



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS DE
CARBÓN PARA USO COMO SUBRASANTE MEJORADA**

Autor: Bach. Olger Goñas Labajos

Asesor: Ing. Jhon Hilmer Saldaña Núñez

CHACHAPOYAS-PERÚ

2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS DE
CARBÓN PARA USO COMO SUBRASANTE MEJORADA**

Autor: Bach. Olger Goñas Labajos

Asesor: Ing. Jhon Hilmer Saldaña Núñez

CHACHAPOYAS-PERÚ

2019

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Manuel Goñas y Florentina Labajos, mi padre y mi madre, por sus consejos y apoyo incondicional para poder cumplir con mis metas.

A DIOS, por haberme bendecido con: vida, mis padres y por ser luz en mi caminar del día a día.

Olger Goñas Labajos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme salud, sabiduría y fortaleza para vencer las adversidades y cumplir con mis metas programadas.

A los docentes de la facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, por compartir sus conocimientos a lo largo de toda mi formación como profesional. De manera especial a mi asesor 1 ing. Jhon Hilmer Saldaña Núñez y al Dr. Manuel Emilio Milla Pino por su apoyo profesional constante durante el desarrollo de esta investigación.

Al laboratorio de Mecánica de suelos de la DIRECCIÓN REGIONAL DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES- AMAZONAS y a todo el personal técnico por haberme facilitado y abierto las puertas para poder realizar los diferentes ensayos que contemplan esta tesis.

EL AUTOR

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Dr. Policarpio Chauca Valqui

RECTOR

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

VICERRECTOR ACADÉMICO

Dra. Flor Teresa García Huamán

VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

M.Sc. Edwin Adolfo Díaz Ortiz

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la tesis titulada “Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada”, desarrollada por el bachiller, egresado de la Carrera profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la UNTRM-A

➤ Olger Goñas Labajos.

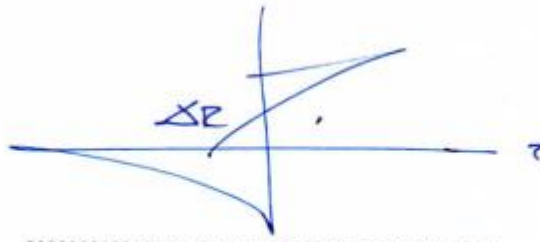
El suscrito da el visto bueno de la mencionada tesis dándole pase para que sea sometida a la revisión por el jurado evaluador comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones que formulen para su posterior sustentación.

Chachapoyas agosto de 2019.



.....
Ing. Jhon Hilmer Saldaña Núñez
ASESOR

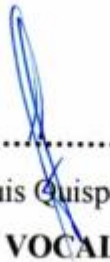
JURADO EVALUADOR

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G. Díaz Jáuregui', written over a set of horizontal and vertical lines that form a coordinate system or a signature guide.

.....
Arq. Guillermo Arturo Díaz Jáuregui
PRESIDENTE

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'E. Díaz Ortiz', written over a set of horizontal and vertical lines that form a signature guide.

.....
M.Sc. Edwin Adolfo Díaz Ortiz
SECRETARIO

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Quispe Osorio', written over a set of horizontal and vertical lines that form a signature guide.

.....
José Luis Quispe Osorio
VOCAL

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo, Olger Goñas Labajos, identificado con DNI 74294885 bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas:

Declaro Bajo Juramento

Que :

1. Soy autor del Trabajo de Investigación titulado:


Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada, que presento para obtener el el título profesional de Ingeniero Civil.

2. El Trabajo de Investigación no ha sido plagiado ni total ni parcialmente, y para su realización se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. El Trabajo de Investigación presentado no atenta contra derechos de terceros.
4. El Trabajo de Investigación presentado no ha sido publicado ni presentado anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. La información presentada es real y no ha sido falsificada, ni duplicada, ni copiada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido del Trabajo de Investigación, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para la UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido del Trabajo de Investigación.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el Trabajo de Investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

Chachapoyas agosto de 2019



Olger Goñas Labajos

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 19 de AGOSTO del año 2019, siendo las 17:30 horas, el aspirante: GOÑAS LABAYOS OLGER

defiende públicamente la Tesis titulada: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA USO COMO SUBRASANTE MEJORADA

para optar el Título Profesional en INGENIERÍA CIVIL

otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por:

Presidente: GUILLELMO ARTURO DÍAZ JAUREGUI

Secretario: EDUIN ADOLFO DÍAZ ORTÍZ

Vocal: JOSE LUIS QUISPE OSORIO

Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente () Aprobado (X) No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las horas 18:30 del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación del Trabajo de Investigación.


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:



FORMATOS PROYECTO DE TESIS

ÍNDICE O CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	vi
JURADO EVALUADOR	vii
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO	viii
ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN	15
II. MATERIAL Y MÉTODOS	17
2.1. Localización de la investigación.....	17
2.2. Diseño de la investigación.....	17
2.3. Universo muestral.....	17
2.4. Muestreo.....	17
2.5. Técnicas e instrumentos.....	18
2.6. Procedimiento	18
III. RESULTADOS	19
3.1. RESULTADO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	19
3.1.1. Humedad natural.....	19
3.1.2. Análisis granulométrico por tamizado	19
3.1.3. Límites de consistencia.....	21
3.1.4. Compactación proctor estándar	22
3.1.5. California bearing ratio (CBR)	25
3.2. Análisis de varianza.....	27
3.3. Prueba de Diferencia Mínima Significativa – Comparaciones Múltiples.....	28
IV. DISCUSIÓN.....	31
V. CONCLUSIONES.....	33
VI. RECOMENDACIONES	34
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
VIII. ANEXOS	37
ANEXO 1- Registro fotográfico	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM de las muestras de suelo extraídas.....	17
Tabla 2. Cantidad de repeticiones aplicado los porcentajes de cenizas de carbón.....	17
Tabla 3. Contenido de humedad natural.....	19
Tabla 4. Gradación granulométrica de la muestra de la calicata 1.....	19
Tabla 5. Gradación granulométrica de la muestra de la calicata 2.....	20
Tabla 6. Resumen de los Límites de Consistencia de las calicatas 1 y 2.....	21
Tabla 7. Clasificación de suelos.....	22
Tabla 8. Óptimo Contenido de Humedad y Máxima Densidad Seca calicata 1 y adición de cenizas de carbón (15%, 20% y 25%).....	22
Tabla 9. Óptimo Contenido de Humedad y Máxima Densidad Seca, calicata 2 y adición de cenizas de carbón (15%, 20% y 25%).....	23
Tabla 10. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra patrón (MP).....	25
Tabla 11. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra adicionada el 15% CC	25
Tabla 12. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra adicionada el 20%	26
Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra adicionada el 25%	26
Tabla 14. Resumen de datos – CBR	27
Tabla 15. Análisis de varianza de los datos de CBR - calicata 1.....	27
Tabla 16. Análisis de varianza de los datos de CBR - calicata 2	28
Tabla 17. Comparaciones múltiples entre combinaciones de tipo de suelo y porcentajes de cenizas de carbón – calicata 1	28
Tabla 18. Comparaciones múltiples entre combinaciones de tipo de suelo y porcentajes de cenizas de carbón – calicata 2	29
Tabla 19. Resultado del análisis de varianza y prueba de comparación múltiple (DMS).....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva granulométrica de la muestra de la calicata 1.....	20
Figura 2. Curva granulométrica de la muestra de la calicata 2.....	21
Figura 3. Variación de la M.D.S. con los porcentajes adicionados de CC-calicata 1.....	23
Figura 4. Variación del óptimo contenido de humedad con los porcentajes adicionados de CC-calicata 1.....	23
Figura 5. Variación de la M.D.S. con los porcentajes adicionados de CC-calicata 2.....	24
Figura 6. Variación del óptimo contenido de humedad con los porcentajes adicionados de CC-calicata 2.....	24
Figura 7. Comparación CBR-Porcentaje de adición.....	29
Figura 8. CBR de las calicatas 1 y 2 adicionadas cenizas de carbón.....	30

RESUMEN

La baja capacidad de soporte que presentan los suelos de la ciudad de Chachapoyas, es desfavorable para ser usadas como subrasante por lo que este trabajo de investigación experimental, tiene como objetivo evaluar la influencia que tiene un subproducto obtenido de la quema de carbón mineral y carbón vegetal (cenizas de carbón) proveniente de una industria ladrillera de la ciudad de Chachapoyas en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de muestras de suelo. El estudio se inició tomando muestras de suelo de las cuadras ocho y nueve de calle Las Lomas, anexo 16 de Octubre a las que se les efectuó ensayos de: humedad natural, granulometría, límites de consistencia, compactación proctor estándar y capacidad de soporte (CBR) a cada muestra de suelo en estado natural. Las muestras adicionadas cenizas de carbón al 15%, 20% y 25% solo se le realizaron ensayos de límites de consistencia, compactación proctor estándar y capacidad de soporte (CBR) respectivamente; los resultados mostraron que el incremento de la capacidad de soporte de los suelos estudiados es directamente proporcional a los porcentajes de cenizas de carbón adicionados, llegando a la conclusión que las cenizas de carbón si mejoran la capacidad portante de los suelos de tipo CH y OH pero los porcentajes de cenizas adicionados no logran estabilizarlos según el manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, para ser usados como una subrasante mejorada.

Palabras Claves: estabilización de suelos, cenizas de carbón, subrasante.

ABSTRACT

The low support capacity presented by the soils of the city of Chachapoyas, is unfavorable to be used as an subgrade so that this experimental research work, aims to assess the influence that a by-product obtained from the burning of coal and coal has Vegetable (coal ash) from a brick industry in the city of Chachapoyas in the improvement of the mechanical properties of soil samples. The study began by taking soil samples from blocks eight and nine of Las Lomas street, annex October 16, which were tested for: natural humidity, grain size, consistency limits, standard proctor compaction and support capacity (CBR) to each soil sample in its natural state. The samples added 15%, 20% and 25% coal ash were only tested for consistency limits, standard proctor compaction and support capacity (CBR) respectively; The results showed that the increase in the bearing capacity of the studied soils is directly proportional to the percentages of added carbon ashes, concluding that coal ashes do improve the bearing capacity of the soils of type CH and OH but the percentages of added ashes fail to stabilize them according to the manual of roads, soils, geology, geotechnics and pavements, to be used as an improved subgrade.

Keywords: soil stabilization, coal ash, subgrade.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo que sostiene las cargas transmitidas por la superficie de rodadura de una vía debe encontrarse en condiciones tales, que sea competente para resistirlas, cuando este no es el caso las alternativas de solución son: cambiar el suelo por un material de préstamo (utilizar material de cantera cercanas al proyecto), aunque esto se considera una buena solución, por lo general tiene el inconveniente de alto costo debido al material de reemplazo; siendo la otra alternativa de realizar un método de estabilización para modificar sus propiedades mecánicas sin tener que eliminar el suelo existente (Pérez C. , 2014, pág. 16)

Muchos suelos debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos de pavimentación. Siendo una alternativa de solución mejorar las características mecánicas del material, estabilizándolo con productos adicionados, debido a que estudios sobre la estabilización de suelos han venido experimentando un importante crecimiento desde el año 2000 (Morales, 2015, pág. 8)

La estabilización de suelos utilizando cenizas de carbón ha tenido óptimos resultados en nuestro país y en países como, Ecuador y Colombia ya que mejoraron sus propiedades mecánicas (Huancoillo, 2017, pág. 14).

En la periferia de la ciudad de Chachapoyas contamos con la apertura de muchas calles y dejadas a nivel de subrasante para la circulación vehicular y peatonal, sin tener en cuenta la deficiente capacidad de soporte con la que cuenta, debido a este problema se busca obtener un subproducto que ayude a mejorar dicha característica mecánica de los suelos y solucionar la problemática que se está viviendo.

Este trabajo, se centra en la estabilización de suelos con ceniza de carbón proveniente de la industria ladrillera, localizada en el distrito de Chachapoyas, con el fin de mejorar las características de soporte que ofrecen estos suelos a nivel de subrasante en el anexo 16 de Octubre; a la ceniza utilizada se denomina “CC” (Ceniza de Carbón) y los porcentajes (tratamientos) de CC empleadas en esta investigación fueron del 15%, 20% y 25%.

El método empleado en el desarrollo de esta investigación implicó la realización de estudio de mecánica de suelo, mediante ensayos de laboratorio para obtener resultados físicos y mecánicos de las muestras de suelo extraídas de cada una de las calicatas. Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio, se tabularon, graficaron, se compararon mediante gráficos de barras y por último se utilizó el método estadístico diseño completamente al azar y la prueba de comparaciones múltiples (Diferencia Mínima Significativa) que ayudaron a determinar el tratamiento que presentó un mejor comportamiento en cada una de las muestras de suelo analizadas.

La capacidad de soporte se evaluó mediante ensayos de CBR, previo ensayo de compactación Proctor Estándar que ayudo a determinar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca, los materiales y equipos utilizados fueron proporcionados por el laboratorio de mecánica de suelos y concreto de la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones-Amazonas.

Se pretende que este trabajo sea una iniciativa para seguir evaluando a mayor profundidad el uso de las cenizas de carbón como material alternativo para la estabilización de suelos en vías no pavimentadas y contribuir con posteriores estudios.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Localización de la investigación.

Las muestras de suelo extraídas fueron de las cuadras ocho y nueve de calle Las Lomas, anexo 16 de octubre, distrito de Huancas, provincia Chachapoyas- Amazonas- Perú.

Tabla 1. Coordenadas UTM de las muestras de suelo extraídas.

CALICATA	Este	Norte	Cota
C-1	183717.61	9312489.45	2488
C-2	183776.55	9312644.68	2498

Los ensayos de esta investigación se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos y concreto de la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones - Amazonas (DRTC-A), ubicado en: Chachapoyas, Amazonas, Perú.

2.2. Diseño de la investigación.

Se aplicó el diseño experimental completamente al azar.

2.3. Universo muestral.

Para la presente investigación se extrajo muestras de suelo de las cuadras ocho y nueve de calle Las Lomas, así mismo se prepararon combinaciones de suelo-ceniza de carbón para ser sometido a ensayos mecánicos.

Tabla 2. Cantidad de repeticiones aplicado los porcentajes de cenizas de carbón.

ENSAYOS	CALICATA 1			CALICATA 2		
	15%CC	20%CC	25%CC	15%CC	20%CC	25%CC
Límites de consistencia	1	1	1	1	1	1
Compactación proctor estandar	1	1	1	1	1	1
California bearing ratio	5	5	5	5	5	5

**CC: cenizas de carbón.

2.4. Muestreo

Se realizó un muestreo no probabilístico tipo intencional o por juicio

2.5. Técnicas e instrumentos

- Técnicas de recolección: Observación.
- Instrumentos de recolección de información: Fichas técnicas de ensayos de laboratorio (Ver ANEXO 2)

2.6. Procedimiento

Paso 1: Se extrajeron las muestras de suelo de (calle Las Lomas-16 de Octubre-Chachapoyas), para su posterior secado.

Paso 2: Recojo y tamizado por la malla N°4 de las cenizas de carbón proveniente de la industria ladrillera.

Paso 3: Determinación de las características físicas de las muestras de suelo en estado natural, tales como:

- Humedad natural (MTC E 108/ ASTM D2216)
- Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107/ ASTM-D422, C-117/ AASHTO T-27, T-88)
- Límites de consistencia (MTC E-110, 111/ ASTM D-4318 / AASHTO T-90, T-89)
 - Límite líquido.
 - Límite plástico.
 - Índice de plasticidad.

Paso 4: Determinación de las características mecánica de las muestras de suelo en estado natural y adicionadas cenizas de carbón al 15%, 20% y 25%, mediante ensayos de:

- Compactación proctor estandar (MTC E-115, E-116/ ASTM D-1557, D 698/ AASHTO T-180)
- California bearing ratio (MTC E-132/ ASTM D-1883/ AASHTO T-193)

Paso 5: Se realizó el procesamiento de los datos en gabinete que se recolectaron a partir de cada uno de los ensayos de laboratorio tanto para los suelo en estado natural, como para las muestras de suelo adicionadas cenizas de carbón.

Paso 6: Con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa se determinó el porcentaje de cenizas de carbón que tuvo un efecto significativo en el incremento de la capacidad de soporte para cada uno de los tipos de suelos estudiados.

III. RESULTADOS

3.1. RESULTADO DE ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1.1. Humedad natural.

Tabla 3. Contenido de humedad natural.

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
C-1	32.70
C-2	28.31

3.1.2. Análisis granulométrico por tamizado

Tabla 4. Gradación granulométrica de la muestra de la calicata 1.

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
8	2.360	0.2	0.1	0.1	99.9
10	2.000	0.1	0.0	0.1	99.9
16	1.180	0.7	0.2	0.3	99.7
20	0.850	1.0	0.3	0.6	99.4
30	0.600	2.6	0.9	1.5	98.5
40	0.425	7.0	2.3	3.9	96.2
50	0.300	12.8	4.3	8.1	91.9
60	0.250	7.4	2.5	10.6	89.4
80	0.180	17.7	5.9	16.5	83.6
100	0.150	5.4	1.8	18.3	81.7
200	0.074	11.3	3.8	22.0	78.0
Pasante		233.9	78.0	100.0	

En la tabla 4 el porcentaje retenido en el tamiz 4 perteneciente a gravas es el 0%, el porcentaje retenido en el tamiz 200 es del 22% perteneciente a arena y el porcentaje pasante de finos es del 78%.

Figura 1. Curva granulométrica de la muestra de la calicata 1.

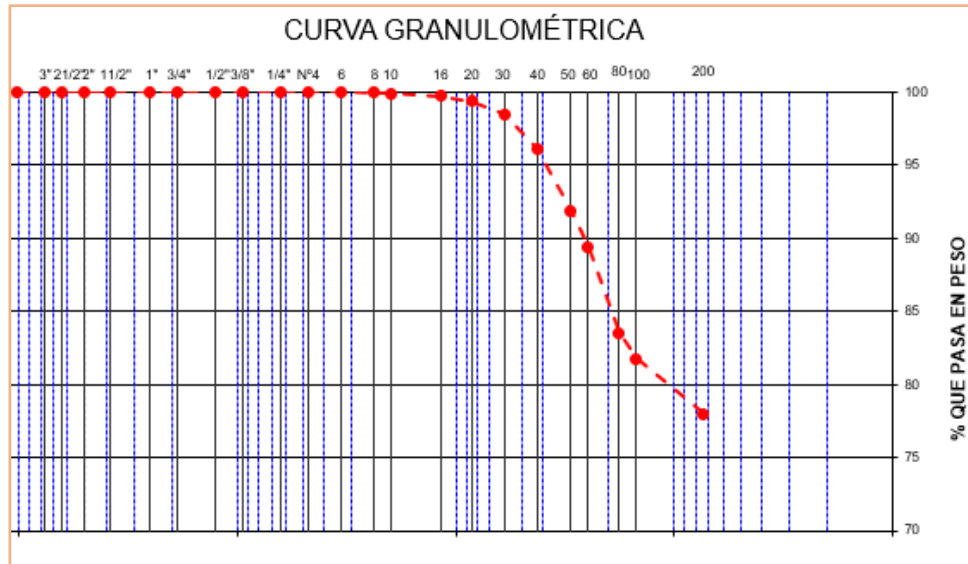
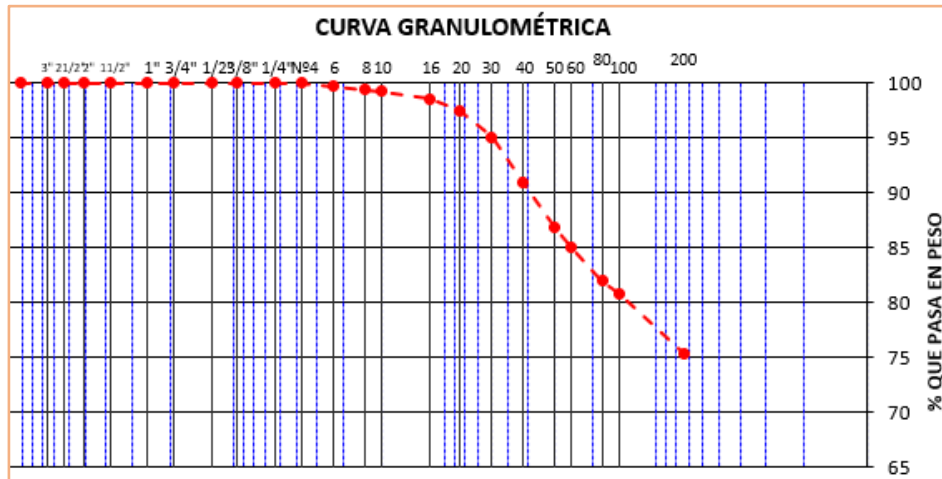


Tabla 5. Gradación granulométrica de la muestra de la calicata 2.

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
6	3.350	0.8	0.3	0.3	99.7
8	2.360	1.0	0.3	0.6	99.4
10	2.000	0.5	0.2	0.8	99.2
16	1.180	1.9	0.7	1.4	98.6
20	0.850	3.1	1.0	2.5	97.5
30	0.600	7.4	2.5	4.9	95.1
40	0.425	12.5	4.2	9.1	90.9
50	0.300	12.3	4.1	13.2	86.8
60	0.250	5.5	1.8	15.0	85.0
80	0.180	9.1	3.1	18.0	82.0
100	0.150	3.4	1.1	19.2	80.8
200	0.074	16.3	5.4	24.6	75.4
Pasante		226.2	75.4	100.0	

En la tabla 5 el porcentaje retenido en el tamiz 4 perteneciente a gravas es el 0.0%, el porcentaje retenido en el tamiz 200 es del 24.6% perteneciente a arena y el porcentaje pasante de finos es del 75.4%.

Figura 2. Curva granulométrica de la muestra de la calicata 2.



3.1.3. Límites de consistencia.

En los resultados de la Tabla 6 se pueden observar que las muestras en estado natural presentan mayor plasticidad que las muestras adicionada cenizas de carbón.

Tabla 6. Resumen de los límites de consistencia de las calicatas 1 y 2.

MUESTRA	LÍMITES DE CONSISTENCIA		
	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
C-1	51	27	24
C-1+15%CC	52	31	21
C-1+20%CC	53	34	19
C-1+25%CC	55	39	16
C-2	51	33	18
C-2+15%CC	52	35	17
C-2+20%CC	54	39	15
C-2+25%CC	55	42	13

Con los resultados de los límites de consistencia y gradación granulométrica, se presenta la clasificación SUCS y AASHTO en la Tabla 7 de las muestras analizadas en estado natural.

Tabla 7. Clasificación de suelos.

MUESTRA	CLASIFICACIÓN			
	SUCS		AASHTO	
	GRUPO	MATERIAL	GRUPO	MATERIAL
C-1	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad	A-7-6 (16)	Suelo arcilloso
C-2	OH	Arcilla orgánica de media o alta plasticidad	A-7-5 (13)	Suelo arcilloso

3.1.4. Compactación proctor estándar

Se presenta los resultados del ensayo proctor estándar donde se indican valores de óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca en las Tabla 8 y 9; en las figuras 3 y 5 se grafican la variación de la máxima densidad seca al adicionarle cenizas de carbón a las muestras y en las figuras 4 y 6 se grafican la variación del óptimo contenido de humedad, con los porcentajes de cenizas de carbón adicionados.

Tabla 8. Óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca calicata 1 y adición de cenizas de carbón (15%, 20% y 25%).

MUESTRA	PROCTOR ESTANDAR	
	óptimo contenido de humedad (%)	máxima densidad seca (gr/cm ³)
C-1	18.2	1.449
C-1 +15%CC	19.1	1.457
C-1 + 20%CC	21.5	1.487
C-1 +25%CC	24.7	1.494

Figura 3. Variación de la máxima densidad seca con los porcentajes adicionados de CC - calicata 1.

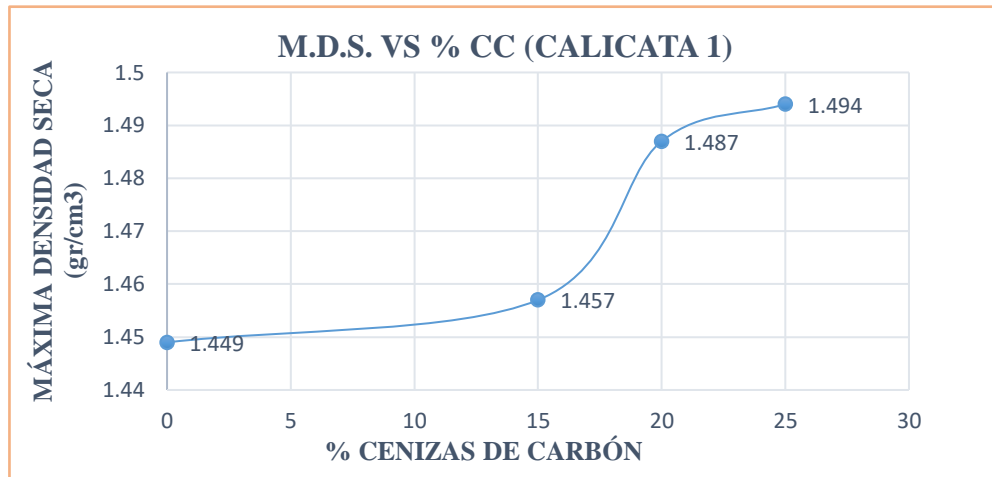


Figura 4. Variación del óptimo contenido de humedad con los porcentajes adicionados de CC-calicata 1.

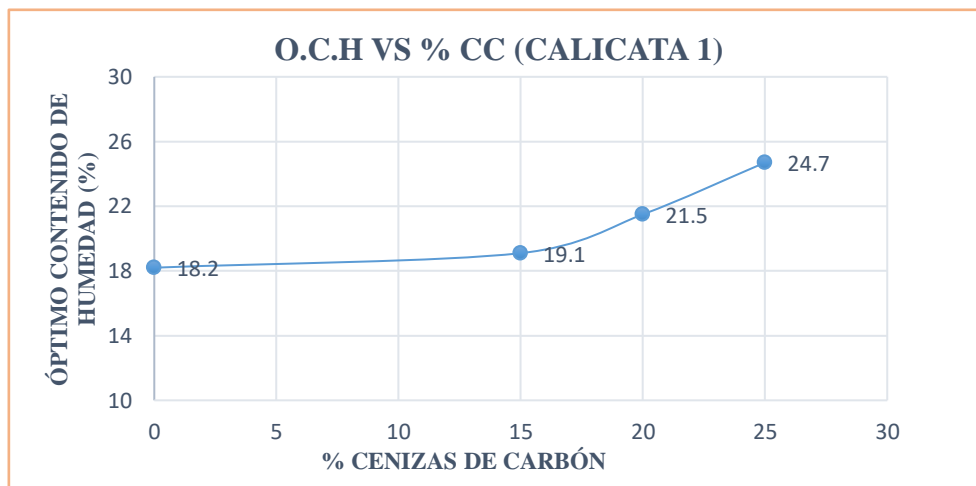


Tabla 9. Óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca, calicata 2 y adición de cenizas de carbón (15%, 20% y 25%).

MUESTRA	PROCTOR ESTANDAR	
	óptimo contenido de humedad (%)	máxima densidad seca (gr/cm ³)
C-2	21.3	1.473
C-2 + 15%CC	26.5	1.525
C-2 + 20%CC	26.7	1.551
C-2 + 25%CC	29.1	1.571

Figura 5. Variación de la máxima densidad seca con los porcentajes adicionados de CC - calicata 2.

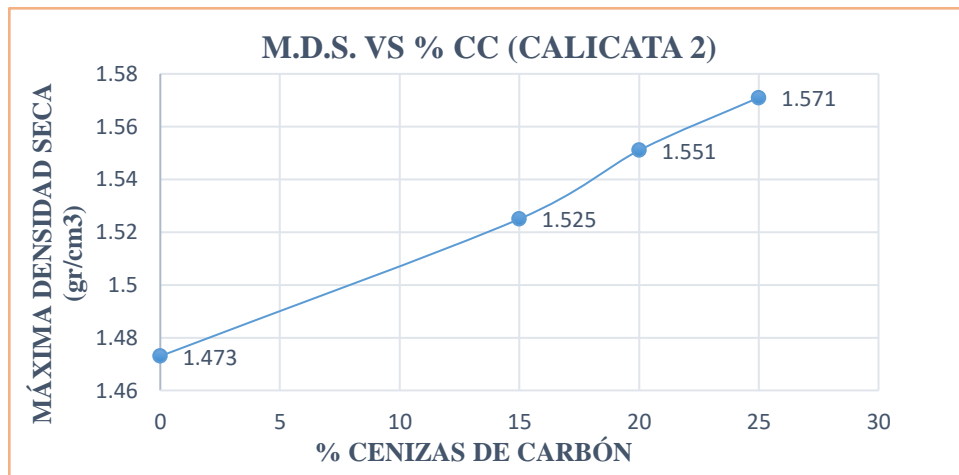
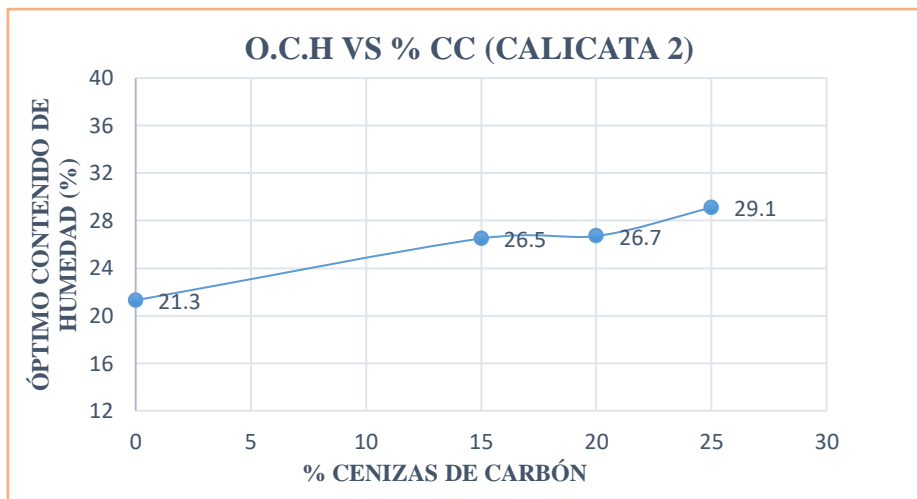


Figura 6. Variación del óptimo contenido de humedad con los porcentajes adicionados de CC-calicata 2.



3.1.5. California bearing ratio (CBR)

Tabla 10. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra patrón.

Mezcla	Adición (%)	Calicata	CBR (%)	Prom.	Categoría de subrasante
MP-01	0	1	2.0	2.1	Subrasante Inadecuada
MP-02	0	1	2.0		
MP-03	0	1	2.1		
MP-04	0	1	2.1		
MP-05	0	1	2.1		
MP-06	0	2	2.1	2.2	Subrasante Inadecuada
MP-07	0	2	2.2		
MP-08	0	2	2.2		
MP-09	0	2	2.2		
MP-10	0	2	2.2		

**MP: muestra patrón.

Tabla 11. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra adicionada el 15% CC.

Mezcla	Adición (%)	Calicata	CBR (%)	Prom.	Categoría de subrasante
MCC-01	15	1	2.1	2.3	Subrasante Inadecuada
MCC-02	15	1	2.2		
MCC-03	15	1	2.1		
MCC-04	15	1	2.4		
MCC-05	15	1	2.5		
MCC-06	15	2	2.7	2.6	Subrasante Inadecuada
MCC-07	15	2	2.6		
MCC-08	15	2	2.6		
MCC-09	15	2	2.7		
MCC-10	15	2	2.6		

**MCC: muestra adicionada cenizas de carbón.

Tabla 12. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra adicionada el 20% CC.

Mezcla	Adición (%)	Calicata	CBR (%)	Prom.	Categoría de subrasante
MCC-01	20	1	2.9	2.9	Subrasante Inadecuada
MCC-02	20	1	2.8		
MCC-03	20	1	2.9		
MCC-04	20	1	2.8		
MCC-05	20	1	3.1		
MCC-06	20	2	2.9	3.0	Subrasante Inadecuada
MCC-07	20	2	3.0		
MCC-08	20	2	2.9		
MCC-09	20	2	3.0		
MCC-10	20	2	3.0		

Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de CBR al 95% MDS de la muestra adicionada el 25% CC.

Mezcla	Adición (%)	Calicata	CBR (%)	Prom.	Categoría de subrasante
MCC-01	25	1	3.5	3.5	Subrasante Pobre
MCC-02	25	1	3.5		
MCC-03	25	1	3.4		
MCC-04	25	1	3.3		
MCC-05	25	1	3.6		
MCC-06	25	2	3.7	3.7	Subrasante Pobre
MCC-07	25	2	3.6		
MCC-08	25	2	3.7		
MCC-09	25	2	3.7		
MCC-10	25	2	3.6		

Tabla 14. Resumen de datos - CBR.

CALICATA	Adiciones porcentuales	CENIZAS DE CARBÓN				
		Observaciones				
		1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	5 ^{ta}
1	0% (T ₁)	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1
	15% (T ₂)	2.1	2.2	2.1	2.4	2.5
	20% (T ₃)	2.9	2.8	2.9	2.8	3.1
	25% (T ₄)	3.5	3.5	3.4	3.3	3.6
2	0% (T ₁)	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2
	15% (T ₂)	2.7	2.6	2.6	2.7	2.6
	20% (T ₃)	2.9	3.0	2.9	3.0	3.0
	25% (T ₄)	3.7	3.6	3.7	3.7	3.6

**T₁: tratamiento 1; T₂: tratamiento 2; T₃: tratamiento 3; T₄: tratamiento 4

En la Tabla 14 se tiene los valores del ensayo de CBR al 95% de la máxima densidad seca y a una pulgada de penetración, de las muestras patrón y muestra con las tres adiciones porcentuales de 15, 20 y 25% de cenizas de carbón de las dos calicatas estudiadas, para ello se elaboraron 10 mezclas patrón y un total de 30 mezclas en los distintos porcentajes antes mencionados.

3.2. Análisis de varianza.

Tabla 15. Análisis de varianza de los datos de CBR - calicata 1

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F _c	F(t) 5%	F(t) 1%
TRATAM.	3	6.086	2.03	126.79	3.24	5.29
EE	16	0.256	0.016			
TOTAL	19	6.3420				

$$CV (\%) = 4.74$$

De la tabla 15 el F_c mayor al F(t)1%, por lo que los tratamientos son altamente significativos sobre el CBR para el tipo de suelo CH de la calicata 1.

Tabla 16. Análisis de varianza de los datos de CBR - calicata 2

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	F(t) 5%	F(t) 1%
TRATAM.	3	5.804	1.93	703.52	3.24	5.29
EE	16	0.044	0.0027			
TOTAL	19	5.8480				
CV (%) =	1.83					

De la tabla 16 el Fc mayor al F(t)1%, por lo que los tratamientos son altamente significativos sobre el CBR para el tipo de suelo OH de la calicata 2.

3.3. Prueba de Diferencia Mínima Significativa – Comparaciones Múltiples

Cálculo de los parámetros:

$$DMS_{(\alpha)} = t_{(\alpha, e, gl.)} \sqrt{\frac{2CME}{r}}$$

Calicata 1:

$$DMS_{(0.05)} = 1.7459 * \sqrt{\frac{2 * 0.016}{5}} = 0.14$$

Calicata 2:

$$DMS_{(0.05)} = 1.7459 * \sqrt{\frac{2 * 0.0028}{5}} = 0.06$$

Tabla 17. Comparaciones múltiples entre combinaciones de tipo de suelo y porcentajes de cenizas de carbón - calicata 1.

Diferencia de Niveles	Diferencia de las Medias	Resultados	Conclusión
T ₄ (25%) - T ₃ (20%)	0.56	0.56 > 0.14	T ₄ ≠ T ₃
T ₄ (25%) - T ₂ (15%)	1.20	1.20 > 0.14	T ₄ ≠ T ₂
T ₄ (25%) - T ₁ (0%)	1.40	1.40 > 0.14	T ₄ ≠ T ₁
T ₃ (20%) - T ₂ (15%)	0.64	0.64 > 0.14	T ₃ ≠ T ₂
T ₃ (20%) - T ₁ (0%)	0.84	0.84 > 0.14	T ₃ ≠ T ₁
T ₂ (15%) - T ₁ (0%)	0.20	0.20 > 0.14	T ₂ ≠ T ₁

T₁

T₂

T₃

T₄

Tabla 18. Comparaciones múltiples entre combinaciones de tipo de suelo y porcentajes de cenizas de carbón - calicata 2.

Diferencia de Niveles	Diferencia de las Medias	Resultados	Conclusión
T ₄ (25%) - T ₃ (20%)	0.70	0.70 > 0.06	T ₄ ≠ T ₃
T ₄ (25%) - T ₂ (15%)	1.28	1.28 > 0.06	T ₄ ≠ T ₂
T ₄ (25%) - T ₁ (0%)	1.48	1.48 > 0.06	T ₄ ≠ T ₁
T ₃ (20%) - T ₂ (15%)	0.32	0.32 > 0.06	T ₃ ≠ T ₂
T ₃ (20%) - T ₁ (0%)	0.78	0.78 > 0.06	T ₃ ≠ T ₁
T ₂ (15%) - T ₁ (0%)	0.46	0.46 > 0.06	T ₂ ≠ T ₁



En las tablas 17 y 18 se representan los resultados de realizar las comparaciones múltiples para cada una de los tratamientos para el tipo de suelo de cada calicata y los cuatro porcentajes de adición (0, 15, 20 y 25%).

Figura 7. Comparación CBR- Porcentaje de adición.

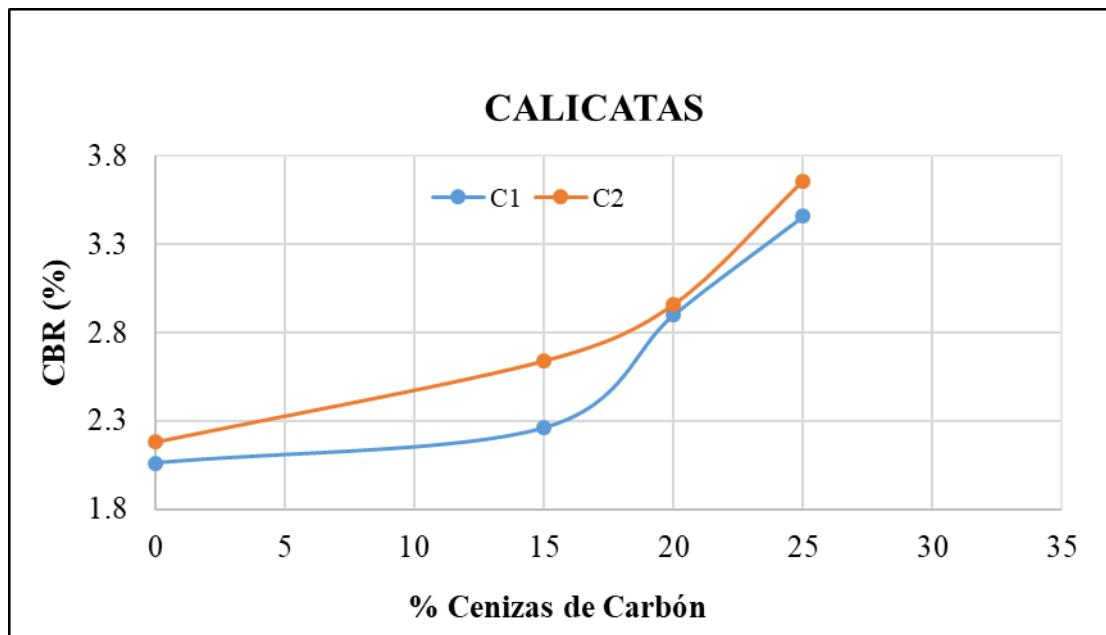


Figura 8. CBR de las calicatas 1 y 2 adicionadas cenizas de carbón.

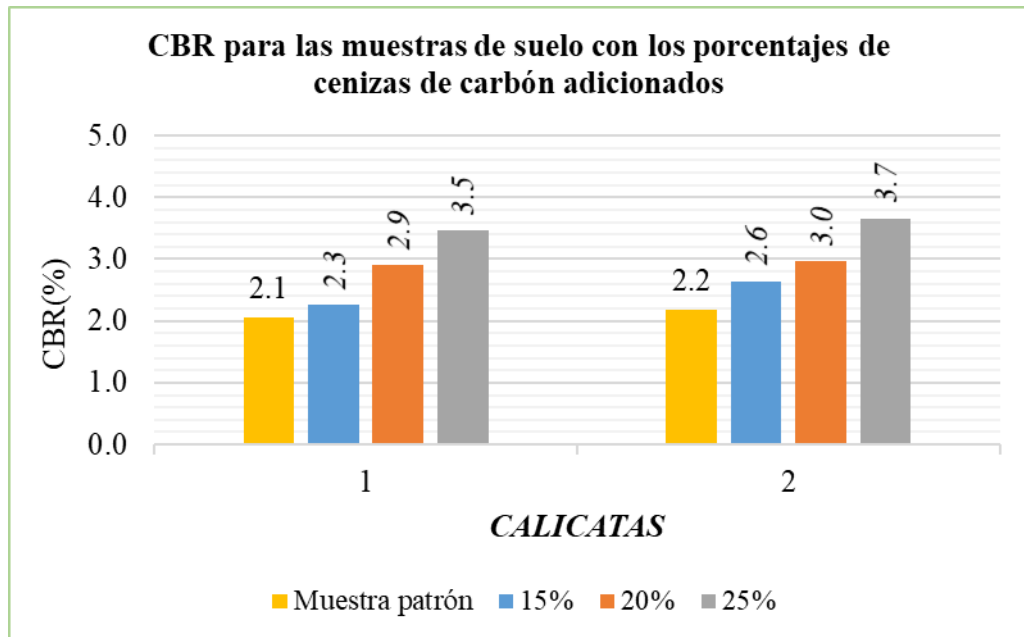


Tabla 19. Resultado del análisis de varianza y prueba de comparación múltiple (DMS).

CALICATA	VARIABLE	ANÁLISIS DE VARIANZA			OBS.
		FC	$F_t(5\% \frac{Gl_t}{Gl_{EE}})$	$F_t(1\% \frac{Gl_t}{Gl_{EE}})$	
1	CBR	122.78**	3.24	5.29	3.5 mayor 2.1 menor
2	CBR	703.52**	3.24	5.29	3.7 mayor 2.2 menor

IV. DISCUSIÓN

Del trabajo de investigación “Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con ceniza de carbón” (Cañar, 2017) el CBR que obtuvo para la muestra de suelo en estado natural para un tipo de suelo CH fue de 9.3% y cuando adicionó el 20 y 25% de cenizas de carbón los CBR fueron de 9.9% y 10.9% respectivamente, del cual se observa que el incremento del CBR es de 0.60 al adicionarle el 20% y de 1.60 al adicionarle el 25% de cenizas de carbón; siendo un incremento de 6.45% y 17.20% respecto al CBR del suelo natural; al compararlo con los resultados de la tabla 14 de esta investigación el aumento es de 0.80 al adicionarle el 20% y del 1.4 al agregarle el 25% de cenizas de carbón lo cual representa el 38.09% y 66.67% de incremento respecto al valor inicial de CBR de las muestras sin la adición de cenizas de carbón; por lo que Cañar concluye que la adición de las cenizas de carbón influye favorablemente en la estabilización de suelos expansivos y por lo tanto mejora su CBR, hecho que se confirma con esta investigación ya que se logró mejorar las propiedades mecánicas de los suelos en estudio.

De la tesis “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada” (Pérez, 2014), menciona que el CBR aumentó considerablemente de 8.3% a 17.3% adicionándole la ceniza volante en la proporción de 20 %, siendo este un incremento de 108.43% con respecto al suelo en estado natural para un suelo arcilloso, concluyendo que la ceniza volante mejoró las propiedades de resistencia y de cohesión en las arcillas. Los resultados que se obtuvieron en esta investigación con la adición del 20% de cenizas de carbón fueron muy inferiores a los resultados de la tesis mencionada, ya que el CBR aumento de 2.1% a 2.9% con la adición del 20% de cenizas de carbón, siendo un incremento porcentual de 38.09%; esta gran diferencia se debe al tipo de ceniza que se utilizó para cada una de las investigaciones.

En la tesis “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos” (Pérez, 2012), indica que el CBR tuvo un incremento de 9.2 al agregarle 20% de cenizas volantes de carbón siendo un

incremento de 119.48% respecto al CBR del suelo natural para un tipo de suelo CH; sin embargo en esta investigación el incremento del CBR al adicionarle el 20% de cenizas de carbón es de 0.80 el cual representa el 38.09% de incremento respecto al valor inicial del CBR de la muestra sin adicionarle cenizas de carbón; de los resultados concluimos que los incrementos de CBR obtenido por Pérez es mucho mayor a los que se lograron en esta tesis, esto debido al tipo de ceniza utilizada como material estabilizante.

De la misma manera se encuentra semejanza con lo que sostiene (Cubas & Falen, 2016) donde concluye que las cenizas de carbón e NaOH puede ser usado para la estabilización de suelos arenosos pobremente graduados con arcillas para mejorar la subrasante, de la misma manera (González, 2014) concluye que la utilización de cal y ceniza volante para la estabilización de suelo cohesivo es eficaz, por generar un mejoramiento de hasta cuatro veces el valor inicial de CBR a 95 por ciento.

De la tabla 17 se aprecia que el tratamiento 2 (15% de cenizas de carbón) tuvo un comportamiento desfavorable en el incremento del CBR, sin embargo, el tratamiento 4 (25% de cenizas de carbón) tuvo un mejor comportamiento en el incremento del CBR siendo este del 66.67% para el tipo de suelo CH de la calicata 1; de la tabla 18 se aprecia que el tratamiento 2 (15% de cenizas de carbón) tuvo un comportamiento desfavorable en el incremento del CBR, sin embargo, el tratamiento 4 (25% de cenizas de carbón) tuvo un mejor comportamiento en el incremento del CBR siendo este del 68.18% para el tipo de suelo OH de la calicata 2.

Del análisis estadístico se demuestra que las cenizas de carbón tienen un efecto altamente significativo sobre el CBR, ya que el factor calculado (F_c) es mayor al factor de tabla (F_t al 1%) tanto para el tipo de suelo CH y OH.

Los valores del coeficiente de variación (CV) fueron menores al 35%, lo cual indica que los datos obtenidos en este trabajo experimental son confiables, consecuentemente las conclusiones que se dieron a partir del análisis de varianza tienen validez.

V. CONCLUSIONES.

Las cenizas de carbón mejoran las propiedades mecánicas (CBR) de los suelos tipo CH y OH, aunque no alcanzan los estándares para ser usadas como material apto como subrasante debido a que se obtuvieron valores de CBR de 3.5% y 3.7% respectivamente, sin superar el valor mínimo de 6% según lo indica el manual de carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos.

La capacidad de soporte (CBR) obtenidos sin la adición de cenizas de carbón de las muestras de las calicatas 1 y 2 a nivel de subrasante fueron de 2.1% y 2.2% respectivamente.

La capacidad de soporte (CBR) obtenidos fueron de: 2.3%, 2.9% y 3.5% con la adición de cenizas de carbón del 15%, 20% y 25% respectivamente para el tipo de suelo CH de la calicata 1; para la calicatas 2, tipo de suelo OH, la capacidad de soporte (CBR) obtenidos fueron de: 2.6%, 3.0% y 3.7% con la adición de cenizas de carbón del 15%, 20% y 25% respectivamente.

Estadísticamente se determinó que la adición del 25% de cenizas de carbón proporciona un mejor comportamiento a la subrasante de los suelos tanto para la calicata 1 y la calicata 2, debido a que presenta un mayor incremento de los valores de CBR en base a la muestra patrón; así como se puede apreciar en las tablas 15 y 16.

VI. RECOMENDACIONES

Dirigido a los interesados en la investigación

Se recomienda hacer un análisis físico-químico de las cenizas de carbón de la ladrillera para saber su composición mineralógica con la que cuenta, puesto que la ceniza empleada en esta investigación es un subproducto obtenido de la combustión de carbón mineral y madera que se usa para la quema de los ladrillos.

Se recomienda hacer trabajos de investigación adicionando más del 25% de cenizas de carbón en suelos del tipo CH y OH para evaluar las mejoras de la capacidad de soporte que se pueden lograr con ese tipo de estabilizante.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Badillo J. (2002). *Mecánica de suelos*. Mexico.
- Cañar, E. (2017). *Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinados con cenizas de carbón*. Trabajo experimental previo a la optención del título de ingeniero civil. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Cubas, K., & Falen, J. (2016). *Evaluación de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y aplicación en carreteras no pavimentadas*. Tesis para optar el título de ingeniero civil. Universidad Señor de Sipan, Pimentel, Perú.
- González, A. (2014). *Estabilización mecánica de suelos cohesivosa través de la utilización de cal-cenizas volantes*. Trabajo de grado para optar el grado de ingeniero civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala.
- Huancoillo, Y. (2017). *Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para su uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera desvío Huancané –Chupa – Puno*. Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Ministerio de Transportes y comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras, Suelos, geología, geotécnia y pavimentos*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (mayo de 2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima, Perú.
- Morales, D. (2015). *Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de Suelos mediante activación alcalina y su uso en vias no pavimentadas*. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
- Peréz, C. (2014). *Estabilizacion de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada*. Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Peréz, R. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos*. Tesis para optar el grado de maestro en ciencias con mención en ingeniería geotécnica. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1- Registro fotográfico



Figura 1. Extracción de las muestras de suelo de las cuadras 8 y 9 de calle Las Lomas.



Figura 2. Recojo de las cenizas de carbón de la ladrillera.



Figura 3. Ensayo de análisis granulométrico por tamizado.

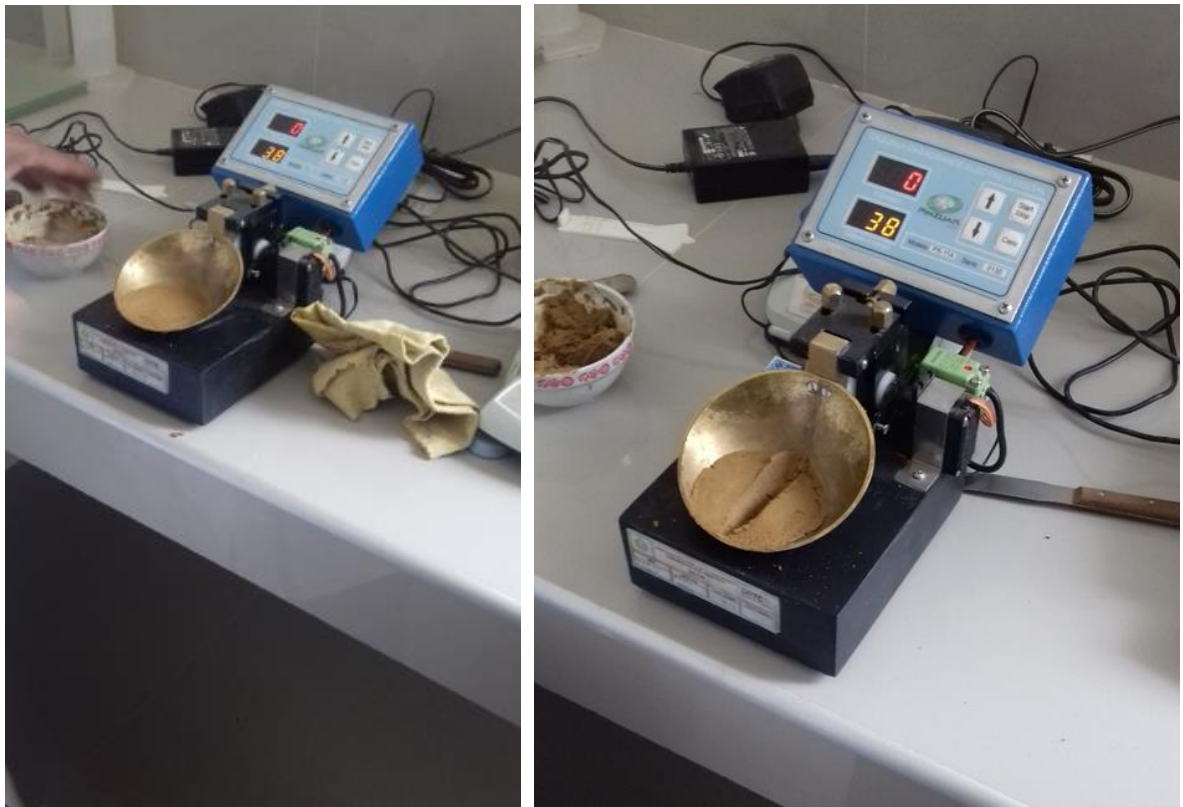


Figura 4. Ensayo de Límite Líquido con la Copa de Casagrande.



Figura 5. Preparación del material para el ensayo de compactación proctor estándar.



Figura 7. Lectura de la penetración en la máquina de CBR.