

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como propósito fundamental realizar un estudio del comportamiento de las propiedades de resistencia que pueden tener los suelos plásticos al adicionar material estabilizante (cenizas de bagazo de caña de azúcar).

Los suelos plásticos son los que generan muchas complicaciones durante el procedimiento al ejecutar alguna obra civil, por su alta plasticidad son vulnerables a tener flexibilidad de hundimiento y cambios volumétricos con la presencia del agua, lo que ha llevado al desarrollo de diferentes estudios en la búsqueda de mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y de resistencia.

Habiendo realizado las investigaciones se ha encontrado la siguiente investigación a nivel internacional.

La investigación de Axel Franco Castro en Perú en el 2017 en su título de tesis; Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, el cual tiene como objetivo aprovechar los residuos agrícolas para obtener beneficios en la estabilización de los suelos arcillosos tomando como conclusión, que los materiales agrícolas bajo su reacción puzolánica se obtiene un buen elemento en la ceniza de cáscara de arroz para la utilización en estabilización de la subrasante.

Con la presente investigación, se busca lograr de manera experimental una mejora de las características físicas y propiedades de resistencia de los suelos plásticos para su aplicación en la capa subrasante mediante la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar, con el fin de mejorar y obtener una capa de soporte más estable para la conformación de una estructura de pavimento.

El aporte de esta investigación en lo teórico es la utilización de la teoría científica que es parte de una investigación y se describe más adelante; su aplicación práctica sería la realización de ensayos a nivel de laboratorio con el fin de buscar mejoras en el comportamiento de sus propiedades de los suelos plásticos y la relevancia social es que el

producto final puede ser utilizado de la mejor manera por los colegas y la sociedad en general, ya sea directa o indirectamente.

1.2. ANTECEDENTES

En los últimos años se han tenido diversas experiencias de estabilización de suelos usando residuos agrícolas o industriales, con la finalidad de reusarlos como agentes estabilizadores para mejorar las propiedades de los suelos, de tal forma que se pueda plantear una solución que tenga beneficios económicos y ambientales.

En Bolivia se tiene una gran producción agrícola de la caña de azúcar, las principales extensiones en nuestro territorio se encuentran en la zona de los valles como es el departamento de Tarija y los llanos orientales como es el departamento de Santa Cruz.

La producción de caña de azúcar está dirigida a la producción de azúcar en sí y el bagazo no tiene una utilización definida como tal. Lo que hace que la disposición final del bagazo de caña de azúcar es un problema sin solución definitiva.

Con el objetivo de darle un uso al bagazo de caña de azúcar, en esta investigación se pretende estudiar el comportamiento que pueden los suelos plásticos con la adición de cenizas de bagazo de caña de azúcar, a través de ensayos de laboratorio y asimismo poder encontrar un nuevo material estabilizador que permita ser una solución para que pueda ser usado en carreteras

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1. Técnico académico

Se necesita plantear nuevas alternativas que permitan el uso del suelo plástico para la construcción de carreteras en la zona de la selva ya que no se puede encontrar materiales granulares adecuados. Una de las alternativas que se ha venido utilizando es la estabilización tradicional, la cual usa como material a la cal para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos. Sin embargo, con el fin de encontrar otras alternativas de solución se puede plantear como material no tradicional de estabilización a la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

En diversos países como en India, Uruguay, Nigeria se han realizado investigaciones acerca de las cenizas provenientes de la quema de desecho de productos agrícolas, las que demuestran que estas cenizas pueden ser usadas como agente estabilizador, ya que mejora las propiedades de los suelos arcillosos, lo que permite que estos puedan ser usados como materiales de construcción para la carretera.

1.3.2. Social

Con la presente investigación, se pretende dar una alternativa más para la estabilización de los suelos plásticos, usando productos provenientes de las producciones agrícolas que no tienen un uso adecuado como tal y así aportar al medio ambiente haciendo uso de los mismos de tal manera que la sociedad y el medio ambiente sean los principales beneficiados.

1.3.2. Económico

Los diferentes proyectos y construcciones civiles como las carreteras, demandan grandes presupuestos económicos al estado, lo que es un problema ya que genera una serie de inconformidades en la sociedad.

Con esta investigación lo que se pretende es poder encontrar un aditivo que mejore las propiedades de los suelos plásticos, para que puedan ser usados en sub rasantes y que sean económicos y así poder reducir los presupuestos de las construcciones de carreteras.

1.4. SITUACIÓN PROBLÉMICA

Al adicionar ceniza de bagazo de caña de azúcar, a suelos plásticos, el comportamiento de las propiedades de estos, viene a ser una reacción, cambiando sus propiedades de resistencia mecánica, plasticidad y expansión de forma visible, estos comportamientos se pueden medir en laboratorio de suelos.

Existen diversos elementos que pueden afectar al comportamiento de las propiedades los suelos plásticos en la capa subrasante, las mismas pueden obedecer a diversos tipos de causas, que van desde un mal diseño, formas deficientes de construcción, mala calidad de los materiales, alto nivel de humedad en la zona, entre otros que traen como consecuencia

una deficiencia en su resistencia e inestabilidad volumétrica ocasionando diferentes tipos de fallas en la plataforma de la vía.

Lo que implica la necesidad de estudiar con mayor atención los suelos plásticos y los materiales estabilizantes, encontrando los porcentajes óptimos de material estabilizante (ceniza de bagazo de caña de azúcar) que al combinarlo con el suelo plástico brinden mejoras en sus propiedades, de tal manera que sean una alternativa de solución en la construcción de una carretera.

1.4.1. Determinación del problema

¿Qué comportamiento tendrá un suelo plástico en sus propiedades, al agregar ceniza de bagazo de caña de azúcar?

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Estudiar el comportamiento de las propiedades de resistencia mecánica de los suelos plásticos, agregando distintos porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar, con la finalidad de encontrar el contenido óptimo para mejorar el suelo y su aplicación en la capa subrasante.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de los materiales en estudio.
- Clasificar los suelos plásticos en su estado natural mediante el ensayo de granulometría y límites de Atterberg.
- Determinar el índice de plasticidad de los suelos plásticos en su estado natural y agregando cenizas de bagazo de caña de azúcar.
- Determinar la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad de los suelos plásticos en su estado natural y agregando ceniza de bagazo de caña de azúcar.

- Determinar la resistencia de los suelos plásticos en su estado natural y agregando cenizas de bagazo de caña de azúcar mediante el ensayo de CBR.
- Determinar el contenido óptimo de cenizas de bagazo de caña de azúcar, para que los suelos plásticos alcancen la mayor resistencia.
- Realizar una aplicación, diseñando un paquete estructural de pavimento con los suelos en estado natural y con el contenido óptimo de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) para verificar el comportamiento del CBR en los suelos de las dos zonas en estudio.
- Realizar el análisis químico y físico a la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) para determinar sus características físicas y composición química.

1.6. HIPÓTESIS

Al adicionar diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar a los suelos plásticos de media y baja plasticidad, se podrá mejorar sus propiedades de resistencia mecánica y expansión, determinando la combinación óptima para su aplicación.

1.6.1. Identificación de variables

Variables independientes

X1=suelo de media y baja plasticidad con adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Variables dependientes

Y1= Resistencia

Y2= expansión

Y3= plasticidad

1.6.2. Conceptualización y operacionalización de las variables

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Suelo plástico de media y baja plasticidad con adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar.	Plasticidad	Porcentaje %	Ensayos de límites
	Expansión	Porcentaje %	Extensómetro
	Tipo	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad CL, arcilla con alto porcentaje de material orgánico OL.	Clasificación AASHTO y ASTM
Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Comportamiento de las propiedades de resistencia de los suelos plásticos de media y baja plasticidad al adicionar cenizas de bagazo de caña de azúcar.	Capacidad de soporte CBR	Porcentaje %	Pruebas en laboratorio de suelos según la norma AASHTO y ASTM
	Expansión	mm o plg	
	Plasticidad	Porcentaje	

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1 Unidad de estudio población y muestra

1.7.1.1. Unidad de estudio o muestreo

Ensayos de laboratorio.

1.7.1.2. Población y muestra

La población son todos los suelos finos estabilizados con productos.

La muestra son los suelos finos estabilizados con cenizas de bagazo de caña de azúcar.

Nivel de confianza

Nivel de confianza%	Nivel de significancia Z
50	0.57
80	1.28
85	1.44
90	1.64
95	1.96
99	2.68

1.7.2. Tamaño de muestra

La muestra es una pequeña parte de la población.

Es un subconjunto o parte del universo o población en que se llevará a cabo la investigación.

La muestra son las propiedades de resistencia de los suelos plásticos.

Las propiedades de los suelos plásticos a tomarse en cuenta para el proyecto son concretamente la capacidad portante CBR, reducir la expansión, mediante los ensayos de laboratorio.

Muestra estratificada por fijación proporcional

N_i = Población Inicial

N = Muestra

P_i = Probabilidad de que ocurra 50%

Q_i = Probabilidad de que no ocurra 50%

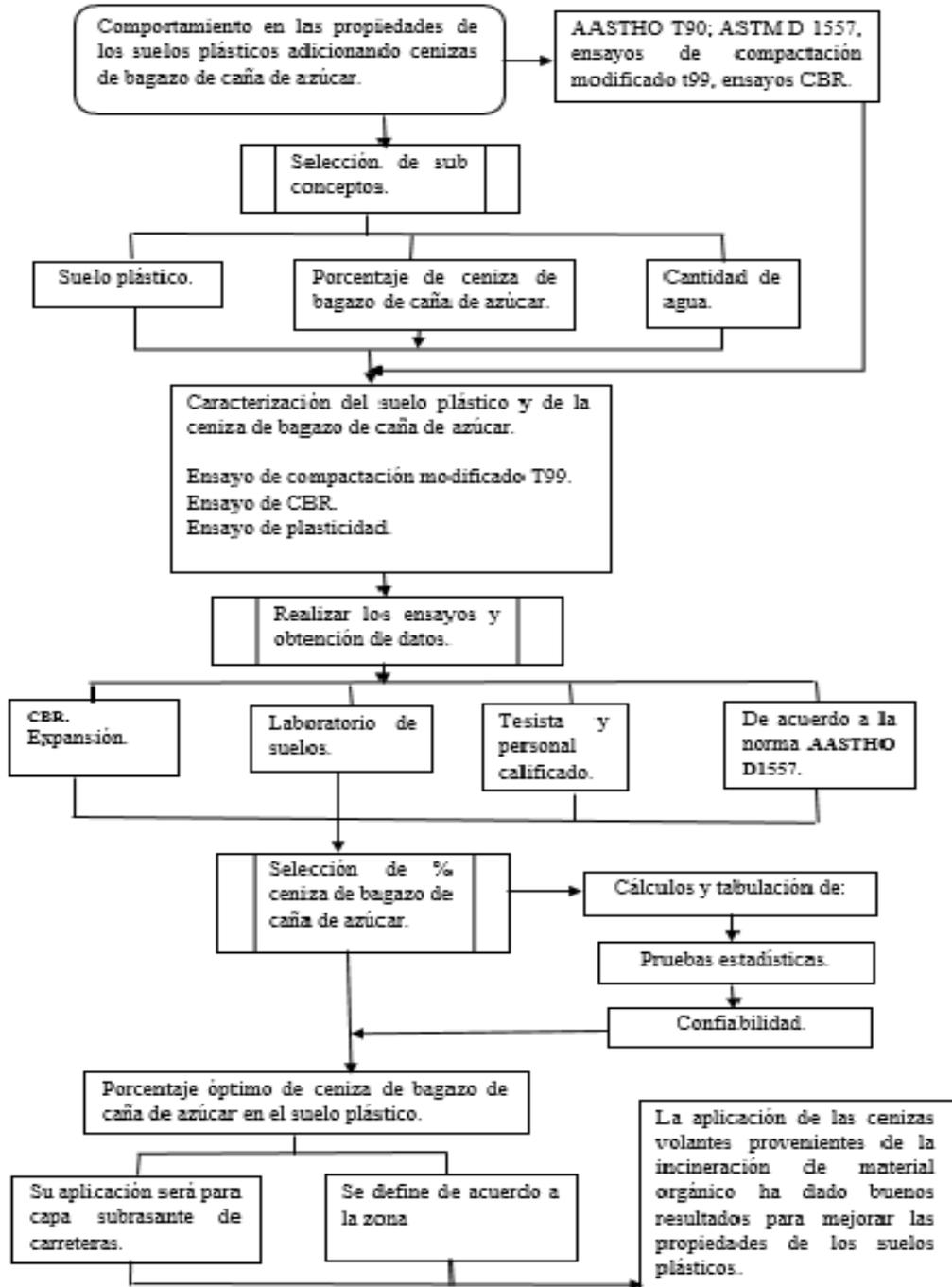
E = Error 5% 0.05

Z = Nivel de significancia 1.96

NC = Nivel de confianza 95

1.8. ESQUEMA DE LA PERSPECTIVA USADA

Figura 1.1. Esquema de la perspectiva.



Fuente: Elaboración propia

1.8.1. Definición en el alcance

La siguiente investigación busca estudiar el comportamiento que tendrán las propiedades de resistencia de los suelos plásticos al combinarlos con cenizas de bagazo de caña de azúcar, con la finalidad de mejorar sus propiedades de resistencia y deformación volumétrica de los mismos.

Para este estudio lo que se hará es lo siguiente; se conseguirá el suelo plástico que será el objeto de estudio, se hará la caracterización y su clasificación para ver si corresponde a un suelo plástico, también se conseguirá el bagazo de caña de azúcar para hacer su incinerado y así obtener la ceniza. Una vez clasificados los suelos y teniendo la ceniza, se los dosificará con la ceniza de bagazo de caña de azúcar. Se lo hará en diferentes porcentajes hasta hallar el porcentaje óptimo de ceniza, que, de resultados favorables en las propiedades de los suelos plásticos, tanto en su capacidad de Resistencia, plasticidad y expansión. Todo esto se controlará haciendo los respectivos ensayos en laboratorio de suelos.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LOS SUELOS FINOS PLÁSTICOS, ESTABILIZACIÓN CON SUSTANCIAS CEMENTANTES (CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR)

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LOS SUELOS FINOS PLÁSTICOS, ESTABILIZACIÓN CON SUSTANCIAS CEMENTANTES (CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Suelo

2.1.1. Definición de suelo

El suelo es un conjunto de partículas minerales o de materia orgánica en forma de depósito, las que pueden separarse por medio de una acción mecánica sencilla que incluyen cantidades variables de agua y aire. con definición en sus propiedades que varían de acuerdo a su tipología (Juárez y Rico, 2010, p.34).

2.1.2. Propiedades de los suelos

Estabilidad volumétrica

Esta propiedad está generalmente relacionada con suelos que se expanden y se contraen por los cambios de humedad relacionados con los cambios climático o alguna actividad propia de la construcción. Las presiones de expansión al no estar controladas, pueden levantar postes, inclinar postes, fracturas muros, romper tubo de drenaje, entre otras cosas.

Resistencia

Es la capacidad de un suelo a evitar su deformación y falla ante una carga, mayormente posee menos resistencia cuando el contenido de humedad es alto. Entre los suelos que presentan resistencia baja están los suelos arcillosos. Estos suelos son sensibles a la humedad.

Permeabilidad

El suelo se puede definir como permeable pues presenta poros, los cuales pueden llenarse de aguas, estos poros se interconectan de modo que generan caminos por donde el agua puede transportarse, cuando la cantidad de vacíos es mínima, no podrá transportar el agua, entonces el suelo será impermeable. La permeabilidad se relaciona con dos problemas que se buscan solucionar, la presión de poros y el flujo de agua a través del suelo.

Compresibilidad

Es el grado en que el volumen del suelo disminuye por efecto de una carga. Para suelos con textura gruesa (gravas y arenas) la compresibilidad será mínimas pues las partículas están en contacto. Para suelos de textura fina (limos y arcillas) se produce una reducción en el volumen, porque gran parte de los vacíos intersticiales se eliminarán. Mientras mayor índice plástico tenga el suelo mayor será la compresibilidad.

La compresibilidad tiene una influencia en las propiedades de los suelos, ya que se altera las fuerzas existentes entre las partículas en magnitud y sentido.

Durabilidad

La durabilidad está relacionada con la resistencia al intemperismo, erosión o la abrasión del tránsito. Esta mayormente relacionado a la superficie de rodadura, la última capa del pavimento.

Humedad natural

Otra característica importante de los suelos es su humedad natural; puesto que la resistencia de los suelos de subrasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten.

Granulometría

Representa la distribución de los tamaños que posee el suelo mediante el tamizado según especificaciones técnicas.

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño.

De acuerdo al tamaño de las partículas de suelo, se definen los siguientes términos:

Tipo de Material _Tamaño de las partículas:

Figura 2.1. Tabla que muestra los diámetros de los suelos gruesos y finos.

Tipo de material		Tamaño de las partículas
Grava		75 mm - 4.75 mm
Arena		Arena gruesa: 4.75 mm - 2.00 mm
		Arena media: 2.00 mm - 0.425 mm
		Arena fina: 0.425 mm - 0.075 mm
Material fino	Limo	0.075 mm - 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Fuente: Elaboración propia

La plasticidad

Es la propiedad de estabilidad que representa los suelos hasta cierto límite de humedad sin disgregarse, por tanto, la plasticidad de un suelo depende, no de los elementos gruesos que contiene, sino únicamente de sus elementos finos. Se determina mediante los ensayos de los límites de Atterberg.

Figura 2.2. clasificación de los suelos según su plasticidad.

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	Suelos arcillosos
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Elaboración propia

2.2. Suelos plásticos

2.2.1. Definición

Se puede entender a los materiales plásticos como aquellos que poseen una parte relevante de suelos cohesivos y que como tales condicionan su comportamiento, frente a los restantes materiales existentes en el terreno.

2.2.2. Las arcillas

La arcilla es un tipo de roca natural sedimentaria que engloba a los minerales filosilicatos, cuyas propiedades dependen de su estructura y tamaño de grano.

Está constituida por silicato de aluminio hidratado, procedentes de la composición de minerales de aluminio.

La arcilla es el suelo con los elementos más finos que tienen un diámetro que varía desde los 0.005mm, y es más conocido popularmente por ser de alta plasticidad al adicionarle agua, normalmente en su composición química las arcillas mantienen aluminita como también sodio y potasio el cual atrapa el hidrogeno con el oxígeno y es muy propenso a captar agua en sus polos positivos, también de poseer silicato mantiene su estructura en forma, mientras no se adhiera agua ya que el magnesio los mantiene unidos en su composición interna de los estratos moleculares (Crespo, 2004, p.22).

El pH de las arcillas no es idóneo pues no se encuentran en el rango de 9 – 10 que son las ideales de todo suelo, donde la plasticidad es natural del mismo suelo arcilloso por su originalidad.

2.2.3. Características de las arcillas

Material de estructura laminar.

Sumamente higroscópico.

Su masa se expande con el agua.

Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica.

Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600 °C.

2.2.4. Clasificación de las arcillas

Desde el punto de vista geológico se puede distinguir entre primarias, las cuales son de tipo hipogénico y que permanecieron en el mismo lugar de su formación y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes de su origen.

Fluviales: depositadas por ríos y siendo depósitos de baja calidad.

Lacustres: asentados en lagos y estado en capas uniformes de buena calidad.

En deltas: son arenosas y de forma irregular.

Glaciales: formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas

2.2.5. Clasificación de los minerales arcillosos

Mineral de arcilla caolinita: se encuentra entremezclada en las arcillas sedimentarias. Es el constituyente más abundante de los depósitos residuales de arcilla, son estables, inexpansibles y de mediana plasticidad.

Mineral de arcilla illita: es el grupo más abundante en los depósitos arcillosos marinos modernos y en los sedimentarios antiguos. Son medianamente estables, medianamente inexpansibles y de mediana plasticidad

Mineral de arcilla montmorilonita: son especialmente abundantes en arcillas derivadas de cenizas volcánicas intemperizadas. Son muy inestables, medianamente inexpansibles y de alta plasticidad.

2.3. Estabilización de suelos

2.3.1. Concepto de estabilización

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos.

La estabilización de un suelo es un proceso que tiene como objetivo mejorar sus propiedades como su resistencia a la deformación, disminuir su sensibilidad al agua, controlar la erosión y los cambios de volumen.

La estabilización permite mejorar propiedades del suelo tales como la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o compresibilidad, la estabilidad volumétrica ante la

presencia de agua, la capacidad de soporte de resistencia, entre otros, buscando en todos los casos, un buen comportamiento esfuerzo deformación de los suelos y de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil.

Los criterios que se deben tener para realizar una estabilización son: Suelos a nivel de subrasante calificada como pobre o inadecuada de acuerdo al manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos (aquellos suelos que presente CBR menor o igual a 6).

Asímismo, cuando la capa de subrasante sea arcillosa o limosa y cuando se humedezcan puedan penetrar las capas granulares del pavimento.

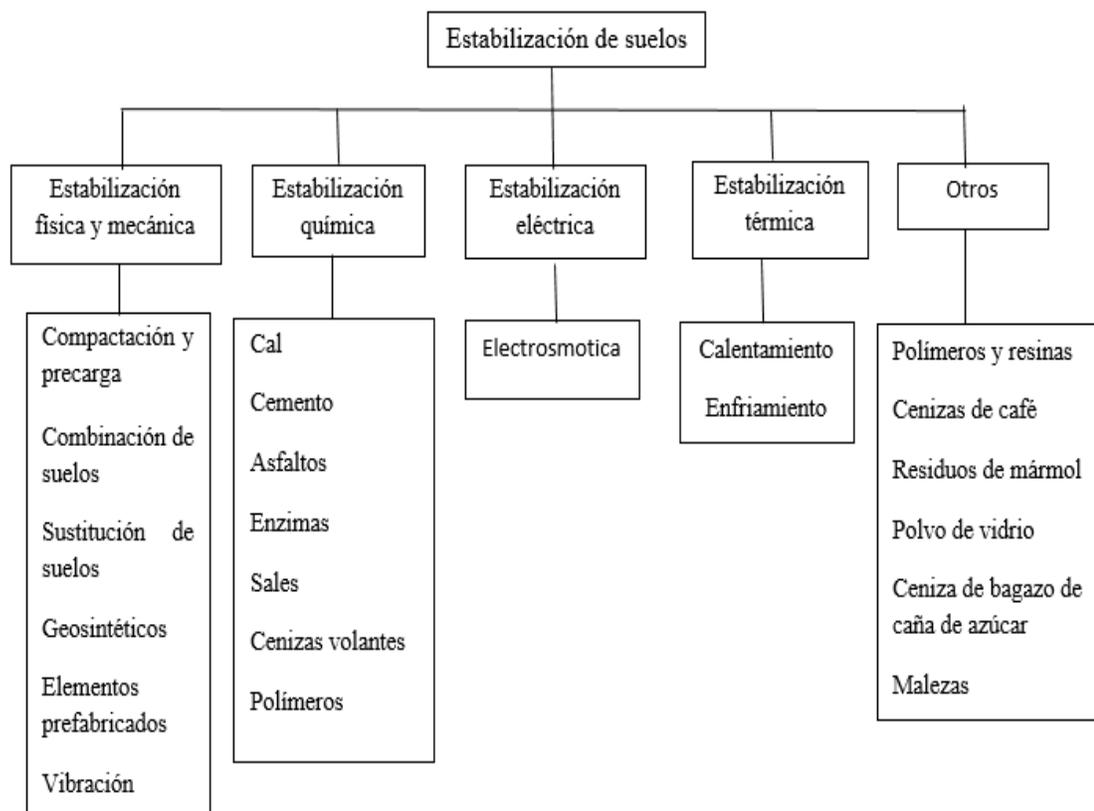
Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas

Las ventajas de una estabilización es que nos permite usar el suelo presente en el pavimento, nos permite construir caminos en lugares donde los terrenos son intransitables, obteniendo un emplazamiento estable que trabaje adecuadamente estructuralmente, esto permite evitar el uso de materiales de préstamo que son necesarios de llevar a la zona donde el pavimento estará emplazado. Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas se suman importantes beneficios económicos

2.3.2. Métodos de estabilización de suelos

Existen diferentes alternativas para la estabilización de suelos, en la figura 2.4 vemos algunas clasificaciones de estabilización de suelos:

Figura 2.3. Clasificación de la estabilización de los suelos.



Fuente: Elaboración propia

2.3.2.1. Estabilización física y mecánica

Este método de estabilización se utiliza para mejorar la capacidad de soporte de resistencia de los suelos a través de cambios físicos, sin producir reacciones químicas. Entre ellas tenemos:

- Estabilización por compactación
- Estabilización por combinación de suelos
- Estabilización por sustitución de suelos
- Estabilización con geo sintéticos
- Estabilización por elementos prefabricados
- Vibración

2.3.2.2. Estabilización química

Se define como la mezcla de un producto con el suelo para reaccionar químicamente modificando las propiedades del suelo, logrando mejorar las propiedades del suelo.

Cuando se utilizan productos con el fin de estabilizar un suelo, hay que tener en cuenta las consecuencias ambientales ya que pueden aparecer problemas de contaminación durante la etapa de ejecución de la construcción, operación y mantenimiento. Además, se debe considerar los factores que influyen en la estabilización como la situación geográfica, las condiciones climáticas (humedad, temperatura, dirección y velocidad de viento entre otros), el tránsito de vehículos, entre otros. Algunas estabilizaciones químicas realizadas son:

- Estabilización con cal
- Estabilización con cemento
- Estabilización con productos asfálticos
- Estabilización con sales
- Estabilización con polímeros
- Estabilización con ceniza volante

2.3.2.2.1. Estabilización de suelos con cal

La estabilización del suelo con cal, cambia considerablemente las características del mismo, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua.

La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán. En general, los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz 200 -75 μ m- y un Índice de Plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para la estabilización. Los suelos que contienen cantidades significativas de material orgánico (mayor que 1 por ciento) o sulfatos (mayor que el 0.3 por ciento) pueden requerir cal adicional y/o procedimientos de construcción especiales.

Subrasante (o subbase): La cal puede estabilizar permanentemente el suelo fino empleado como una subrasante o subbase, para crear una capa con un valor estructural significativo en el sistema del pavimento. Los suelos tratados pueden ser del lugar (subrasante) o bien, de materiales de préstamo. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.

Bases: La cal puede estabilizar permanentemente materiales que no cumplen con las características mínimas para funcionar como una base (como la grava con arcilla, gravas "sucias", o bases contaminadas en general) que contienen al menos el 50 por ciento de material grueso retenido en la malla o tamiz No. 4. La estabilización de bases es utilizada para la construcción de caminos nuevos y para la reconstrucción de caminos deteriorados, y generalmente requiere la adición de 2 a 4 por ciento de cal respecto al peso del suelo seco. La mezcla en el lugar se usa comúnmente para la estabilización de bases, sin embargo, la mezcla en planta también puede ser utilizada. La cal también se usa para mejorar las características de las mezclas de suelo y agregados en "el reciclaje de espesor completo".

