactación. Asimismo, el aumento de humedad se correlaciona con la disminución del límite líquido observada en los suelos tratados, lo que es un indicio de que necesita más agua para llegar a su densidad máxima de compactación.



En conjunto, los resultados del ensayo Proctor modificado indican que la adición de ceniza de fique tiene un efecto no lineal sobre la compactabilidad del suelo: proporciones bajas (1 %) pueden mejorarla levemente, mientras que porcentajes superiores podrían comprometer este efecto si no se acompañan de mecanismos de activación química o mezcla adecuada. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura sobre estabilización de suelos finos con residuos agroindustriales, donde el desempeño está fuertemente condicionado por la dosificación y reactividad del material incorporado (Aprianti, Shafigh, Bahri, & Farahani, 2015).

#### **4.4 Resultados de Expansión libre**

Los resultados mostrados en la Tabla 33 de la sección 3.3.5, indican una disminución progresiva en el porcentaje de expansión libre conforme se incrementa el contenido de ceniza de fique en las mezclas. El suelo virgen presentó un valor de expansión de 2.59 %, mientras que las muestras con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza mostraron valores de 2.37 %, 2.13 % y 1.81 %, respectivamente.

#### **Tabla 33**

*Resultados ensayo de expansión libre para cada una de las muestras de suelo. Fuente autoría propia*

 		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.					Fecha V: 12/05/2025 Versión: 01	
RESUMEN DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD OPTIMA								
EXPANSION LIBRE								
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso Muestra (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Lectura Dial Final	ΔL (cm)	Expansión Libre (%)	Humedad Final (%)
<b>Virgen</b>	5.03	2.17	94.53	2.20	0.562	0.056	2.59	16.83
<b>1%</b>	5.07	2.17	89.70	2.04	0.515	0.052	2.37	16.75
<b>1.50%</b>	5.11	2.16	92.61	2.09	0.459	0.046	2.13	16.83
<b>2.00%</b>	5.11	2.15	96.85	2.20	0.390	0.039	1.81	16.75

Esta tendencia evidencia una reducción del potencial expansivo del suelo tratado, asociada a los efectos físicos y mecánicos del aditivo.

Desde el punto de vista físico, los resultados de granulometría mostraron una leve disminución en el contenido de finos con el aumento del porcentaje de ceniza, lo que implica una menor proporción de minerales arcillosos expansivos en la mezcla. Esta modificación en la distribución de tamaños de partícula reduce la capacidad del suelo para retener agua y generar presiones de hinchamiento.

A su vez, los resultados de límites de Atterberg reflejan una tendencia decreciente del índice de plasticidad, lo cual implica una disminución de la actividad de los finos. En general, suelos con menor plasticidad tienden a mostrar menor hinchamiento libre al contacto con el agua, lo que explica en parte el comportamiento observado. Los materiales estabilizados con residuos agroindustriales presentan una reducción en la expansión como consecuencia de la disminución de su plasticidad y capacidad de absorción Gupta y Kumar (2016).


En cuanto al comportamiento en compactación, si bien se identificó una ligera disminución en la densidad máxima seca para contenidos de ceniza superiores al 1 %, esta no se tradujo en un aumento de la expansividad. Esto sugiere que el material incorporado no solo modifica la densidad, sino que también altera la disposición y estructura interna del suelo, posiblemente favoreciendo la dispersión de los agregados cohesivos o interrumpiendo la alineación de láminas minerales en mezclas con subproductos lignocelulósicos y cenizas ricas en sílice amorfa, similares en composición a la ceniza de fique utilizada Aprianti et al. (2015).

#### 4.5 Resultados Consolidación

Los resultados obtenidos en el ensayo de consolidación unidimensional permiten evaluar la compresibilidad del suelo bajo carga vertical y su comportamiento frente a deformaciones primarias y secundarias. En la Tabla 38 se presentan los valores de coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ), coeficiente de Re compresión ( $C_s$ ) y esfuerzo de preconsolidación para las cuatro condiciones evaluadas: suelo virgen, y suelos tratados con 1 %, 1.5 % y 2 % de ceniza de fique.

