

**Uso de la ceniza de bagazo de caña para mejoramiento de suelos**

**Karol Yuliana Celis Cuevas y Santiago Manrique Villamizar**

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

**Director**

**Luis Alberto Capacho Silva**

**Ingeniero Civil, Msc**

**Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2025**

### **Dedicatoria**

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la oportunidad de aprender, crecer y superar los desafíos.

A mi familia, por ser mi pilar inquebrantable, por brindarme su amor, esfuerzo y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí incluso cuando dudé de mí misma.

A mis amigos y compañero de investigación, por alentarme, por estar presentes en los momentos difíciles y por celebrar cada pequeño logro conmigo. Su compañía hizo que este recorrido fuera más llevadero y significativo.

A todas las personas que contribuyeron a esta investigación: laboratoristas, profesores e ingenieros amigos. Su orientación y disposición fueron fundamentales para que este trabajo pudiera llevarse a cabo.

Este logro es de todos ustedes.

**Karol Yuliana Celis**

### **Dedicatoria**

A mis padres, hermanos y a toda mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido el pilar fundamental en cada paso de mi camino. Su amor y confianza me han dado la fuerza para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis amigos, por su compañía y aliento inagotable; a mis profesores, por compartir su conocimiento y guiarme en este proceso; y a mi compañera de investigación, por su entrega, disciplina y compromiso en la realización de este proyecto.

Pero, sobre todo, agradezco a Dios, quien me sostuvo en los momentos más complicados de mi carrera, dándome la fortaleza, la paciencia y la fe necesarias para llegar hasta aquí.

**Santiago Manrique Villamizar.**

**Table de Contenido**

Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos .....	14
2. Marco teórico .....	15
2.1. Producción de las cenizas de bagazo: .....	15
2.2. Composición de las cenizas de bagazo de caña de azúcar:.....	16
2.3. Propiedades físico-mecánicas:.....	17
2.4. Aplicaciones y potenciales usos: .....	17
2.5. Procedimiento para mejoramiento del suelo:.....	18
3. Metodología.....	18
3.1. Clasificación, caracterización y propiedades del suelo natural: .....	18
3.2. Molienda y clasificación de la ceniza de bagazo de caña.....	19
3.3. Preparación de mezclas y probetas para suelo con adición de CBC: .....	19
4. Resultados .....	20
4.1. Revisión bibliográfica.....	20
4.2. Clasificación, caracterización y propiedades del suelo natural. ....	21
4.3. Molienda y caracterización de la ceniza .....	25
4.4. Preparación de mezclas y probetas para suelo con adición de CBC .....	27
4.5. Compresión inconfiada de suelo natural y con adición de CBC .....	28
4.6. Ensayo CBR suelo natural y con adición óptima de CBC.....	30
Conclusiones .....	32

Recomendaciones .....	33
Referencias Bibliográficas .....	34

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Normativa ensayos de laboratorio</i> .....	19
<b>Tabla 2</b> <i>Revisión bibliográfica de proyectos afines</i> . ....	20
<b>Tabla 3</b> <i>Resultados de cálculo de gravedad específica</i> . ....	23
<b>Tabla 4</b> <i>Parámetros para el Ensayo Modificado de Compactación</i> . ....	24
<b>Tabla 5</b> <i>Resultados del cálculo de la gravedad específica</i> .....	27
<b>Tabla 6</b> <i>Resultados proctor modificado con todas las concentraciones de ceniza de bagazo de caña</i> .....	28
<b>Tabla 7</b> <i>Resultados de compresión inconfiada</i> .....	29

**Lista de figuras**

<b>Figura 1</b> <i>Granulometría del suelo natural.</i> .....	21
<b>Figura 2</b> <i>Suelo extraído y en proceso de tamizado.</i> .....	22
<b>Figura 3</b> <i>Resultados proctor modificado con suelo natural. Curva de compactación.</i> ..	24
<b>Figura 4</b> <i>Granulometría de la ceniza de bagazo de caña.</i> .....	25
<b>Figura 5</b> <i>Escoria antes y después de la molienda.</i> .....	26
<b>Figura 6</b> <i>Relación general de consistencia y esfuerzo de compresión no confinada de las arenas y arcillas</i> .....	30
<b>Figura 7</b> <i>Resultado CBR suelo natural VS suelo con 8% de CBC.</i> .....	31

## Glosario

**Bagazo de caña:** residuo fibroso que queda después de la extracción del jugo de la caña de azúcar.

**Ceniza de bagazo de caña (CBC):** subproducto obtenido de la combustión del bagazo de caña, rico en silicatos y con propiedades puzolánicas.

**Compactación:** proceso mecánico mediante el cual se reduce el volumen de vacíos en un suelo para aumentar su densidad y resistencia.

**CBR (California Bearing Ratio):** ensayo que mide la capacidad de soporte de un suelo para ser utilizado en pavimentos y estructuras viales.

**Compresión inconfiada:** ensayo que evalúa la resistencia mecánica de un suelo sin la influencia de confinamiento lateral.

**Granulometría:** análisis que determina la distribución del tamaño de partículas en un suelo o agregado.

**Índice de plasticidad (IP):** diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo, indicando su capacidad de deformación sin fracturarse.

**Límites de Atterberg:** parámetros que definen los estados de consistencia de un suelo, incluyendo límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

**Mejoramiento de suelos:** técnica utilizada en ingeniería civil para incrementar la capacidad portante y estabilidad de un suelo.

**Método Proctor Modificado:** ensayo de laboratorio que determina la densidad seca máxima y humedad óptima para la compactación de un suelo.

**Normas INVIAS:** conjunto de regulaciones técnicas en Colombia que establecen los procedimientos de ensayo para materiales de construcción y suelos.

**Puzolanidad:** propiedad de ciertos materiales de reaccionar con hidróxido de calcio en presencia de agua, formando compuestos cementantes.

**Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS):** método de clasificación de suelos basado en su granulometría y plasticidad.

**Subrasante:** capa de suelo natural o compactado que sirve de base para estructuras como carreteras y pavimentos.

## Resumen

**Título:** Uso de la ceniza de bagazo de caña para mejoramiento de suelos\*

**Autor:** Karol Yuliana Celis Cuevas y Santiago Manrique Villamizar\*\*

**Palabras clave:** Ceniza, Bagazo de caña, Mejoramiento de suelos, Suelo arenoso, CBR.

**Descripción:** El mejoramiento de suelos es un proceso altamente importante para la construcción de vías y por lo tanto para el desarrollo económico de una región. Hoy en día existen grandes aportes en la reutilización y uso de materiales alternos para optimizar y mejorar este proceso. Por esta razón consideramos que la ceniza de bagazo de caña es una buena alternativa, debido a que es un residuo de un proceso industrial, rico en silicatos lo cual permite elevar la resistencia mecánica de un suelo en una compactación. Esta investigación se centra en evaluar y analizar las propiedades mecánicas de un suelo, específicamente una arena arcillosa de baja plasticidad mezclada con proporciones del 5%, 8%, 10% y 15% respecto al peso seco de la misma. Durante el proceso experimental se desarrollaron ensayos de caracterización del suelo, se obtuvo el porcentaje de humedad óptimo, la máxima densidad seca, la plasticidad, la resistencia a compresión no confinada y el porcentaje de CBR tanto de la muestra inalterada como de la muestra con la adición de ceniza de bagazo de caña. Con base a los resultados obtenidos se determinó que la adición del 8% de ceniza a la muestra de suelo es la que evidencia la mayor resistencia y capacidad portante. Nuestros resultados demuestran que es posible utilizar la ceniza de bagazo de caña para estabilizar el suelo, lo cual permite obtener beneficios positivos en las empresas, relacionadas con la construcción de infraestructura vial debido a que por ser un residuo genera menos costos en la adquisición del producto y por ende menor costo en la etapa de mantenimiento, promoviendo también el uso de materiales sostenibles y reduciendo la contaminación ambiental.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva. Ingeniero Civil, Msc

### Abstract

**Title:** Use of sugarcane bagasse ash for soil improvement.\*

**Authors:** : Karol Yuliana Celis Cuevas y Santiago Manrique Villamizar<sup>††</sup>

**Key Words:** Ash-Sugarcane bagasse- Soil improvement- Sandy soil- CBR.

**Description:** Soil improvement is a highly important process for road construction and, therefore, for the economic development of a region. Today, significant advancements have been made in the reuse and application of alternative materials to optimize and enhance this process. For this reason, we consider sugarcane bagasse ash (SBA) a viable alternative, as it is an industrial byproduct rich in silicates, which enhances the mechanical resistance of soil during compaction. This research focuses on evaluating and analyzing the mechanical properties of a specific soil type—a low-plasticity clayey sand—mixed with SBA in proportions of 5%, 8%, 10%, and 15% by dry weight. During the experimental process, soil characterization tests were conducted to determine the optimal moisture content, maximum dry density, plasticity, unconfined compressive strength, and California Bearing Ratio (CBR) for both the untreated soil sample and the sample with SBA addition. Based on the results obtained, it was determined that the 8% SBA addition provided the highest strength and bearing capacity. Our findings demonstrate that sugarcane bagasse ash can be effectively used for soil stabilization, offering significant benefits to companies involved in road infrastructure construction. Since SBA is an industrial waste product, its use reduces material acquisition costs and, consequently, maintenance expenses. Additionally, its application promotes the use of sustainable materials and contributes to environmental pollution reduction.

---

\* Degree Work

†† Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: Luis Alberto Capacho Silva. Civil Engineer, MSc.

## Introducción

La mejora y estabilización de suelos es una técnica fundamental en la ingeniería civil que busca fortalecer las bases y subrasantes de las infraestructuras, optimizando sus propiedades mecánicas (Parra, 2017). Con el tiempo, este proceso ha evolucionado gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y el uso de materiales sostenibles como lo es el caucho reciclado de neumáticos usados, restos de pizarra conglomerada, residuos de la industria papelera y fibras naturales, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental en la construcción (Cabrera, 2010). Tradicionalmente, se han empleado productos como el cemento y la cal debido a su eficacia para aumentar la cohesión y resistencia del suelo. No obstante, su producción tiene un alto costo ambiental, ya que contribuye entre el 5 % y el 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Castaldelli, 2013).

Hoy en respuesta a estos desafíos, la investigación se ha enfocado en alternativas más sostenibles, como el uso de residuos industriales y materiales reciclados (Mansaneira EC, 2017). La ceniza de bagazo de caña, un subproducto de la industria azucarera y representa una opción viable debido a la composición rica en silicatos y otros compuestos reactivos que promueven las reacciones puzolánicas. Esta reacción mejora la estabilidad y resistencia del suelo, reduciendo al mismo tiempo su expansividad. (Payá, 2002).

El uso de ceniza de bagazo de caña y el mejoramiento de suelos tiene un impacto económico y social positivo. Colombia, hoy como uno de los mayores productores de caña de azúcar en América Latina, genera cantidades significativas de este residuo. En 2020, en el país se cortaron 21.5 millones de toneladas de caña de azúcar, lo que garantiza una disponibilidad de material sostenible apto para su uso en la construcción de infraestructuras (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2020). Esto posiciona la ceniza de bagazo de caña

(CBC) no solo como un material de bajo costo sino también como una estrategia para reforzar la economía circular en regiones con alta producción de esta.

Aunque las propiedades de la ceniza han sido estudiadas en contextos específicos, hoy todavía existen limitaciones con respecto a su implementación a gran escala y la estandarización de su uso en proyectos de ingeniería civil. Este estudio busca contribuir al conocimiento existente, mediante una evaluación detallada de las propiedades mecánicas de un suelo clasificado como areno arcilloso mejorado con proporciones variables de CBC. Esta investigación incluye ensayos claves como granulometría, límites de Atterberg, proctor modificado, compresión inconfiada y CBR, simulando condiciones reales de campo para validar la viabilidad de su aplicación. Por lo tanto, el propósito de nuestro trabajo no es solo identificar las condiciones óptimas del mezclado para maximizar la resistencia del suelo sino también promover el uso de materiales sostenibles que contribuyan a mitigar el impacto ambiental de la industria de la construcción y la transición hacia economías más verdes.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Inspeccionar a través de ensayos de laboratorio y otras fuentes, los procesos de producción, y determinación de las propiedades mecánicas de las cenizas de bagazo en el mejoramiento a la resistencia de suelos para vías.

### **1.2. Objetivos específicos**

Verificar en la base de datos de la universidad, documentación bibliográfica existente acerca del uso de ceniza de bagazo en mejoramiento de suelos.

Constatar los resultados encontrados en la base de datos con los obtenidos en el laboratorio.

Establecer la interacción de la ceniza con el suelo mejorado debido a la incorporación de esta en la muestra.

## 2. Marco teórico

Existe hoy en día la necesidad de buscar nuevos materiales en el mundo de la ingeniería civil que puedan ser producidos de una forma amigable con el medio ambiente y también, que su producción y uso sea económica, buscando la manera de evitar el uso del cemento, sin perder características importantes que este tiene con respecto a la implementación en los suelos. El bagazo de caña de azúcar es un subproducto fibroso que queda después de la extracción del jugo de la caña de azúcar en la industria azucarera, o de la quema del residuo de la producción de panela. Este material se ha convertido en un área de interés para la investigación y desarrollo en diversas disciplinas debido a su potencial utilidad en una variedad de aplicaciones, y el estudio del marco teórico sobre las cenizas de bagazo de caña de azúcar se centra en su composición, propiedades y posibles usos.

### 2.1. Producción de las cenizas de bagazo:

Las cenizas de bagazo de caña de azúcar como se mencionó anteriormente, se obtienen subproducto del proceso de combustión del bagazo de caña de azúcar, que es la fibra que queda después de extraer el jugo de la caña para la producción de cristales de azúcar. También se encuentra en la producción de la panela, al finalizar el material sobrante es incinerado, producto de esto surge la ceniza.

A continuación, se explica el proceso paso a paso:

Recolección del bagazo: Posterior a la extracción del jugo de la caña de azúcar en una fábrica de azúcar, el bagazo, que es la parte fibrosa de la caña, se recoge y se acumula, para posteriormente ser incinerado.

Combustión: El bagazo de caña de azúcar se quema en calderas o hornos especiales.

Durante este proceso de combustión, se quema a altas temperaturas para generar

calor, la idea es que la ceniza quede lo más pura posible, evitando residuos como carbón u otros materiales.

Cenizas como subproducto: Durante el proceso de combustión, se producen cenizas como un subproducto. Estas cenizas son el residuo sólido que queda después de que el bagazo se quema por completo. Las cenizas de bagazo de caña de azúcar suelen contener minerales y otros compuestos inorgánicos que estaban presentes en la caña de azúcar, más que todo óxidos y silicatos.

Cabe resaltar que las cenizas de bagazo de caña deben ser lo más puras posible para su uso en el proceso de mejoramiento de suelos. También se pueden utilizar de diversas formas, como fertilizante, para estabilización de suelos, o incluso en la fabricación de materiales de construcción, como el concreto de alta resistencia. Su uso depende de la composición de las cenizas y de las necesidades específicas de la industria o la agricultura local. (Batra et al., 2008)

## **2.2. Composición de las cenizas de bagazo de caña de azúcar:**

Las cenizas de bagazo de caña de azúcar se obtienen a través de la incineración de bagazo a altas temperaturas que rondan los 700 – 900 °C, estas temperaturas son las recomendadas para lograr la ceniza más pura posible. Estas cenizas contienen una variedad de compuestos inorgánicos los óxidos metálicos son los más abundantes. A continuación, se mencionan los porcentajes de composición de óxidos: sílice (SiO<sub>2</sub>), 64.15%, alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 9.05%, óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 5.52%, calcio (CaO), 8.14, potasio (K<sub>2</sub>O), 1.35%, sodio (Na<sub>2</sub>O), 0.92%, Magnesio (MgO), 2.85%. La composición exacta puede variar dependiendo de las condiciones de combustión y el tipo de caña de azúcar. (Ganesan et al., 2007)

### **2.3. Propiedades físico-mecánicas:**

Las cenizas de bagazo de caña de azúcar poseen propiedades físicas y químicas que las hacen aptas para diversas aplicaciones. Estas propiedades incluyen alta porosidad, resistencia a altas temperaturas, reactividad química, y capacidad de absorción de agua y otros líquidos. (Batra et al., 2008)

### **2.4. Aplicaciones y potenciales usos:**

Las cenizas de bagazo de caña de azúcar pueden tener varios usos y aplicaciones, que incluyen:

*Mejora de suelos:* Las cenizas se pueden utilizar como material para estabilización de suelos, gracias a que es un material puzolánico, con alto contenido de óxidos.

*Producción de materiales de construcción:* Las cenizas de bagazo pueden ser utilizadas en la producción de materiales de construcción como ladrillos, bloques y morteros.

*Adsorbente:* Debido a su capacidad para absorber líquidos y contaminantes, las cenizas de bagazo se utilizan en la remoción de metales pesados y otros contaminantes en aguas residuales, y como adsorbentes en procesos de tratamiento de aguas.

*Agricultura:* Las cenizas de bagazo pueden ser utilizadas como una fuente de nutrientes en la agricultura, mejorando suelos y proporcionando elementos esenciales para el crecimiento de algunos cultivos.

### **2.5. Procedimiento para mejoramiento del suelo:**

Este proceso consiste en la remoción del material base de la subrasante, se retira eventualmente una parte, y la adición del material en estudio, mezcla, humedecimiento o aireación, posteriormente se realiza la compactación del suelo y finalmente se perfila según el requerimiento, con las dimensiones y alineamientos dispuestas en la norma.

## **3. Metodología**

Para alcanzar los objetivos de este proyecto se realizó una revisión bibliográfica sobre investigaciones previas relacionadas con el uso de CBC para la estabilización y mejoramiento de suelos. Este análisis permitirá identificar los criterios de aplicación en diferentes contextos.

Posteriormente se incluye la caracterización, clasificación y evaluación del suelo natural y su comportamiento mecánico al ser mezclado con proporciones de 5%, 8%, 10% y 15% de CBC.

El suelo utilizado en esta investigación fue producto de excavaciones de la construcción de la Facultad de Salud de la Universidad Industrial de Santander (UIS), ubicada en la Quebrada Seca, entre las carreras 32 y 33. La muestra se extrajo a una profundidad de 7 metros y se almacenó en condiciones controladas para su posterior análisis y caracterización.

Los procedimientos de la fase experimental fueron:

### **3.1. Clasificación, caracterización y propiedades del suelo natural:**

La muestra de suelo natural fue sometida a diferentes ensayos de laboratorio conforme a las normativas establecidas en la tabla 1. Esta etapa es fundamental para el estudio y entendimiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo incluyendo granulometría, límites de Atterberg, proctor modificado, compresión inconfiada y CBR.

**Tabla 1***Normativa ensayos de laboratorio.*

<b>Nombre de ensayo</b>	<b>Norma técnica</b>
Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.	INV E – 213- 13 (INVIAS Normas de ensayo de materiales para carreteras INV E-213-13, 2013)
Determinación del límite líquido de los suelos.	INV E – 125-13 (INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-125-13, 2013)
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	INVE E-126-13. (INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-126-13)
Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.	NTC 237 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 237, 1995)
Ensayo modificado de compactación	INVE E -142-13 (INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-142-13, 2013)
Compresión inconfiada en muestras de suelos.	INV E – 152-13 (INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-152-13, 2013)
CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.	INV E – 148- 13 (INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras INV E-148-13, 2014)

### **3.2. Molienda y clasificación de la ceniza de bagazo de caña.**

Se realiza la molienda de bloques de escoria de CBC utilizando molino de bolas a una velocidad de 31-33 r.p.m. Posteriormente, se realiza un ensayo de granulometría que determine el tamaño de las partículas obtenidas.

### **3.3. Preparación de mezclas y probetas para suelo con adición de CBC:**

Se incorporaron proporciones de ceniza del 5%, 8%, 10% y 15% respecto al peso seco del suelo asegurando una homogénea distribución.

Se realizaron ensayos de laboratorios con las diferentes concentraciones con el fin de comparar la densidad, humedad, resistencia y capacidad portante, evaluando así las propiedades mecánicas del suelo, los ensayos necesarios son proctor modificado, compresión inconfiada y CBR.

Para la compresión inconfínada se moldearon probetas con una relación altura-diámetro de 2:1 siguiendo las recomendaciones de la norma INV E -152-13 (INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-152-13, 2013)

#### 4. Resultados

##### 4.1. Revisión bibliográfica

Para constatar los resultados obtenidos en laboratorio se eligieron proyectos de investigación relacionados con el uso de la ceniza de bagazo de caña en la estabilización de suelos para pavimentos. En la tabla 2 podemos apreciar los datos relevantes de cada artículo.

**Tabla 2**

*Revisión bibliográfica de proyectos afines.*

REF.	% ÓPTIMO	CBC	TIPO DE SUELO	ENSAYO COMPRESIÓN			
				INCONFINADA (Kpa)		CBR (%)	
				0% CBC	15% CBC	0% CBC	45% CBC
(TERRONES, CRUZ, 2018) (Cruz, 2018)	15%		Arcilla limosa (CL)	13.96	151.23	1.82	22.27
(CAPUÑAY & PASTOR, 2020) (CAPUÑAY AGUIRRE Christiaan Eduardo Y PASTOR OLASCUAGA, 2020)	45%		Arena limosa (SL)	N/A	N/A	8.84	15.8

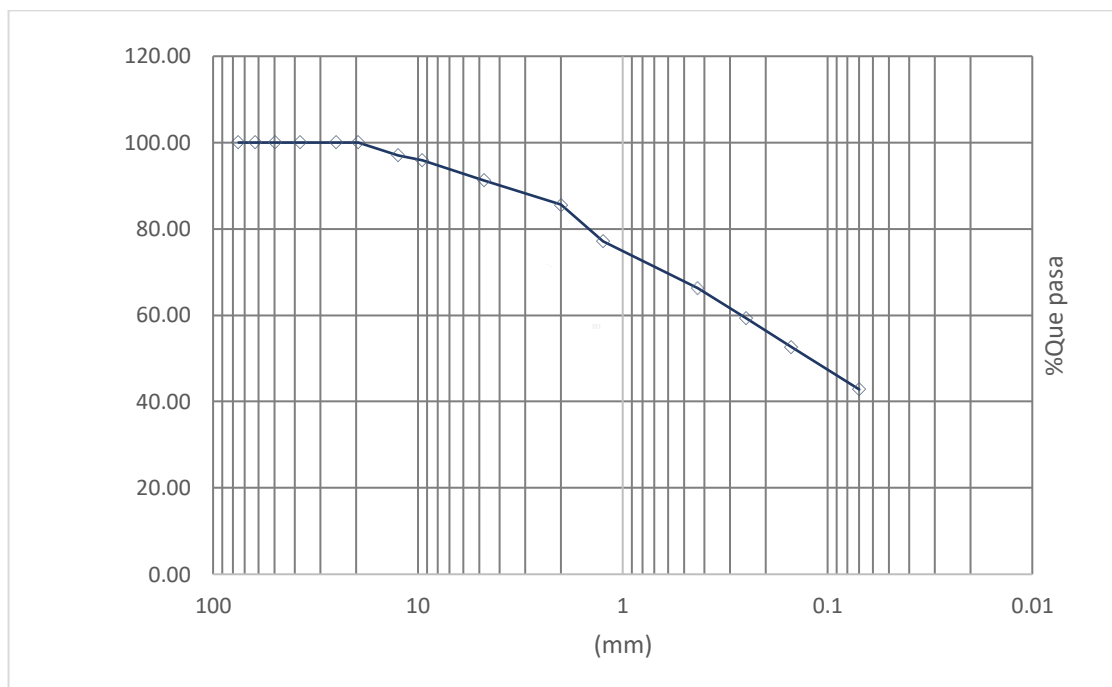
#### 4.2. Clasificación, caracterización y propiedades del suelo natural.

##### Granulometría

Para el ensayo granulométrico se utilizaron 582.5 gramos de material siguiendo la norma INV E 213-13 (INVIAS Normas de ensayo de materiales para carreteras INV E-213-13, 2013), los resultados se aprecian en la Figura 1.

##### Figura 1

*Granulometría del suelo natural.*



Este ensayo determinó que el material es una arena con alto contenido de finos, ya que el mayor porcentaje de suelo pasa por el tamiz N4.

##### Límites de Atterberg

Después de realizar la caracterización granulométrica del suelo, se procedió a determinar los límites de Atterberg, el objetivo es evaluar las propiedades de consistencia y plasticidad de un suelo, lo que nos permite predecir el comportamiento de este ante diferentes condiciones de humedad y carga. Este ensayo depende de dos normas, la INV E-125-13 e INV E -126-13 la cual se realizó por el método A.

Obteniendo los siguientes resultados en el laboratorio:

Límite líquido: 32.72%

Límite plástico: 20.20%

Índice de plasticidad: 12.52%

### Figura 2

*Suelo extraído y en proceso de tamizado.*



El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) nos proporciona un criterio para la asignación de símbolos de grupo. En nuestro caso, la arena con alto contenido de finos posee un índice de plasticidad (IP) mayor a 7% y se ubica por encima de la línea “A” (ver figura 3). Lo que nos permite concluir que el suelo es una arena arcillosa de baja plasticidad (SC-CL). (DAS, 2015)

**Gravedad específica:**

Para poder determinar la gravedad específica del suelo natural, se realizó el método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino siguiendo los lineamientos de la norma NTC 237 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 237, 1995), se tomaron 500 gramos de material que pasa el tamiz No 4 (4.75 mm) para realizar el procedimiento.

Obteniendo así los resultados de la tabla:

**Tabla 3**

*Resultados de cálculo de gravedad específica.*

Gravedad específica aparente	2.0930
Gravedad específica aparente saturada y superficialmente seca.	2.28
Gravedad específica real	2.57
Absorción máxima (%)	8.93

A partir de la información, se puede analizar que existe una porosidad significativa en el material, ya que hay una diferencia de valores entre gravedad específica y la saturada superficialmente seca.

También posee un valor alto de absorción lo que puede influir en el comportamiento mecánico del material.

**Proctor modificado**

Se realizó ensayo de proctor modificado a la arena arcillosa usando del método A debido al tamaño del material, establecido por el Instituto Nacional de Vías (INV- 142-13) para pruebas

de compactación modificada. En la siguiente tabla se detallan los aspectos importantes como la dimensión del molde, número de capas y golpes de compactación. (Ver Tabla No 4).

**Tabla 4**

*Parámetros para el Ensayo Modificado de Compactación.*

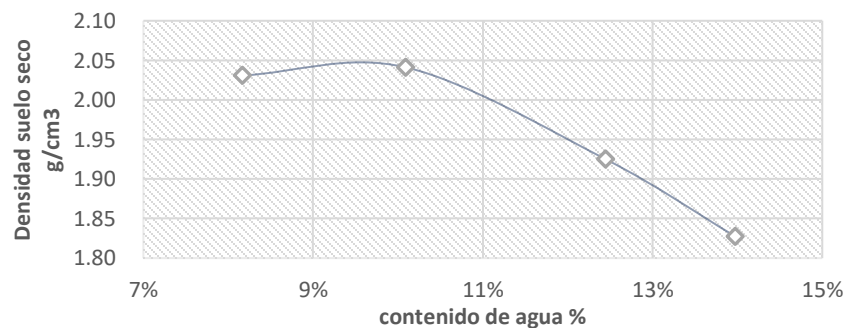
Número de Capas	5
Número de Golpes por Capa	25
Diámetro del Molde (cm)	10.16
Altura del Molde (cm)	11.61
Volumen del Molde (cm <sup>3</sup> )	933.86

Este procedimiento implica compactar el suelo utilizando un martillo de 44.48 N (10 lbf) este cae libremente desde una altura de 457.2 mm (18"). La energía de compactación aplicada es aproximadamente de 2700 kN–m/m<sup>3</sup> (56,000 lbf–pie/pie<sup>3</sup>).

Los resultados se ilustran en la figura 4 con una curva de compactación que nos permite determinar la densidad seca óptima y el contenido de humedad.

**Figura 3**

*Resultados proctor modificado con suelo natural. Curva de compactación.*





La granulometría determina la proporción de las partículas que en su mayoría son arenas con el 68.2%, un 15.8% de finos y solo el 3.7% de gravas.

### **Figura 5**

*Escoria antes y después de la molienda.*



Nota: Bagazo de caña de azúcar antes y después de ser molido en máquina de los ángeles.

### **Límites de Atterberg CBC**

En la preparación de los límites de Atterberg, se logra identificar que el material carece de plasticidad, dado a que no fue posible realizar el límite plástico, lo que lo clasifica como un material no plástico (NP).

### **Gravedad específica CBC**

La gravedad específica del CBC se realizó siguiendo los lineamientos de la norma NTC 237, se tomaron 446.5 gramos de material que pasa el tamiz No 4 (4.75 mm) para realizar el procedimiento.

Obteniendo así los resultados de la tabla:

**Tabla 5**

*Resultados del cálculo de la gravedad específica.*

Gravedad específica aparente	2.0708
gravedad específica aparente saturada y superficialmente seca.	2.11
Gravedad específica real	2.15
Absorción máxima (%)	1.71

El material muestra baja porosidad, ya que los valores de gravedad específica aparente y la superficialmente seca son similares, además la absorción baja favorece a la estabilidad ante cambios de humedad, reduciendo los cambios de expansión y contracción.

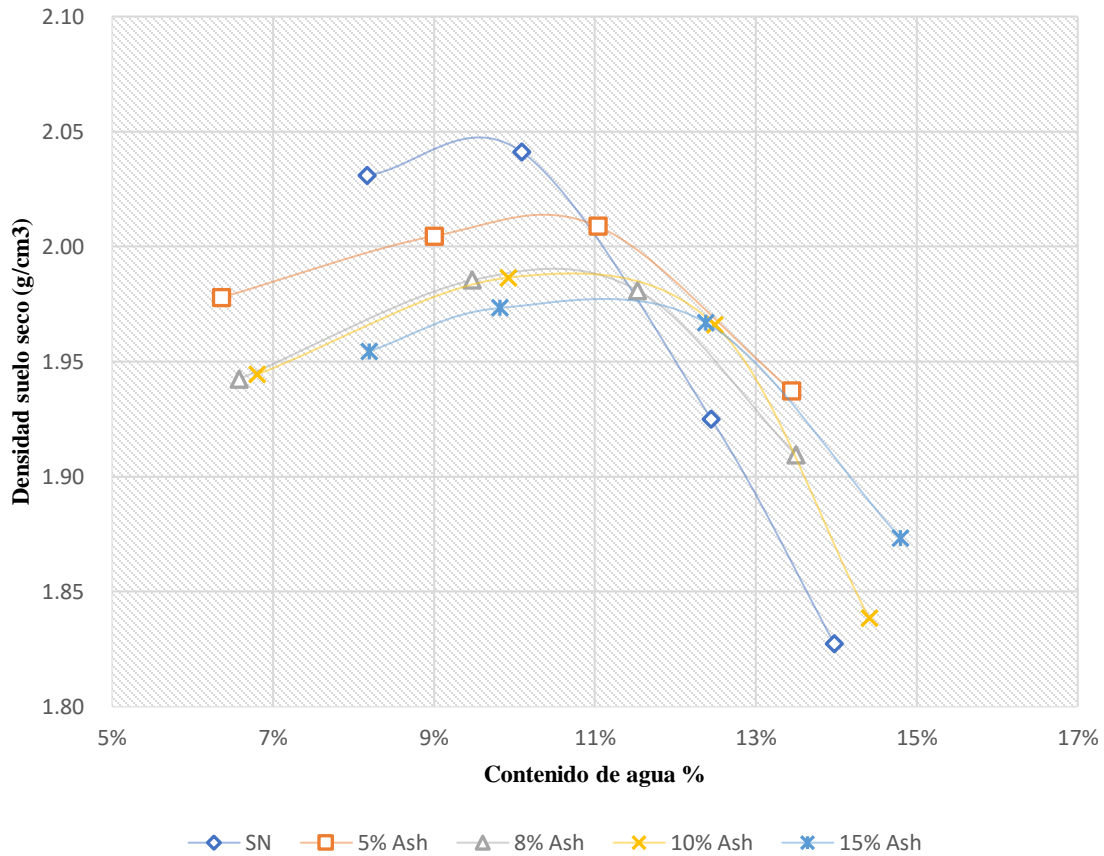
#### **4.4. Preparación de mezclas y probetas para suelo con adición de CBC**

##### **Proctor modificado**

Los resultados obtenidos del ensayo de proctor modificado mostrados en la figura 7 nos permiten identificar que a medida que aumentamos la proporción de CBC, se disminuyen las propiedades físicas de compactación de la muestra, lo que puede llegar a afectar la capacidad portante del suelo. Cabe resaltar que no se puede ignorar las propiedades químicas del material, debido a que, al ser una ceniza, favorece procesos como la estabilización de suelos a través de reacciones puzolánicas por su gran contenido en sílice y en menor medida, alúmina, óxido de calcio, óxido de hierro y óxido de potasio (K.C.P. Faria, 2012).

**Tabla 6**

*Resultados proctor modificado con todas las concentraciones de ceniza de bagazo de caña*



El objetivo de realizar este ensayo fue determinar un valor de la densidad del suelo mezclado con la CBC en diferentes porcentajes (5%, 8%, 10% y 15%), con el fin de encontrar la concentración óptima de ceniza en el suelo.

#### 4.5. Compresión inconfiada de suelo natural y con adición de CBC

El ensayo de compresión inconfiada se realizó con la energía de compactación utilizada en el ensayo de proctor modificado y así mantener las condiciones de humedad óptima y densidad seca máxima, con probetas de 10cm de alto y 5 cm de diámetro. Obteniendo así los siguientes resultados mostrados en la tabla 6.

**Tabla 7***Resultados de compresión inconfiada.*

<b>%Ceniza</b>	<b>Resistencia USC (kg/ cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformación unitaria (%)</b>	<b>Descripción de la falla</b>
0% (suelo natural)	3.306	0.846	Falla frágil, sin agrietamiento previo.
	3.224	1.064	
	3.242	1.065	
5%	3.442	0.844	Mayor cohesión, grietas mejor distribuidas.
	3.320	0.840	
	3.412	0.914	
8%	3.720	0.840	Aumento de resistencia, falla dúctil.
	3.824	0.981	
	3.883	0.894	
10%	3.425	0.903	Pérdida de cohesión.
	3.504	0.898	
	3.482	0.876	
15%	2.681	0.905	Aumento de la deformación y menor resistencia.

Comparando los resultados con la tabla 6, indica que el suelo tiene una consistencia muy firme, ya que la resistencia a compresión simple está entre 2 y 4 kg/ cm<sup>2</sup>. Aunque se evidencia una mejora significativa en la resistencia, el suelo no alcanza la categoría de suelo duro (>4.00 kg/cm<sup>2</sup>).

**Figura 6**

*Relación general de consistencia y esfuerzo de compresión no confinada de las arenas y arcillas*

CONSISTENCIA DEL SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESION INCONFINADA	
	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
Muy blanda	< 0.25	< 25
Blanda	0.25 - 0.50	25 - 50
Mediana	0.50 - 1.00	50 - 100
Firme	1.00 - 2.00	100 - 200
Muy firme	2.00 - 4.00	200 - 400
Dura	> 4.00	> 400

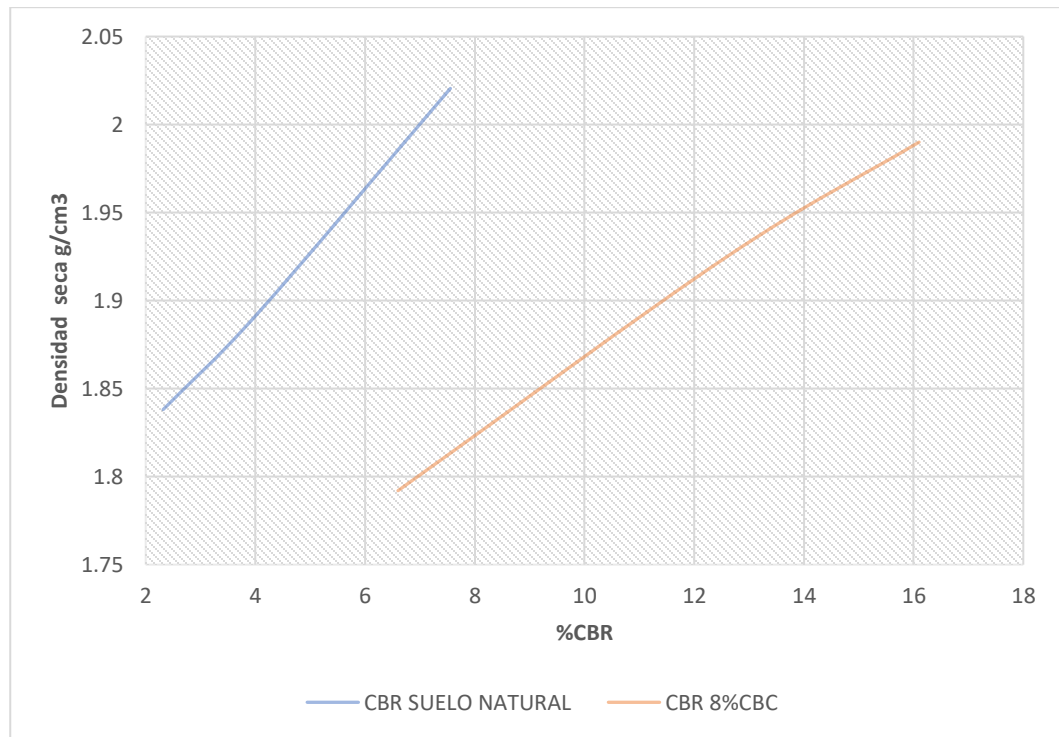
*Nota:* Tomado de Braja Das. Principios de ingeniería de cimentaciones 5<sup>a</sup> ed. Thomson Learning.,2002.

#### **4.6. Ensayo CBR suelo natural y con adición óptima de CBC**

El ensayo de CBR (California Bearing Ratio) es un indicador clave para ser utilizado en capas de subrasante y subbase en pavimentos. En esta investigación se evaluó el comportamiento del suelo tratado con diferentes porcentajes de ceniza para determinar la influencia en la resistencia; al ser limitada la cantidad de material, se realizó el ensayo CBR con el suelo natural y con el porcentaje de CBC que mejor mostró resistencia (8%).

**Figura 7**

*Resultado CBR suelo natural VS suelo con 8% de CBC.*



La adición del 8% de ceniza de bagazo de caña generó un incremento significativo en la capacidad de soporte del suelo reflejado en el aumento del CBR de 7.55% en el suelo natural a 16.1% en la mezcla mejorada. Este resultado indica que la CBC contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del suelo, aumentando su resistencia a la penetración y su capacidad para soportar cargas.

Se midió la expansividad de ambas muestras, siendo 1.39% la del suelo natural y 1.23% la del suelo con adición de ceniza.

En el ámbito vial esto se traduce en un mejor desempeño del suelo, reduciendo la deformabilidad y mejorando su estabilidad.

### **Conclusiones**

Se verifica a través de la revisión bibliográfica y los ensayos de laboratorio que la ceniza de bagazo de caña mejora las propiedades mecánicas de un suelo areno arcilloso, aumentando su capacidad portante y resistencia y reduciendo la expansividad.

A través de los ensayos de laboratorio, se determinó que el suelo proporcionado es una arena arcillosa con baja plasticidad acorde a la clasificación SUCS.

Se comprueba el aumento de la capacidad de soporte al utilizar la proporción de 8% cuyo valor de resistencia fue de 3.88 kg/cm<sup>2</sup> en comparación con la resistencia del suelo natural que fue de 3.25 kg/cm<sup>2</sup>.

Se evidencia un aumento significativo del valor de CBR con un incremento de la capacidad portante del 8.55% y reduciendo la expansividad en un 0.16%, determinando que la cantidad óptima de ceniza es la de 8% para un suelo (SC-CL) arenoso arcilloso con baja plasticidad.

### **Recomendaciones**

Consideramos que para ampliar el alcance e impacto de esta investigación se recomienda:

Realizar estudios de campo que validen la aplicabilidad a gran escala.

Evaluar la durabilidad del suelo mejorado en condiciones climáticas adversas.

Promover la integración de la ceniza de caña como alternativa sostenible.

Ampliar el estudio a una mayor variedad de tipos de suelos con diferentes características granulométricas y plásticas. Lo que permitirá establecer un rango más amplio de contenidos óptimos de ceniza de bagazo de caña y evaluar su efectividad, generando una base de datos robusta para proyectos de estabilización y mejoramiento de suelos.

**Referencias Bibliográficas**

- ASTM International, A. D.-1. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
- Cabrera, F. M. (2010). La selección sostenible de los materiales de construcción. *Tecnología y desarrollo.*, VIII(16), 9-16.
- CAPUÑAY AGUIRRE Christiaan Eduardo Y PASTOR OLASCUAGA, C. J. (2020). ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR PARA USO COMO SUBRASANTE MEJORADA EN LOS PAVIMENTOS DE CHIMBOTE. PERÚ.
- Castaldelli, V. N. (2013). *Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/ma6083108>
- Cruz, A. T. (2018). ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS ADICIONANDO CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE EN EL SECTOR BARRAZA, TRUJILLO. PERÚ.
- DAS, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica cuarta edición*. México: Cengage Learning.
- INVIAS Normas de ensayo de materiales para carreteras INV E-213-13. (2013). *ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO*.
- INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras INV E-148-13. (2014). *CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada*.
- INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-125-13. (2013). *Determinación del límite líquido de los suelos*.

INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-126-13. (s.f.). Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-142-13. (2013). *Ensayo modificado de compactación.*

INVIAS, Normas de ensayo de materiales para carreteras, INV E-152-13. (2013). *Compresión inconfiada en muestras de suelo.*

K.C.P. Faria, R. G. (2012). Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. *Journal of Environmental Management*, 101(11), 6.

Mansaneira EC, S.-C. N.-S.-T. (2017). *Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material.* Colombia.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, C. d. (2020). *Cifras Sectoriales, diciembre 2020.* Obtenido de <https://sioc.minagricultura.gov.co/CanaAzucar/Documentos/2020-12-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.

Ministerio de Vivienda, C. y. (12 de Enero de 2018). *En los últimos 30 años ciudades y municipios de Colombia han crecido de manera informal.* Obtenido de <https://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/en-los-ultimos-30-anos-ciudades-y-municipios-de-colombia-han-crecido-de-manera-informal>

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 237. (1995). *Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.*

Parra, B. F. (2017). *Estabilización de Suelos Arcillosos de Macas con Valores de CBR menores al 5% y.* Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26917>

Payá, J. M.-P. (2002). Studies on its properties for reusing in concrete production. doi:  
<https://doi.org/10.1002/jctb.549>

Rafael Alavéz-Ramírez, P. M.-G.-R. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability. *Construction and Building Materials*, 34, 11.

SALAS, D. A. (2016). Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 114-122.