Modificación con cal y secado de suelos

Existen otros dos tipos importantes de tratamiento con cal utilizado en operaciones de construcción:

Primero, debido a que la cal viva se combina químicamente con el agua, puede ser usada con eficacia para secar suelos mojados. El calor generado por esta reacción también contribuye a secar los suelos mojados. La reacción con el agua ocurre incluso si los suelos no contienen fracciones arcillosas significativas. Cuando las arcillas están presentes, la reacción química de la cal con las arcillas, seca aún más los suelos. El efecto neto es que el secado ocurre rápidamente, dentro de un lapso de horas, permitiendo al contratista compactar el suelo mucho más rápidamente que si esperara que el suelo se secara por la evaporación natural.

El secado del suelo húmedo en obras de construcción es uno de los usos más amplios de la cal para el tratamiento de suelos. La cal puede ser utilizada para uno o varios de los siguientes casos: ayudar a la compactación, secar las áreas húmedas; mejorar la capacidad soporte; proporcionar una plataforma de trabajo para la construcción subsiguiente; y acondicionar el suelo (hacerlo trabajable) para una posterior estabilización con cemento Portland o con asfalto. Generalmente, entre 1 y 4 por ciento de cal secará un sitio mojado suficientemente para permitir que procedan las actividades de construcción.

Segundo, el tratamiento con cal puede mejorar considerablemente la trabajabilidad y la resistencia del suelo a corto plazo, de tal forma que permite que los proyectos puedan ser ejecutados más fácilmente. Los ejemplos incluyen tratamiento de suelos finos o materiales de base granular para construir caminos temporales u otras plataformas de construcción. Típicamente se utiliza del 1 al 4 por ciento de cal en peso con respecto al suelo para la modificación, que es generalmente una menor cantidad que la utilizada para la estabilización permanente de suelos. Los cambios hechos al suelo modificado con cal pueden o no ser permanentes. La diferencia principal entre la modificación y la estabilización es que, con la modificación, generalmente no se le concede ningún crédito estructural a la capa modificada con cal en el diseño de pavimento. La modificación con cal trabaja mejor en suelos plásticos.

La química del tratamiento con cal

Cuando la cal y el agua se añaden a un suelo arcilloso, comienzan a ocurrir reacciones químicas casi inmediatamente.

1. Secado: Si se usa la cal viva, la misma se hidrata inmediatamente (i.e., químicamente se combina con el agua) y libera calor. Los suelos se secan, porque el agua presente en el suelo participa en esta reacción, y porque el calor generado puede evaporar la humedad adicional. La cal hidratada producida por estas reacciones iniciales, posteriormente reaccionará con las partículas de arcilla (como se discute posteriormente). Estas reacciones subsecuentes, lentamente producirán un secado adicional porque las mismas reducen la humedad, mejorando el soporte. Si se utilizan la cal hidratada o la lechada de cal hidratada, en lugar de la cal viva, el secado ocurre sólo por los cambios químicos del suelo, que reducen su capacidad para retener agua y aumentan su estabilidad.

2. **Modificación:** Después de la mezcla inicial, los iones de calcio (Ca^{++}) de la cal hidratada emigran a la superficie de las partículas arcillosas y desplazan el agua y otros iones. El suelo se hace friable y granular, haciéndolo más fácil para trabajar y compactar. En esta etapa, el Índice de Plasticidad del suelo disminuye drásticamente, así como lo hace su tendencia a hincharse y contraerse. El proceso, llamado "floculación y aglomeración", generalmente ocurre en el transcurso de horas.

3. **Estabilización:** Cuando se añaden las cantidades adecuadas de cal y agua, el pH del suelo aumenta rápidamente arriba de 10.5, lo que permite romper las partículas de arcilla. La determinación de la cantidad de cal necesaria es parte del proceso de diseño y se estima por pruebas como la de Eades y Grim (ASTM D6276). Se liberan la sílice y la alúmina y reaccionan con el calcio de la cal para formar hidratos de calcio-silicatos (CSH) e hidratos de calcio-aluminatos (CAH). CSH y CAH que son productos cementantes similares a aquellos formados en el cemento de Portland. Ellos forman la matriz que contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas con cal.

Cuando se forma esta matriz, el suelo se transforma de un material arenoso granular, a una capa dura relativamente impermeable, con una capacidad de carga significativa. El proceso se inicia en unas horas y puede continuar durante años, en un sistema diseñado correctamente. La matriz formada es permanente, duradera, y significativamente impermeable, produciendo una capa estructural que es tan fuerte como flexible.

Mezclas de Cal-Puzolanas para suelos con cantidades bajas de arcilla

La cal por sí misma puede reaccionar con suelos que contienen tan poca arcilla como 7% e Índices de Plasticidad tan bajos como 10. Si el suelo no es suficientemente reactivo, la cal puede ser combinada con una fuente adicional de sílice y alúmina. Tales puzolanas incluyen la ceniza volante y la escoria de alto horno. El sílice y alúmina adicional de las puzolanas reaccionan con la cal para formar el fuerte matriz cementante que caracteriza a una capa estabilizada con cal. Las mezclas correctamente proporcionadas de cal y puzolanas pueden modificar o estabilizar casi cualquier suelo, pero comúnmente se usan para suelos con plasticidad de baja a media. La ceniza volante es la puzolana más comúnmente usada. Esta es el residuo fino que es resultado de la combustión de carbón

pulverizado en calderas de centrales eléctricas, que es transportado de la cámara de combustión a la chimenea de los gases.

El empleo de ceniza o polvo de horno de cal (LKD por sus siglas en inglés) es una alternativa cada vez más popular. El LKD es el residuo fino que resulta de la combustión de carbón y el tratamiento de caliza en un horno, para procesar la piedra en cal y que es removido de los gases de escape del horno. El LKD por lo general contiene una cantidad significativa de cal, aluminio y silicio -es en esencia una premezcla de puzolana y cal. La cantidad de cal, silicio y aluminio en el LKD varía, principalmente dependiendo de la caliza, el combustible y el tipo de operaciones del horno usadas durante el proceso de fabricación de cal.

2.3.2.2.2. Estabilización con sales

Las sales se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H^+) ni básicos de hidróxilo (OH^-).

Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas.

En el laboratorio, se han estudiado, un gran número de sales (NaCl , CaCl_2 , NaNO_3 , Na_2CO_3 , BaCl_2 , MgCl_2 , KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

2.3.2.2.3. Estabilización con cloruro de calcio (CaCl_2)

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

La solubilidad del cloruro de calcio es de 60 g aproximadamente, por cada 100 c.c. de agua destilada a 0° C, o de 159 g aproximadamente, por cada 100 c.c. de agua destilada a 100° C.

Se ha demostrado que con la adición de cloruro de calcio disminuyen las fuerzas de repulsión entre las arcillas, pero hay autores que inclusive aseguran que la película de agua que rodea a las partículas se ve eléctricamente reforzada con la adición del cloruro de calcio, a tal grado que se incrementa notablemente la cohesión aparente. Como en el intercambio catiónico se sustituye un ión Ca^{++} por 2 iones Na^+ , la doble capa se ve reducida en su espesor lo que hace que se reduzca el potencial eléctrico y en consecuencia se reduzcan las fuerzas de repulsión entre las partículas.

Se ha encontrado un incremento en los pesos volumétricos hasta en un 11% con la adición de 0.5 a 3% de cloruro de calcio, según el tipo de suelo. Sin embargo, existen datos que reportan disminuciones en el peso volumétrico con respecto a un suelo arcilloso que no contenga el cloruro de calcio.

Así también se tiene que el cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo, pero desafortunadamente esta sal es muy fácilmente lavable. Se reduce la evaporación y es capaz de absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, pudiéndose mantener dicha humedad en sus dos terceras partes durante un día de calor seco, lo que hace de esta sal un producto muy eficaz cuando se trata de evitar la formación de polvo en terracerías, lo que acepta el Cuerpo de Ingenieros para el caso de caminos con tránsito muy ligero.

Se tiene sin embargo que existen limitaciones para el empleo del cloruro de calcio, entre las más importantes se tienen:

Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa superior al 30%.

Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que estos reaccionen favorablemente con la sal.

Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

2.3.2.2.4. Estabilización de suelos con silicato de sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio pertenece al grupo de compuestos químicos que poseen un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas. Se le ha empleado como adhesivo, cementante, detergente, defloculante, catalizador, etc., en solución es incoloro e inodoro y actúa en términos generales, como un jabón fuerte, y causa serios daños a los ojos si se llega a introducir en ellos.

La estabilización de suelos con silicato de sodio para su empleo en carreteras, se ha empleado en el mundo desde 1945, aproximadamente, y parece ser que los mejores resultados se han obtenido en el caso de suelos arenosos y climas moderados.

Varios investigadores han reportado desde 1945, la efectividad del silicato de sodio como estabilizante de suelos; en algunas ocasiones se le empleó solo y otras veces junto con otros productos químicos. Sin embargo, parece ser, que los éxitos logrados fueron para el caso de suelos arenosos y en climas moderados si se emplea nada más el silicato de sodio, ya que para otros tipos de suelo se requiere el empleo de otros productos químicos adicionales.

Lo que, si se ha podido aseverar, es que el silicato de sodio se puede utilizar para trabajos de estabilización de suelos cuando se tiene la presencia de sales de calcio diluidas en agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un magnífico agente cementante. El efecto de la adición de un silicato, a cierto tipo de suelos, ha sido el de incrementar la permanencia del agua de compactación, aumentar la resistencia al disgregado, abatir el índice plástico y la expansión. Algunas evidencias indican que en la reacción del silicato de sodio con el suelo se presenta un intercambio aniónico, dando como resultado la formación de corazas de silicatos insolubles alrededor de las partículas de suelo, aunado a la acción cementante entre las partículas de suelo y el estabilizante.

Mediante un estudio exhaustivo, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts se encontró que otros tipos de sales diferentes a los ya referidos, tales como el sulfato de cobre, sulfato de bario, sulfato de aluminio, sulfato de magnesio, etc., no producen cambios significativos a los suelos, o bien la mejoría resulta muy pequeña y su costo elevado como para justificar la aplicación de dichas sales.

2.3.2.2.5. Estabilización con cloruro de sodio (NaCl)

El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y el método más reciente consiste en la evaporación del agua de mar mediante el empleo de hornos.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se les consigue en el mercado constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza (la ASTM y la AASHTO han fijado especificaciones al respecto).

Con la adición de sal al agua, se puede abatir la temperatura de congelamiento de ésta última. Se han reportado casos en los que el empleo de 2 a 3% de sal abatió el punto de congelamiento de un suelo hasta 2° C.

Las soluciones que contengan cloruro de sodio (NaCl) disueltas, presentan una mayor tensión superficial que en el caso del agua destilada y en 1% de sal incrementa la tensión superficial en 1 a 2 dinas por cm², asimismo, la adición de sal al agua abate la presión de vapor.

Los cambios en el agua, debidos a la adición de sal, tanto en el punto de congelación como en la tensión superficial y la presión de vapor, dependen de la solubilidad de la sal. Ahora bien, la sal se adiciona al agua en pequeños porcentajes, ésta se disuelve rápidamente, pero a medida que el porcentaje adicionado va siendo más elevado, la sal se disuelve con más dificultad y se tendrá un cierto porcentaje más allá del cual la sal ya no se disuelve.

Existe en la superficie de las partículas arcillosas una doble capa de iones adsorbidos, en la cual la energía potencial existente se disipa a partir de dicha superficie, hasta que a una cierta distancia se tenga el mismo potencial que el líquido circundante. La magnitud de este potencial se puede expresar por una cantidad asignada como:

AK

$$z = 4Qd$$

En donde:

Q es la carga eléctrica

d es el espesor de la doble capa

A es el área superficial

K es la constante dieléctrica

De los parámetros anteriores, el único que se puede modificar es el espesor de la doble capa, lo cual se logra incrementando la concentración de electrolito en el agua de mezclado y sustituyendo iones de valencia alta por iones de valencia menor. Al sustituir iones de valencia superior por iones de valencia menor en la superficie de una partícula de arcilla se tendrán entonces, menos iones susceptibles a crecer debido a que están rodeados por moléculas de agua sobre dicha superficie y en consecuencia se reduce el espesor de la doble capa.

Cuando las partículas se encuentran rodeadas por cargas del mismo signo se repelen; pero si alguna de las partículas o parte de ellas tiene carga opuesta entonces se desarrollan fuerzas de atracción. Se ha observado que, si el medio que rodea a estas partículas es con un bajo pH, entonces los bordes de las partículas tienden a cargarse en forma positiva, en cuanto a las caras estas permanecen con carga negativa, por lo que resulta una floculación de las caras de unas partículas con los bordes de las otras. En tanto que, si se tiene un alto pH, tanto los bordes como las caras tienden a quedar con cargas negativas y la estructura puede quedar en forma dispersa.

En las partículas arcillosas el tipo de intercambio importante es el catiónico, es decir, intercambio de iones positivos, debido a que las superficies de las partículas están cargadas negativamente.

En lo que respecta a la estabilización de suelos con Cloruro de Sodio se ha discutido mucho en lo concerniente al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de esta sal, pues mientras algunos investigadores aseguran un pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que sí parece existir un común acuerdo, es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad óptima. Se admite teóricamente que el cloruro de sodio ocasiona que la arcilla se estructure en forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre las partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico,

pero en la práctica este criterio no se ha verificado en todos los casos, por lo que no se debe generalizar.

Al agregar la sal se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial. Sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones.

En el caso del empleo del cloruro de sodio se han tenido en México aplicaciones exitosas, como en las terracerías de las salinas de Guerrero Negro, California, en donde éstas están constituidas por arenas de mar compactadas con agua de mar y cuya condición salina se mantiene siempre constante, pero existen otras experiencias como las de las aeropistas de Loreto e Islas Marías, cuyas bases fueron compactadas con agua de mar y los tratamientos superficiales posteriormente colocados, se han desprendido formando ámpulas que se destruyen fácilmente por los efectos abrasivos de las llantas.

De lo anterior se deduce que es de suma importancia tener conocimiento de la reacción íntima entre la sal y el suelo, así como la permanencia a través del tiempo de la estabilización lograda y sus efectos colaterales que causaría, en algunos elementos de la estructura del camino.

Se tiene que se ha logrado mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. Según lo manifiestan algunos investigadores, la adición de sal en una arcilla produce un decremento en la contracción volumétrica o lineal y estos cambios físicos, la formación de costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las partículas no arcillosas y cuando estas se encuentran en la superficie, se desprenden con menor facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito.

Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo, son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en plantas con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizada con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos.

Si se desea utilizar el equipo tradicional, los pasos a seguir son:

- Escarificación
- Disgregación
- Adición de cloruro de sodio
- Adición del agua
- Mezclado con motoconformadora
- Tendido y compactación

Cuando el mezclado se hace en planta ha sido práctica común adicionar la sal en forma de solución y cuando se intente la estabilización con sal deberán tenerse presentes las siguientes limitaciones:

El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento.

Se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal.

La materia orgánica inhibe la acción de la sal.

El rodillo pata de cabra no ha dado buenos resultados en la compactación de suelos con sal adicionada.

Es indispensable la intervención de un técnico especializado en todo estudio de estabilización con sal, incluyendo las pruebas correspondientes.

Algunos criterios para la estabilización de suelos para pavimentos

Dentro de los criterios para la estabilización de suelos se encuentran los usados por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de Norte América para estabilizar suelos. De los factores que se consideran en la selección del estabilizante, el más importante es el tipo de suelo que se va a estabilizar. Para el cual hay más de un estabilizante que se puede aplicar con éxito, la Fuerza Aérea, utiliza guías o líneas basados sobre todo en la granulometría, plasticidad y textura del suelo.

2.3.2.3. Estabilización térmica

Calentamiento

Cuando las arcillas son calentadas a una temperatura de 900 °C adquieren gran resistencia que no se pierde ni por inmersión. Para la estabilización de suelos se necesita llegar a una temperatura donde la rehidratación se vuelva imposible ocurriendo entre los valores comprendidos entre los 200 y 400 °C.

En Rumania se desarrolló una aplicación de una llama provocada directa hacia la superficie y en Rusia se desarrolló por circulación de gas calentado, siendo el de Rusia más efectivo, pero a su vez más complicado. No obstante, los métodos mencionados anteriormente la influencia del punto de calentamiento no se extiende más de un par de metros

Enfriamiento

Al producir un enfriamiento en suelos finos, genera una disminución de la resistencia debido a que la repulsión de las partículas aumenta y causa el movimiento de agua interparticular por el gradiente térmico.

La estabilización por enfriamiento debe llegar al congelamiento para evitar los efectos mencionados anteriormente y que el agua se congele y el suelo se transforma en un conjunto rígido, presentando una mejor resistencia. Para los suelos arcillosos se puede requerir de temperaturas menores de 0 °C para que el agua de los poros se congele.

2.3.2.4. Estabilización por medios eléctricos

Electros motica

La electrosmótica o electroósmosis es la aplicación de una corriente eléctrica en una muestra de suelo, por medio de unos electrodos (ánodos y cátodo). Los cátodos están constituidos por tubos que recogen el agua, para luego ser evacuados por bombeo. La aplicación de corriente genera una migración de iones y un flujo de agua en el sistema hacia el cátodo, como resultado del proceso, la presión de poros se reduce, el suelo se consolida y aumenta su resistencia. Esta técnica está adquiriendo extensa aplicación en suelos finos y húmedos.

2.4. Ensayos de laboratorio de los suelos

2.4.1. Contenido de humedad

Consiste en extraer la cantidad de agua contenida en un suelo en estado natural.

Puesto que la resistencia de los suelos de subrasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos.

2.4.2. Análisis granulométrico

Es la selección de los granos de un estrato de suelo previsto en tamaños en milímetros los que cual serán procesados en una escala granulométrica que determinara la granulometría a través de una serie de huecos enmallados de distintos diámetros que actúen como separadores aislantes de los granos el cual tiene como nombre el tamizado (Pozo, 2010, p.119).

2.4.3. Límites de Atterberg

Es un ensayo mediante el cual encontramos la plasticidad de un tipo de suelo, y para ello vemos el grado de humedad con el cual reacciona el suelo en su comportamiento líquido y plástico, en el ensayo se realizará un proceso de diferencias entre el estado líquido y el estado plástico para ver el índice de plasticidad el cual va determinar si la plasticidad es la adecuada o es inestable (Sanz, 1975, p.36). 18

2.4.4. Próctor modificado

Es un ensayo mediante el cual se puede encontrar la humedad requerida con el grado de humedad y ver la compactación ideal del suelo a través del peso volumétrico que se encuentra dentro de un molde a esto se le llama densidad relativa por volumen bajo una humedad requerida, y para ellos se hace un proceso el cual consta de una variedad de golpes que varían en 5 capas y que tienen que ver con las herramientas que se utilizan para encontrar dicha densidad.

Gracias al ensayo proctor que hemos estudiado anteriormente, se puede definir una humedad y una compactación standard para un suelo determinado. Partiendo de las condiciones así definidas se puede estudiar y medir la resistencia mecánica de un suelo.

2.4.5. Ensayo de CBR: Californian Bearing Ratio.

El CBR que es el valor soporte o resistencia del suelo, que estará referido al 95% de la MDS (máxima densidad seca) y a una penetración de carga de 2.54 mm. Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” 40 Gracias al ensayo proctor que hemos estudiado anteriormente, se puede definir una humedad y una compactación standard para un suelo determinado. Partiendo de las condiciones así definidas se puede estudiar y medir la resistencia mecánica de un suelo; esta es la finalidad del ensayo CBR (California Bearing Ratio) puesto a punto por los ingenieros americanos. Se utiliza el mismo molde que el del proctor modificado, y se introduce dentro la muestra del terreno que se desea estudiar, humificando hasta la humedad optima proctor. y se sumerge en el agua durante 4 días de forma que las condiciones sean lo más desfavorables posible (Sanz, 1975, p.52).

2.5. PAVIMENTO FLEXIBLE

El pavimento flexible se define como aquella estructura constituida por un conjunto de capas diseñadas y construidas técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estos conjuntos de capas están emplazados sobre la subrasante del camino, tiene la función de resistir y distribuir los esfuerzos transmitidos por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Un pavimento flexible, para cumplir sus funciones correctamente debe cumplir las siguientes características:

Ser resistente a la acción de cargas generadas por el tránsito.

Ser resistente al intemperismo.

Presentar condiciones adecuadas de drenaje.

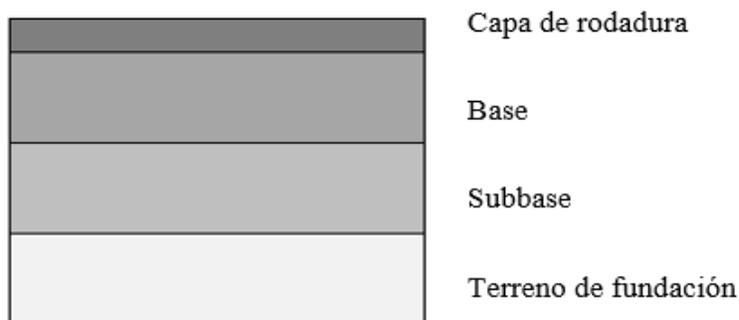
Presentar una regularidad superficial, transversal y longitudinal permitiendo una adecuada comodidad a los usuarios.

Presentar una textura superficial adecuada a las velocidades de diseño, influenciando en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

Debe tener una duración con respecto al tiempo de vida diseñado y deberá a su vez ser económicamente viable.

Un pavimento generalmente está formado por las siguientes capas:

Figura 2.4. Capas que componen un pavimento.



Fuente: Elaboración propia

2.5.1. Subrasante del camino

La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que se construye entre el terreno natural allanado o explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocará encima. En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo proctor modificado (MTC EM 115).

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con $CBR \geq 6\%$. En caso que el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante, tenga un $CBR < 6\%$ (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual el Ingeniero

Responsable analizará según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, estabilización con geosintéticos, elevación de la rasante, cambiar el trazo vial, eligiéndose la más conveniente técnica y económica. En la siguiente gráfica 2.6 se describen diversos tipos de estabilización de suelos.

Figura 2.5. Clasificación de las subrasante según su valor de CBR.

Categoría de subrasante	CBR
Subrasante inadecuada	$CBR < 3$
Subrasante pobre	$3 \leq CBR < 6$
Subrasante regular	$6 \leq CBR < 10$
Subrasante buena	$10 \leq CBR < 20$
Subrasante muy buena	$20 \leq CBR < 30$
Subrasante excelente	$30 \leq CBR$

Fuente: Elaboración propia

2.6. DISEÑO DE UN PAQUETE ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO FLEXIBLE

2.6.1 Método de CBR (valor de soporte)

Fue propuesto por los ingenieros Staton y partes del departamento de carreteras del Estado de California en 1929, desde entonces tanto en Europa como en otros países es utilizado con gran frecuencia, en este método se establece la relación entre la resistencia a la penetración de un suelo y su capacidad de soporte.

Para diferentes valores de CBR y por carga por eje o por rueda se han determinado los respectivos valores de los espesores de pavimentos. De la cual nos proporciona el espesor de las distintas capas de pavimentos con un determinado CBR.

Los diferentes organismos viales y técnicos han elaborado curvas para facilitar este cálculo y en la actualidad se conoce un sin número de gráficos para la determinación de espesores de pavimentos flexibles en función del CBR.

En la construcción de un pavimento flexible, se recomienda que el material para la sub-base tenga un CBR mayor de un 15%. El material para base debe tener un CBR mayor al

40% cuando las cargas por rueda son menores a 10000 libras (4540 kg) como es el caso de las carreteras en general, y un CBR no menor del 80% cuando las cargas por rueda son mayores de 10000 libras, como sucede en la mayor parte de las pistas.

2.7. GENERALIDADES SOBRE EL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

2.7.1. Bagazo

Es el residuo fibroso, obtenido a la salida del último molino del tándem, que, en la fábrica de azúcar, extrae el jugo de la caña. Representa el 28% en peso de la caña que se procesa.

Constituido por cuatro fracciones: fibra (45%), sólidos insolubles (2-3%), sólidos solubles (2-3%) y agua (50%), representa el coproducto de mayor tonelaje y volumen de la producción industrial del azúcar de caña.

2.7.2. Estructura

El bagazo es el residuo o remanente de los tallos de la caña de azúcar después que ésta ha sido sometida al proceso de extracción del jugo azucarado, saliendo del último molino con un 50% de humedad y un contenido residual de sacarosa de alrededor del 4% (base seca).

Desde el punto de vista general de su estructura, el bagazo se caracteriza por su elevada heterogeneidad morfológica y está formado por dos fracciones bien diferenciadas, la fibra, de estructura cristalina, estable químicamente, que brinda rigidez a la planta, y el meollo o parénquima de estructura amorfa y de un alto poder de absorción.

2.7.3. Composición física y química

Composición física

Físicamente el bagazo está constituido por cuatro fracciones cuya magnitud relativa está en dependencia del proceso agroindustrial azucarero, a saber, la designada como fibra o bagazo en la terminología azucarera, con aproximadamente un 45%; los sólidos no solubles entre el 2 y 3%; los sólidos solubles entre el 2 y 3% y el agua en proporción de 51 - 49%.

Composición química

Desde el punto de vista químico el bagazo de la caña de azúcar está compuesto, aproximadamente de 41 - 44% de celulosa, 25 - 27% de hemicelulosas, 20 - 22% de lignina y 8 - 10% de otros componentes, entre estos. La celulosa y hemicelulosas componen la fracción carbohidrática del bagazo a la que se le denomina analíticamente como holocelulosa.

2.7.4. Cenizas volantes

2.7.4.1. Concepto

Las cenizas volantes secas suelen presentarse como una arena o polvo muy fino, suave al contacto y de un color gris más o menos claro, según la proporción de hierro y carbón.

2.7.4.2. Cenizas provenientes de la incineración de biomasa

Se puede definir la biomasa como la materia orgánica de origen animal o vegetal, o procedente de cualquier transformación de los mismos.

2.7.4.3. La puzolanización

Es el proceso mediante el cual las cenizas de un desecho orgánico van a generar un producto químico llamado silicato de calcio el cual se obtendrá bajo un cargo de requerimiento el cual es estar sometido a una temperatura que fluctúe de 700 a 800 °C durante un tiempo de 2 horas en combustión para poder obtener un grado de silicato de calcio óptimo.

Sub rasante de carreteras con cenizas es utilizado como adición en los suelos para modificar el contenido químico de este, en ello la reacción es positiva y reduce los grados de humedad y mejor compactación obteniendo garantías en su resistencia para el uso de transitabilidad.

2.8. MARCO REFERENCIAL

2.8.1. Combinación suelo-ceniza

Las referencias para comenzar a desarrollar el presente trabajo de investigación son las investigaciones de Axel Franco Castro en Perú en el 2017 en su título de tesis; Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de

subrasante. La ceniza de cáscara de arroz utilizada en la investigación presentaba un color gris, debido a que la temperatura de quema fue controlada en hornos industriales a más de 700 grados centígrados. Para el mejoramiento del suelo uso varias combinaciones de suelo ceniza; 10, 20, 30 y 40% de ceniza donde para las humedades óptimas de compactación, el valor de CBR del suelo fue 6.91% y el de la mezcla suelo más 20% de ceniza de cáscara de arroz más 38.50%, es decir, se observó un aumento de más de 6 veces en el CBR de la mezcla con relación al del suelo.

La investigación de Mamani Barriga Lux Eva y Yotaco Quispe Alejandro Jesús en 2017 en su título de tesis; Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho.