**Tabla 38**

*Valores de  $C_c$ ,  $C_s$  y preconsolidación de cada una de las muestras.*

		Evaluación del potencial de expansión de un suelo arcilloso mejorado con cenizas de fique.			Fecha V: 25/05/2025 Versión: 01
		RESUMEN COEFICIENTES $C_c$ , $C_s$ , Esfuerzo Pre Consolidación			
		Consolidación			
		Suelo Virgen	Suelo 1% Ceniza	Suelo 1.5% Ceniza	Suelo 2% Ceniza
<b><math>C_c</math></b>		0.1996	0.1751	0.1763	0.1979
<b><math>C_s</math></b>		0.0311	0.03	0.0264	0.031
<b>Esf. Preconsolidación</b>		70kpa	90kpa	90kpa	100kpa

Para el suelo virgen, se registró un  $C_c$  de 0.1996, lo que indica una compresibilidad moderadamente alta, coherente con el alto contenido de finos (61.33 %) y un índice de plasticidad de 18.5, lo que lo clasifica como un suelo activo y susceptible a deformaciones bajo carga. Su  $C_s$  fue de 0.0311, lo cual representa una baja pero típica capacidad de recuperación ante cargas menores. El esfuerzo de preconsolidación fue de 80 kPa, señalando que el suelo no ha estado sometido a cargas mayores en su estado natural, en la Tabla 39 se observa un resumen de los datos obtenidos.

**Tabla 39***Resultados consolidación suelo en estado virgen.*

Escalón de Carga	Esfuerzo Axial (kPa)	Deformación corregida (mm)	Deformación unitaria Axial (%)	Altura muestra (cm)	Relación de vacíos (e)	Tiempo $t_{90}$ (seg)	Coefficiente de consolidación $c_v$ (cm <sup>2</sup> /seg)
0	5	0.000	0.000	2.17	1.173		
I	48.6	0.301	1.385	2.14	1.143	240	0.00405628
II	97	0.660	3.037	2.11	1.107	240	0.00392151
III	194	1.165	5.361	2.06	1.057	240	0.00373579
IV	389	1.766	8.127	2.00	0.996	240	0.00352062
V	97	1.592	7.326	2.01	1.014		
VI	5	1.174	5.403	2.06	1.056		

La mezcla con adición de 1 % de ceniza mostró una disminución de  $C_c$  a 0.1751, con un leve descenso de  $C_s$  a 0.0300 y un aumento del esfuerzo de preconsolidación a 90 kPa. Esta reducción en la compresibilidad se relaciona con la ligera disminución observada en el índice de plasticidad (17.5) y el cambio en la distribución granulométrica, con menor proporción de finos activos. Aunque la modificación es leve, se evidencia un comienzo de estabilización estructural en el suelo tratado, en la Tabla 40 se observa un resumen de los datos obtenidos.

**Tabla 40***Resultados consolidación suelo con adición de 1% de ceniza de fique.*

Escalón de Carga	Esfuerzo Axial (kPa)	Deformación corregida (mm)	Deformación unitaria Axial (%)	Altura muestra (cm)	Relación de vacíos (e)	Tiempo $t_{90}$ (seg)	Coefficiente de consolidación $c_v$ (cm <sup>2</sup> /seg)
0	5	0.000	0.000	2.17	1.166		
I	49	0.204	0.942	2.15	1.146	240	0.00406651
II	99	0.421	1.944	2.12	1.124	240	0.00398467
III	198	0.775	3.578	2.09	1.089	240	0.00385295
IV	395	1.302	6.011	2.04	1.036	240	0.00366096
V	99	1.133	5.231	2.05	1.053		
VI	5	0.730	3.370	2.09	1.093		

En el caso de la muestra con 1.5 % de ceniza, se obtuvo un  $C_c$  de 0.1763, valor prácticamente equivalente al del 1 %, lo que sugiere que en este rango la compresibilidad no se reduce significativamente. Sin embargo, el  $C_s$  descendió a 0.0264, lo que puede interpretarse como una

reducción en la elasticidad estructural, posiblemente debido a una disposición interna más densa o rígida del suelo modificado. El esfuerzo de preconsolidación se mantuvo cercano al anterior (90 kPa), indicando una resistencia similar frente a cargas iniciales, en la Tabla 41 se observa un resumen de los datos obtenidos.