Se observa que el valor de CBR se incrementa notablemente desde 7.7% correspondiente a un suelo arcilloso hasta un valor de CBR de 23.5% para una combinación de material arcilloso en un 60% y ceniza volante en un 40%. Se puede concluir que la arcilla en combinación con la ceniza volante da buenos resultados mejorando la resistencia del suelo arcilloso.

El Manual de Carreteras Suelos, Geología y Pavimentos 2013 del Perú, es un manual que tiene una información muy buena para consultar y sacar criterios para aplicarlos en la en los proyectos de ingeniería.

2.9. MARCO NORMATIVO

El presente trabajo de investigación estará basado en los ensayos de laboratorio de suelos reglamentados por la norma AASHTO y ASTM.

2.10. ANÁLISIS Y TENDENCIAS

El marco teórico de esta investigación, en su primera parte señala conceptos sobre los suelos y a continuación hace una conceptualización de los tipos de suelos. Pero esta conceptualización está más orientada a los suelos finos, plásticos, como son las arcillas. Como sabemos las arcillas son las que presentan más problemas a la hora de ejecutar una obra civil, porloque en esta teoría se enfoca a estudiar estos suelos conceptualizando sus propiedades, sus características y los diferentes ensayos que se hacen en laboratorio de suelos para su clasificación del mismo para hacer un análisis de sus propiedades, etc.

por otra parte, hace una conceptualización sobre el bagazo de caña de azúcar, su origen, su composición física y química.

También hace referencia sobre las cenizas volantes haciendo una breve descripción de su origen y del uso que se lo da en las diferentes construcciones civiles

Como se puede observar toda la teoría está orientada o tiene la tendencia a estudiar los suelos finos plásticos como son las arcillas buscando alternativas de mejorar su capacidad portante mediante agentes estabilizantes como es el caso de las cenizas volantes provenientes de la incineración de biomasa vegetal como es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

2.11. POSICIÓN DEL INVESTIGADOR

Es importante destacar que al momento de mejorar un suelo plástico se debe tener mucho cuidado con la selección del material estabilizante a utilizar, para poder tener un producto con mejores propiedades de resistencia mecánica, el autor considera que también es importante tomar en cuenta la cantidad en porcentaje de material estabilizante a utilizar a la hora de realizar una mejora de un suelo plástico, ya que con la adición del mismo, es con el fin de aumentar la estabilidad, resistencia, disminuir su plasticidad y su expansión, por esta razón debe existir un control estricto en la cantidad que se añadirá al suelo plástico.

CAPÍTULO III
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

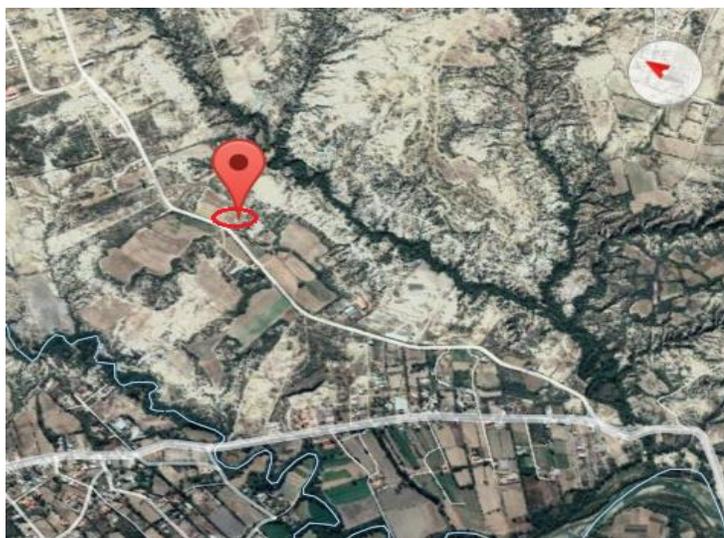
3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Las zonas de estudio para la extracción de las muestras, se dividen en dos unidades localizadas en el departamento de Tarija (Bolivia) provincia Cercado, zonas periurbanas de la ciudad capital Tarija.

La primera unidad se encuentra ubicada en la zona denominada El Temporal carretera a San Jacinto Norte, entrando por el camino al matadero municipal de la ciudad de Tarija con las siguientes coordenadas UTM: (325624.69m O; 7613525.61m S). El terreno está compuesto por material fino, arcillas orgánicas de color café amarillento con material orgánico. A continuación, en las siguientes figuras 3.1 y 3.2 se visualizarán las áreas de estudio.

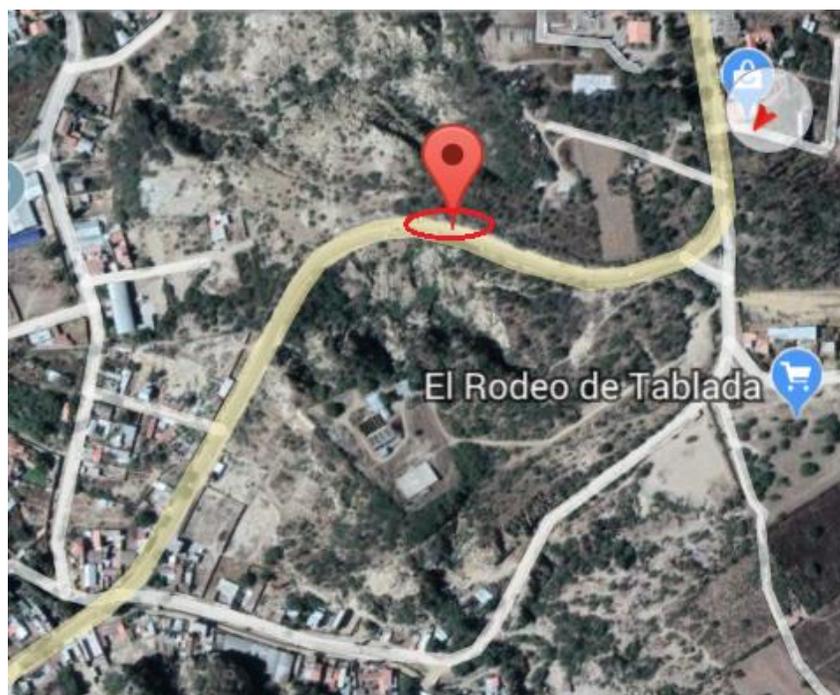
La segunda unidad se encuentra ubicada sobre la carretera hacia San Jacinto en el lugar denominado la Cuesta del Gallinazo con las siguientes coordenadas UTM: (320279m O; 7615924.03m S), la cual presenta un corte cajón con dos taludes del cual se extrajo la muestra. El terreno está compuesto por varias capas de material fino con contenido de arcillas de color plomo oscuro de textura muy fina.

Figura 3.1. Mapa del área de extracción de la muestra N° 1 zona El Temporal.



Fuente: Programa Google Earth

Figura 3.2. Mapa del área de extracción de la muestra N° 2 Cuesta del Gallinazo.



Fuente: Programa Google Earth

3.2. MUESTREO DE MATERIALES

Para la selección de la muestra de los suelos. Se tuvo que tomar en cuenta que las zonas cuenten con material fino arcilloso y presenten comportamiento plástico expansivo.

Con este objetivo fue necesario hacer un previo reconocimiento del área y sus aptitudes geotécnicas. Las muestras se extrajeron cumpliendo con las especificaciones y siguiendo los pasos de las guías de laboratorio.

3.2.1. Muestreo zona 1 de estudio: zona El Temporal

Para este muestreo de la zona El Temporal, se procedió a excavar unos 20cm en el talud que se originó por la acción de una pala cargadora, para eliminar las posibles impurezas superficiales, se tomó una pequeña muestra en bolsa de nylon para evitar que pierda su humedad natural, la muestra restante se tomó en sacos plásticos para realizar los respectivos ensayos en laboratorio.

Figura 3.3. Zona de procedencia del material extraído: muestra 1 (arcilla orgánica color café amarillento).



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Muestreo zona 2 de estudio: Cuesta del Gallinazo

Para este muestreo se procedió a cavar con el pico unos 10 a 15cm para sacar o eliminar las posibles impurezas superficiales que presenta el talud, luego se sacó la muestra o material fino requerido para el estudio. Una pequeña muestra se colocó en bolsa de nylon para evitar que pierda la humedad natural del suelo, las demás muestras se colocaron en sacos plásticos para la realización de los respectivos ensayos de laboratorio, esto debido a que se trabajará con muestra seca. En los siguientes gráficos se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.4. Zona de procedencia del material extraído: muestra 2 (arcilla color plomo oscuro).



Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Selección del bagazo de caña de azúcar, proceso de incineración y obtención de la ceniza de bagazo de caña de azúcar(CBCA)

El bagazo de caña de azúcar utilizado para esta investigación fue obtenido del ingenio azucarero Industrias Agrícolas de Bermejo S.A. (IABSA), que está situado en la segunda sección de la provincia Arce del departamento de Tarija, a unos 190 km de la ciudad capital Tarija.

El proceso de incineración o quema del bagazo de caña de azúcar, se realizó mediante un método rústico para lo que se utilizó un horno de barro (de hornear pan) porque no se cuenta con un horno industrial para controlar la temperatura. El proceso consistió, primero en secar el material bajo los rayos del sol para así facilitar su incinerado, posteriormente se introdujo el bagazo ya seco dentro del horno de barro, asegurándonos de que esté limpio y seco para evitar de esta forma que entre en contacto con algún agente externo y se mezcle alterando su composición. El tiempo de incineración fue aproximadamente de 3 horas. Después de obtener la ceniza se dejó enfriar para luego almacenarla en bolsas plásticas cerradas y en ambiente seco.

Figura 3.5. Proceso de obtención de la ceniza de bagazo de caña de azúcar.



Fuente: Elaboración propia

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Para conocer las propiedades de los suelos utilizados en el proyecto, se tomaron muestras en todo el desarrollo del mismo, posteriormente, en el laboratorio de suelos se determinaron sus propiedades y clasificación de los mismos según la norma AASHTO.

3.3.1. Análisis granulométrico (ASTM D 422 / AASHTO T88)

La práctica o ensayo de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de las partículas presentes en el suelo. El ensayo de análisis granulométrico por tamizado se realizó mediante el método del lavado, se pesó unos dos kilos como peso total y se procedió a realizar el lavado en la malla N° 200 de acuerdo a la norma AASHTO T88, todo el material retenido en la malla N° 200 se lo hizo secar en el horno para luego tamizarlo por las mallas N° 10, 40 y 200. Para luego realizar el pesaje del material retenido en cada malla.

Figura 3.6. Lavado del suelo por la malla N° 200.

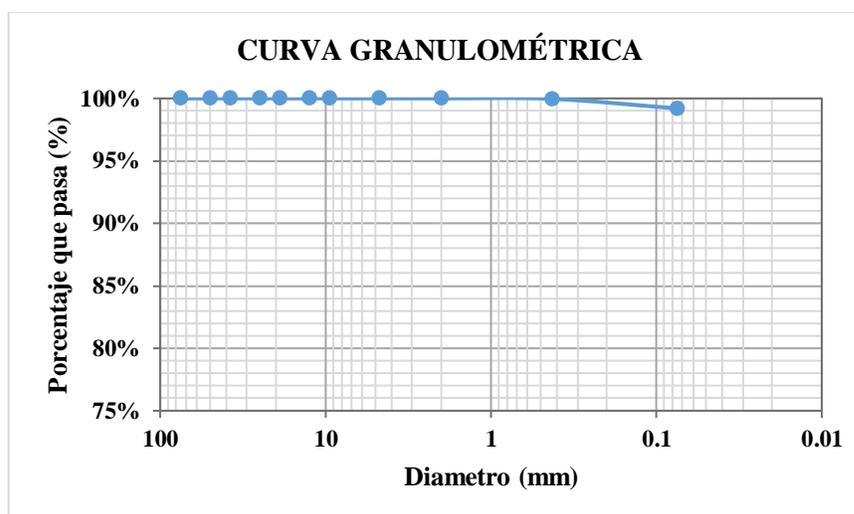


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1. Resultado del análisis granulométrico.

Tamaño (mm)	Tamiz N°	% que pasa del total
75	3"	100
50	2"	100
37.50	1 1/2"	100
25.00	1"	100
19.00	3/4"	100
12.50	1/2"	100
9.50	3/8"	100
4.75	N°4	100
2.00	10	100
0.425	40	99.96
0.075	200	99.2
	base	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7. Curva granulométrica.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ensayo del hidrómetro

El ensayo del hidrómetro se lo realizó con el objetivo de poder determinar los diámetros de las partículas que pasan la malla N° 200, para así poder determinar los porcentajes de limo y arcilla y completar la curva granulométrica.

El tamaño requerido aproximado de la muestra para los suelos finos como son los limos y arcillas esta entre 50 y 60 gramos (peso seco).

Figura 3.8. Ensayo del hidrómetro para los dos tipos de suelos plásticos.

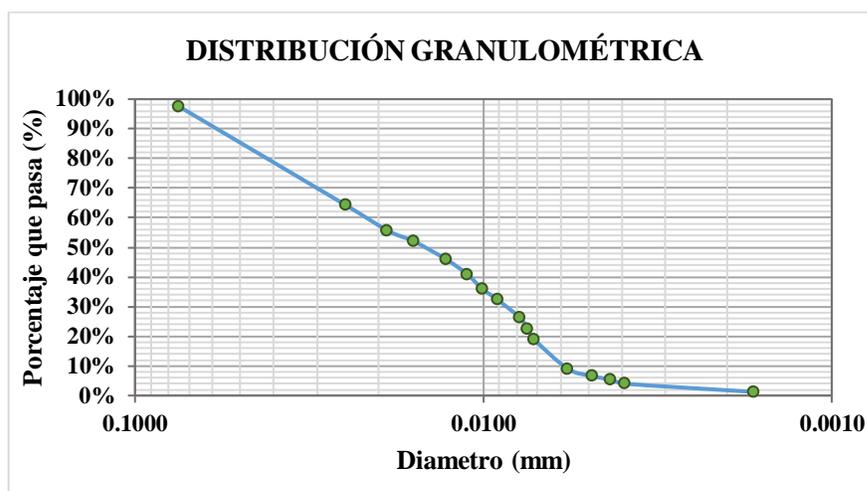


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2. Distribución de limo y arcilla determinado por el hidrómetro.

% pasa N° 200	97.63
% de arcilla	2.3
% de limo	97.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9. Curva granulométrica.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Límites de Atterberg (A ASTM D4318 /ASHTO T90 T89)

Los límites de plasticidad se realizaron conforme a la norma y esto corresponde a la humedad o sea al porcentaje de agua respecto al peso de los sólidos en que los finos de los materiales pasan de una consistencia a otra.

Límite líquido: se determina mediante el método de la cuchara de casa grande (NTL-105). El ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que se puede contener en una pasta más o menos formada de unos 100 gramos de suelo seco que pasa la malla N° 40, esta pasta se lo coloca en el equipo casa grande con una espátula, luego se lo hace la rasuración con el ranurador y luego mediante los golpes se cierre la ranura. El ensayo se dá por valido cuando se obtiene determinaciones entre 15-20; 20-25; 25-30; 30-35 y 35- 40 N° de golpes. La humedad correspondiente al límite líquido se da a los 25 golpes y se determina interpolando mediante una gráfica normalizada.

Límite plástico (NLT-106): Se determina en base a la menor cantidad de humedad de un suelo que permita realizar unos rollitos de 3mm de diámetro aproximadamente hasta que presenten pequeñas fisuras. Esto se repite unas 3 veces como mínimo, se pesarán los rollitos en las cápsulas para luego dejarlos secar en el horno.

Figura 3.10. Realización del ensayo de límite líquido y plástico.

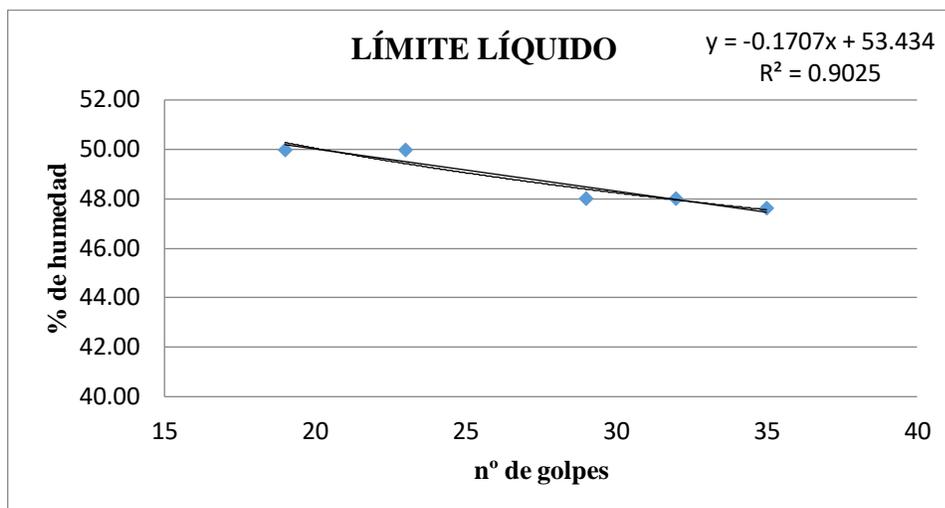


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Distribución de los límites de Atterberg.

Límite Líquido (LL)
49
Límite Plástico (LP)
31
Índice de plasticidad (IP)
18
Índice de Grupo (IG)
13

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Limite líquido.

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Compactación (AASHTO T-180 / ASTM D1557)

El ensayo de proctor se realizó por el método de la norma (AASHTO T-180 / ASTM D1557) modificado y permite conocer el contenido de humedad óptimo (CHO) de un suelo para alcanzar una densidad máxima aplicando una energía de compactación determinada, en este caso se compacto 5 capas de 25 golpes cada capa.

El suelo al tener contacto con el agua y al ser mezclado, facilita su compactación de un suelo seco para poder encontrar su humedad óptima y así alcanzar la máxima densidad de un suelo con una misma energía de compactación.

La prueba es de vital importancia para controlar la calidad de los procesos de compactación que se le dan a las capas bases y sub bases que varían entre 95% y 100%.

el ensayo consiste en preparar unos 3 kilogramos de suelo seco y mezclarlo en una fuente con una cierta cantidad de agua, luego se procede a compactar en el cilindro metálico en 5 capas consecutivas con la misma energía de compactación, una vez compactado se enraza y se pesa el molde más suelo húmedo, posteriormente se desmolda y se saca una muestra de suelo compactado de la parte media o central para colocarlo en una cápsula, pesarlo y hacer secar en el horno. Este procedimiento se repite por 5 veces.

Figura 3.12. Realización del ensayo de compactación.

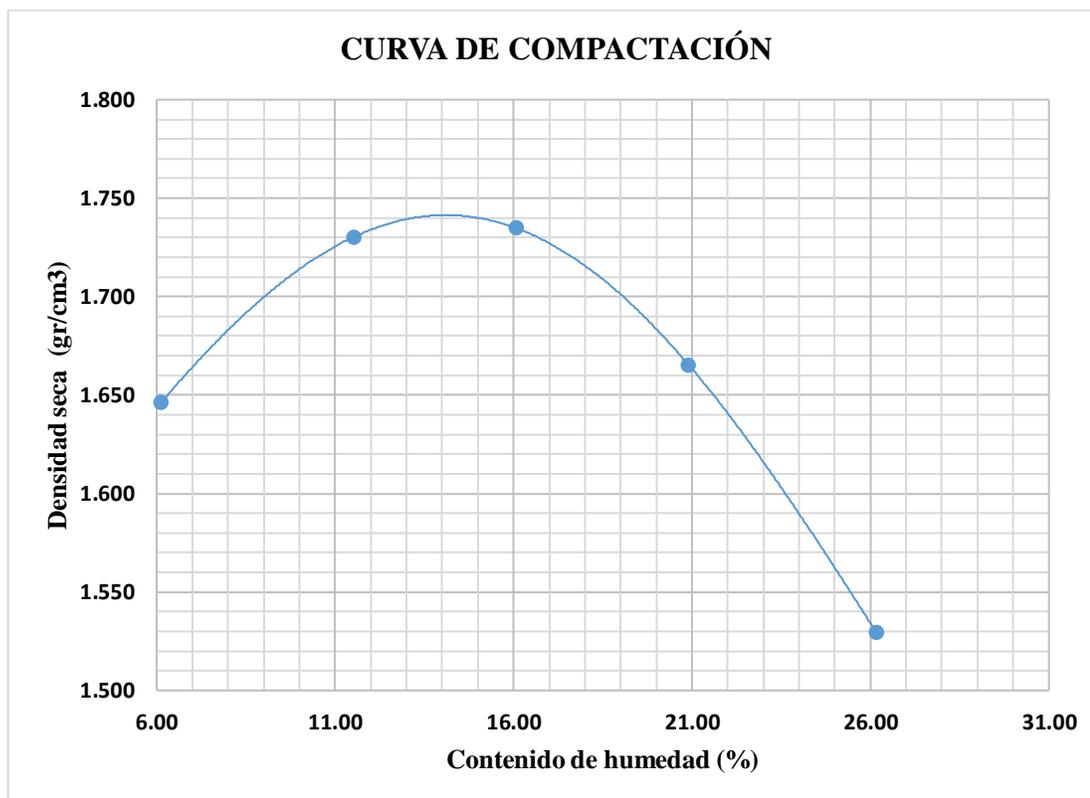


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Contenido de humedad óptima y densidad máxima seca.

Humedad óptima:	14.3	%
Densidad máxima seca :	1.74	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13. Curva de compactación.

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Relación de Soporte de California CBR (ASTM D1883 / AASHTO T-193)

El ensayo de C.B.R se realizó de acuerdo a la norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa subrasante, base y sub-base de una carretera.

Para obtener los diferentes CBR se utilizaron tres moldes con diferente energía de compactación; la primera con 12 golpes, la segunda con 25 golpes y la tercera con 56 golpes por cada molde.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua, para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como la capa subrasante de una carretera y de esta forma obtener los CBR de los suelos bajo las condiciones más críticas, esto durante un periodo mínimo de 96 horas, se colocan unas pesas en forma de herradura sobre los moldes para simular las

cargas tanto de los vehículos como la de la estructura del pavimento y por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas con un extensómetro debidamente calibrado.

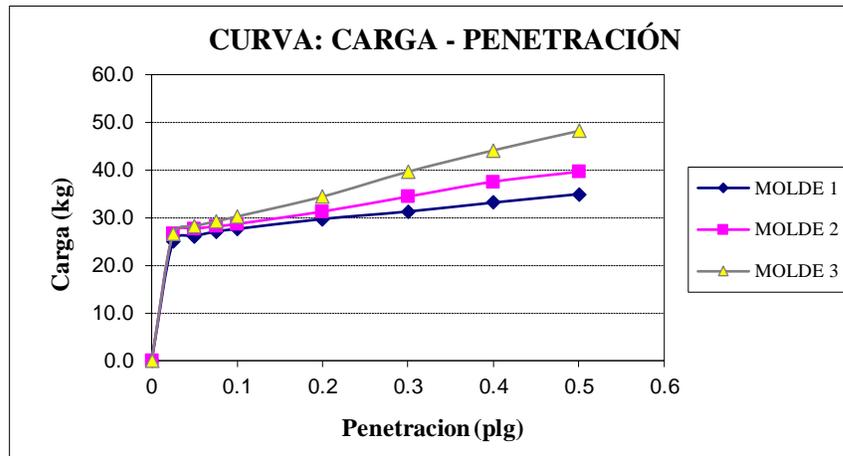
El ensayo de penetración se basa en la aplicación de una presión a una velocidad normalizada de forma creciente efectuada mediante la prensa a la que va acoplado un pistón de sección anular sobre la muestra de suelo compactado con la humedad óptima.

Luego de hacer el ensayo de penetración se procede a sacar muestras de la parte superior, inferior y segundo superior para determinar sus densidades.

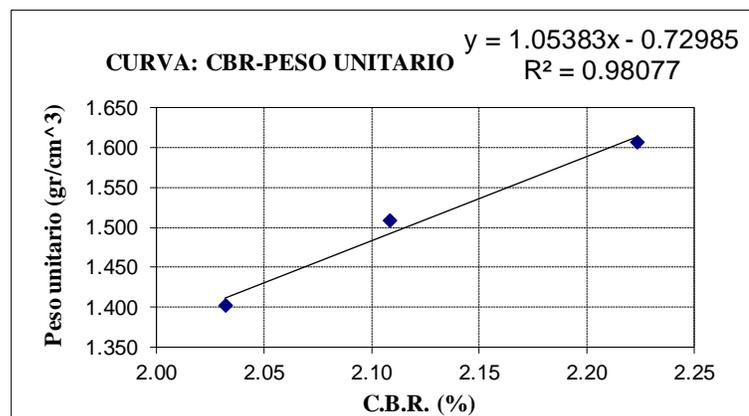
Figura 3.14. Realización del ensayo de CBR.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15. Curva de carga vs Penetración.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Curva CBR.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. CBR al 100% y al 95% de la densidad máxima.

CBR 100% D.máx
2.34 %
CBR 95% D.máx.
2.26 %

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Características de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

3.3.6.1. Origen de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

La ceniza de bagazo de caña de azúcar tiene su origen en el tallo de la caña de azúcar, planta proveniente de la familia de las poaceas. La caña de azúcar está constituida por tallos cilíndricos, comúnmente llenos de una especie de pulpa de color blanco, interrumpidos de trecho en trecho por nudos llenos de hojas que nacen de estos nudos y abrazan al tallo.

El bagazo de caña de azúcar proviene o es el resultado de la molienda de la caña de azúcar.

3.3.6.2. Características de la ceniza del bagazo de caña de azúcar

La constitución de la ceniza de bagazo de caña de azúcar es aproximadamente un 10% en peso del bagazo de caña de azúcar.

Cuando el bagazo de caña de azúcar es secado posteriormente es quemado en pampa o en campo abierto las cenizas estarán compuestas mayormente por sílice cristalina menos reactiva, con un porcentaje bajo de dióxido de sílice (SiO_2), lo cual hace que tenga baja actividad puzolánica.

Para esta investigación el quemado del bagazo de caña de azúcar fue en horno rústico de barro (horno utilizado para cocinar pan) aproximadamente unas 3 horas, luego se dejó enfriar la ceniza lo necesario para luego tamizarla por la malla N° 10 y almacenada en bolsas de nylon.

Figura 3.17. Proceso para la obtención de la ceniza de bagazo de azúcar (imágenes del bagazo, horno y la ceniza).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 6. Resultados del análisis físico y químico realizado a la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA).

Resultados de los ensayos de la CBCA			
N°	Tipo de análisis	Unidad	Resultados
1	Análisis físico:		
	color		Gris con presencia de residuos carbonosos
	Ph		10.85
	% de humedad	%	0.81
2	Análisis químico:		
	% SiO ₂	%	10.07

Fuente: Elaboración propia

3.4. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS PARA LA CARACTERIZACIÓN

Con el objetivo de obtener información geotécnica del suelo a ensayar, se realizaron ensayos de laboratorio para poder determinar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo arcilloso y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Para lo que se utilizaron una serie de instrumentos y equipos que se encuentran en el laboratorio de suelos de carrera de ingeniería civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Todos estos instrumentos y equipos utilizados son de alta confiabilidad ya que están normados por IBNORCA.