**Tabla 41**

*Resultados consolidación suelo con adición de 1.5% de ceniza de fique.*

Escalón de Carga	Esfuerzo Axial (kPa)	Deformación corregida (mm)	Deformación unitaria Axial (%)	Altura muestra (cm)	Relación de vacíos (e)	Tiempo $t_{90}$ (seg)	Coefficiente de consolidación $c_v$ (cm <sup>2</sup> /seg)
0	5	0.000	0.000	2.16	1.155		
I	48	0.087	0.404	2.15	1.146	240	0.00406917
II	95	0.253	1.174	2.13	1.130	240	0.00400647
III	191	0.651	3.021	2.09	1.090	240	0.00385812
IV	382	1.182	5.485	2.04	1.037	240	0.00366456
V	95	1.133	5.258	2.04	1.042		
VI	5	0.678	3.146	2.09	1.087		

Finalmente, para la mezcla con 2 % de ceniza, el Cc aumentó nuevamente hasta 0.1979, valor muy próximo al del suelo virgen. Este comportamiento sugiere que, en lugar de mejorar, a partir de este contenido la ceniza podría haber comenzado a interferir negativamente en la estructura del suelo, reduciendo la cohesión interna o incrementando los vacíos, lo cual se refleja también en el incremento del Cs a 0.0310 y del esfuerzo de preconsolidación a 100 kPa. Este último valor, sin embargo, sí indica una mayor rigidez frente al inicio del proceso de consolidación, aunque sin traducirse en una mejora neta de la compresibilidad, en la Tabla 42 se observa un resumen de los datos obtenidos.

**Tabla 42**

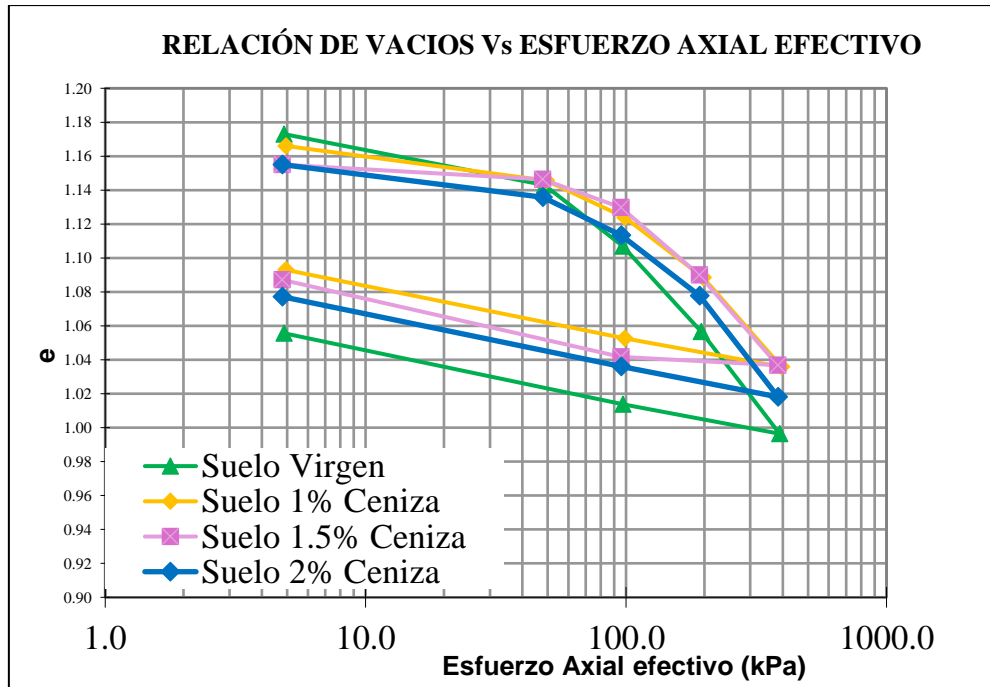
*Resultados consolidación suelo con adición de 2% de ceniza de fique.*

Escalón de Carga	Esfuerzo Axial (kPa)	Deformación corregida (mm)	Deformación unitaria Axial (%)	Altura muestra (cm)	Relación de vacíos (e)	Tiempo $t_{90}$ (seg)	Coefficiente de consolidación $c_v$ (cm <sup>2</sup> /seg)
0	5	0.000	0.000	2.16	1.155		
I	48	0.193	0.896	2.14	1.136	240	0.00402907
II	96	0.417	1.935	2.11	1.113	240	0.00394500
III	192	0.773	3.587	2.08	1.078	240	0.00381321
IV	383	1.369	6.353	2.02	1.018	240	0.00359758
V	96	1.190	5.522	2.04	1.036		
VI	5	0.778	3.610	2.08	1.077		

Para cada uno de los resultados obtenidos en cada una de las muestras se grafica la relación de vacíos Vs esfuerzo axial efectivo, como se muestra en la Figura 48.

**Figura 48**

*Gráfica relación de vacíos Vs esfuerzo axial efectivo para cada una de las muestras. Fuente autoría propia*



Los resultados no muestran una disminución continua de la compresibilidad con el aumento progresivo del porcentaje de ceniza. Por el contrario, se evidencia que los mejores resultados en términos de disminución de  $C_c$  se alcanzan con adiciones moderadas (1–1.5 %), mientras que una dosificación del 2 % podría revertir parcialmente los beneficios, fenómeno que también fue observado en el comportamiento del Proctor y en los índices de plasticidad. Esto refuerza la necesidad de optimizar la proporción del aditivo y validar su efecto más allá del reemplazo porcentual.

## 5. Conclusiones

En conjunto, los resultados no muestran una disminución continua de la compresibilidad con el aumento progresivo del porcentaje de ceniza. Por el contrario, se evidencia que los mejores resultados en

términos de disminución de  $C_c$  se alcanzan con adiciones moderadas (1–1.5 %), mientras que una dosificación del 2 % podría revertir parcialmente los beneficios, fenómeno que también fue observado en el comportamiento del Proctor y en los índices de plasticidad. Esto refuerza la necesidad de optimizar la proporción del aditivo y validar su efecto más allá del reemplazo porcentual.

La incorporación progresiva de ceniza de fique al suelo arcilloso evaluado permitió evidenciar un comportamiento no lineal en la respuesta del material, caracterizado por mejoras iniciales en sus propiedades índice y mecánicas, seguidas por una estabilización o incluso reversión de los beneficios a partir de ciertos porcentajes de adición. Este fenómeno subraya la necesidad de establecer dosificaciones óptimas basadas en criterios técnicos y no en incrementos arbitrarios.

Desde el punto de vista geotécnico, el suelo tratado con ceniza presentó modificaciones favorables en su clasificación y comportamiento. La reducción del índice de plasticidad, el aumento del esfuerzo de preconsolidación y la disminución del coeficiente de compresibilidad reflejan una tendencia hacia una matriz menos activa y más resistente a la deformación volumétrica, especialmente en los tratamientos con 1 % y 1.5 % de ceniza.

El comportamiento observado en los ensayos de expansión libre confirmó el efecto estabilizante de la ceniza sobre el suelo, evidenciado en la disminución sistemática de la expansividad con el aumento del contenido del aditivo. Este resultado, en conjunto con la evolución de los parámetros de plasticidad, consolida la hipótesis de que la ceniza de fique puede actuar como modificador eficaz del comportamiento volumétrico de suelos cohesivos.

La caracterización mediante el ensayo Proctor modificado mostró que el suelo con 1 % de ceniza alcanzó la mayor densidad máxima seca, lo cual sugiere que en ese rango de dosificación se logra una disposición granular más eficiente. No obstante, la tendencia descendente observada en la densidad para contenidos superiores, acompañada de un aumento en la humedad óptima, sugiere un cambio en la estructura del suelo que podría comprometer su compacidad y desempeño estructural.

A partir del desarrollo del estudio se logró estructurar un protocolo técnico replicable para la evaluación de residuos agroindustriales aplicados a la estabilización de suelos, en este caso con ceniza de

fique. El protocolo integra de manera secuencial la recolección de materiales, preparación del aditivo, diseño de mezclas, ejecución de ensayos físicos y mecánicos según normas INVIAS, y análisis comparativo de resultados. Su aplicación permitió obtener una visión integral del efecto del aditivo sobre el comportamiento geotécnico del suelo, constituyendo una herramienta metodológica útil para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas con residuos similares.

El conjunto de resultados obtenidos permite establecer que la ceniza de fique puede emplearse como un estabilizante parcial en suelos arcillosos de baja plasticidad, siempre que se controle su dosificación y se evalúe su efecto en función de la propiedad geotécnica objetivo. Asimismo, el estudio permite afirmar que los objetivos específicos planteados fueron cumplidos, al haberse diseñado y aplicado un protocolo metodológico riguroso, evaluado el comportamiento comparativo del suelo y cuantificada la influencia del aditivo sobre su expansividad.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda ampliar el rango de dosificación evaluado mediante ensayos adicionales, con el fin de verificar si la respuesta del suelo presenta una tendencia lineal de mejora y así determinar con mayor precisión una dosificación óptima de ceniza de fique.

Se recomienda evaluar el uso de un activador químico, como la cal, para potenciar la reactividad de la ceniza de fique y mejorar su efecto estabilizante sobre suelos arcillosos.