3.4. RESUMEN DE RESULTADOS

3.4.1. Resultados de la caracterización de la zona 1 (El Temporal)

Muestra 1	Granulometría											Límites		
	3"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°200	LL	LP	IP
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.96	99.20	49	31	18
2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.89	98.26	50	32	17
3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.91	98.35	50	33	17

Muestra 1	Clasificación		Hidrómetro		Compactación		CBR	
	AASHTO	SUGS	% Arcilla	% Limo	D.M.S.	C.H.O.	100%	95%
1	A-7-5(13)	OL	2.3	97.7	1.74	14.30	2.34	2.26
2	A-7-5(13)	OL	2.3	97.7	1.74	14.30	2.58	2.34
3	A-7-5(13)	OL	2.3	97.7	1.74	14.30	2.77	2.53

3.4.2. Resultados de la caracterización de la zona 2 (Cuesta del Gallinazo)

Muestra 1	Granulometría											Límites		
	3"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°200	LL	LP	IP
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.19	97.43	33	22	11
2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.26	97.55	30	19	11
3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.29	97.63	31	20	11

Muestra 1	Clasificación		Hidrómetro		Compactación		CBR	
	AASHTO	SUGS	% Arcilla	% Limo	D.M.S.	C.H.O.	100%	95%
1	A-6 (8)	CL	6.15	93.85	1.784	15.0	2.36	2.23
2	A-6 (8)	CL	6.15	93.85	1.784	15.0	2.25	2.15
3	A-6 (8)	CL	6.15	93.85	1.784	15.0	2.49	2.31

CAPÍTULO IV

**DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS
PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE LOS SUELOS
PLÁSTICOS AL ADICIONAR CENIZAS DE BAGAZO DE
CAÑA DE AZÚCAR**

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE LOS SUELOS PLÁSTICOS AL ADICIONAR CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

4.1. PROCESO DE ESTABILIZACIÓN CON LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (CBCA)

4.1.1. Preparación de las mezclas

Para la preparación de las mezclas se utilizará la siguiente secuencia suelo más porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar (S+CBCA).

Los porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) se especificaron como un porcentaje en peso seco del suelo.

Los materiales suelo-CBCA fueron preparados por la mezcla en seco de los componentes con la posterior adición de agua, que mezclados bajo una adecuada dosificación nos dará un producto que cumple con las especificaciones necesarias de una buena estabilización.

Para el porcentaje de CBCA se procedió a dar rangos un tanto elevados ya que no se cuenta con mucha información; por tanto, la dosificación para hallar el porcentaje óptimo de la mezcla S-CBCA es la siguiente:

Para el suelo de la zona 1 El Temporal

Mezcla 1: S-5% CBCA

Mezcla 2: S-8% CBCA

Mezcla 3: S-10% CBCA

Mezcla 4: S-12% CBCA

Mezcla 5: S-20% CBCA

Mezcla 6: S-40% CBCA

Para el suelo de la zona 2 la Cuesta del Gallinazo

Mezcla 1: S-8% CBCA

Mezcla 2: S-10% CBCA

Mezcla 3: S-12% CBCA

4.1.2. Ensayos de control

los ensayos de control para la estabilización de suelos son los siguientes:

Ensayo de límites de Atterberg

Ensayo de compactación (proctor modificado)

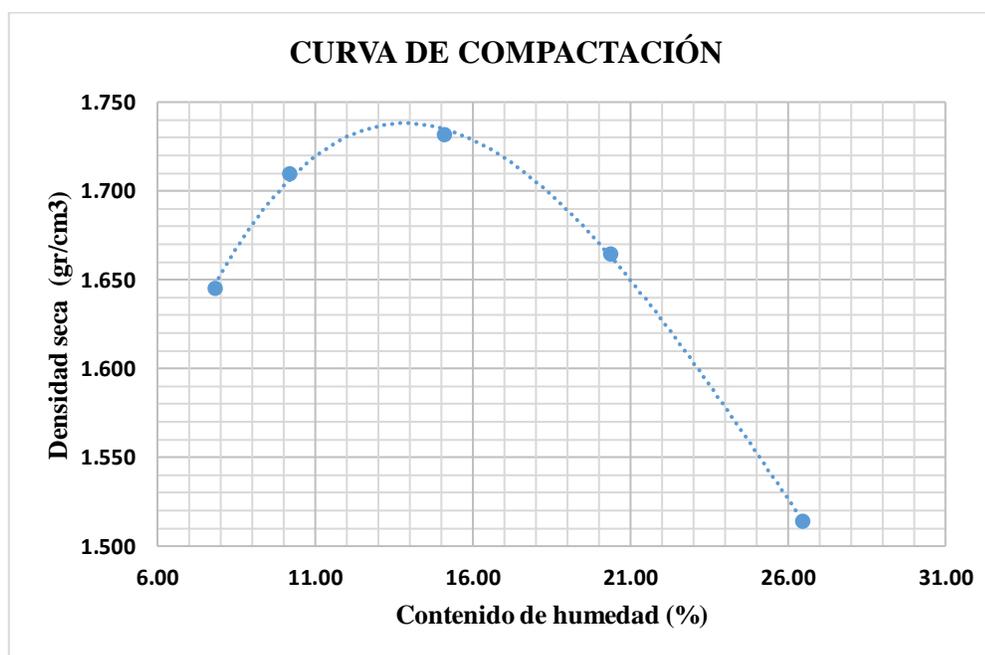
Ensayo de CBR y expansión

A continuación, se detallan las planillas de tablas y graficas de los resultados de los ensayos obtenidos en laboratorio.

4.1.2.2. Compactación

Resultados del ensayo de compactación para la zona 1 El Temporal

Figura 4.1. Curva de compactación con 5% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

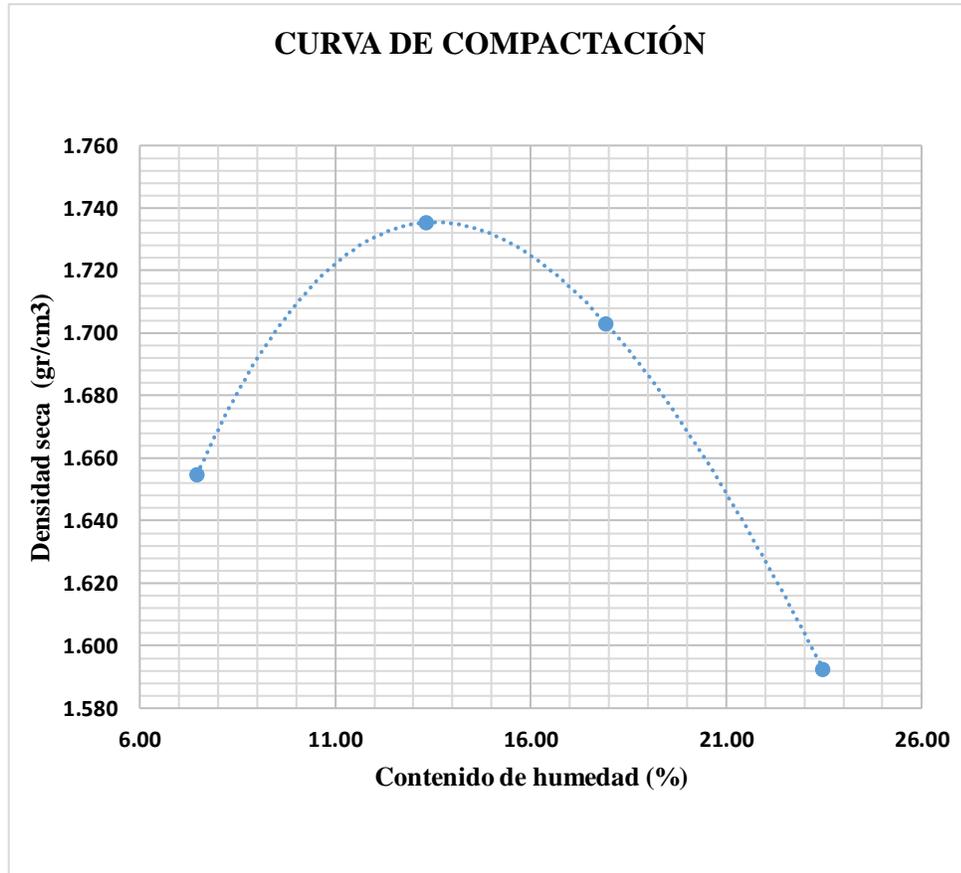
Tabla 4.1. Resultados de compactación con 5% de CBCA zona 1.

Humedad óptima:	13.5	%
Densidad máxima seca :	1.739	gr/cm3

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 1 El Temporal

Figura 4.2. Curva de compactación con 8% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

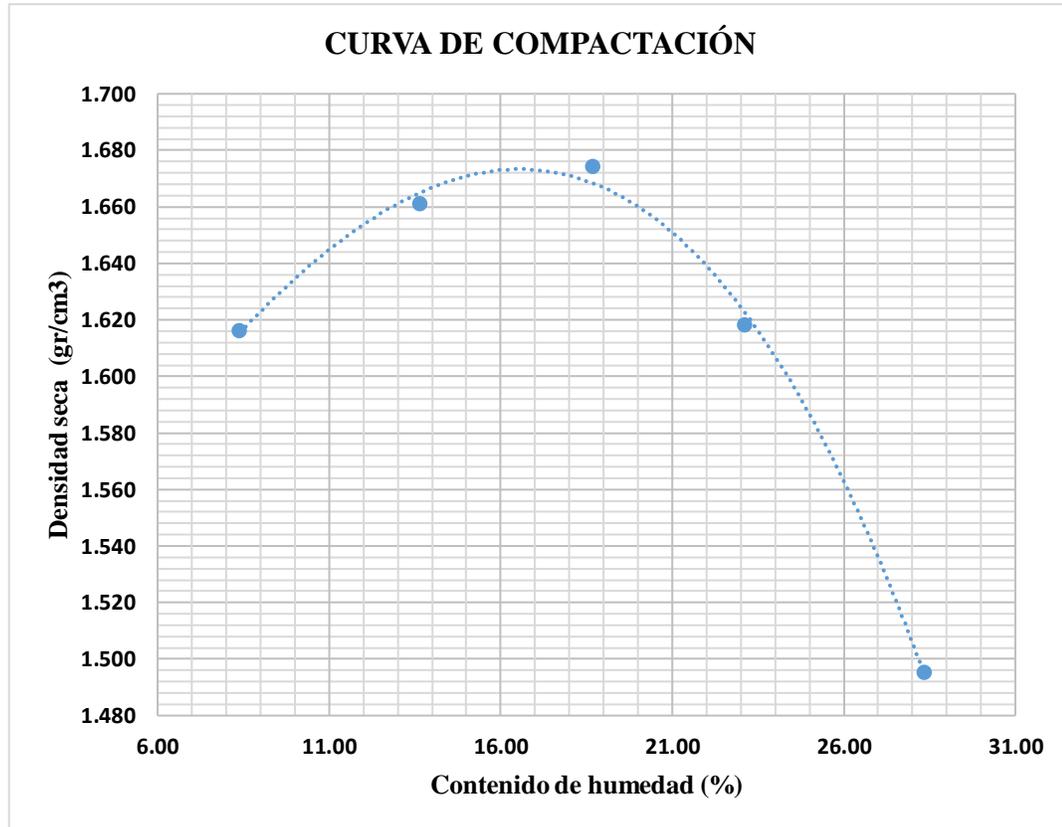
Tabla 4.2. Resultados de compactación con 8% de CBCA zona 1.

Humedad óptima:	13.8	%
Densidad máxima seca :	1.736	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.3. Curva de compactación con 8% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

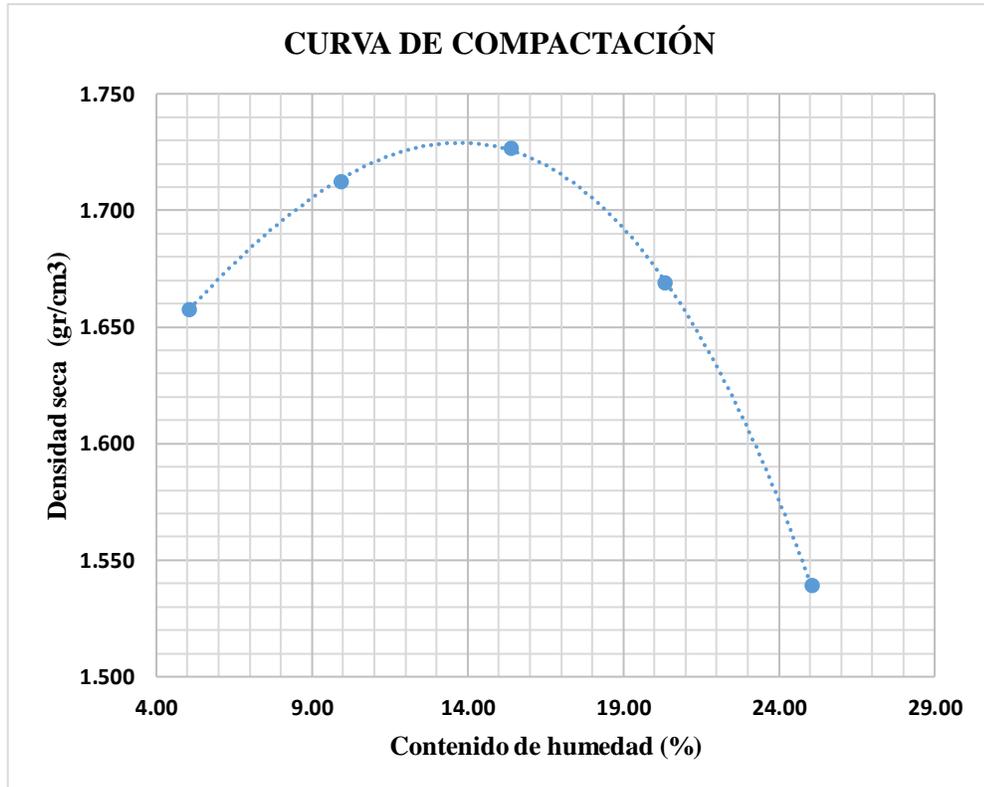
Tabla 4.3. Resultados de compactación con 8% de CBCA zona 2.

Humedad óptima:	16.5	%
Densidad máxima seca :	1.67	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 1 El Temporal

Figura 4.4. Curva de compactación con 10% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

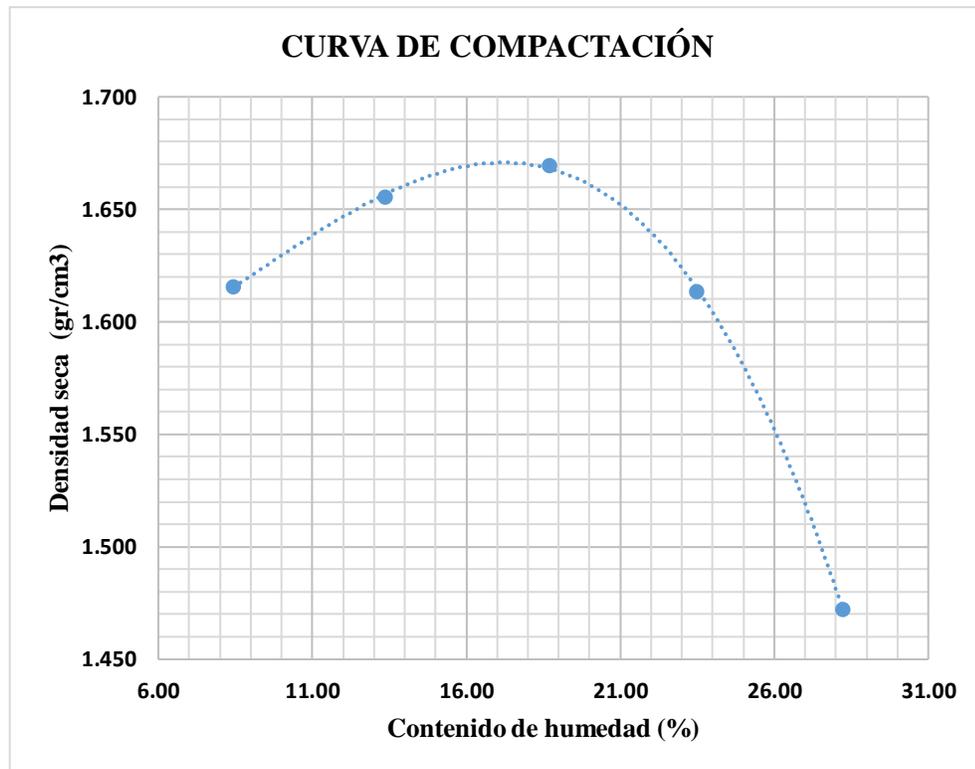
Tabla 4.4. Resultados de compactación con 10% de CBCA zona 1.

Humedad óptima:	14	%
Densidad máxima seca :	1.733	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.5. Curva de compactación con 10% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

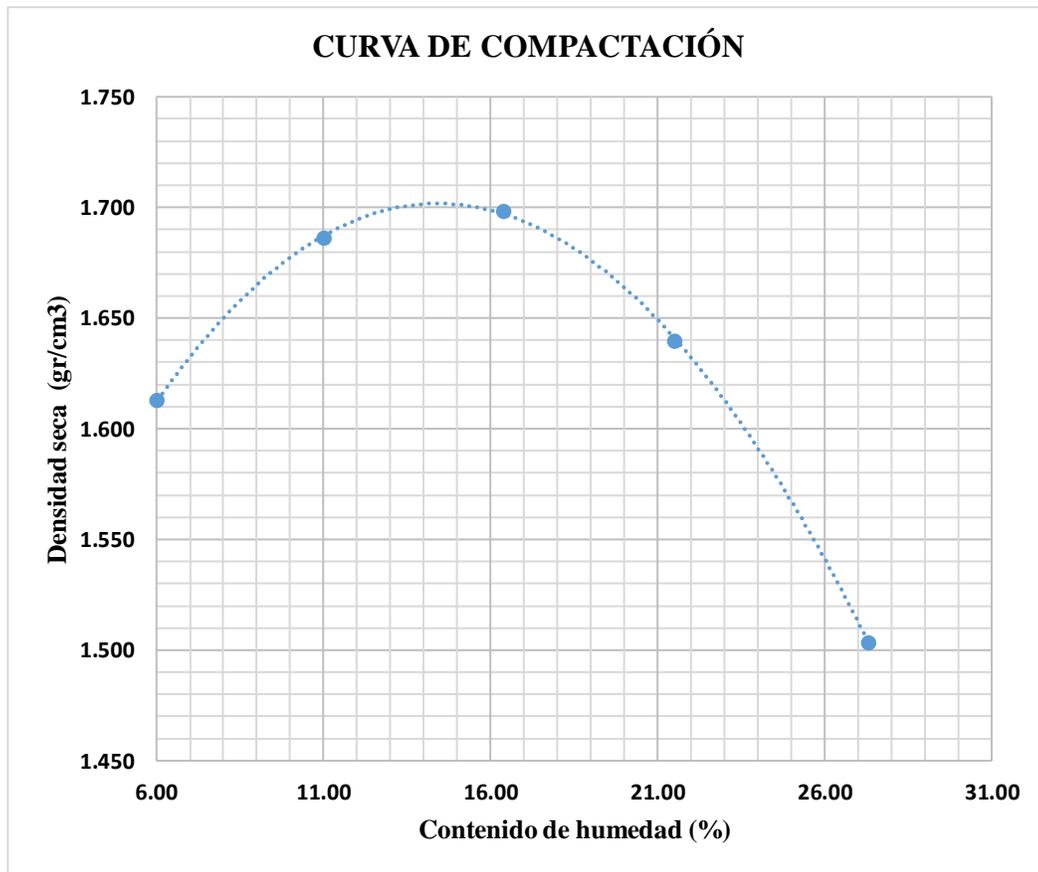
Tabla 4.5. Resultados de compactación con 10% de CBCA zona 2.

Humedad óptima:	17.5	%
Densidad máxima seca :	1.668	gr/cm3

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 1 El Temporal

Figura 4.6. Curva de compactación con 12% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

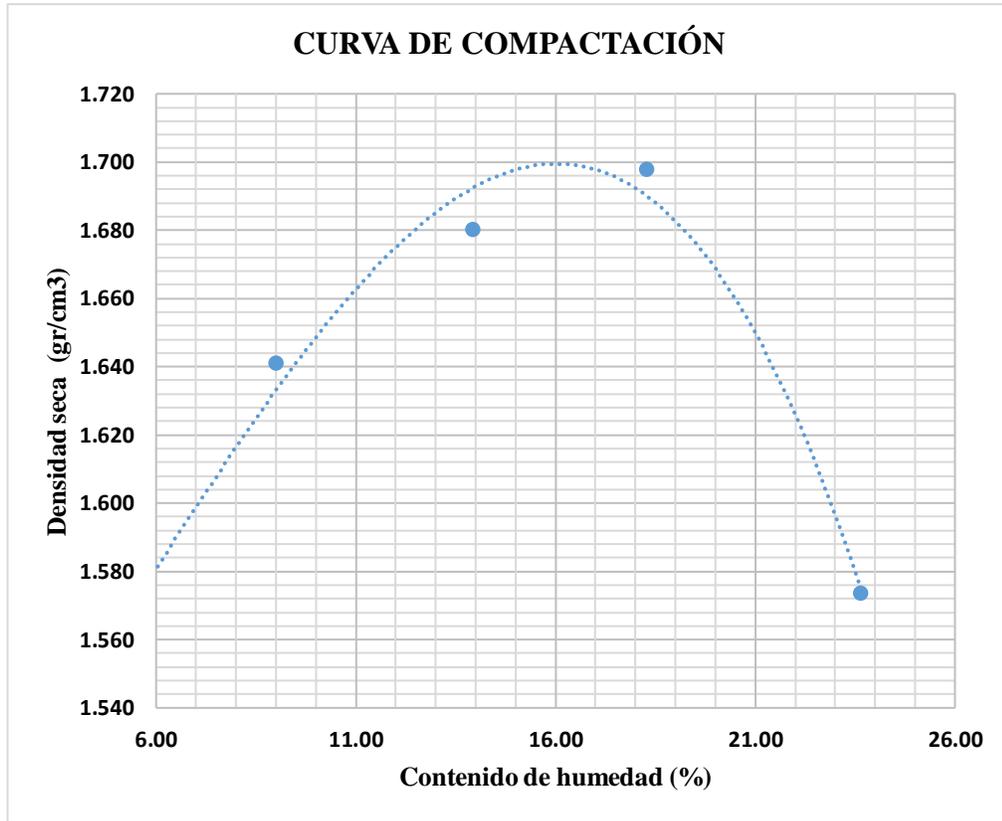
Tabla 4.6. Resultados de compactación con 12% de CBCA zona 1

Humedad óptima:	14.5	%
Densidad máxima seca :	1.702	gr/cm3

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.7. Curva de compactación con 12% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

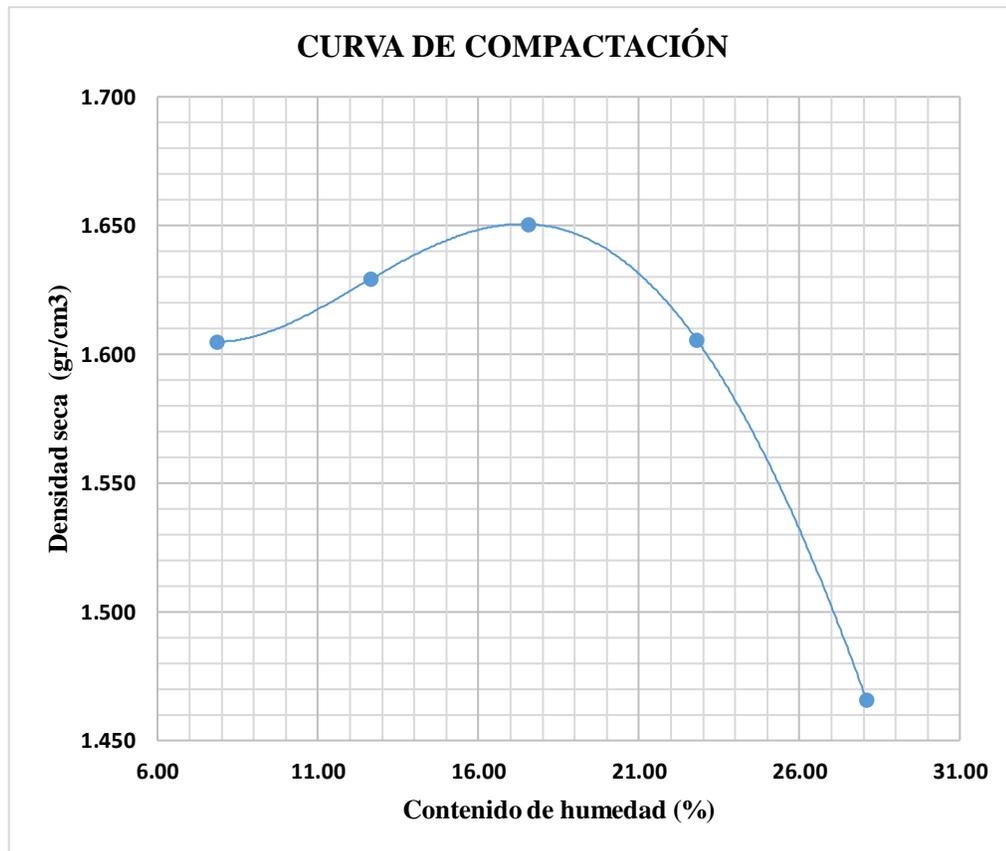
Tabla 4.7. Resultados de compactación con 12% de CBCA zona 2.

Humedad óptima:	16.2	%
Densidad máxima seca :	1.7	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 1 El Temporal

Figura 4.8. Curva de compactación con 20% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

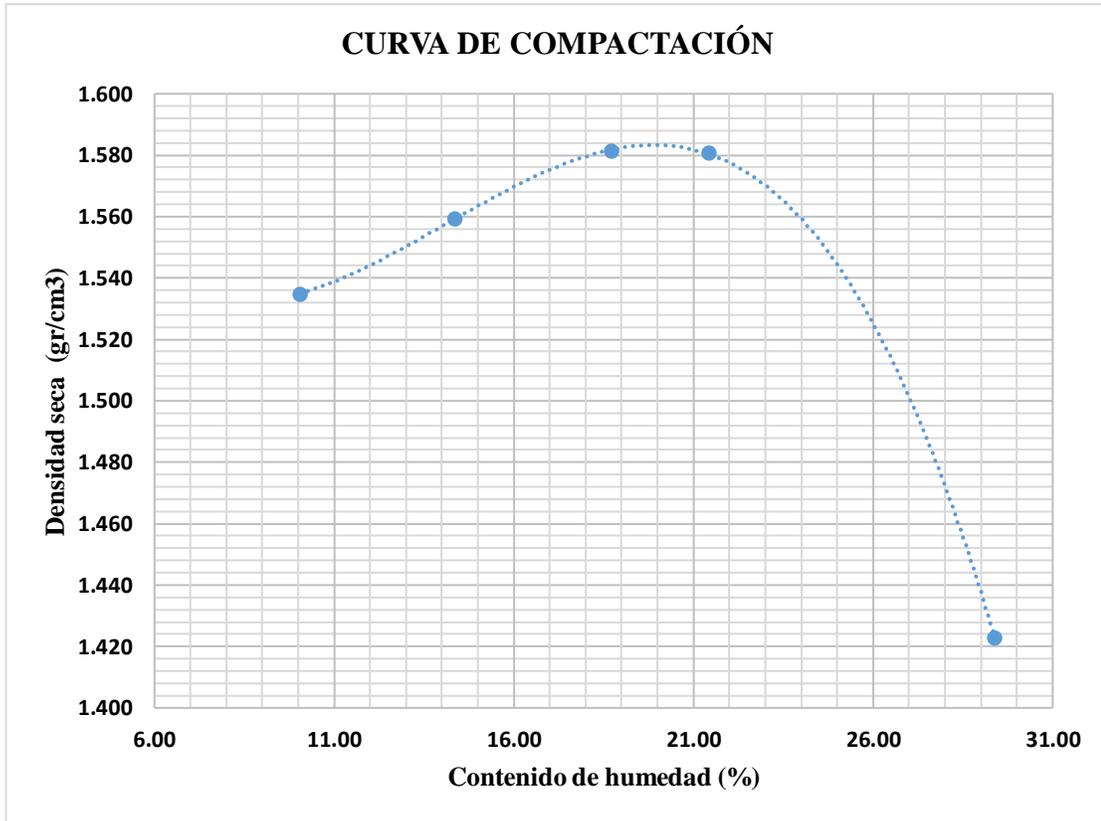
Tabla 4.8. Resultados de compactación con 20% de CBCA zona 1.

Humedad óptima:	17.5	%
Densidad máxima seca :	1.651	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 1 El Temporal

Figura 4.9. Curva de compactación con 40% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

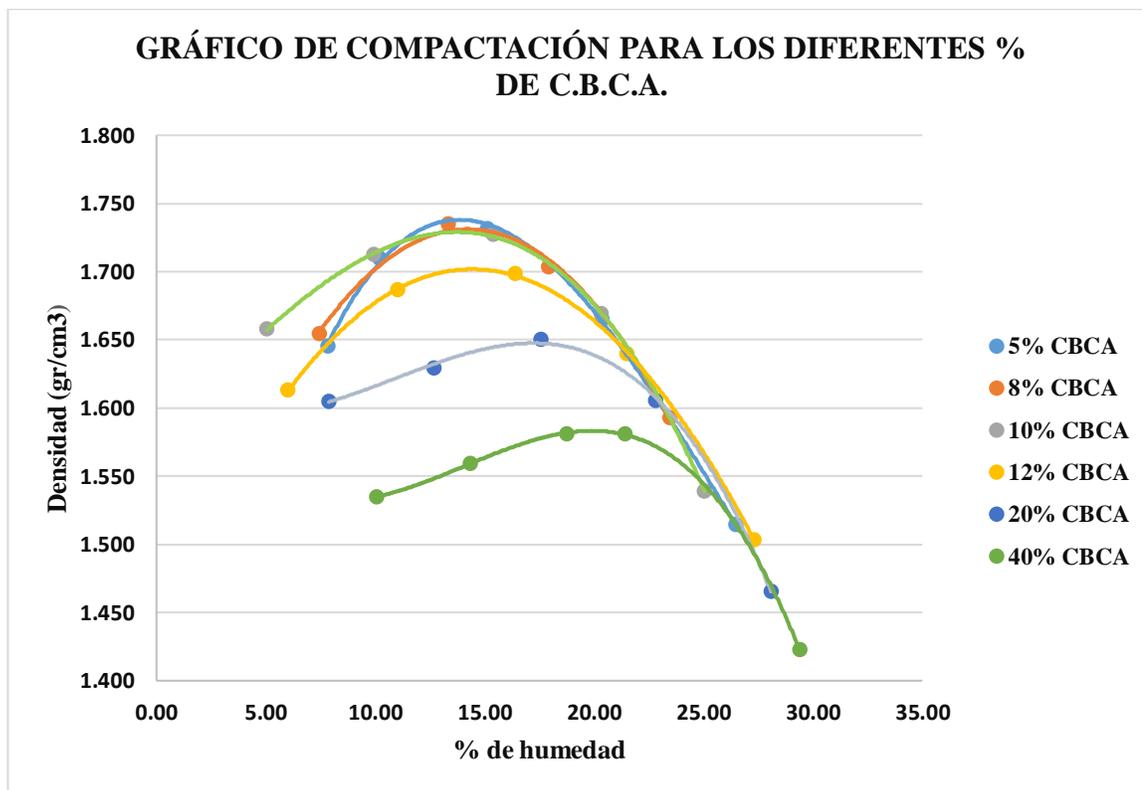
Tabla 4.9. Resultados de compactación con 40% de CBCA zona 1.

Humedad óptima:	19.5	%
Densidad máxima seca :	1.58	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación con los diferentes porcentajes de CBCA para la zona 1 El Temporal

Figura 4.10. Curva de compactación con 5-8-10-12-20-40% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

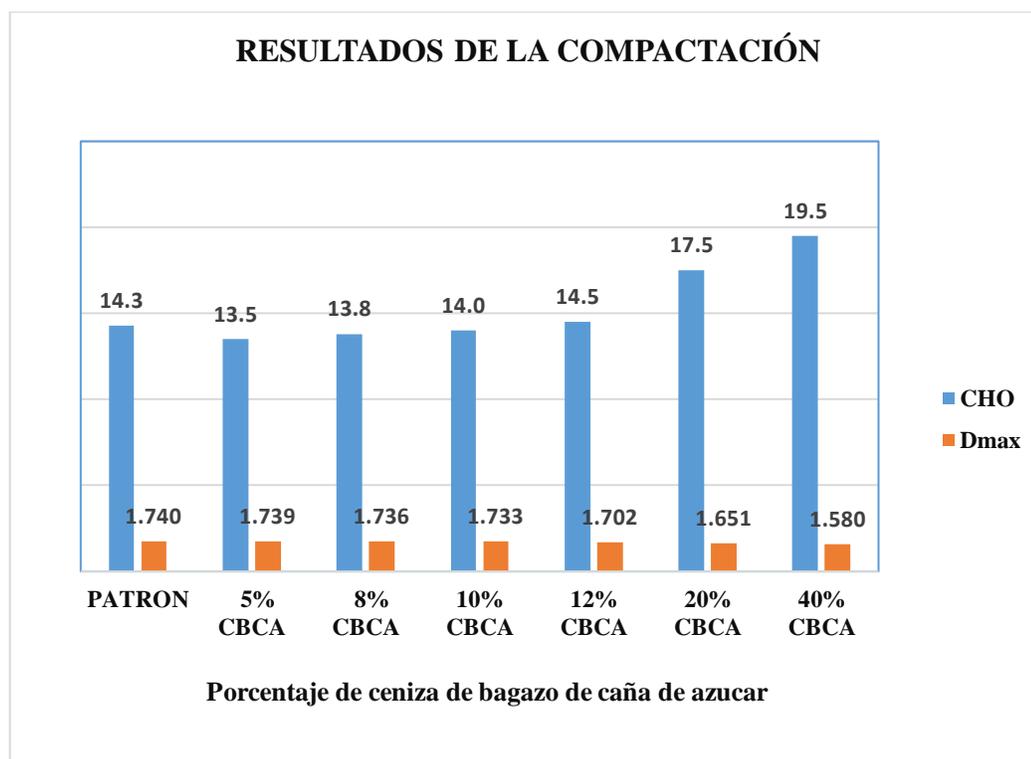
Tabla 4.10. Resultados de compactación con 5-8-10-12-20-40% de CBCA zona 1.

% de CBCA	5%	8%	10%	12%	20%	40%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.739	1.736	1.733	1.702	1.651	1.58
Humedad óptima (%)	13.5	13.8	14	14.5	17.5	19.5

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación con los diferentes porcentajes de CBCA para la zona 1 El Temporal

Figura 4.11. Gráfico de barras del resultado de la compactación de suelo natural (patrón) y 5-8-10-12-20-40% de CBCA zona 1.



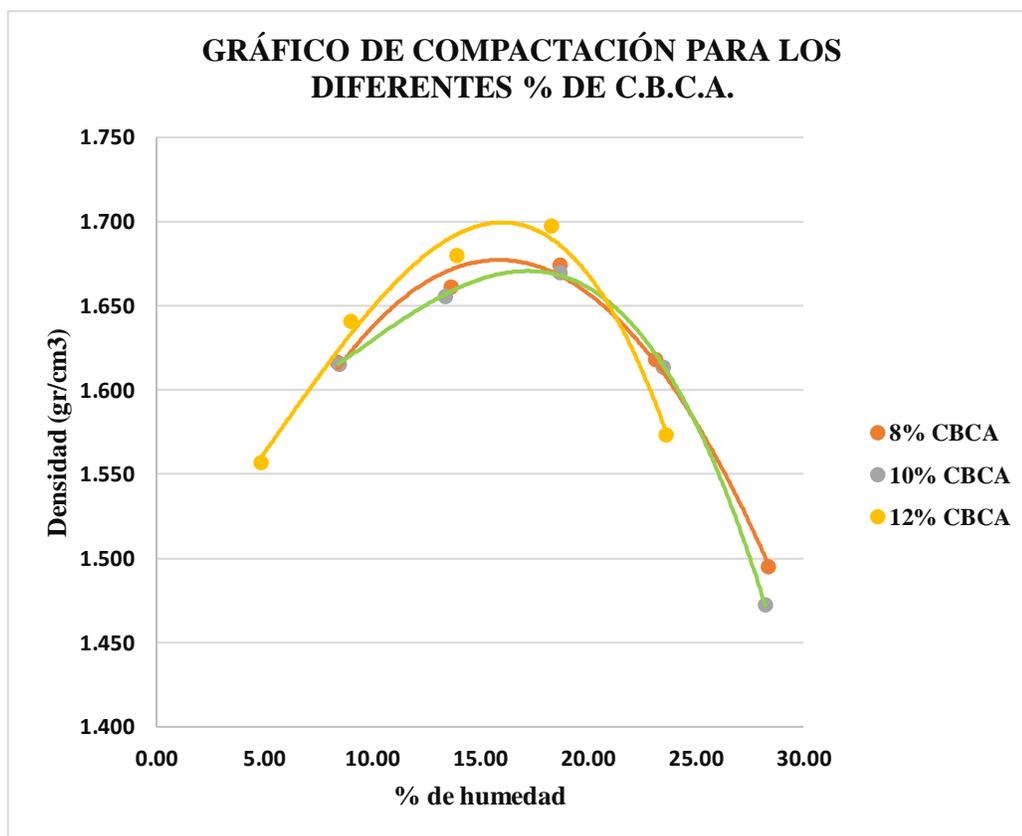
Fuente: Elaboración propia

Con el ensayo de proctor modificado se logró demostrar que el suelo de la zona 1 de estudio (El Temporal) con adición y sin adición de cenizas de bagazo de azúcar (CBCA), se ha logrado obtener mediante porcentajes de agua, un balance de óptima humedad para dar como resultado una mejor compactación.

El gráfico 4.11. nos muestra que el contenido de humedad va en aumento; con 5% de CBCA tenemos una humedad de 13.5%, con 40% de CBCA tenemos una humedad de 19.5% y la máxima densidad seca disminuye, en cuanto aumentamos el porcentaje de CBCA.; con 5% de CBCA tenemos una máxima densidad seca de 1.739 gr/cm³, con 40% de CBCA tenemos una máxima densidad seca de 1.580 gr/cm³.

Resultados del ensayo de compactación para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.12. Curva de compactación con 8-10-12% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

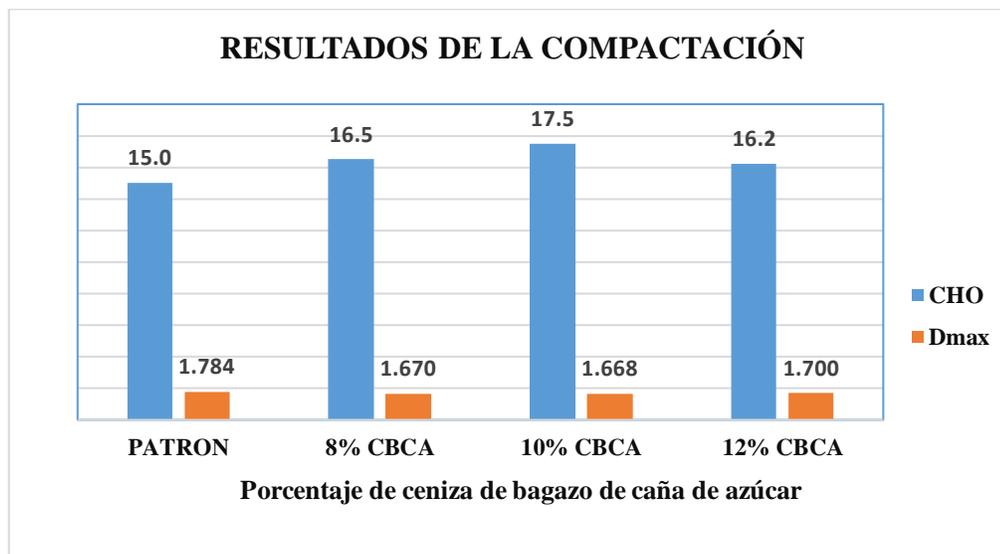
Tabla 4.11. Resultados de compactación con 8-10-12% de CBCA zona 2.

% de CBCA	8%	10%	12%
Densidad máxima (gr/cm³)	1.739	1.736	1.733
Humedad óptima (%)	13.5	13.8	14

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.13. Gráfico de barras del resultado de la compactación de suelo natural (patrón) y 8-10-12% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

Con el ensayo de proctor modificado se logró demostrar que el suelo de nuestra zona 2 de estudio (la Cuesta del Gallinazo) con adición y sin adición de cenizas de bagazo de azúcar (CBCA) se ha logrado obtener mediante porcentajes de agua, un balance de óptima humedad para dar como resultado una mejor compactación.

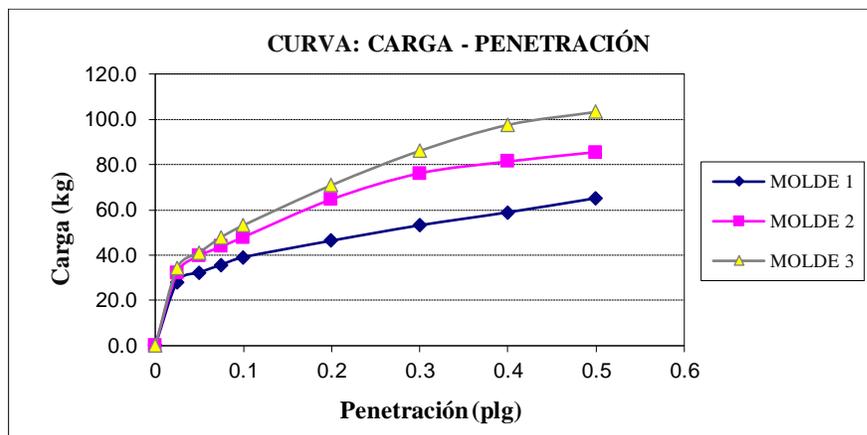
El gráfico 4.13. nos muestra que el contenido de humedad va en aumento; con 8% de CBCA tenemos una humedad de 16.5%, con 10% de CBCA tenemos una humedad de 17.5%, con 12% de CBCA tenemos un contenido de humedad de 16.2 y la máxima densidad seca disminuye con relación al suelo natural (patrón), pero cuando agregamos los porcentajes de CBCA, el porcentaje la máxima densidad seca varía muy poco, con 8% de CBCA tenemos una máxima densidad seca de 1.670 gr/cm³, con 10% de CBCA tenemos una máxima densidad seca de 1.668 gr/cm³ y con 12% de CBCA la máxima densidad seca es de 1.70 gr/cm³.

Con relación al suelo natural (patrón) tanto la humedad con la densidad seca, son mayores en relación al suelo combinado con CBCA.

4.1.2.3. CBR y expansión

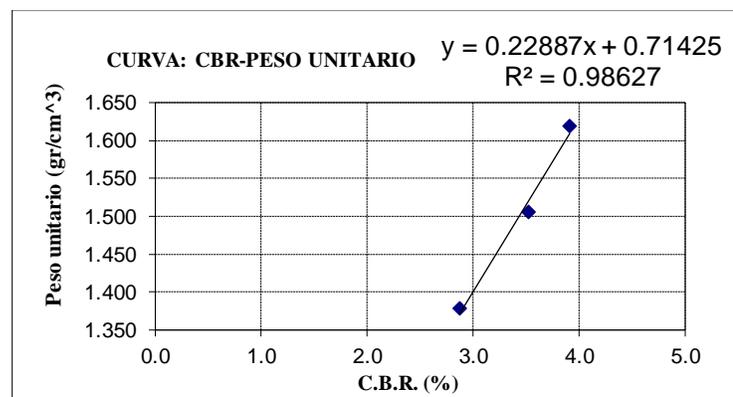
Resultados del ensayo de CBR para la zona 1 El Temporal

Figura 4.14. Curva: Carga vs Penetración con 5% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15. Peso unitario vs CBR con 5% de CBCA zona 1.

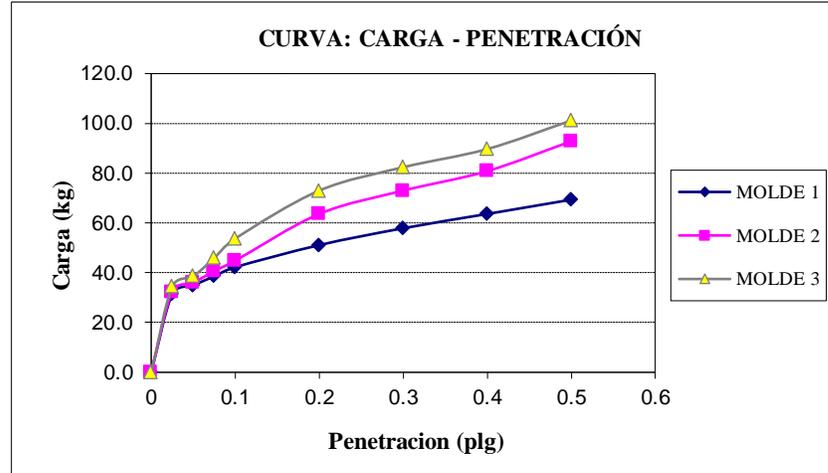


Fuente: Elaboración propia

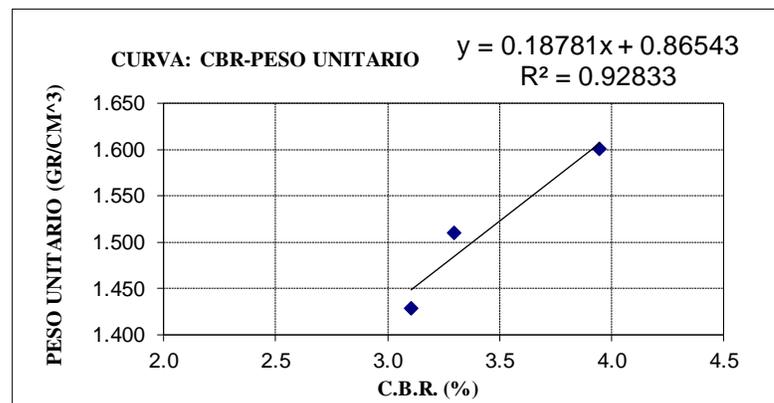
Tabla 4.12. Resultados de % de CBR y expansión con 5% de CBCA zona 1.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión %
	100% Dmax	95% Dmax	
5%	4.48	4.1	3.44

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16. Carga vs Penetración con 8% de CBCA zona 1.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.17. Peso unitario vs CBR con 8% de CBCA zona 1.

Fuente: Elaboración propia

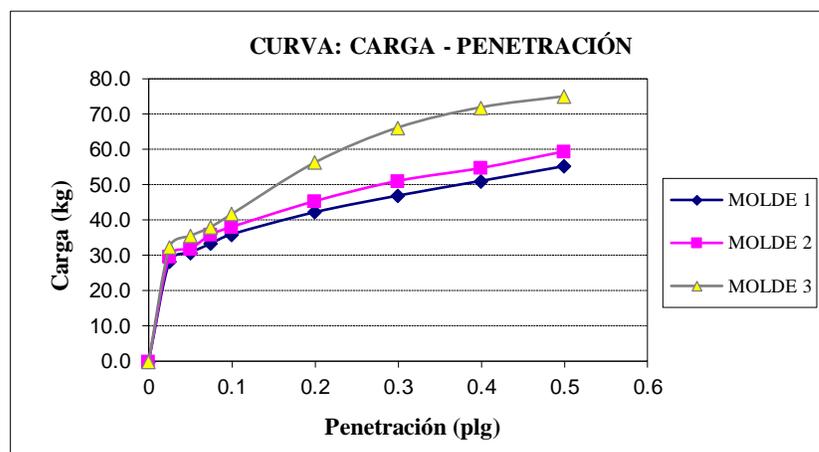
Tabla 4.13. Resultados de % de CBR y expansión con 8% de CBCA zona 1.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión
	100% Dmax	95% Dmax	%
8%	4.64	4.17	3.25

Fuente: Elaboración propia

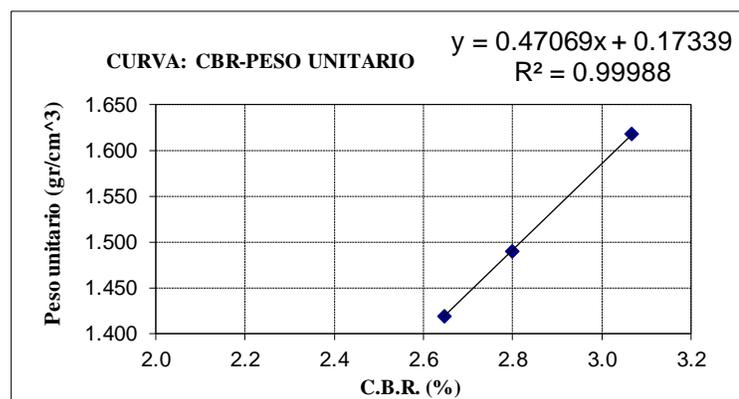
Resultados del ensayo de CBR para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.18. Carga vs Penetración con 8% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19. Peso unitario vs CBR con 8% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

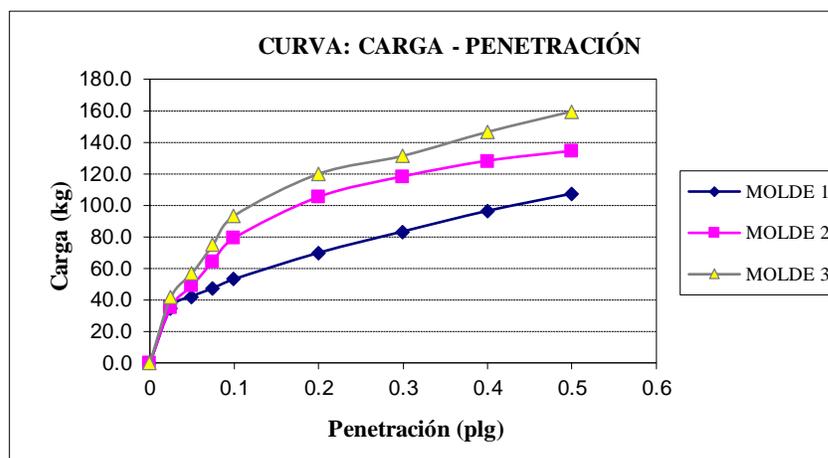
Tabla 4.14. Resultados de % de CBR y expansión con 8% de CBCA zona 2.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión %
	100% Dmax	95% Dmax	
8%	3.18	3.00	4.80

Fuente: Elaboración propia

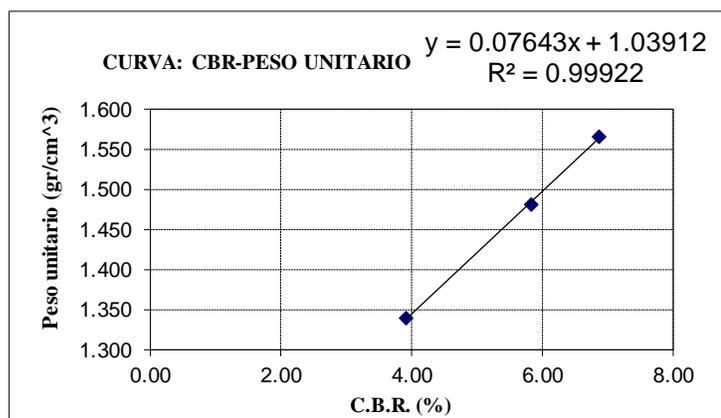
Resultados del ensayo de CBR para la zona 1 El Temporal

Figura 4.20. Carga vs Penetración con 10% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.21. Peso unitario vs CBR con 10% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

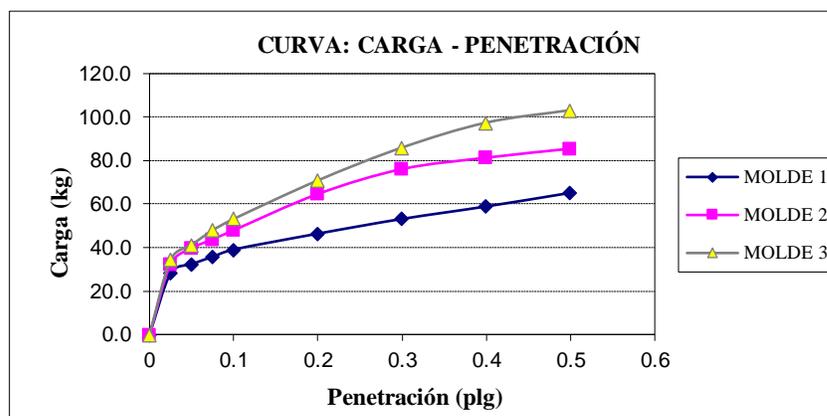
Tabla 4.15. Resultados de % de CBR y expansión con 10% de CBCA zona 1.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión %
	100% Dmax	95% Dmax	
10%	9.08	7.94	2.26

Fuente: Elaboración propia

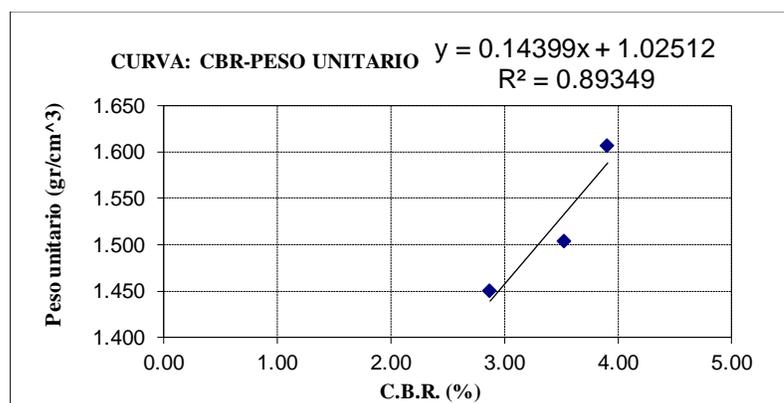
Resultados del ensayo de CBR para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.22. Carga vs Penetración con 10% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.23. Peso unitario vs CBR con 10% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

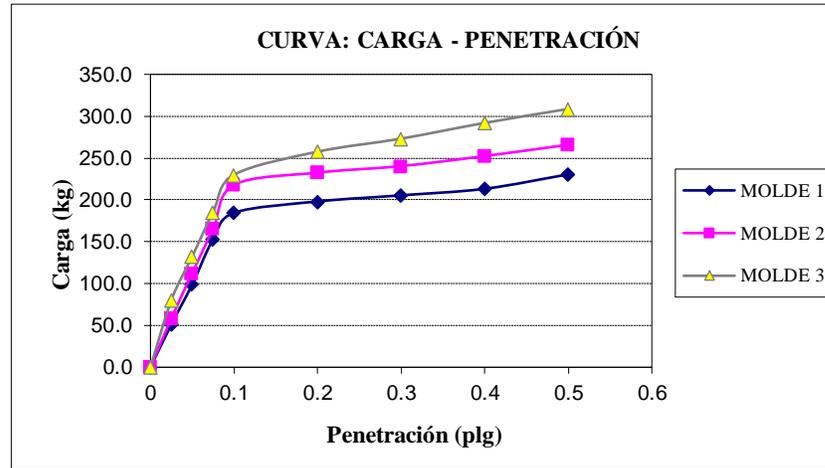
Tabla 4.16. Resultados de % de CBR y expansión con 10% de CBCA zona 2.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión %
	100% Dmax	95% Dmax	
10%	4.46	3.89	3.12

Fuente: Elaboración propia

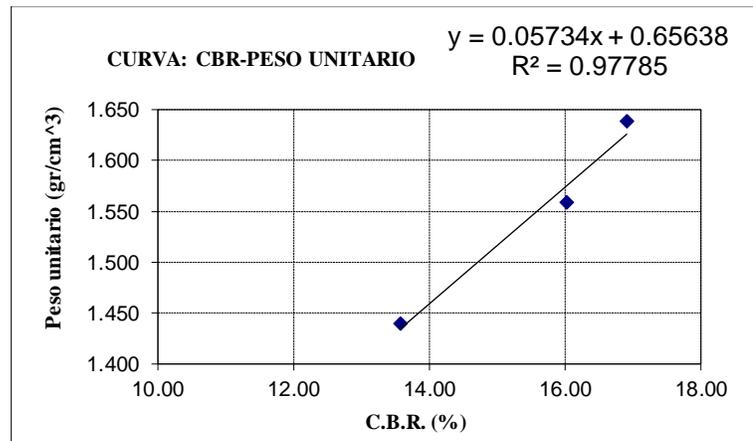
Resultados del ensayo de CBR para la zona 1 El Temporal

Figura 4.24. Carga vs Penetración con 12% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.25. Curva: Peso unitario vs CBR con 12% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

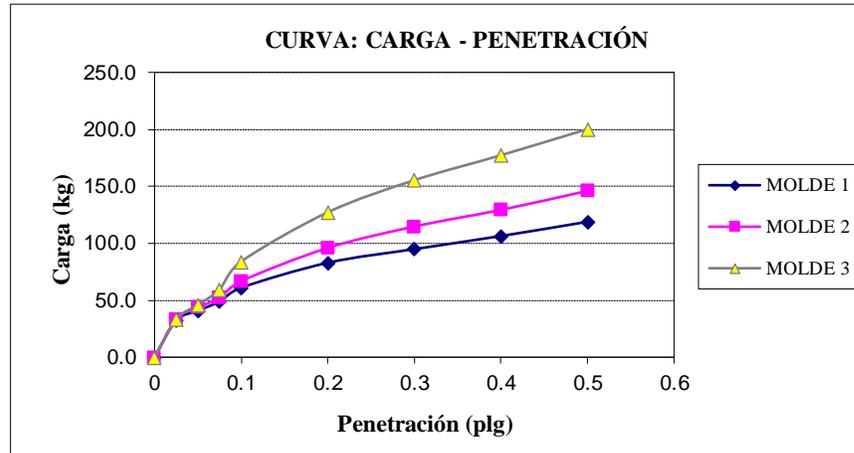
Tabla 4.17. Resultados de % de CBR y expansión con 12% de CBCA zona 1.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión
	100% Dmax	95% Dmax	%
12%	18.22	16.75	1.36

Fuente: Elaboración propia

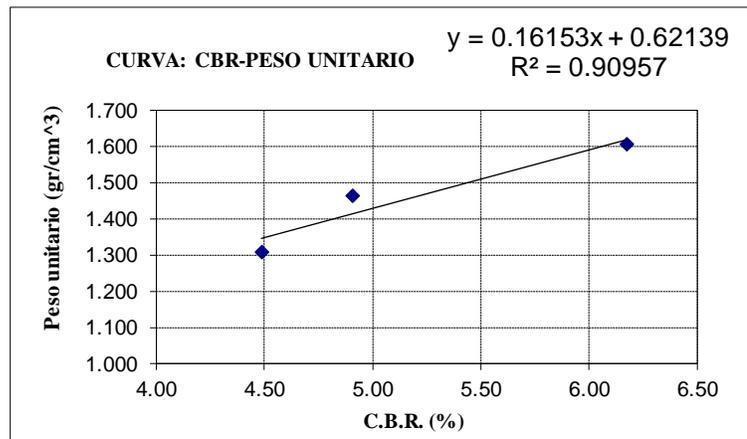
Resultados del ensayo de CBR para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.26. Curva: Carga vs Penetración con 12% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.27. Curva: Peso unitario vs CBR con 12% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

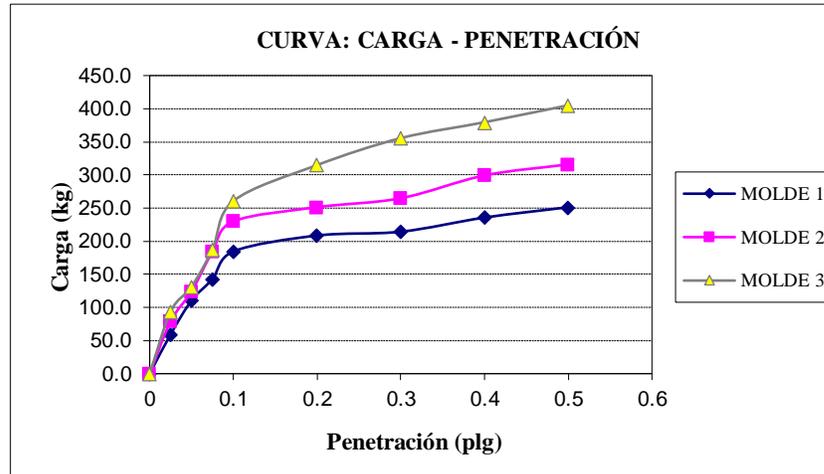
Tabla 4.18. Resultados de % de CBR y expansión con 12% de CBCA zona 2.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión %
	100% Dmax	95% Dmax	
12%	6.68	6.15	2.26

Fuente: Elaboración propia

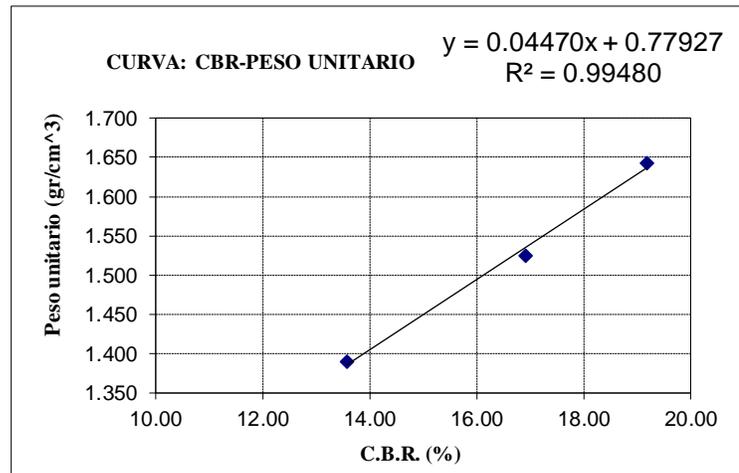
Resultados del ensayo de CBR para la zona 1 El Temporal

Figura 4.28. Curva: Carga vs Penetración con 20% de CBCA zona 1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.29. Curva: Peso unitario vs CBR con 20% de CBCA zona 1.

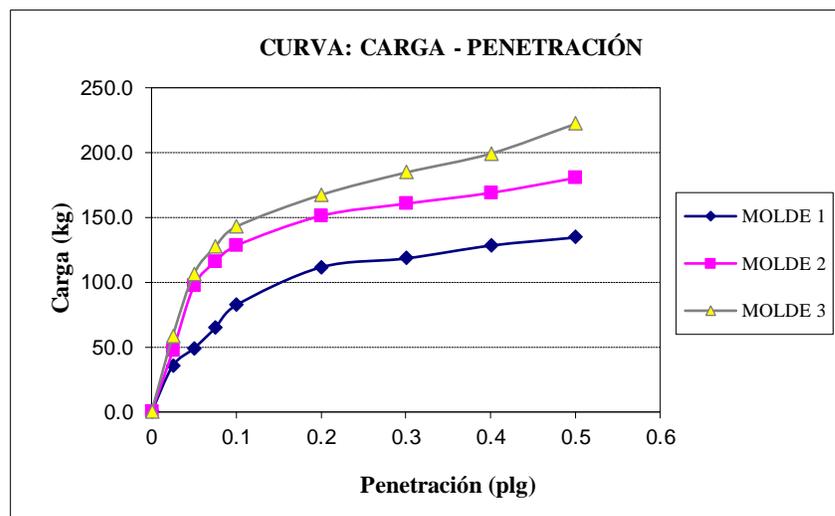


Fuente: Elaboración propia

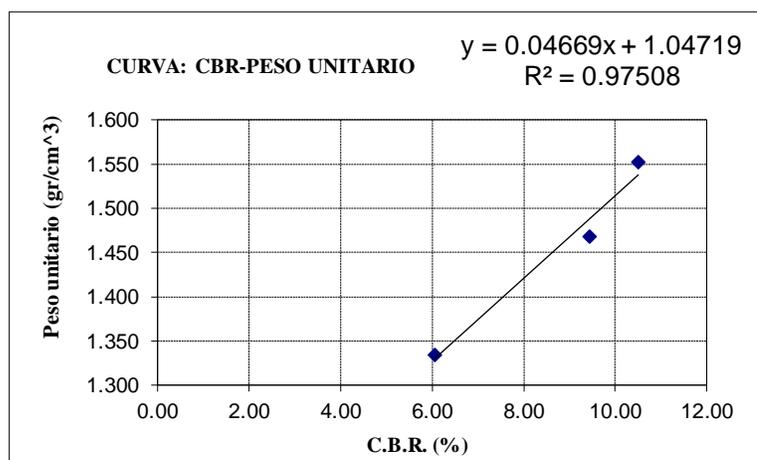
Tabla 4.19. Resultados de % de CBR y expansión con 20% de CBCA zona 1.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión %
	100% Dmax	95% Dmax	
20%	18.36	16.57	0.43

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.30. Curva: Carga vs Penetración con 40% de CBCA zona 1.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.31. Curva: Peso unitario vs CBR con 40% de CBCA zona 1.

Fuente: Elaboración propia

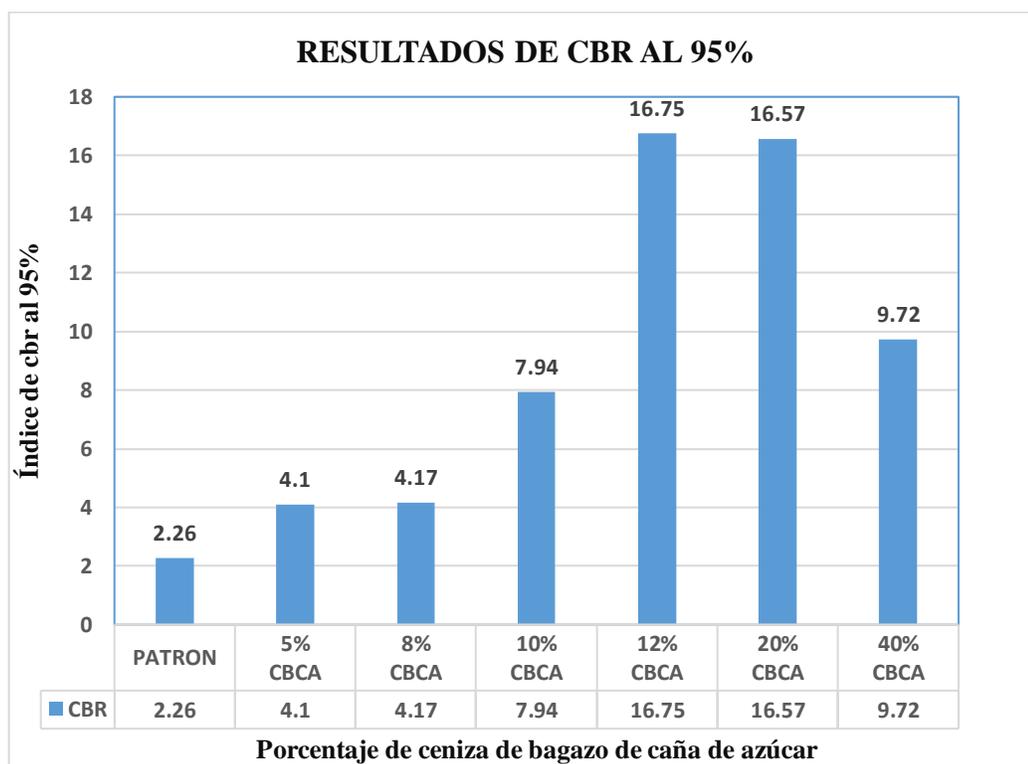
Tabla 4.20. Resultados de % de CBR y expansión con 40% de CBCA zona 1.

Cantidad de ceniza	CBR		Expansión
	100% Dmax	95% Dmax	%
40%	11.41	9.72	0.32

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3. Análisis de resultados de los ensayos de CBR del suelo natural con los diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar

Figura 4.32. Gráfico de barras del resultado de ensayo de CBR del suelo natural (patrón) y 5-8-10-12-20-40% de CBCA zona 1.

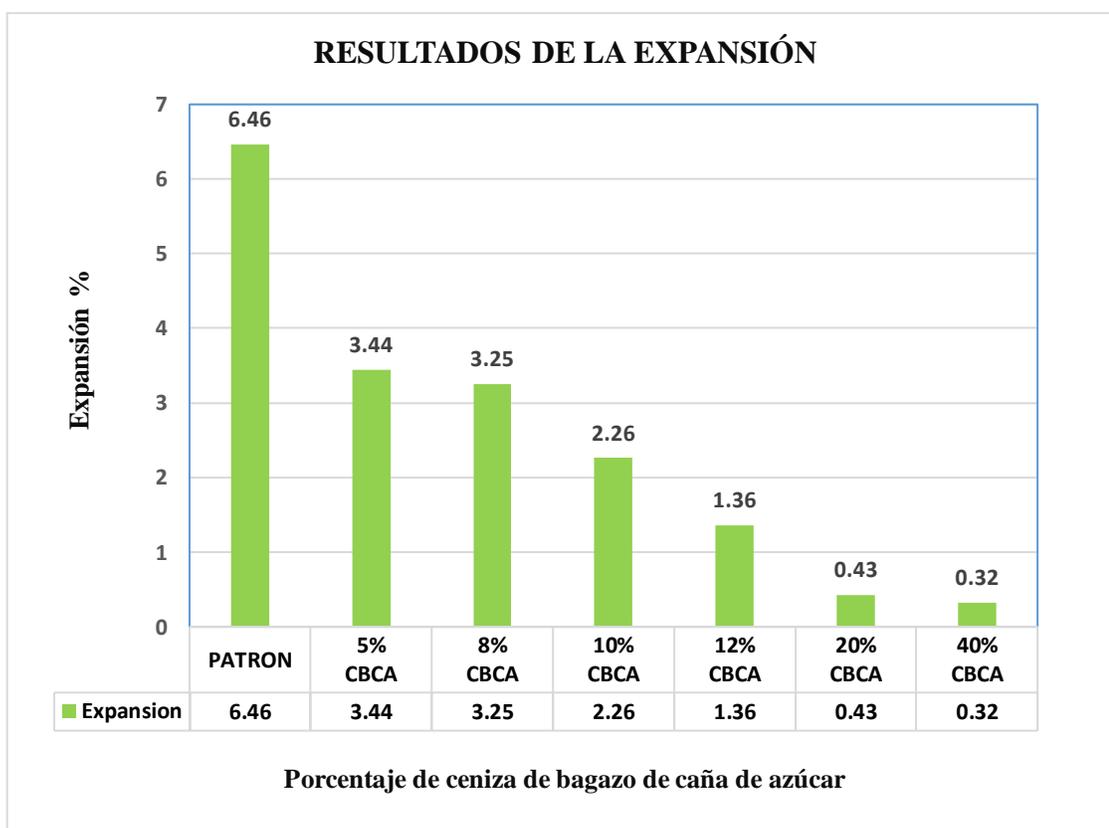


Fuente: Elaboración propia

El ensayo de CBR es para definir si el suelo es bueno o malo para ser utilizado como capa subrasante de una carretera.

La gráfica 4.32. nos muestra los resultados de los ensayos de CBR obtenidos en esta investigación que dio como resultado que el suelo natural (patrón) arroja un CBR de 2.26% lo cual es una subrasante mala, y nos damos cuenta que aumenta la resistencia al adicionarlo 5% de CBCA, donde el porcentaje de CBR alcanza un 4.1%. con la adición de 8% de CBCA se logra un porcentaje de CBR de 4.17%. Cuando adicionamos 12% de CBCA logra su mayor porcentaje de CBR, alcanzando un valor de 16.75%. Cuando adicionamos 40% de CBCA el suelo sufre una descompensación y baja su resistencia alcanzando un 9.72% de CBR.

Figura 4.33. Gráfico de barras del resultado de ensayo de expansión del suelo natural (patrón) y 5-8-10-12-20-40% de CBCA zona 1.

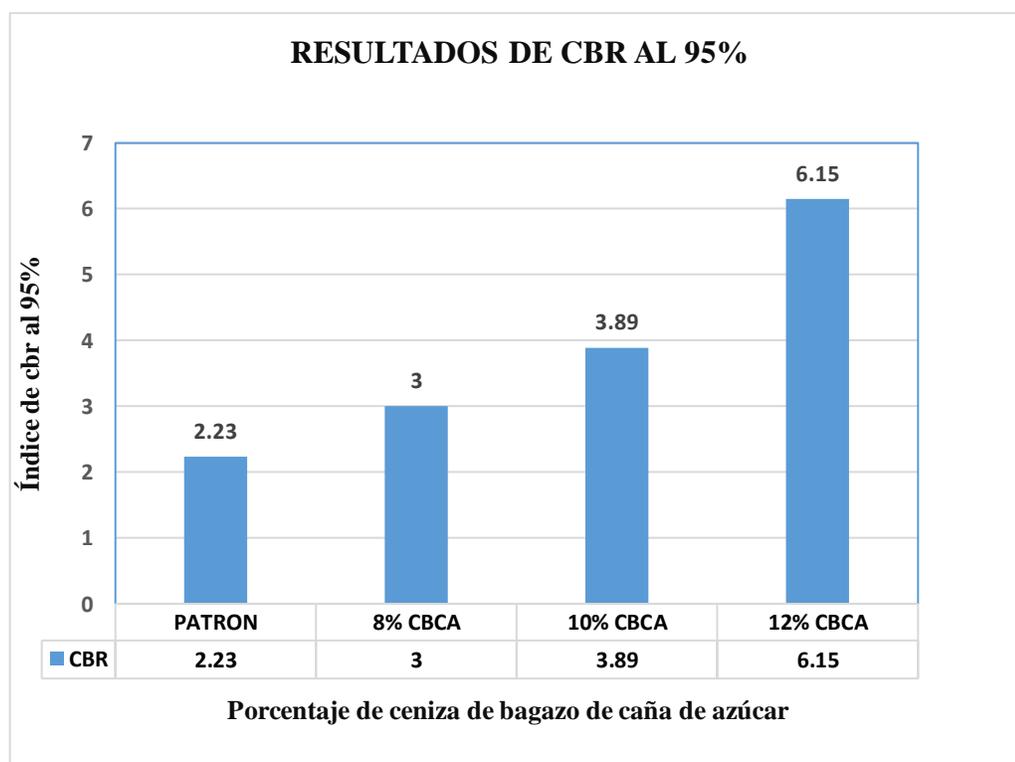


Fuente: Elaboración propia

El ensayo de CBR es para determinar la resistencia de un suelo, pero también nos permite hacer un control de la expansión o hinchamiento que sufre el suelo al ser sometido a saturación.

La gráfica 4.33. nos muestra el comportamiento de expansión que tiene el suelo al agregar diferentes porcentajes de CBCA, al ser sometidos a saturación. El suelo natural (patrón) de la zona 1 arroja un valor de expansión de 6.46%. cuando se adiciona 5% de CBCA la expansión reduce a 3.44%, con 8% de CBCA la expansión reduce a 3.25%, con 10% de CBCA la expansión reduce a 2.26%, cuando se adiciona 12% de CBCA la expansión es de 1.36%, adicionando 20% de CBCA baja a 0.43% y al adicionar 40% de CBCA la expansión reduce a 0.32%.

Figura 4.34. Gráfico de barras del resultado de ensayo de CBR del suelo natural (patrón) y 8-10-12% de CBCA zona 2.

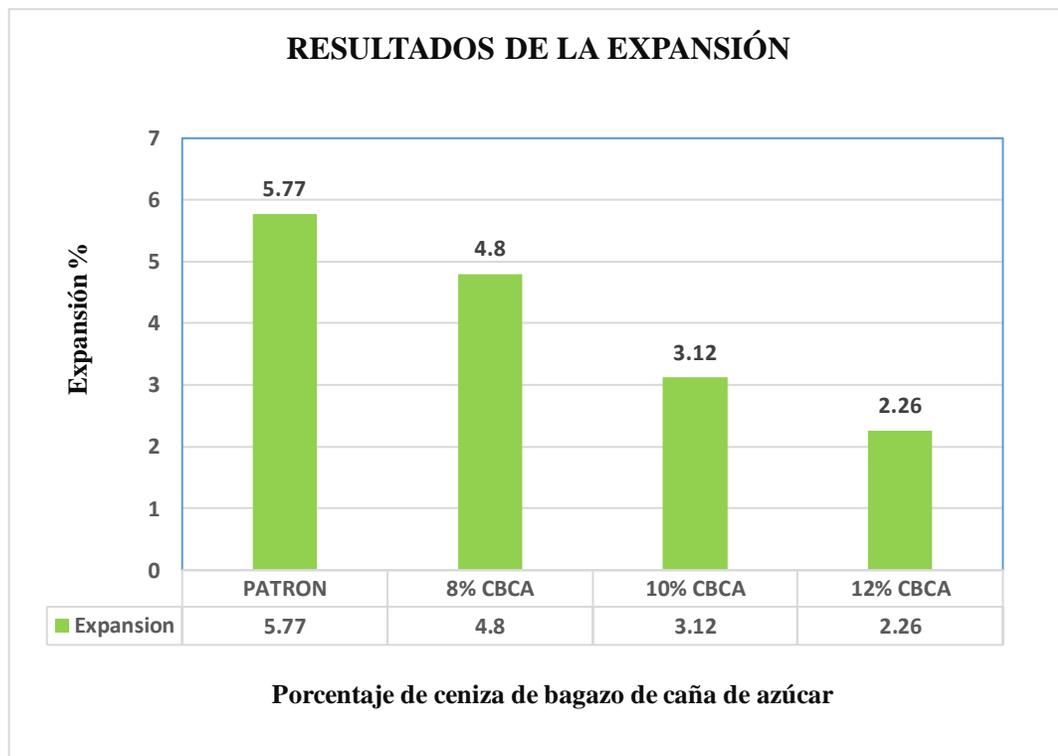


Fuente: Elaboración propia

El ensayo de CBR es para definir si el suelo es bueno o malo para ser utilizado como capa subrasante de una carretera.

La figura 4.34. muestra los ensayos de CBR obtenidos en esta investigación de la zona 2 que dio como resultado que el suelo natural (patrón) arroja un CBR de 2.23% lo cual es una subrasante mala y nos damos cuenta que aumenta la resistencia al adicionarlo 8% de CBCA, donde el porcentaje de CBR alcanza un 3%, con la adición de 8% de CBCA se logra un porcentaje de CBR de 3.89%. Cuando adicionamos 12% de CBCA logra su mayor porcentaje de CBR, alcanzando un valor de 6.15%.

Figura 4.35. Gráfico de barras del resultado de ensayo de expansión del suelo natural (patrón) y 8-10-12% de CBCA zona 2.



Fuente: Elaboración propia

El ensayo de CBR es para determinar la resistencia de un suelo, pero también nos permite hacer un control de la expansión o hinchamiento que sufre el suelo al ser sometido a saturación durante 5 días.

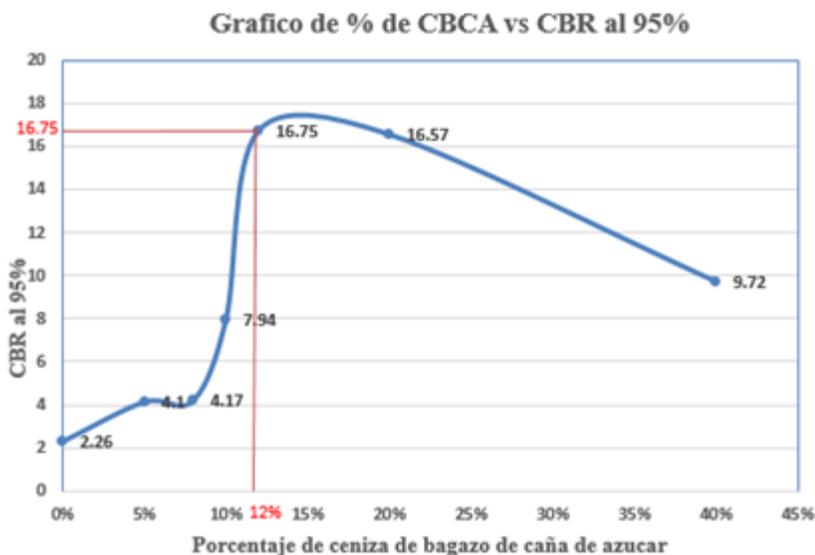
La gráfica 4.35. nos muestra el comportamiento de expansión que presentó el suelo de la zona 2 con los diferentes porcentajes de adiciones de CBCA, al ser sometidos a saturación. El suelo natural (patrón) de la zona 2 arroja un valor de expansión de 5.77%. cuando se adiciona 8% de CBCA la expansión reduce a 4.8%, con 10% de CBCA la expansión reduce a 3.12%, cuando se adiciona 12% de CBCA la expansión reduce a 2,26%. Como podemos observar a mayor porcentaje de CBCA controla y reduce mejor la expansión del suelo.

4.1.3. Análisis para la obtención del porcentaje óptimo de la mezcla S-CBCA tanto de la zona 1 (El Temporal), como el de la zona 2 (Cuesta del Gallinazo)

Una vez realizados los ensayos para los diferentes porcentajes de S-CBCA, tanto para la zona 1 como para la zona 2, analizaremos los resultados obtenidos para poder determinar su contenido óptimo de CBCA para su aplicación.

4.1.3.1. Análisis para la zona 1 (El Temporal)

Figura 4.36. Curva que representa el comportamiento del CBR vs el % de CBCA.



Fuente: Elaboración propia

La gráfica nos muestra el comportamiento que tiene el CBR a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA).

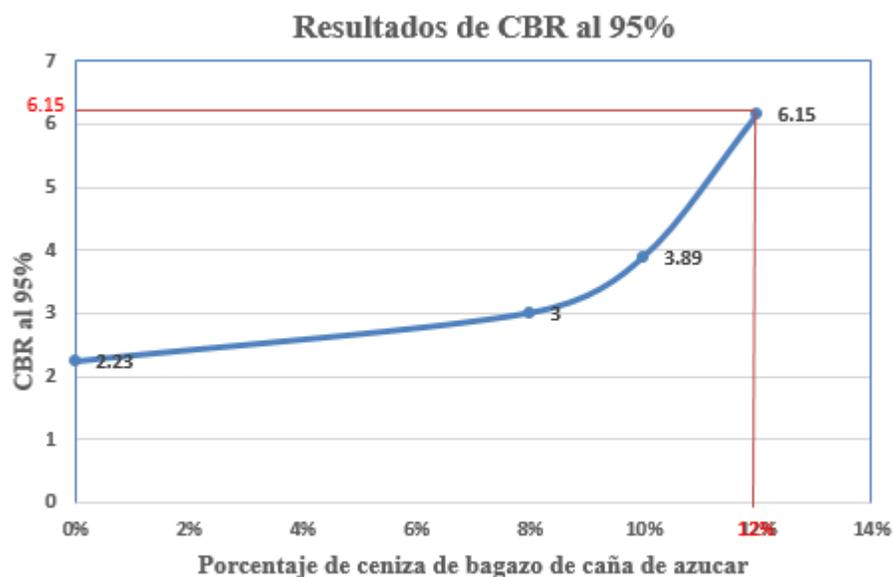
Se puede observar que a medida que se agrega más % de CBCA el índice de CBR aumenta llegando a un punto máximo que está alrededor de 15% de CBCA, luego la curva desciende cuando se agrega más del 15% de CBCA y cuando se agrega 40% de CBCA el CBR disminuye considerablemente.

Con estos resultados y con las diferentes bibliografías consultadas referente al tema, se tomó la decisión de asumir el 12% de CBCA como porcentaje óptimo para el mejoramiento de las propiedades de resistencia mecánica del suelo plástico en estudio.

12% es un valor más próximo a 10% que es lo que recomiendan las bibliografías como porcentaje máximo a agregar este tipo de aditivos cementantes. Esto debido a que si agregamos más del 10% generalmente se hace antieconómico para aplicar en cualquier proyecto.

4.1.3.2. Análisis para la zona 2 (Cuesta del Gallinazo)

Figura 4. 37. Curva que representa el comportamiento del CBR vs el % de CBCA.



Fuente: Elaboración propia

La gráfica nos muestra el comportamiento que tiene el CBR a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA).

Se puede observar que a medida que se agrega más % de CBCA el índice de CBR aumenta llegando a un punto máximo que está al 12% de CBCA. Pero a diferencia del suelo de El Temporal, este suelo mejora sus propiedades de resistencia mecánica en menor proporción, esto debido a que sus características son diferentes, este suelo es menos orgánico.

Asumiendo el mismo criterio que para el suelo de la zona 1, el porcentaje óptimo para el mejoramiento de las propiedades de resistencia mecánica del suelo plástico de la zona 2 en estudio será de 12% de CBCA.

4.1.4. Ensayos de control para el porcentaje óptimo de la mezcla S-CBCA tanto de la zona 1, como el de la zona 2

Mezcla óptima para la zona 1: S-12% CBCA

Mezcla óptima para la zona 2: S-12% CBCA

Los ensayos de control para la estabilización de suelos son los siguientes:

Análisis físico

Ensayo de límites de Atterberg

Ensayo de compactación (proctor modificado)

Ensayo de CBR y expansión

A continuación, se detallan las planillas de tablas y graficas de los resultados de los ensayos obtenidos en laboratorio.

4.1.4.1. Análisis físico

Resultado de Ph S-12% de CBCA (El Temporal) = 10.19

Resultado de Ph S-12% de CBCA (Cuesta del Gallinazo) =10.11

4.1.4.2. Límites de Atterberg

Resultados del ensayo de límites de Atterberg para el porcentaje óptimo de CBCA para la zona 1 El Temporal

Tabla 4.21. Resultados de L.L, L.P, e I.P con 12% de CBCA zona 1.

% de CBCA	12%	12%	12%	Media
N° de repeticiones	1	2	3	%
Límite líquido (L.L.) %	28	28	29	28.33
Límite plástico (L.P.) %	19	18	18	18.33
Índice de plasticidad (I.P.) %	9	10	11	10

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de límites de Atterberg para el porcentaje óptimo de CBCA para la zona 2 Cuesta del Gallinazo

Tabla 4.22. Resultados de L.L, L.P, e I.P con 12% de CBCA zona 2.

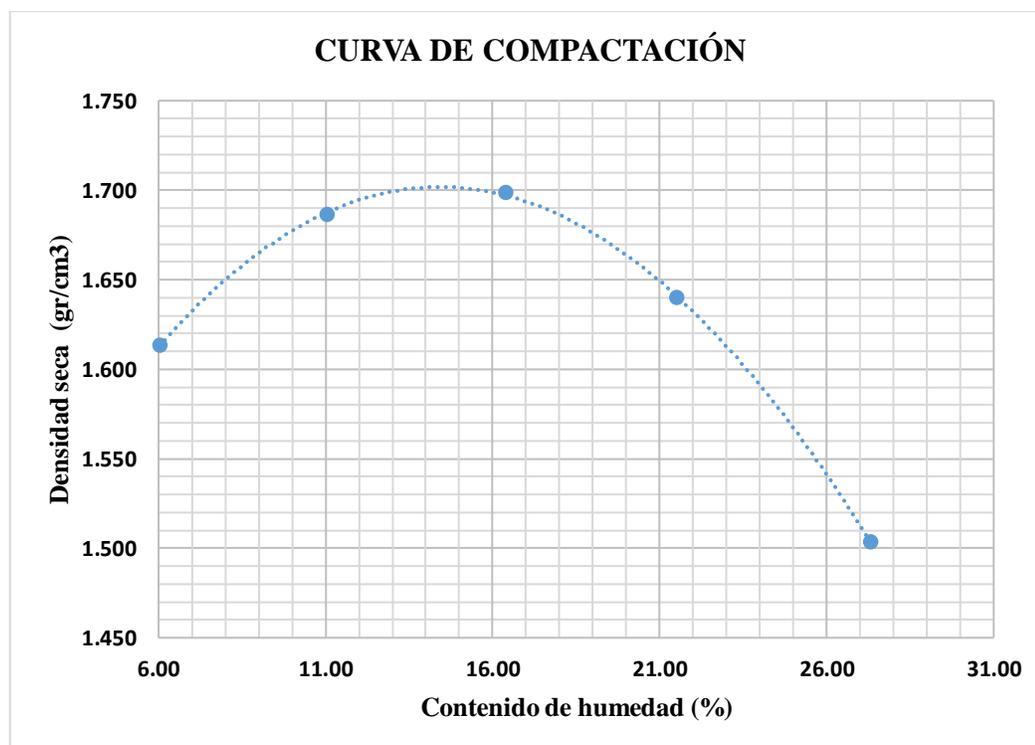
% de CBCA	12%	12%	12%	Media
N° de repeticiones	1	2	3	%
Límite líquido (L.L.) %	23	24	23	23.33
Límite plástico (L.P.) %	19	20	18	19.00
Índice de plasticidad (I.P.) %=	4	3	5	4

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.3. Compactación

Resultados del ensayo de compactación para el porcentaje óptimo de CBCA para la zona 1 El Temporal

Figura 4.38. Curva de compactación con 12% de CBCA zona 1.



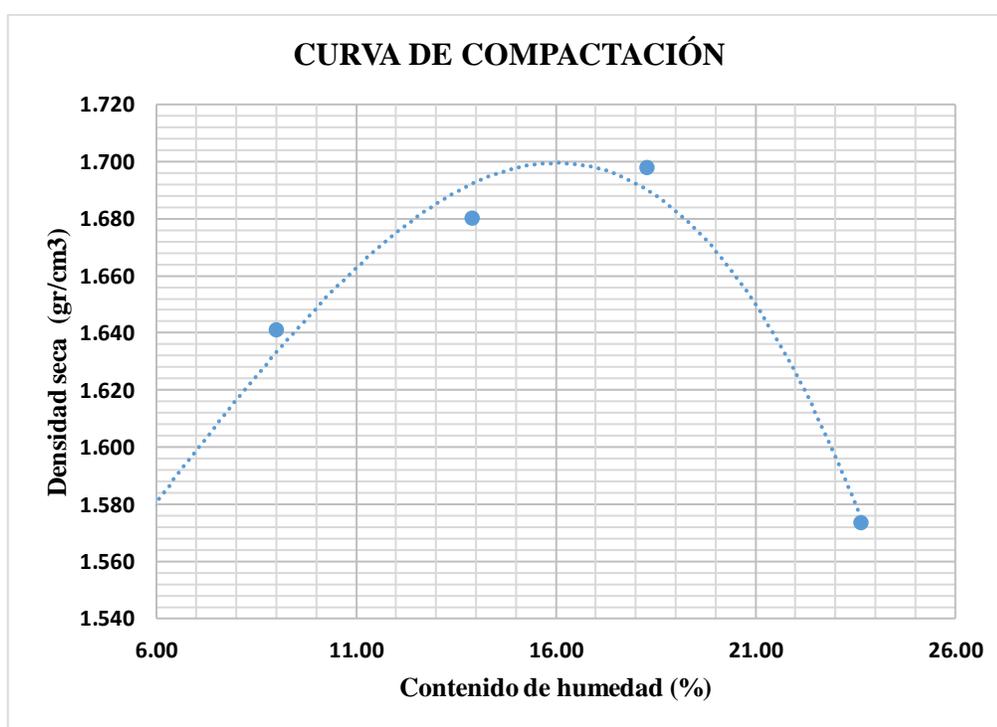
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.23. Resultados de compactación con 12% de CBCA zona 1

Humedad óptima:	14.5	%
Densidad máxima seca :	1.702	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo de compactación para el porcentaje óptimo de CBCA para la zona 2 de la Cuesta del Gallinazo

Figura 4.39. Curva de compactación con 12% de CBCA zona 2.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.24. Resultados de compactación con 12% de CBCA zona 2

Humedad óptima:	16.2	%
Densidad máxima seca :	1.7	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.4. CBR y expansión

Resultados del ensayo de CBR y expansión para el porcentaje óptimo de CBCA para la zona 1 El Temporal

Tabla 4.25. Resultados de % de CBR y expansión con 12% de CBCA zona 1.

88% de suelo y 12% de CBCA			
N° de repeticiones	CBR		Expansión
	100% Dmax	95% Dmax	%
1	18.24	16.52	1.25
2	17.87	16.42	1.57
3	18.55	16.91	1.29
4	17.89	16.37	1.18
5	17.6	16.11	1.18
6	17.64	15.67	1.01
7	17.86	16.45	1.29
8	17.91	16.53	1.23
9	19.26	16.58	1.29
10	17.78	16.42	1.29
11	18.73	17.05	1.18
12	17.29	15.77	1.33
13	17.87	15.53	1.4
14	17.75	15.18	1.4
15	18.45	16.8	1.29
MEDIA	18.046	16.287	1.279
DESV. ESTAN	0.51	0.53	0.13

Fuente: Elaboración propia

La gráfica 4.25. muestra los resultados de los 15 ensayos de CBR que se realizaron para el suelo de la zona 1 (El Temporal) con 12% de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), lo cual nos da un resultado favorable ya que mejora bastante su resistencia, teniendo un promedio de CBR de 16.287%.

También se hizo el control de la expansión de cada ensayo teniendo un valor mínimo de 1.01%, un valor máximo de expansión de 1.57% y un promedio total de expansión de los 15 ensayos de 1.279%.

Resultados del ensayo de CBR y expansión para el porcentaje óptimo de CBCA para la zona 2 la Cuesta del Gallinazo

Tabla 4.26. Resultados de % de CBR y expansión con 12% de CBCA zona 2.

88% de suelo y 12% de CBCA			
N° de repeticiones	CBR		Expansión
	100% Dmax	95% Dmax	%
1	7.14	6.5	2.54
2	7.04	6.45	1.72
3	7.64	6.98	2.15
4	6.87	6.25	2.22
5	6.91	6.21	1.94
6	7.08	6.48	1.83
7	6.97	6.25	1.98
8	6.28	5.86	2.04
9	6.52	5.99	1.77
10	7.02	6.41	2.15
11	7.2	6.53	2.02
12	7.87	7.09	2.2
13	6.69	6.15	2.28
14	6.4	5.86	1.89
15	8.06	7.07	2.36
MEDIA	7.046	6.405	2.073
DESV.ESTAN	0.50	0.40	0.23

Fuente: Elaboración propia

La gráfica 4.26. muestra los resultados de los 15 ensayos de CBR que se realizó para el suelo de la zona 2 (la Cuesta del Gallinazo) con 12% de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), lo cual nos da un resultado menos favorable a comparación del suelo de la zona 1, ya que mejora su resistencia, teniendo un promedio de CBR de 6.405%.

También se hizo el control de la expansión de cada ensayo teniendo un valor mínimo de 1.72%, un valor máximo de expansión de 2.54% y un promedio total de expansión de los 15 ensayos de 2.073%.

4.2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.2.1. Tratamiento estadístico y prueba de hipótesis para el suelo de la zona 1 El Temporal

4.2.1.1. Tratamiento estadístico

Se define con la variable dependiente

Tabla 4.27. Resultados de % de CBR al 95%.

n	fcg (kg/cm²)
1	16.52
2	16.42
3	16.91
4	16.37
5	16.11
6	15.67
7	16.45
8	16.53
9	16.58
10	16.42
11	17.05
12	15.77
13	15.53
14	15.18
15	16.8
Media	16.3

Fuente: Elaboración propia

Estadística descriptiva

Datos relevantes

Media $X = 16.3$

Número de datos $n = 15$

Valor máximo $Max = 17.05$

Valor mínimo $Min = 15.67$

rango = 1.38

n° de intervalos = $1 + 3.3 \log n$

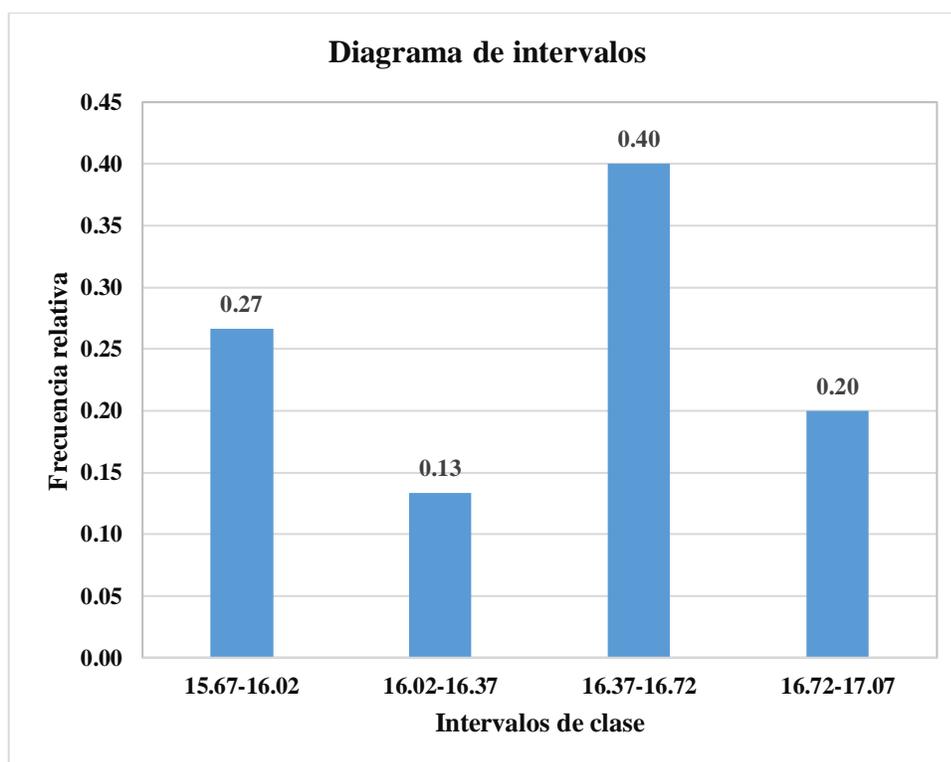
n° de intervalos = 4.3 redondeando = 4

amplitud = 0.35

n	Intervalos		Frecuencia	Fr	Fa
	Lim inf.	Lim sup.			
1	15.67	16.02	4	0.27	27
2	16.02	16.37	2	0.13	13
3	16.37	16.72	6	0.40	40
4	16.72	17.07	3	0.20	20
Total			15	1	

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.40. Diagrama de intervalos.



Fuente: Elaboración propia

Estadística inferencial

Error de datos desviación estándar (S)

$$S = \sqrt{\sum_{x=1}^n \frac{(X_i - X)^2}{n - 1}}$$

$$S = 0.533$$

$$\text{Varianza} = 0.28$$

Error medio de la media

$$E_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E_x = 0.14$$

Nivel de confianza: $N_c = 95\%$

Entonces: $Z = 1.96$

Por lo tanto, el Error Probable (E_p)

$$E_p = Z * E_x = 0.27$$

4.2.1.2. Prueba de hipótesis

1) Determinación de la prueba hipótesis

Datos

Número de ensayos: $n = 15$

Media $X = 16.3\%$

Desviación $S = 0.533$

Media poblacional $\mu = 6\%$

2) Generando la hipótesis (dos tipos de hipótesis)

Hipótesis alternativa H1: $X > \mu$;(16.3 > 16.3)

Hipótesis nula H0: $X \leq \mu$;(16.3 \leq 16.3)

3) Determinación del nivel de significancia

$N_c = 95\%$

$\alpha = 0.05$

Entonces con la tabla de distribución normal obtenemos: $Z = 1.96$

4) Calculando Z_c

$$Z_c = \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

$$\text{Donde } \sigma = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$\alpha = 0.14$

$Z_c = 289.44$

Se verificó que Z_c se encuentra en la región rechazada RR, por lo tanto, la hipótesis nula es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa.

4.2.2. Tratamiento estadístico y prueba de hipótesis para el suelo de la zona 2 la Cuesta del Gallinazo

4.2.2.1. Tratamiento estadístico

Se define con la variable dependiente

Tabla 4.28. Resultados de % de CBR al 95%

n	fcg (kg/cm²)
1	6.5
2	6.45
3	6.98
4	6.25
5	6.21
6	6.48
7	6.25
8	5.86
9	5.99
10	6.41
11	6.53
12	7.09
13	6.15
14	5.86
15	7.07
Media	6.4

Fuente: Elaboración propia

Estadística descriptiva

Datos relevantes

Media $\bar{X} = 6.40$

Número de datos $n = 15$

Valor máximo $\text{Max} = 7.09$

Valor mínimo $\text{Min} = 5.89$

rango = 1.23

$$n^{\circ} \text{ de intervalos} = 1 + 3.3 \log n$$

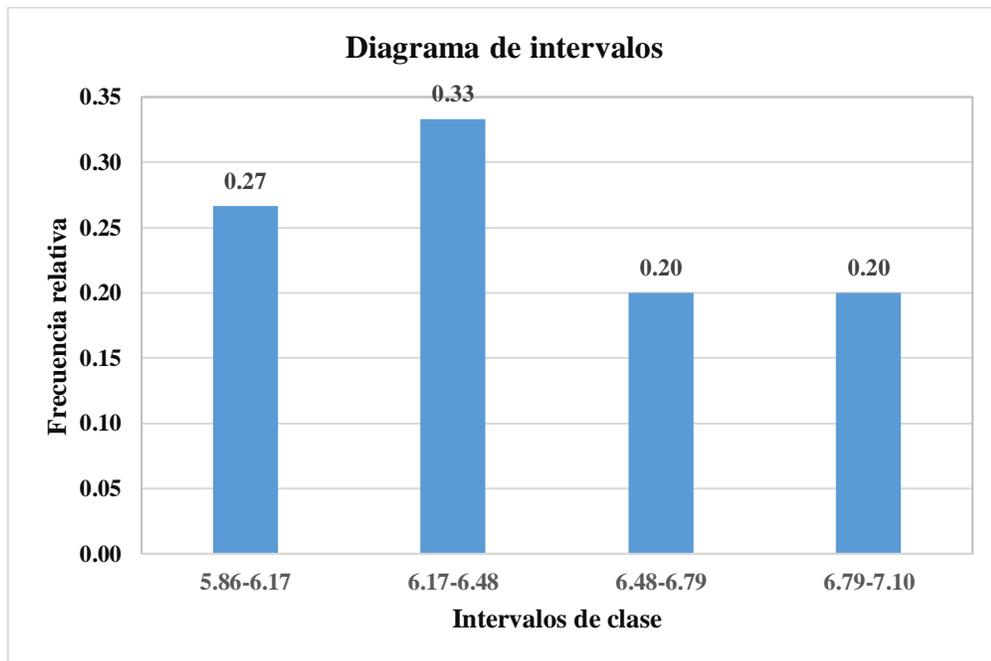
$$n^{\circ} \text{ de intervalos} = 4.3 \text{ redondeando} = 4$$

$$\text{amplitud} = 0.31$$

n	Intervalos		Frecuencia	Fr	Fa
	Lim inf.	Lim sup.			
1	5.86	6.17	4	0.27	27
2	6.17	6.48	5	0.33	33
3	6.48	6.79	3	0.20	20
4	6.79	7.1	3	0.20	20
Total			15	1	

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.41. Diagrama de intervalos.



Fuente: Elaboración propia

Estadística inferencial

Error de datos desviación estándar (S)

$$S = \sqrt{\sum_{x=1}^n \frac{(X_i - X)^2}{n - 1}}$$

$$S = 0.396$$

$$\text{Varianza} = 0.16$$

Error medio de la media

$$E_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E_x = 0.10$$

Nivel de confianza: $N_c = 95\%$

Entonces: $Z = 1.96$

Por lo tanto, el Error Probable (E_p)

$$E_p = Z * E_x = 0.20$$

4.2.2.2. Prueba de hipótesis

1) Determinación de la prueba hipótesis

Datos

Número de ensayos: $n = 15$

Media $X = 6.40\%$

Desviación $S = 0.396$

Media poblacional $\mu = 6\%$

2) Generando la hipótesis (dos tipos de hipótesis)

Hipótesis alternativa H1: $X > \mu$;(6.40 > 6)

Hipótesis nula H0: $X \leq \mu$;(6.40 \leq 6)

3) Determinación del nivel de significancia

$N_c = 95\%$

$\alpha = 0.05$

Entonces con la tabla de distribución normal obtenemos: $Z = 1.96$

4) Calculando Z_c

$$Z_c = \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

$$\text{Donde } \sigma = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$\alpha = 0.10$

$Z_c = 15.37$

Se verificó que Z_c se encuentra en la región rechazada RR, por lo tanto, la hipótesis nula es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa.

4.3. DISEÑO DE UN PAQUETE ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO ASUMIENDO LOS RESULTADOS DE CBR DEL SUELO NATURAL Y DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE S-12%CBCA PARA LAS DOS ZONAS EN ESTUDIO

4.3.1 Método de CBR (valor de soporte)

4.3.1.1. Diseño de pavimento para la zona 1 El Temporal

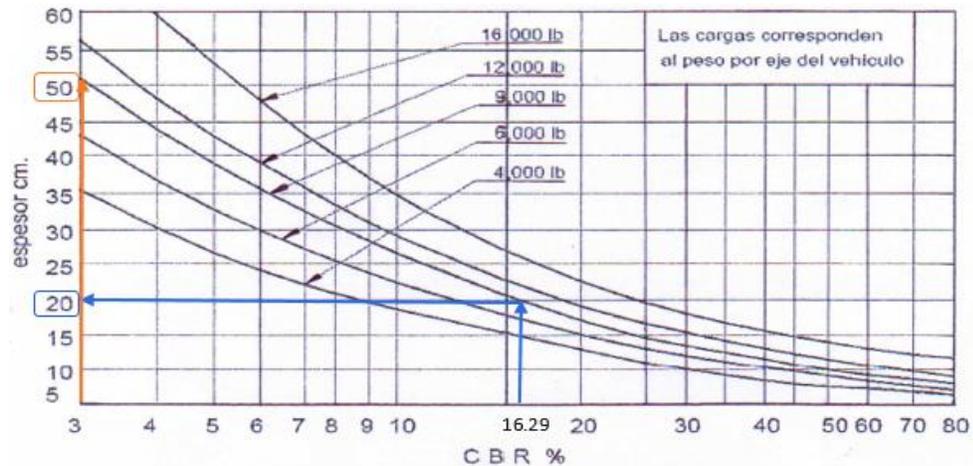
Datos:

CBR suelo natural = 2.26%

CBR suelo con 12% de CBCA = 16.29%

Peso por eje del vehículo = 9000 lb

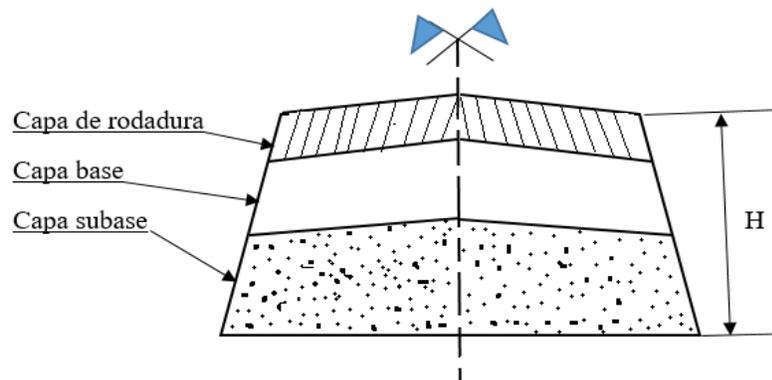
Con estos valores entramos al siguiente Ábaco (Texto guía de carreteras II) para determinar el espesor H del paquete estructural del pavimento.



Resultados:

Espesor H para el suelo natural = 50cm

Espesor H para suelo con 12% de CBCA = 20cm



4.3.1.2. Diseño de pavimento para la zona 2 la Cuesta del Gallinazo

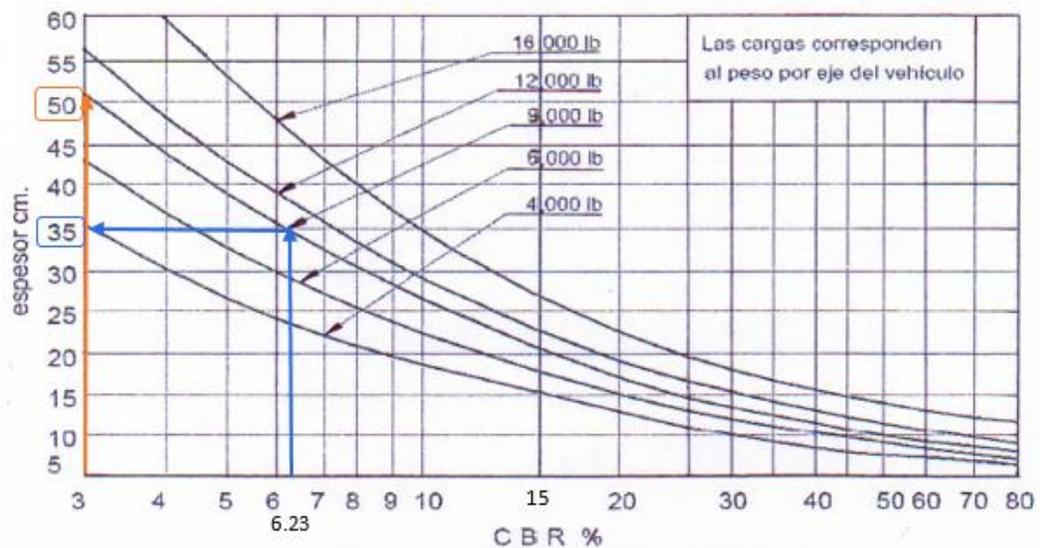
Datos:

CBR suelo natural = 2.23%

CBR suelo con 12% de CBCA = 6.41%

Peso por eje del vehículo = 9000 lb

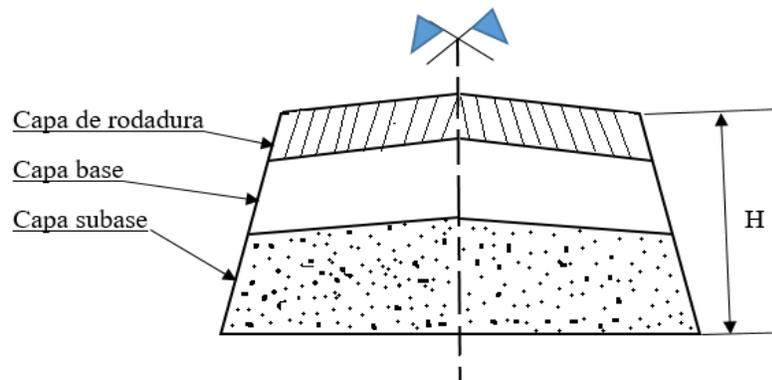
Con estos valores entramos al siguiente Ábaco (Texto guía de carreteras II) para determinar el espesor H del paquete estructural del pavimento.



Resultados:

Espesor H para el suelo natural = 50cm

Espesor H para suelo con 12% de CBCA = 35cm



4.4. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

DATOS GENERALES					
		Proyecto:	CONSTRUCCIÓN DE UNA CAMINO		
		Actividad:	PROV. Y CONFOR DE UNA SUBRASANTE NATURAL Y TRANSP.		
		Cantidad:	1.00		
		Unidad:	m3 con subrasante natural		
		Moneda:	Bs.		
1. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1		kg.	0.00	0.00	0
TOTAL MATERIALES					0
2. MANO DE OBRA					
1	Ayudante	Hr.	0.030	15	0.45
2	Capataz	Hr.	0.022	22.5	0.50
3	Chofer	Hr.	0.020	16.25	0.33
4	Operador	Hr.	0.040	21.25	0.85
5	Peon	Hr.	0.020	12.5	0.25
SUBTOTAL MANO DE OBRA:					2.37
CARGAS SOCIALES = (% DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				60.00%	1.42
IMPUESTO IVA = % DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES				14.94%	0.57
TOTAL MANO DE OBRA					4.36
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
1	Camion cisterna 4000 a 10000 lt	Hr.	0.1030	210.13	21.64
2	Cargador frontal de ruedas >= 950 m3	Hr.	0.0022	422.27	0.93
3	Comp Rod Liso y pata de cabra m2/hr	Hr.	0.0040	304.66	1.22
4	Motoniveladora 14G m2/hr	Hr.	0.0030	340.47	1.02
5	Volqueta >= 12 m3	Hr.	0.0022	225.06	0.50
*	HERRAMIENTAS = % DEL TOTAL DE MANO DE OBRA			5.00%	0.22
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					25.53
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
*	GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3			10.00%	2.99
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					2.99
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
*	UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4			10.00%	3.29
TOTAL UTILIDAD					3.29
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
*	IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3.09%	1.12
TOTAL IMPUESTOS					1.12
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					37.28
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos decimales)					37.28

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

DATOS GENERALES					
		Proyecto:	Construcción de una carretera		
		Actividad:	Provisión y confort de una subrasante mejorada		
		Cantidad:	1.00		
		Unidad:	m3 con un 12% de ceniza de bagazo de caña de azúcar		
		Moneda:	Bs.		
1. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Ceniza de bagazo de caña de azúcar	kg.	226.10	0.10	22.61
TOTAL MATERIALES					22.61
2. MANO DE OBRA					
1	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr.	0.030	15	0.45
2	Capataz	Hr.	0.022	21.25	0.47
3	Chofer	Hr.	0.020	16.25	0.33
4	Operador	Hr.	0.040	25	1.00
5	Peón	Hr.	0.020	11.25	0.23
SUBTOTAL MANO DE OBRA:					2.47
CARGAS SOCIALES = (% DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				60.00%	1.48
IMPUESTO IVA = % DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES				14.94%	0.59
TOTAL MANO DE OBRA					4.54
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
1	Camión cisterna 4000 a 10000 lt	Hr.	0.1030	210.13	21.64
2	Cargador frontal de ruedas >= 950 m3	Hr.	0.0022	422.27	0.93
3	Comp Rod Liso y pata de cabra m2/hr	Hr.	0.0040	304.66	1.22
4	Motoniveladora 14G m2/hr	Hr.	0.0030	340.47	1.02
5	Volqueta >= 12 m3	Hr.	0.0022	225.06	0.50
*	HERRAMIENTAS = % DEL TOTAL DE MANO DE OBRA			5.00%	0.23
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					25.53
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
*	GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3			10.00%	5.27
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					5.27
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
*	UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4			10.00%	5.80
TOTAL UTILIDAD					5.80
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
*	IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3.09%	1.97
TOTAL IMPUESTOS					1.97
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					65.72
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos decimales)					65.72

4.4.1. Costo referencial para un tramo de capa subrasante de una carretera

Costo referencial para un tramo de capa subrasante de una carretera con una longitud de 1km, un ancho de 7m y un espesor de 15cm.

Costo referencial de 1km de subrasante con suelo natural					
Cantidad de suelo natural	Volumen total m ³	Precio unitario Bs.	Costo total Bs.	CBR al 100%	CBR al 95%
100% de suelo 1	1050	37.28	39144	2.34	2.26
100% de suelo 2	1050	37.28	39144	2.36	2.23
Costo referencial de 1km de subrasante mejorada					
Cantidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar	Volumen total m ³	Precio unitario Bs.	Costo total Bs.	CBR al 100%	CBR al 95%
12% de CBCA suelo 1	1050	65.72	69001.07	18.10	16.21
12% de CBCA suelo 2	1050	65.72	69001.07	7.10	6.40

Análisis técnico económico de los resultados obtenidos en la investigación.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio de suelos del contenido óptimo de suelo con ceniza, se llegó a la conclusión de que ambos suelos combinados con 12% de ceniza de bagazo de caña de azúcar, técnicamente cumplen con las características y especificaciones técnicas según norma para su aplicación en una capa subrasante, ya que ambos suelos al combinarlo con ceniza mejora su resistencia llegando a valores de CBR mayores a 15% en el suelo de la zona 1 y con valores de CBR mayores a 6% en el suelo de la zona 2. Por otra parte, controla en gran manera la expansión o hinchamiento, la plasticidad y los límites en ambos suelos, lo que es de mucho beneficio en ingeniería civil.

En la parte económica, analizando los precios unitarios realizados tanto para una subrasante con suelo natural y con suelo mejorado con ceniza, se observa que hay una variación considerable en cuanto a los precios por metro cúbico, con suelo natural el precio por metro cúbico es de 37.28 Bs y con suelo mejorado es de 65,72 Bs, casi se duplica el precio. Pero tomando en cuenta los muchos beneficios que tiene el suelo mejorado con ceniza de bagazo de caña de azúcar, se puede tomar en cuenta este producto para mejorar tramos de capa subrasante, en lugares donde se cuenten con el producto para disponer del mismo.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

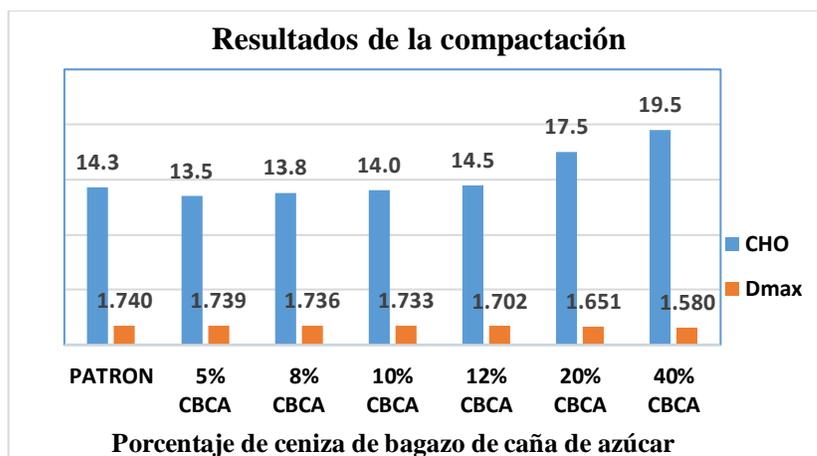
5.1. CONCLUSIONES

En función a los resultados expuestos en los capítulos anteriores, puede enunciarse las siguientes conclusiones:

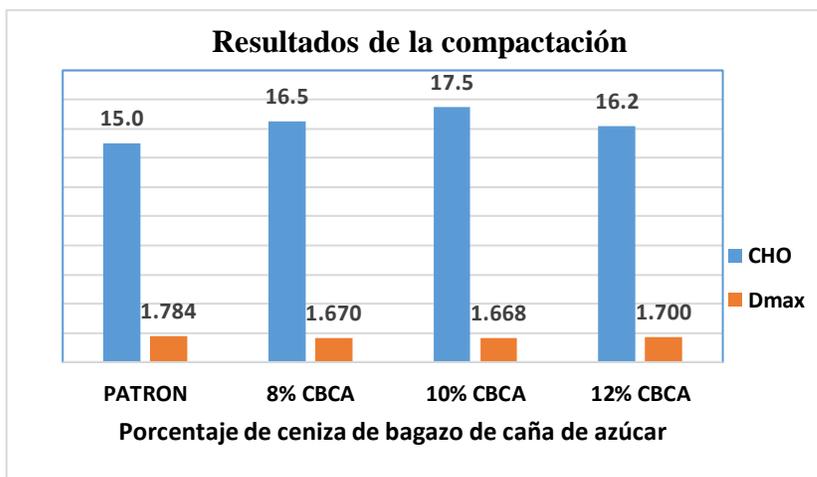
1. A los dos suelos plásticos naturales, se realizaron tres ensayos de laboratorio basados en las normas ASTM y AASHTO. Las dos muestras de suelo poseen características propias que determinan su amplitud para ser estabilizados. Los índices de plasticidad de estos suelos son mayores a 10, poseen un alto porcentaje de material fino que pasa el tamiz 200 (mayor a 50% del total de la muestra ensayada).
2. Los resultados de los ensayos del suelo natural muestran que son suelos de baja resistencia a la capacidad de soporte del suelo, además de presentar mucha plasticidad que son características propias de los suelos finos.
3. Los resultados de los ensayos realizados en la caracterización de los suelos dio como resultado que el suelo de la zona 1 El Temporal, clasificado según ASHTO A-7 (13), según la clasificación SUGS es un suelo OL y el suelo de la zona 2 la Cuesta del Gallinazo, clasificado según AASHTO A-6 (8) por consiguiente según la clasificación SUGS es un suelo CL.
4. De acuerdo a los valores obtenidos se concluye que el índice de plasticidad de los suelos en estudio, sin adición obtiene un índice de plasticidad elevada alcanzando un I.P de 18% de la zona El Temporal y un I.P de 11% de la zona de la Cuesta del Gallinazo, el que conlleva a tener un suelo con baja resistencia. Las muestras plásticas con adición de cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA) obtiene mejoras en reducción del índice de plasticidad alcanzando un valor de I.P de 10% del suelo de El Temporal y un I.P de 4% del suelo de la Cuesta del Gallinazo y que mediante este trabajo realizado obtuvimos la adición adecuada para poder mejorar el índice de plasticidad el cual es la utilización del 12% de cenizas de bagazo de caña de azúcar.
5. De los ensayos de compactación se pudo observar que las densidades se comportaron de manera variable, pero en general tuvieron disminuciones cuando se adicionó (CBCA),

mientras que sus porcentajes de humedad óptima fueron en aumento en todos los casos. Este comportamiento se debe a la acción de la ceniza de bagazo de caña de azúcar que produce una reacción puzolánica sobre los suelos plásticos, lo cual produce floculación de las partículas de las arcillas, produciendo mayor absorción de agua, razón por la que los porcentajes de humedad aumentan con el incremento del porcentaje de CBCA, tal como se muestra en las gráficas.

Resultados de la compactación del suelo de la zona 1 El Temporal.



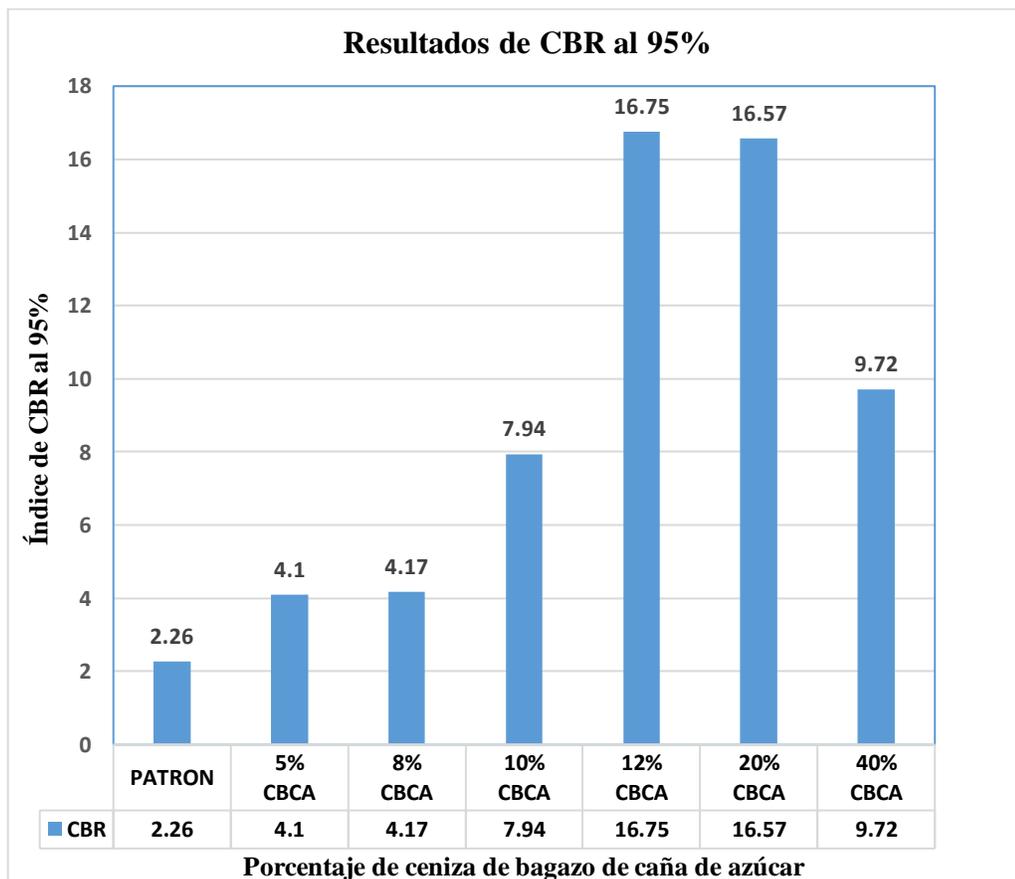
Resultados de la compactación del suelo de la zona 2 la Cuesta del Gallinazo.



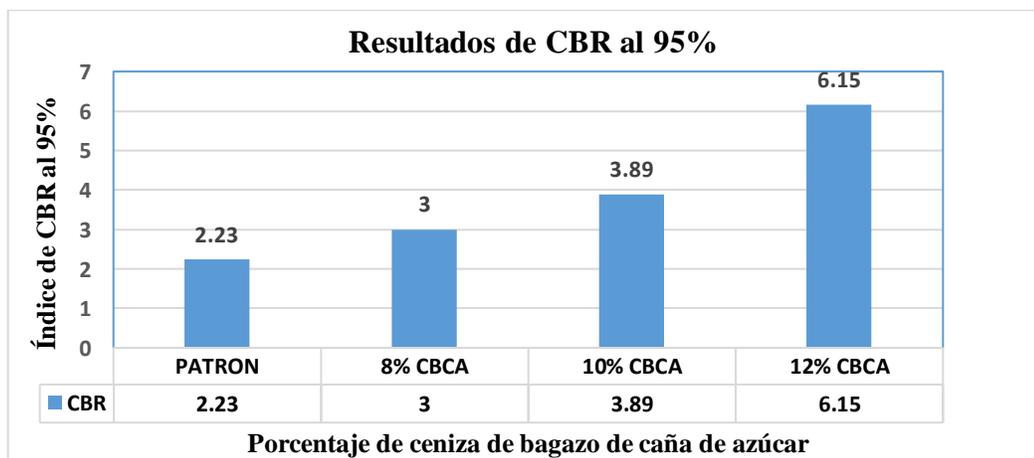
6. En cuanto a los resultados de los porcentajes de CBR fueron variables para las muestras ensayadas, para la muestra de la zona 1 estos aumentaron considerablemente según se fue aumentando el porcentaje de CBCA, llegando a un valor de CBR de 16.30% cuando se adicionó 12% de CBCA, pero cuando se adicionó 40% de CBCA el material sufrió una

descompensación y su CBR baja a 9.72%, en cambio para la muestra de la zona 2 solo alcanzo un CBR de 6.40% cuando se adicionó 12% de CBCA, con relación al 95% de su máxima densidad seca tal como se muestra en las gráficas.

Resultados de los ensayos de CBR del suelo de la zona 1 El Temporal.

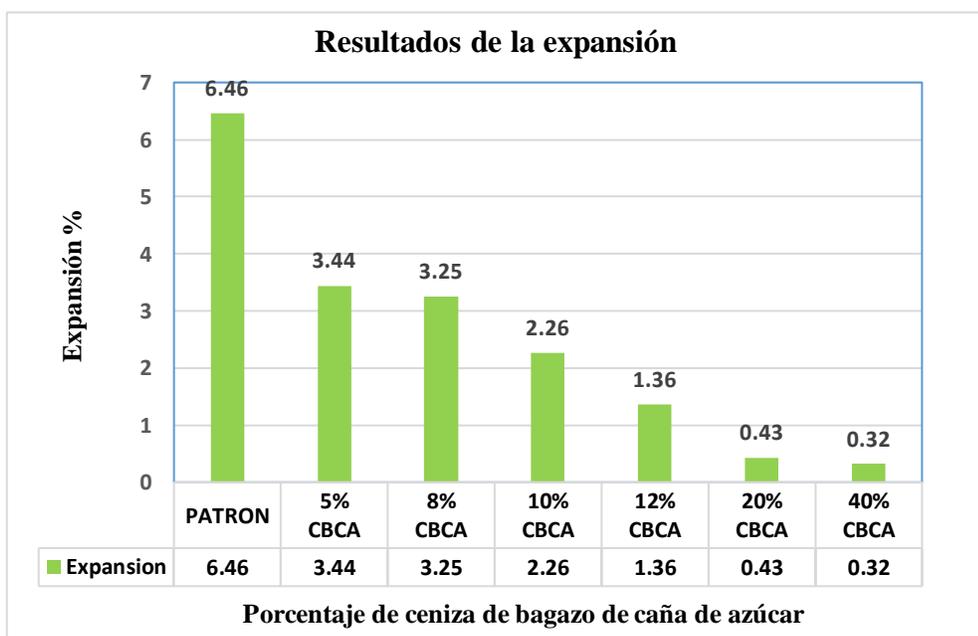


Resultados de los ensayos de CBR del suelo de la zona 2 la Cuesta del Gallinazo.

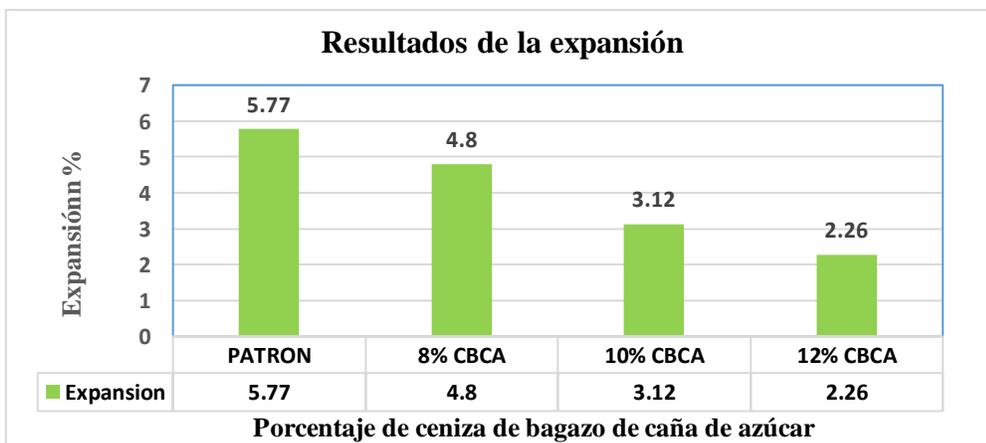


7. Las cenizas de bagazo de caña de azúcar(CBCA) reduce el carácter expansivo del suelo plástico a medida que se incrementa el contenido de CBCA, controlando de manera favorable la expansión, con suelo dela zona 1 El Temporal, el suelo natural presentó una expansión de 6.46%, con adición 12% de CBCA presentó una expansión de 1.28% y con adición de 40% de CBCA la expansión redujo a 0.32%. Con el suelo de la zona de la Cuesta del Gallinazo, el suelo presentó una expansión de 5.77% y con adición de 12% de CBCA la expansión redijo a 2.26% tal como se muestra en las gráficas.

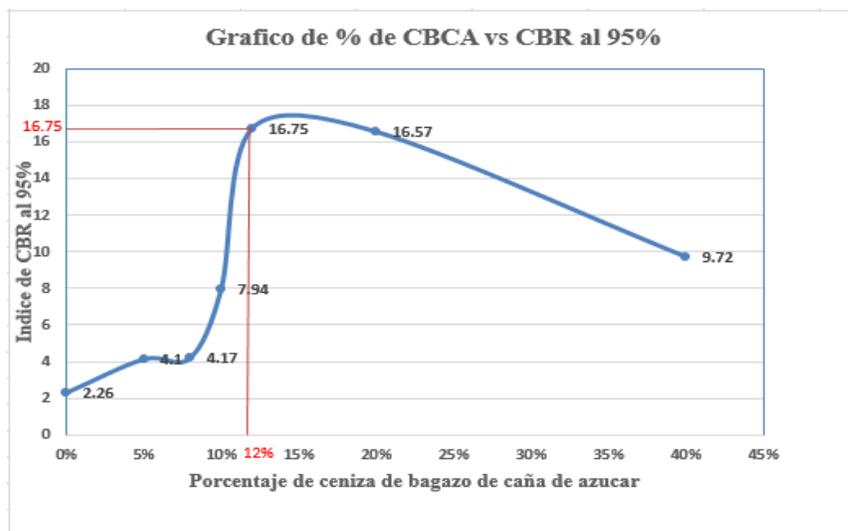
Resultados del control de la expansión del suelo de la zona 1 El Temporal.



Resultados del control de la expansión del suelo de la zona 2 la Cuesta del Gallinazo.



8. El contenido óptimo de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), es de 12% para su aplicación en los suelos plásticos en estudio, tanto de la zona El Temporal como la de la Cuesta del Gallinazo, este valor se obtuvo realizando ensayos de CBR para diferentes porcentajes de suelo–ceniza hasta llegar al óptimo, como lo muestra esta gráfica



9. Se realizó el análisis físico químico a la ceniza de bagazo de caña de azúcar, teniendo como resultado los siguientes datos, detallado en la tabla que se muestra a continuación:

Resultados de los ensayos de la CBCA			
N°	Tipo de análisis	Unidad	Resultados
1	Análisis físico:		
	color		Gris con presencia de residuos carbonosos
	Ph		10.85
	% de humedad	%	0.81
2	Análisis químico:		
	% SiO ₂	%	10.07

10. De acuerdo al conjunto de resultados obtenidos durante esta investigación se determinó que, sí es posible mejorar las propiedades de resistencia de los suelos plásticos adicionando cenizas de bagazo de caña de azúcar ya que mediante los ensayos realizados con las muestras de los suelos en estudio ratifica que, sí mejoran sus propiedades, haciendo posible la aplicación del material en la capa subrasante.

5.2. RECOMENDACIONES

En base a los resultados de la presente investigación, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Como se demostró en esta investigación, la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) mejora las propiedades de resistencia y reduce la expansión en los suelos plásticos expansivos, por lo que se recomienda tener en cuenta este material como una alternativa de estabilización de los suelos finos plásticos.
2. Se recomienda realizar investigaciones con cenizas de bagazo de caña de azúcar con diferentes condiciones de quemado, como por ejemplo la quema controlada a diferentes temperaturas en hornos industriales, para poder medir a que temperatura es más conveniente hacer el incinerado del bagazo de caña de azúcar, para que ésta tenga una mejor reacción al combinarla con los suelos plásticos y por ende obtener mejores resultados en las propiedades de estos suelos.
3. Estudios que se hicieron antes de esta investigación muestra que cuando el suelo presenta una mayor plasticidad y es estabilizado con CBCA, los resultados obtenidos en sus propiedades son favorables, puesto que se genera una mejor reacción química entre estos, por lo que se recomienda más estudios sobre esta técnica de estabilización en nuestro país, donde se involucren distintos suelos con diferentes propiedades plásticas.
4. Sería una mejor referencia realizar estabilizaciones en campo, de esta forma podremos saber si hay reacciones similares en los resultados de los ensayos obtenidos en laboratorio y las estabilizaciones en campo.
5. Diferentes países en el mundo son grandes productores de caña de azúcar y sus industrias azucareras, al procesar la caña de azúcar, generan grandes cantidades de bagazo que no tiene un uso definido, esto hace que lo acopien en grandes cantidades al aire libre (en pampa) hasta que seca, una vez seco, el bagazo es incinerado para reducir su volumen quedando las cenizas como residuos contaminantes del medio ambiente. Para mitigar esta contaminación se recomienda utilizar esa ceniza para la estabilización de suelos y de ese modo reducir la contaminación del medio ambiente.