Se recomienda para trabajos posteriores incorporar ensayos de resistencia mecánica como CBR, triaxial no drenado o compresión no confinada, que permitan establecer el impacto del aditivo sobre la capacidad portante del suelo tratado, especialmente si se proyecta su uso como subrasante en vías.

Para futuras investigaciones, se sugiere explorar la activación química de la ceniza mediante adición de cal o alcalinos suaves, lo cual podría potenciar su reactividad puzolánica y mejorar sus efectos estabilizantes en suelos de mayor actividad.

Se recomienda realizar análisis mineralógicos y químicos (FRX, DRX) para caracterizar con mayor detalle la composición de la ceniza obtenida y su relación con los resultados mecánicos. Esta información sería clave para la estandarización del proceso y la replicabilidad del método.

Finalmente, se sugiere validar el protocolo desarrollado en este estudio con otros tipos de suelo cohesivo, para verificar la aplicabilidad del aditivo en contextos geotécnicos diversos, y así consolidar su uso como alternativa sostenible en proyectos de estabilización de suelos.

### Referencias bibliográficas

Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction and Building Materials*, 74, 176–187.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.027>

Cardona, C., & Sarache, W. (2014). *Evaluación de fibras y cenizas provenientes de residuos agroindustriales como materias primas para la producción de materiales compuestos con cemento hidráulico*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62282>

Celis Chaparro, M. M., y Martínez Suarez, L. H. (2015). *Estudio del mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de suelos residuales arcillosos de la formación Bucaramanga, Vereda Llanadas, Municipio de San Juan de Girón, Santander, aditivo con residuos de construcción* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Centeno-Mesa, N., Lombana-Toro, O., Correa-Aguirre, J. P., Hidalgo-Salazar, M. A., & Trujillo-Aramburo, E. (2022). Effect of fique fibers and its processing by-products on morphology, thermal and mechanical properties of epoxy based biocomposites. *Scientific Reports*, 12(1), 15143.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-18934-x>

Chagas, L. A., Oliveira, J. A. S., & Rocha, J. C. (2009). Thermal behavior of rice husk ash produced in a fluidized bed reactor. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 97(2), 411–414.

<https://doi.org/10.1007/s10973-009-0265-3>

Gupta, D., & Kumar, A. (2016). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 8(1), 30-34.

Hwang, K. N., & Chandra, S. (2002). The effect of rice husk ash on the strength and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(6), 491–500. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00087-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00087-0)

IEA Bioenergy. (2019). *Biomass pre-treatment for bioenergy* (Policy Report). International Energy Agency Bioenergy. [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/04/Pretreatment\\_PolicyReport.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/04/Pretreatment_PolicyReport.pdf)

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas de ensayo de materiales para carreteras: Sección 100 - Suelos*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Norma INV E-123-13: Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos*. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras: Sección 100 - Suelos*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-125: Determinación del límite líquido de los suelos*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-126: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-127: Determinación de los factores de contracción de los suelos*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Norma INV E-132-13: Determinación de suelos expansivos*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-142-13: Ensayo modificado de compactación*. Bogotá: INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas INV E-151-13: Consolidación unidimensional de suelos*. Bogotá: INVIAS.

Laguna Peñaloza, O. I., & Chacón Charcas, J. M. (2020). *Análisis comparativo del comportamiento a la resistencia de un suelo fino con adición de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza de cascarilla de café* (Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia). Universidad Piloto de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Girardot, Cundinamarca.

Montero Flores, J. (2019). *Evaluación de propiedades del concreto empleando cenizas de cáscara de arroz como sustituto del cemento en Chiclayo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Scribd. <https://es.scribd.com/document/669820657/Tesis-Evaluacion-de-Propiedades-Del-Concreto-Eempleando-Cenizas-de-Cascara-de-Arroz-Como-Sustituto-Del-Cemento-en-Chiclayo-Montero-Flores-2019>

PICASSO, G. (2008). Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas. *Revista de la sociedad química del Perú*, enero-marzo, 74(1).

Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., Ocampo-López, C., Pinedo-Rangel, V., Muñoz-Blandón, O., & Trujillo-Aramburo, E. (2023). The industrial potential of fique cultivated in Colombia. *Sustainability*, 15(1), 695. <https://doi.org/10.3390/su15010695>

Taype Sánchez, M., & Vega Cahuana, K. G. (2020). *Incorporación de óxido de calcio y fibra de fique para el mejoramiento de la subrasante en el tramo Unión Leticia-Condorcocha, Junín, 2020* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú.