

CENIZAS CASCARILLA DE ARROZ FRENTE A OTROS MÉTODOS DE
MEJORAMIENTO GEOTECNICO
DE SUELOS ARCILLOSOS

WILMER ANDREY GÓMEZ JUYA



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2022

CENIZAS CASCARILLA DE ARROZ FRENTE A OTROS MÉTODOS DE
MEJORAMIENTO GEOTECNICO
DE SUELOS ARCILLOSOS

WILMER ANDREY GÓMEZ JUYA

Trabajo de grado en la modalidad de monografía para optar al título de Ingeniero
Civil

Director
Carlos Javier Sainea Vargas Dr. -Ing.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2022

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, fecha (día, mes, año)

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo primeramente a Dios por permitirme culminar esta maravillosa carrera, igualmente a todo el cuerpo docente de la escuela de Ingeniería Civil por compartir sus conocimientos y guiarme en cada uno de los proyectos y materias cursadas; también lo dedico a mi señora esposa Jenny Daniela, quien estuvo incondicionalmente apoyándome durante toda mi carrera, al igual que mis cuatro gaticos (Ryuk, Fifi, Erick y Ozzy) quienes trasnochaban conmigo en aquellas noches largas. Finalmente, e igualmente importante, dedico este trabajo a mi familia y amigos que de igual manera contribuyeron a este logro tan importante para mí.

Mil gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios primeramente por la salud y la vida que me ha otorgado para poder cumplir mis metas propuestas; agradezco también a todos mis amigos, compañeros y personas cercanas que a través de la carrera conocí, a mi esposa, compañeros de trabajo y familiares.

CONTENIDO

Pág.

GLOSARIO	26
RESUMEN	28
INTRODUCCIÓN	30
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	33
2 JUSTIFICACIÓN	34
3 ALCANCE Y LIMITACIONES	35
3.1 ALCANCE	35
3.2 LIMITACIONES	35
4 OBJETIVOS	36
4.1 OBJETIVO GENERAL	36
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
5 MARCO REFERENCIAL	37
5.1 MARCO CONCEPTUAL	37
5.1.1 SUELOS.....	37
5.1.2 SUELOS ARCILLOSOS	37
5.1.3 TIPOS DE ARCILLAS	38
5.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS	40
5.1.5 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	42
5.1.6 TIPO DE ESTABILIZACIÓN	44
5.1.7 LAS PUZOLANAS	46
5.1.8 CENIZAS VOLANTES (FLY ASH)	48
5.1.9 CASCARILLA DE ARROZ (CA).....	49
5.1.10 CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ	50
5.2 ESTADO DEL ARTE	52
5.2.1 INVESTIGACIONES DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	52
5.2.2 INVESTIGACIONES DE RELACIONADAS CON LAS CCA.	53
5.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN LAS METODOLOGÍAS AASTHO Y SUCS	54
5.3 MATERIALES Y TÉCNICAS	55
5.4 MARCO METODOLÓGICO	56

5.4.1	METODOLOGÍA EMPLEADA	56
5.4.2	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS.....	56
5.4.3	DELIMITACIÓN	57
5.5	FASES DE LA INVESTIGACIÓN	57
5.5.1	INFORMACIÓN FALTANTE	58
6	<u>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</u>	59
6.1	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS.	59
6.2	COMPARACIÓN DE METODOS DE ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS POR AUTORES SEGÚN EL TIPO DE ENSAYO.....	61
6.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS POR EL MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE LAS CCA	61
6.3.1	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CASCARILLAS DE ARROZ.....	62
6.3.2	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL	69
6.3.3	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS VOLANTES.....	76
6.3.4	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CEMENTO PORTLAND	82
6.4	ANÁLISIS COSTOS – BENEFICIOS	85
6.4.1	FACTORES DIRECTOS E INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD.....	86
6.4.2	FACTORES QUE AUMENTAN EL DESGASTE	86
	MAQUINARIA QUE IMPLICA COSTOS DE TRANSPORTE	87
6.4.3	CONSIDERACIONES PARA DISMINUIR COSTOS.....	87
6.5	MATRIZ COSTO – BENEFICIO	87
7	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	89
8	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	91
9	<u>ANEXOS</u>	95
9.1	ANEXO 1	95
9.1.1	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL.....	98
9.1.2	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS VOLANTES	99
9.1.3	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CEMENTO PORTLAND	100
9.2	ANEXO 2 - MANUAL DE PROCEDIMIENTOS	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Índice de plasticidad de la arcilla.	37
Tabla 2. Clasificación de suelos según tamaño de partículas.....	38
Tabla 3. Composición química de la cascarilla de arroz.....	51
Tabla 4. Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz.....	51
Tabla 5. Matriz Comparativa de ventajas y desventajas entre métodos de estabilización.	60
Tabla 6. Comparación del Humedad óptima - CCA.....	62
Tabla 7. Comparación del Límite líquido- CCA.....	63
Tabla 8. Comparación de la densidad máxima seca - CCA.....	64
Tabla 9. Comparación del índice de plasticidad - CCA.	65
Tabla 10. Comparación del CBR - CCA.....	66
Tabla 11. Comparación Índice de expansión - Resistencia compresión incofinada y modulo resilente - CCA.....	67
Tabla 12. comparación densidad máxima seca – con adición de cal.....	69
Tabla 13. Comparación CBR - cal.....	70
Tabla 14. Comparación Resistencia compresión incofinada, modulo resilente, esfuerzos máximos- Cal.....	71
Tabla 15. Comparación índice de plasticidad - cal.....	73
Tabla 16. Comparación Limite Líquido - cal.....	74
Tabla 17. Comparación Limite Plástico - cal.....	75
Tabla 18. Comparación de densidad máxima seca.....	76
Tabla 19. Análisis esfuerzo Max.; Rigidez y expansión del suelo.....	77
Tabla 20. Análisis físico - mecánicas cenizas volantes.....	78

Tabla 21. Comparación CBR.....	79
Tabla 22. Comparación LL.....	80
Tabla 23. Comparación densidad máxima seca - cemento portland	82
Tabla 24. Comparación CBR - cemento portland.....	83
Tabla 25. Comparación Humedad óptima - cemento portland.....	84
Tabla 26. Análisis expansión del suelo - cemento portland.....	85
Tabla 27. Valor productos por Kg y cada 110 Kg.....	88
Tabla 28. Precios unitarios de estabilización de suelos	88
Tabla 29. Precios de estabilización de suelos por M3	88

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICA 1. Humedad Óptima vs % Adición con adición de CCA.....	62
GRÁFICA 2. LL vs % Adición	63
GRÁFICA 3. Densidad máxima seca vs % Adición con CCA	64
GRÁFICA 4. Índice de plasticidad vs % Adición con CCA	65
GRÁFICA 5. CBR vs % Adición con CCA	66
GRÁFICA 6. Expansión del suelo vs % Adición con CCA.....	67
GRÁFICA 7. Compresión incofinada vs % Adición con CCA.....	68
GRÁFICA 8. Modulo resilente vs % Adición con CCA.....	68
GRÁFICA 9. Densidad máxima seca vs % Adición con cal	69
GRÁFICA 10. CBR vs % Adición con cal	70
GRÁFICA 11. Compresión incofinada vs % Adición con cal.....	71
GRÁFICA 12. Modulo resilente vs % Adición con cal.....	71
GRÁFICA 13. Esfuerzos máximos vs % Adición con cal.....	72
GRÁFICA 14. Rigidez vs % Adición con cal.....	72
GRÁFICA 15. Índice de plasticidad vs % Adición con cal	73
GRÁFICA 16. LL vs % Adición con cal	74
GRÁFICA 17. Límite Plástico vs % Adición	75
GRÁFICA 18. Densidad máxima seca vs % Adición de cenizas volantes	76
GRÁFICA 19. esfuerzo Max vs % Adición de cenizas volantes.....	77
GRÁFICA 20. Rigidez vs % Adición de cenizas volantes.....	77
GRÁFICA 21. Expansión del suelo vs % Adición de cenizas volantes.....	78
GRÁFICA 22. Humedad óptima vs % Adición de cenizas volantes.....	79

GRÁFICA 23. CBR vs % Adición de cenizas volantes	80
GRÁFICA 24. LL vs % Adición de cenizas volantes	81
GRÁFICA 25. Límite Plástico vs % Adición de cenizas volantes.....	81
GRÁFICA 26. Índice de Plasticidad vs % Adición de cenizas volantes.....	81
GRÁFICA 27. Densidad máxima seca vs % Adición con cemento Portland.....	82
GRÁFICA 28. CBR vs % Adición con cemento Portland.....	83
GRÁFICA 29. Humedad óptima vs % Adición con cemento Portland	84
GRÁFICA 30. Expansión del suelo vs % Adición con cemento Portland	85

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Mejoramiento de suelos arcillosos por Licuy, C. & Román, K. (2019)	95
Anexo 2. Mejoramiento de suelos arcillosos por Ormeño, E. & Rivas, N. (2020).	95
Anexo 3. Mejoramiento de suelos arcillosos por Llamoga, L. (2017).	96
Anexo 4. Mejoramiento de suelos arcillosos por Martínez, K. (2021).....	96
Anexo 5. Mejoramiento de suelos arcillosos por Cajaleón, O & Mondragón, D. (2018).	96
Anexo 6. Mejoramiento de suelos arcillosos por Caamaño, M. (2016)	97
Anexo 7. Mejoramiento de suelos arcillosos por Chuquizuta, C. (2019).	97
Anexo 8. Mejoramiento de suelos arcillosos por Oktavia, L. Et al. (2017).	97
Anexo 9. Mejoramiento de suelos arcillosos por García, A. (2019).	98
Anexo 10. Mejoramiento de suelos arcillosos por Moale, A. & Rivera, E. (2019). .	98
Anexo 11. Mejoramiento de suelos arcillosos por Chávez, D. & Odar, G. (2019).	98
Anexo 12. Mejoramiento de suelos arcillosos por Parra, M. (2018)	99
Anexo 13. Mejoramiento de suelos arcillosos por Khan, A. (2014).	99
Anexo 14. Mejoramiento de suelos arcillosos por Parra, M (2018).....	99
Anexo 15. Mejoramiento de suelos arcillosos por Flórez, G. Et al. (2008).....	100
Anexo 16. Mejoramiento de suelos arcillosos por Landa, A. & Torres, S. (2019).	100
Anexo 17. Mejoramiento de suelos arcillosos por Swain, N. & Sahoo, U. (2012).	100
Anexo 18. Mejoramiento de suelos arcillosos por Castro, J. Et al. (2019)	100
Anexo 19. Mejoramiento de suelos arcillosos por Quispe, Y. & Venero, R. (2021).	101

Anexo 20. Manual de procedimientos de métodos estabilizantes de suelos arcillosos 102

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Composición de las Caolinitas	38
Ilustración 2. Composición de las Illita	39
Ilustración 3. Composición de las Montmorillonitas	39
Ilustración 4. Cenizas volantes	48
Ilustración 5. Cascarillas secas de arroz.....	49
Ilustración 6. Cenizas de cascarilla de arroz	50

GLOSARIO

CAPACIDAD PORTANTE: capacidad del terreno o de una estructura para soportar las cargas aplicadas sobre el mismo terreno o la estructura (Vega, 2006). La importancia de la capacidad portante en los suelos es hacer que el suelo pueda resistir la presión máxima que ejerce la cimentación, y no permitir que el suelo sufra una ruptura o asentamiento fuera de los rangos establecidos.

CAPACIDAD CEMENTANTE: propiedad que tiene la capacidad de cohesionar un grupo de partículas en una mezcla para poder ganar resistencia. Experimentalmente es la diferencia de la resistencia a compresión no confinada en Kg/cm² entre el suelo y el material cementante” (Pérez, 2008).

EXPANSIÓN: hinchazón del suelo causado por la variación de la humedad causando graves daños a las estructuras (Delgado, 2011). Esta expansión de los suelos se da por lo general frente a la presencia de arcilla de grupos de la montmorillonita, la cual tiene la capacidad de expandirse cuando entra en contacto con el agua, dicha arcilla representa un gran desafío en los proyectos.

ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS: hace referencia a aquellos métodos que puede mejorar las características de un suelo con el fin de aumentar la resistencia y compresibilidad de un material mediante la unión artificial de sus partículas, para el caso de los suelos arcillosos se utilizan diferentes métodos de estabilización como lo son utilización de las cenizas de la cascarilla de arroz, estabilización con cal, estabilización con cemento Portland, estabilización química, con escorias siderúrgicas de alto horno, utilizando sales con cementantes activos alcalinamente, y con cenizas volantes.

LÍMITE LÍQUIDO (LL): el contenido de agua, en porcentaje, de un suelo en un límite arbitrariamente definido entre los estados líquidos y plásticos. Este contenido de agua es definido como el contenido de agua en el cual una porción pequeña de suelo colocada en una copa estándar y cortada por un surco de dimensiones estándar fluirán juntos en la base del surco por una distancia de 13 mm (1/2 pulg.) cuando se somete a 25 golpes a la copa cayendo 10 mm en un aparato estándar de límite líquido operado a una razón de 2 golpes por segundo.

LÍMITE PLÁSTICO (LP): el contenido de agua, en porcentaje, de un suelo en el límite entre los estados plástico y quebradizo. El contenido de agua en el cual un suelo no puede ser más deformado al enrollarlo en 3.2 mm (1/8 pulgadas) en diámetro de hebra sin desmenuzarlo.

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP): el rango de contenido de agua sobre el cual un suelo se compara plásticamente. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

PUZOLANA: es un material con alto contenido de silicio o silicio- aluminio, de origen natural o industrial, que una vez pulverizado en presencia de agua reacciona con el hidróxido de calcio, formando, a temperatura ambiente, compuestos con propiedades hidráulicas permanentemente insolubles y estables (Juárez,2012). Actividad Puzolánica es una reacción química entre los minerales de suelo y el hidróxido de calcio o cal, que conlleva a una acción de cementación entre las partículas de suelo formando así compuestos con propiedades cementantes (Morales, 2015).

CENIZAS CASCARILLA DE ARROZ (CCA): la ceniza de cascarilla de arroz es un desecho agrícola cuya principal característica es que posee propiedades químicas que, al mezclarse con el suelo para estabilizarlo, mejora las propiedades físico – mecánicas y por ende su durabilidad (De la Pared Condo, D; 2011).

MEJORAMIENTO GEOTÉCNICO: proceso por el cual son tratados de cierta manera para mejorar sus propiedades físicas o mecánicas para obtener un suelo sólido y estable que pueda soportar adecuadamente las cargas y condiciones ambientales.

RIGIDEZ DEL SUELO: es una medida cualitativa de la resistencia de un material a las deformaciones elásticas, que examina la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin grandes deformaciones (Machaca, J; 2017).

DENSIDAD MÁXIMA SECA (DMS): corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima

CENIZAS VOLANTES: partículas finas, en estado sólido, de ceniza, polvo y hollín que se liberan al aire cuando se quema un combustible.

CASCARILLA DE ARROZ: es un residuo orgánico que proviene del arroz, este producto el alto en contenido de sílice, lo cual lo hace un material ideal para estudios en obras civiles (De la Pared Condo, D; 2011).

RESUMEN

La presencia de suelos arcillosos en el territorio colombiano siempre ha sido un inconveniente para los ingenieros al momento de ejecutar algún tipo de proyecto que implique el uso de algún terreno donde estén presentes estos suelos; A partir de esto se vio la necesidad de desarrollar e implementar nuevas metodologías para el tratamiento y estabilización de estos.

Se encontró que este tipo de suelos tienen características de expansión, permeabilidad, e inestabilidad en sus estructuras, por lo cual mediante los cuatro métodos de estabilización de suelos arcillosos descritos en el siguiente trabajos (cenizas de cascarilla de arroz, cal, cenizas volantes y cemento portland)., se analizó cuál de los métodos es más efectivo comparados frente al método de estabilización con cascarilla de arroz, teniendo en cuenta que este método se caracteriza por tener influencia de mejoramiento de las propiedades mecánicas, esto debido a los altos índices de sílice; el mejoramiento con CCA se basa en agregar porcentajes pequeños de este material con el fin de mejorar las condiciones mecánicas del suelo, y así con los otros métodos que se analizaron.

A partir de esto, se analizaron los resultados de cada trabajo donde se obtuvo una comparación entre cada método, tanto por matrices como por gráficas, obteniendo así las comparaciones donde se encontró que la estabilización de suelos depende principalmente de las condiciones propias e iniciales de cada muestra, por otro lado, la revisión mostro mejoramiento en las propiedades físico – mecánicas, variando en sí los resultados frente a cada autor, zona de ubicación y muestras iniciales.

Otro punto de este trabajo, es la generación de un material guía donde se muestra las condiciones, factores y pasos que generalmente se tienen en cuenta para realizar un trabajo o proyecto de estabilización de suelos, en este trabajo se encontraran aspectos de ventajas, breve introducción a los suelos arcillosos, conceptos de tipos de estabilización, la composición química y física de los materiales estabilizantes, los efectos de estos materiales que tienen en el suelo, la maquinaria utilizada para estas estabilizaciones y conceptos de estudios económicos.

Palabras clave: Estabilización de suelos, Cascarilla de arroz, suelos arcillosos, estabilización geotécnica, propiedades mecánicas, materiales estabilizantes, porcentajes de adición.

ABSTRACT

The presence of clay soils in the colombian territory has always been a problem for engineers when executing any type of project that involves the use of any land where these soils are present; from this it was necessary to develop and implement new methodologies for the treatment and stabilization of these soils.

It was found that this type of soils has characteristics of expansion, permeability, and instability in their structures, so by means of the four methods of clay soil stabilization described in the following work (rice husk ash, lime, fly ash and Portland cement). In order to analyze which of the methods is more effective compared to the rice husk stabilization method, it was analyzed which of the methods is more effective compared to the rice husk stabilization method, taking into account that this method is characterized by having an influence on the improvement of the mechanical properties, due to the high silica indexes; the improvement with CCA is based on adding small percentages of this material in order to improve the mechanical conditions of the soil, and so on with the other methods that were analyzed.

From this, the results of each work were analyzed where a comparison between each method was obtained, both by matrices and graphs, thus obtaining comparisons where it was found that soil stabilization depends mainly on the own and initial conditions of each sample, on the other hand, the review showed improvement in the physical-mechanical properties, varying the results against each author, location area and initial samples.

Another point of this work is the generation of a guide material showing the conditions, factors and steps that are generally considered to carry out a soil stabilization work or project. In this work we will find aspects of advantages, brief introduction to clay soils, concepts of stabilization types, the chemical and physical composition of stabilizing materials, the effects of these materials on the soil, the machinery used for these stabilizations and concepts of economic studies.

Key words: Soil stabilization, rice husk, clayey soils, geotechnical stabilization, mechanical properties, stabilizing materials, addition percentages.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo monográfico se encontrará aspectos generales de la utilidad de las cenizas de cascarilla de arroz para la estabilización de suelos arcillosos, en este se da a conocer la importancia que tiene este producto, su composición química, física y la influencia que ejerce sobre los suelos al ser adicionada a estos.

Por ello, la presencia de suelos arcillosos dentro de la ejecución de obras ingenieriles es, por lo general, una constante problemática que requiere una solución pronta y económicamente viable; para esto se debe tener en cuenta la variedad de suelos arcillosos tanto en su estado natural como en un estado alterado, donde estos no son adecuados para el uso en la construcción de carreteras y caminos viales debido a que presentan características de resistencia bajas o cambios volumétricos bruscos. Para ellos, diversos investigadores han estudiado métodos para el mejoramiento de propiedades mecánicas de estos suelos; métodos tales como: estabilización con cal, estabilización con cemento Portland, estabilización química, estabilización con escorias siderúrgicas de alto horno, utilizando sales con cementantes activos alcalinamente y con cenizas volantes. Aparte de tales métodos, se buscan otras alternativas de mejoramiento más efectivas y de menor costo; una de ellas es la estabilización con cenizas de cascarilla de arroz.

Por lo anterior, y al considerarse a Colombia como un país arrocero, tiene un gran potencial de implementación de este método de mejoramiento, debido a que este no se ha desarrollado de manera masiva, lo que ha producido que las CCA hayan sido poco utilizadas como método de estabilización de suelos arcillosos, se plantea la necesidad de realizar una revisión bibliográfica, recopilación y análisis crítico y organizado, donde se evalué la eficacia de este método y se haga una comparación frente a los demás métodos comúnmente utilizados en este país y en otros países. El presente trabajo monográfico se enfoca en el estudio, estabilización y mejoramiento de las propiedades físico - mecánicas para suelos arcillosos a través de la adición de cenizas de cascarilla de arroz ya que es muy recurrente encontrar condiciones desfavorables, como lo es la alta plasticidad, en los proyectos geotécnicos, que forman problemas asociados a la inestabilidad de los suelos arcillosos.

El propósito de este trabajo monográfico es dar a conocer la influencia que tiene las cenizas de cascarilla de arroz, los cambios que se logran con este producto, y otro aspecto que busca es dar un material guía donde se relata un procedimiento de distintos pasos explicando de manera secuencial como iniciar la estabilización de los suelos arcillosos utilizando diferentes métodos de estabilización de suelos.

Dentro la búsqueda de información para este trabajo monográfico se buscó delimitar a aspectos locales inicialmente, donde no hubo mayores referencias de trabajos relacionados, en cuanto a nivel internacional, la mayor referencia que se obtuvo fue en trabajos realizados en Perú y Ecuador. Por ello, se tomó estos trabajos como referencias principales, donde se muestra en estos la aplicación de los métodos de estabilización, la adición de cada producto y los porcentajes óptimos de adición que normalmente funcionen en este tipo de suelos.

Se enfoca principalmente en realizar una comparación de diferentes métodos de estabilización y de esta manera comparar frente al método de estabilización con cenizas de cascarilla de arroz. Una vez obtenida esta comparación de la eficiencia del método seleccionado respecto a los a partir de esto, generar las conclusiones y recomendaciones necesarias.

Dado así, la presente investigación contiene 9 secciones con los cuales se fundamenta los problemas planteados y la consecución de objetivos los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- En la sección I se aborda el planteamiento del problema, la cual nace de la necesidad de investigar a partir de estudios realizados, nuevos métodos de estabilización de suelos arcillosos y como enfoque principal las cenizas de cascarilla de arroz, en esta misma sección se da inicio al planteamiento y formulación del problema.
- En la sección II se presenta la justificación del trabajo, donde se explica que tipo de trabajo es el que se está desarrollando y bajo que lineamientos.
- En la sección III se establece los alcances y limitaciones del presentes trabajo monográfico, en esta muestra las herramientas a las que el trabajo tiene acceso directo tales como canales digitales, libros, artículos, etc. Pero a su vez muestra las limitaciones con las que se podría encontrar el trabajo.
- En la sección IV se muestra los objetivos, los cuales buscan determinar las características de estabilización de propiedades mecánicas en los suelos arcillosos, así como generar un documento donde se expliquen los distintos métodos de estabilización de suelos arcillosos, y la manera de aplicabilidad de estos y a su vez comparar los métodos de estabilización, junto con las ventajas y desventajas que presentan estos mejoramiento para finalmente se pueda generar una matriz costo-beneficio de las alternativas de estabilización para suelos arcillosos.
- En la sección V se muestra el marco referencial, dentro de este se construye el estado del arte donde se encontrarán los antecedentes del estudio, bases

teóricas y referentes principales del estudio de los suelos arcillosos, así como también se encontrará la composición de las CCA, diferentes tipos de arcillas, diferentes formas de estabilizar suelos, la metodología a seguir en este trabajo y donde se definió el tipo de trabajo realizado.

- En la sección VI se da a conocer el análisis de resultados, los cuales se muestran en tablas comparativas organizadas inicialmente por métodos de estabilización, seguido por autores que desarrollaron el mismo ensayo, dentro de estas tablas se colocó los porcentajes con los que trabajo cada uno de los autores y finalmente se creó una gráfica con el fin de observar mejor la variabilidad que tenía el ensayo entre cada autor y así poder realizar un análisis individual de cada ensayo, así sucesivamente con cada método y ensayo. Dentro de esta misma sección también se encuentra definida a matriz de ventajas y desventajas de los métodos de estabilización de suelos arcillosos, así como también la matriz de costos – beneficios de la estabilización de un suelo arcilloso.
- En la sección VII contiene las conclusiones de acuerdo con los objetivos planteados para el desarrollo del trabajo de monográfico, y las recomendaciones respectivas de acuerdo con el punto de vista que se ha apreciado durante su desarrollo.
- En la sección VIII Luego las referencias bibliográficas que han dado sustento a la presente investigación, brindando información acerca del estado actual que se encuentra la ciencia con respecto al desarrollo del estudio de investigación.
- En la sección IX encontraran los anexos 1 con la matriz de cada autor y los ensayos desarrollados por cada uno. En estos anexos también se encuentra el manual de procedimientos y el cual es entregado como un anexo aparte de este libro.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presencia de suelos arcillosos dentro de la ejecución de obras ingenieriles es, por lo general, una constante; dentro de estos, existen una variedad de suelos arcillosos que, en su estado natural, no son adecuados para el uso en la construcción debido a que presentan características de resistencia bajas; para ellos, diversos investigadores han estudiado métodos para el mejoramiento de propiedades mecánicas de estos suelos, métodos tales como estabilización con cal, estabilización con cemento Portland, estabilización química, con escorias siderúrgicas de alto horno, utilizando sales con cementantes activos alcalinamente y con cenizas volantes. A parte de tales métodos, se buscan otras alternativas de mejoramiento más efectivas y de menor costo; una de ellas es la estabilización con cenizas de cascarilla de arroz.

Por lo anterior, y al considerarse Colombia como un país arrocero, lo que ha producido que las cenizas de este producto hayan sido utilizadas como método de estabilización de suelos arcillosos, se plantea la necesidad de realizar una revisión bibliográfica, recopilación y análisis crítico y organizado, donde se evalúe la eficacia de este método y se haga una comparación frente a los demás métodos comúnmente utilizados en este país.

Basados en lo anterior, este trabajo se plantea responder a la pregunta: ¿Cuál es la eficacia del método de cenizas de cascarilla de arroz frente a otros métodos de estabilización en obras de subrasante con presencia de suelos arcillosos?

2 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfoca en el estudio, estabilización y mejoramiento de las propiedades mecánicas para suelos arcillosos a través de la adición de cenizas de cascarilla de arroz ya que es muy recurrente encontrar condiciones desfavorables, como lo es la alta plasticidad, en los proyectos geotécnicos, que forman problemas asociados a la inestabilidad de los suelos arcillosos.

Este trabajo se enfoca principalmente en realizar un análisis crítico a partir de la revisión documental y bibliográfica, mediante la cual se busca hacer una comparación de diferentes métodos de estabilización y de esta manera comparar frente al método de estabilización con cenizas de cascarilla de arroz, una vez obtenida esta comparación entre los métodos y ver que tan eficiente es el método de estabilización con cenizas de cascarilla de arroz mediante diferentes alternativas o ítems como lo es los porcentajes de dosificación los cuales se trabajaran mediante rangos de porcentajes teniendo en cuenta el mínimo y el máximo rango encontrado en las revisiones bibliográficas, preparaciones previas y forma de aplicación en obra y a partir de esto, generar las conclusiones y recomendaciones necesarias.

Con la implementación de este trabajo bibliográfico se busca obtener un mayor grado de conocimiento de materiales orgánicos utilizables para la estabilización de suelos y también que sirva como soporte bibliográfico para futuras investigaciones de este tema.

Una de las problemáticas que resuelve este trabajo es la implementación de un material orgánico poco utilizable en Colombia, el cual se puede utilizar como material cementante para mejorar las propiedades de estabilidad de los suelos blandos o arcillosos; por otra parte, también se quiere mostrar a detalle una comparación inicial entre un método y otro, mostrando sus características con respecto al otro método de estabilización y de esta manera tener una herramienta de apoyo y selección del método más adecuado a elegir.

Dicho trabajo esta incentivado a partir de que Colombia es un país arrocero, con potencial muy grande para poder generar las cenizas de cascarilla de arroz e implementarlo en proyectos de estabilización de suelos, además de que, al ser un material proveniente de residuos orgánicos, se está aportando a la sostenibilidad del medio ambiente e incentivando a este uso de materiales.

3 ALCANCE Y LIMITACIONES

3.1 ALCANCE

Con el estudio actual, se busca dar a conocer diferentes métodos o alternativas que pueden tener los ingenieros al momento de realizar un mejoramiento de un suelo arcilloso en sus propiedades mecánicas; mediante este estudio podrán visualizar ventajas y desventajas de diferentes métodos de mejoramiento y estabilización de dichos suelos, encontrarán matrices comparativas, viabilidad, efectividad y porcentajes de mejoramiento.

Para lograr dichos resultados se tiene a disposición herramientas tecnologías y bases de datos tanto de la Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia (Uptc), como de otras fuentes tales como libros, revistas académicas, publicaciones, tesis de diversos estudios, artículos de investigación, buscadores como Google académico, entre otras fuentes de carácter virtual o físico en la biblioteca de la Uptc.

3.2 LIMITACIONES

Una de las principales limitaciones es que se dependerá de los estudios y hallazgos realizados por otros investigadores, lo que no permitirá el control de las variables puesto que, esta se plantea como una investigación bibliográfica y no experimental.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar las características diferenciales de estabilización de propiedades mecánicas en los suelos arcillosos de la subrasante a través del uso de la ceniza de cascarilla de arroz, frente a los métodos estabilizantes de uso convencional en Colombia.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar un manual de aplicación para ingenieros geotécnicos, sobre los distintos métodos de estabilización de suelos arcillosos, donde podrán tener comparaciones por autores y por métodos estabilizantes.
- Comparar los métodos de estabilización, incluida la ceniza de cascarilla de arroz, frente a las ventajas y desventajas que presentan en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos.
- Generar una matriz costo-beneficio de las alternativas de estabilización para suelos arcillosos frente a la ceniza de cascarillas de arroz, aprovechando el potencial agrícola de ese producto en el país y el cual sustituya métodos de estabilización más costosos.

5 MARCO REFERENCIAL

El marco referencial de esta investigación se muestra a continuación, contiene estado del arte, marco teórico y marco conceptual tenido para el desarrollo del presente trabajo.

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Suelos

Como manifiesta (Parra, 2018) el suelo es un conjunto de minerales, el suelo también es definido como un material que no es consolidado ya que está formado por elementos líquidos, sólidos y por vacíos que entre ellas mismas ocupan un lugar. (Crespo, 2004) nos dice que el suelo está compuesto por una capa delgada que es causado por la descomposición en el campo físico y químico como resultado de las actividades de algunos seres que son bióticos.

Como menciona (Murthy, R. 2003), el suelo es un conjunto de agregados naturales con alguna presencia de materiales orgánicos que se disgregan a causa de los medios mecánicos y cuando exacta la presencia de agua.

5.1.2 Suelos arcillosos

Los minerales arcillosos pertenecen a la familia mineral de los filosilicatos, ya que desde un punto de vista químico son silicatos de aluminio, magnesio, hierro, etc.

Este tipo de suelos contienen características especiales tales como la plasticidad y estructuras únicas las cuales están conformadas por silicatos de aluminio, magnesio y hierro, algunos de este tipo de suelos arcillosos pueden sufrir cambios abruptos de volumen; en la asociación americana de materiales (ASTM) nos muestra las características a partir del índice de plasticidad para que un suelo sea considerado arcilloso.

Tabla 1. Índice de plasticidad de la arcilla.

Índice de plasticidad	Características
IP >20	Suelos muy arcillosos
20>IP>10	suelos arcillosos
10>IP<4	suelos poco arcillosos
IP=0	suelos exentos de arcilla

Fuente: Norma ASTM D4318-84.

Tabla 2. Clasificación de suelos según tamaño de partículas

Tipo de materia	Tamaño de partículas
Grava	75 mm - 2 mm
Arena gruesa	2 mm - 0.2 mm
Arena fina	0.2 mm - 0.05 mm
Limo	0.05 mm - 0.005 mm
Arcilla	menor a 0.005 mm

Fuente: Norma ASTM D422.

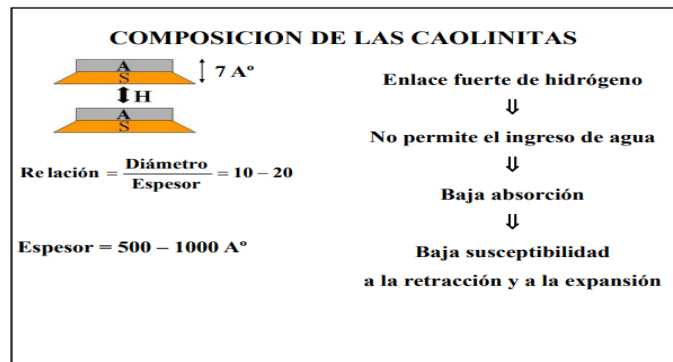
5.1.3 Tipos de arcillas

A partir de la clasificación de la norma ASTM, se clasifica las arcillas de la siguiente manera:

5.1.3.1 Arcilla caolinitas

La caolinita es un mineral arcilloso el cual está compuesto de silicatos de aluminio, los cuales se ha formado por la descomposición del feldespato. Este tipo de arcillas son estable ya que su estructura interna permite protegerse de infiltraciones de agua, es decir no existe paso interno de este fluido por lo cual hace que esta arcilla sea muy buena para la impermeabilización de presas hidroeléctricas ya que suelen ser muy estables. En general no se necesita de intervención de procesos estabilizantes.

Ilustración 1. Composición de las Caolinitas



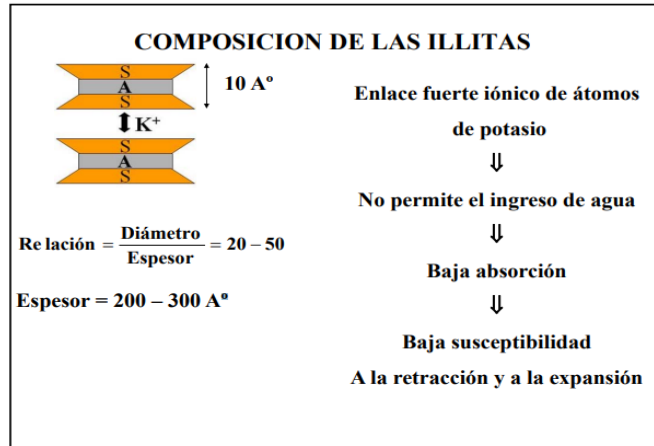
Fuente: Geología y Geotecnia 2020 6ta ed.

5.1.3.2 Arcillas illitas

Normalmente es un mineral que se encuentra entre las rocas sedimentarias, su origen proviene de procesos metamórficos, comúnmente se encuentra en abundancia en depósitos sedimentarios, este tipo de arcillas no son expansivas, su estructura interna inhibe este proceso, pero existe en pequeñas cantidades de paso

de agua en su estructura sin que se llague a afectar, sufre de hinchamiento un poco mayor a la caolinita, pero en menor medida a las montmorillonitas.

Ilustración 2. Composición de las Illita

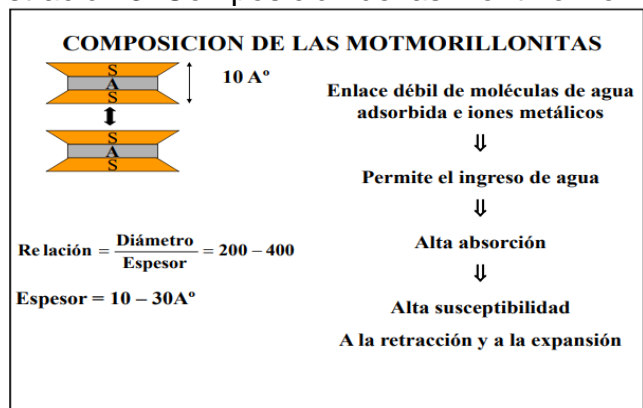


Fuente: Geología y Geotecnia 2020 6ta ed.

5.1.3.3 Arcillas montmorillonitas

Este tipo de arcillas son las eventualmente peligrosas teniendo en cuenta el tipo de proyecto a trabajar, son potencialmente expansivas, por lo que la unión interna o estructura es débil y permite la infiltración del agua con mucha facilidad, resultan ser muy inestables, sufren de grandes hinchamientos o expansión. Por ello se ve la necesidad de implementar métodos que ayuden al mejoramiento y estabilidad de estas arcillas, comúnmente con métodos mecánicos o métodos químicos.

Ilustración 3. Composición de las Montmorillonitas



Fuente: Geología y Geotecnia 2020 6ta ed.

5.1.4 Características de las arcillas

A partir de los trabajos investigativos: Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasante al adicionar ceniza de cascarilla de arroz (Llamoga, 2016), y Mejoramiento de un suelo blando de subrasante mediante la adición de cascarilla de arroz y su efecto en el módulo resiliente (Caamaño, 2016); se encuentran las siguientes definiciones relevantes:

La capacidad portante es la capacidad del terreno o de una estructura para soportar las cargas aplicadas sobre el mismo terreno o la estructura (Vega, 2006). La importancia de la capacidad portante en los suelos es hacer que el suelo pueda resistir la presión máxima que ejerce la cimentación, y no permitir que el suelo sufra una ruptura o asentamiento fuera de los rangos establecidos.

“La Capacidad cementante es la propiedad que tiene la capacidad de cohesionar un grupo de partículas en una mezcla para poder ganar resistencia. Experimentalmente es la diferencia de la resistencia a compresión no confinada en kg/cm² entre el suelo y el material cementante” (Pérez, 2008).

La estabilización de los suelos se refiere a aquellos métodos que puede mejorar las características de un suelo con el fin de aumentar la resistencia y compresibilidad de un material mediante la unión artificial de sus partículas, para el caso de los suelos arcillosos se utilizan diferentes métodos de estabilización como lo son utilización de las cenizas de la cascarilla de arroz, estabilización con cal, estabilización con cemento Portland, estabilización química, con escorias siderúrgicas de alto horno, utilizando sales con cementantes activos alcalinamente, y con cenizas volantes.

La Expansión es la hinchazón del suelo causado por la variación de la humedad causando graves daños a las estructuras (Delgado, 2011). Esta expansión de los suelos se da por lo general frente a la presencia de arcilla de grupos de la montmorillonita, la cual tiene la capacidad de expandirse cuando entra en contacto con el agua, dicha arcilla representa un gran desafío en los proyectos.

La Puzolana es un material con alto contenido de silicio o silicio - aluminio, de origen natural o industrial, que una vez pulverizado en presencia de agua reacciona con el hidróxido de calcio, formando, a temperatura ambiente, compuestos con propiedades hidráulicas permanentemente insolubles y estables (Juárez, 2012). Actividad Puzolánica es una reacción química entre los minerales de suelo y el hidróxido de calcio o cal, que conlleva a una acción de cementación entre las partículas de suelo formando así compuestos con propiedades cementantes (Morales, 2015).

Dentro de las características de los suelos arcillosos, y al momento de conocer ciertas propiedades, es necesario primeramente conocer factores que ayuden a entender de manera más clara el funcionamiento de la arcilla y que tipo de arcilla se ha encontrado, dentro de estos factores están:

Límites de Atterberg. Originalmente, siete “Límite de Consistencia” de suelos de grano fino definidos por Albert Atterberg. En la práctica actual de la ingeniería, el término generalmente se refiere solo al límite líquido, límite plástico, y en algunas referencias, el límite de contracción.

Límite Líquido (LL). El contenido de agua, en porcentaje, de un suelo en un límite arbitrariamente definido entre los estados líquidos y plásticos. Este contenido de agua es definido como el contenido de agua en el cual una porción pequeña de suelo colocada en una copa estándar y cortada por un surco de dimensiones estándar fluirán juntos en la base del surco por una distancia de 13 mm (1/2 pulg.) cuando se somete a 25 golpes a la copa cayendo 10 mm en un aparato estándar de límite líquido operado a una razón de 2 golpes por segundo.

Límite Plástico (LP). El contenido de agua, en porcentaje, de un suelo en el límite entre los estados plástico y quebradizo. El contenido de agua en el cual un suelo no puede ser más deformado al enrollarlo en 3.2 mm (1/8 pulgadas) en diámetro de hebra sin desmenuzarlo.

Índice de Plasticidad (IP). El rango de contenido de agua sobre el cual un suelo se compara plásticamente. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Plasticidad, en este concepto se da a conocer que toda arcilla es plástica, esta plasticidad se debe a la interacción agua – partículas y al desplazamiento que el agua ejerce sobre estas, pero a la vez están sujetas a la morfología de su estructura interna y tamaño granular o de sus partículas. Los métodos para determinar la plasticidad de las arcillas comúnmente se hace por los límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción), estos nos dan una idea de en qué estado podría encontrarse la arcilla, si en estado sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Salas, J. 1975).

El límite líquido y el índice de plasticidad permite obtener información de la granulometría, el comportamiento, calidad de la arcilla y su estado natural. Una de las características de la plasticidad es que entre más pequeña sus partículas la plástica es la arcilla, eso lo demuestra los límites de Atterberg, esta plasticidad se debe también a la perfección de los cristales

Hidratación e Hinchamiento, estas características de las arcillas ocurren en cuanto los cationes permiten un paso de agua en sus estructuras, es decir hay un paso

interlaminar que humedece la estructura interna de las arcillas, cuando estas permiten el paso directo del agua no hay saturación, por lo cual no existe el hinchamiento, pero por el contrario la estructura laminar esta entre lazadas donde solo se permite la entrada del agua pero no la salida , acontece el hinchamiento de la su estructura y da lugar a las expansión de la arcilla.

Superficie especifica se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g , no todas las arcillas tienen la misma superficie especifica. Algunos ejemplos de ello son:

- Caolinita de elevada cristalinidad hasta $15 m^2/g$
- Caolinita de baja cristalinidad hasta $50 m^2/g$
- Halloisita hasta $60 m^2/g$
- Illita hasta $50 m^2/g$
- Montmorillonita $80-300 m^2/g$

Tixotropía, Esta hace referencia a la perdida de resistencia que tiene un coloide cuando se amasa o revuelve mucho y posterior a este proceso se restaura; este tipo de arcillas tixotrópicas cuando sufren el batido o amasado obtienen un estado cuasi líquido, por lo que después de este proceso de deben dejar recuperar para que obtenga nuevamente la cohesión y su estado sólido, pero para que estos procesos ocurran el límite liquido de la arcilla debe alcanzar valores cercanos al límite liquido de esta, ya que cuando el valor de la arcilla está dentro del límite plástico, esta no alcanzara el fenómeno tixotrópico.

Capacidad de absorción, dentro de las arcillas esta capacidad va relacionada directamente a las especificaciones estructurales de cada una de ellas, es decir, dependen de la superficie especifica y la porosidad; esto hace que el proceso de absorción se posibles, entre más porosa sea la arcilla, más absorción obtendrá esta.

Capacidad de intercambio catiónico, esta es una propiedad química que permite intercambiar o retener cationes, esta propiedad es fundamental para estudios geotécnicos y de estabilidad ya que da una solución a que, método se podría usar en este tipo de suelo.

5.1.5 Estabilización de suelos

La necesidad de construir puentes, edificios y demás estructuras grandes se dio por el incremento en la población, estos conlleva a que se realizaran dichas estructuras, pero a su vez llevo a construir sobre terrenos poco estables y con baja capacidad portante; por ello se vio la necesidad de buscar métodos que permitiesen desarrollar

este tipo de estructuras sin ningún problema, de allí los métodos de estabilización de suelos (Brajas, 2012).

Comúnmente los suelos arcillosos presentan problemas de expansión y contracción ante la presencia de agua, la cual implica alteraciones volumétricas y contracciones críticas que pueden llevar a una afectación de las estructuras que se encuentren sobre este. (Navarro, H. 2022)

Según (Parra, 2018) da a entender que para la estabilización de suelos se realizan métodos físicos y químicos que ayudan a mejorar una masa de suelo para que pueda resultar más consistente y obtenga un buen uso.

M. R. Hall, 2014 plantea que la estabilización de suelos atrae ventajas y desventajas y algunas de ellas son las siguientes:

- Apura el proceso constructivo por el hecho que el espesor que se requiere es muy menor y por lo tanto no se necesita mucho material y la mano de obra también.
- La resistencia y la durabilidad aumentan significativamente.
- Los costos para el tratamiento superficial será educido.
- El costo del material para la estabilización es mayor como por ejemplo el de cemento y también de algunos materiales ya que son difícil de conseguir y transportar (M. R. Hall, 2014).

5.1.5.1 Métodos de mejoramiento de suelos arcillosos

En cuanto a la geotecnia y a los tratamientos ingenieriles, se encuentran métodos de mejoramiento de suelos arcillosos que han sido aplicados en distintos países con similitudes en las características de dicho suelo; estos métodos aplicados experimentalmente, han mostrado grandes avances dentro del campo geotécnico y de tratamientos mecánicos que se le pueden dar a los suelos arcillosos (Alhassan, M., & Alhaji, M. 2017).

Así mismo, este autor realizo un estudio sobre la utilización de cenizas de cascarilla de arroz para el mejoramiento de suelos deficientes en Nigeria, encontrando mejoras como el aumento del RHA, el cual redujo la expansividad del suelo arcilloso, y mejoro la resistencia de este.

Algunos de los métodos implementados son: utilización de las cenizas de la cascarilla de arroz, estabilización con cal, estabilización con cemento Portland, estabilización química, con escorias siderúrgicas de alto horno, utilizando sales

con cementantes activos alcalinamente, y con cenizas volantes (Gómez de Santos, C. 2018); de éstos, el tratamiento de utilización de cenizas de cascarilla de arroz es el que se va a implementar en el trabajo monográfico propuesto.

Los anteriores métodos de estabilización son de carácter físico-químico, donde cada uno de estos ayudan a mejorar un conjunto de características asociadas al mejoramiento de la propiedades mecánicas del suelo, dentro de las cuales están la disminución de plasticidad mediante la adición de cal, aumento de CBR con cenizas volantes, aumento de la resistencia a la compresión mediante la adición de cemento Portland, impermeabilización y exceso de polvo mediante tratamiento químico, entre otros mejoramiento; pero en general, cada uno de estos tratamientos ayudan de manera individual el mejoramiento de todas estas características (Rivera, F. et al. (2020).

5.1.6 Tipo de estabilización

5.1.6.1 Estabilización física o mecánica

Este proceso consiste en realizar operaciones mediante maquinaria especializada o de forma manual cuyo objetivo logre mejorar la capacidad y la resistencia del suelo, sí que se dé la necesidad de implementar algún método de estabilidad química. (Cajaleón, O. & Mondragón D. 2018).

5.1.6.2 Estabilización por compactación

En este tipo de estabilización de terreno o suelo se implementa maquinaria pesada o liviana dependiendo el grado de compactación al que se quiere llegar, su metodología consiste en aplicar una carga mediante vibración y peso que permita que las partículas de arcillas se vean obligadas a acomodarse y juntarse unas a otra disminuyendo su porosidad y permitiendo el aumento a la resistencia al corte (Castro, A. 2017).

5.1.6.2.1 Estabilización por combinación de suelos

Consiste en la mezcla de dos suelos o más, dentro de estos debe estar el presente, es decir cuando se tiene una arcilla la combinación de suelos se debe hacer con uno de mayores características geotécnicas buenas, que permitan obtener un cambio positivo en este, cuando se trata de arcillas lo más adecuado es que se combine con material granular para que ayuden a aumentar el grado de fricción en el material, ya que estas tienen un alto grado de cohesión lo que carecen de fricción en el material (Cajaleón, O. & Mondragón D. 2018).

5.1.6.2.2 Estabilización por cambio de suelo

Este método es muy poco usado, pero se da cuando las condiciones del suelo realmente lo requieran debido a su alto costo de operación; consiste en si en extraer el suelo que tiene problemas de inestabilidad y cambiarlo por un suelo de mejor calidad geotécnica, esto se da en arcillas expansivas (Castro, A. 2017).

5.1.6.2.3 Estabilización con geosistémicos

Este método consiste en colocar dentro de los estratos geotextiles o geomallas las aumentan la resistencia a la tracción y reducen las deformaciones. Aunque es un método de aplicación bastante efectiva, generalmente en los proyectos de carreteras, aun son muy poco usados debido a su costo elevado en comparación a otros procesos (Palomares, J. & Mojica, V. 2021).

5.1.6.3 Estabilización Química

(Cajaleón, O. & Mondragón D. 2018). Dentro de este método de estabilización aplica la adición de algún agente en pequeños y medianos porcentajes que permita mejorar las condiciones de los suelos, algunos de estos métodos son:

5.1.6.3.1 Estabilización con cemento

Este método consiste en mezclar el suelo con proporciones establecidas de cemento y mezclarlos, adicionalmente a este proceso se añade agua y posteriormente se compacta hasta alcanzar las condiciones deseadas (Palomares, J. & Mojica, V. 2021).

5.1.6.3.2 Estabilización con cal

Es un método muy efectivo de estabilización, tal como sucede como el método de estabilización de cemento, se debe agregar cal ya sea viva, hidratada o lechada de cal hidratada en proporciones adecuadas y mezclarlas con el suelo, a diferencia del anterior método este no se le aplica agua; en si la cal, permite la adsorción de humedad e incrementa la resistencia del suelo (Chicaiza, E. & Oña, F. 2018).

5.1.6.3.3 Estabilización con polímeros

Se trata de sustancias químicas que lubrican el suelo, con lo cual se obtiene una disminución en el índice plástico y un aumento en la resistencia al corte, un aumento en la densidad del suelo y corrige las fallas de corte frágil o dúctil (Palomares, J. & Mojica, V. 2021).

5.1.6.3.4 Estabilización con cenizas de cascarilla de arroz (CCA)

Este método de estabilización ha estado en uso por un corto tiempo, las CCA tiene una composición de alto porcentaje de sílice, cuando se combina con el suelo este producirá el material es más resistente y menos deformado. Además, las CCA son un producto no amigable con el medio ambiente, por lo cual considerado un material contaminante. Es por ello por lo que su uso puede considerarse como beneficioso para el medio ambiente . (Castro, 2017).

5.1.6.4 Estabilización Térmica

Este tipo de estabilización de suelos arcillosos consiste en llevar al material a las temperaturas de 900°C, lo cual permite que estas arcillas incrementen su resistencia al corte, lo que hace este método es llevar a la arcilla a un punto donde le sea imposible rehidratarse nuevamente, por más de que se haga inmersión (Castro, 2017)

5.1.6.5 Estabilización eléctrica

Denominada electroósmosis, consiste en la aplicación de electricidad a una muestra de suelo, por medio de unos electrodos, los cuales deben ser ánodos y cátodos. Los cátodos están conformados por tubos que recogen el agua, para luego ser evacuados por bombeo con lo cual, la aplicación de corriente genera una migración de iones y un flujo de agua en el sistema hacia el cátodo. (Castro, 2017), el objetivo de este tipo de estabilización es la disminución de la presión de poros y la consolidación y el aumento de la resistencia.

5.1.7 Las Puzolanas

Las puzolanas son materiales que contienen sílice y/o aluminio, los cuales por si solos tienen poca o ninguna propiedad cementante, sin embargo, cuando son mezclados con hidróxido de calcio, ante la presencia de agua pueden endurecerse como los cementos (Vega, 2006).

La norma ASTM citada en Vega (2006) define a las puzolanas como "materiales naturales o artificiales sílice - amorfos o aluminio - silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente; son una especie de cemento natural que en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes" (p.17).

Los materiales puzolánicos son sólidos inorgánicos de naturaleza silíceo o sílice aluminosa de origen natural o artificial, los cuales endurecen en agua al ser mezclados con hidróxido cálcico o cualquier otro material que pueda producir

reacciones puzolánicas y que finalmente generan productos de hidrataciones estables, insolubles y de carácter cementante, además para que pueda producirse la reacción puzolánica es necesario que la sílice esté en estado amorfo (Vega, 2006).

5.1.7.1 Principales tipos de puzolanas

Según su origen las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos naturales y artificiales:

5.1.7.1.1 Puzolanas Naturales

Son productos minerales de compuestos sílice-luminosos de textura fina y estructura amorfa, lo que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento. El constituyente amorfo es vidrio producido por el enfriamiento brusco de la lava, como la pómez, las tobas, la escoria y la obsidiana.

Las puzolanas naturales son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. Su estructura pobre cristalina es la que les da la reactividad a estos materiales, son difíciles de evaluar debido a su variación mineralógica, entre las principales puzolanas naturales, tenemos las acumulaciones de cenizas generadas durante las erupciones volcánicas explosivas que luego por procesos geológicos de enterramiento estas cenizas se convierten en tobas.

5.1.7.1.2 Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales son materiales que son el resultado de un tratamiento térmico adecuado, dentro de esta condición cabe distinguir dos grupos uno formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y esquistosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos y otro constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales que en virtud de su naturaleza y de las transformaciones sufridas en las mismas, adquieren las propiedades puzolánicas.

Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales; tales como, residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, etc. Las de mayor peso en la actualidad, en el mundo, son las cenizas volantes en función de las ventajas económicas y técnicas que ofrecen ya que es un material de desecho con muy buenas propiedades puzolánicas.

5.1.8 Cenizas volantes (Fly ash)

Ilustración 4. Cenizas volantes



Fuente: Asocem

Las cenizas volantes, son un tipo de cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito) fundamentalmente en las centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible.

La Norma ASTM C618 define dos clases de cenizas volantes: las cenizas de clase F y las cenizas de clase C. La clase F se produce normalmente al quemar antracita o carbón bituminoso y tiene propiedades puzolánicas, pero no tiene propiedades aglomerantes. La clase C de cenizas volantes se produce normalmente de la quema de lignito o carbón no bituminoso y además de las propiedades puzolánicas tiene algunas propiedades aglomerantes autógenas.

5.1.8.1 Arcillas activadas o calcinadas artificialmente:

Las arcillas naturales por sí solas no presentan actividad puzolánica a menos que su estructura cristalina sea destruida mediante un tratamiento térmico a temperaturas del orden de 600°C a 900°C. Mayormente estos materiales están formados por residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que son sometidas a temperaturas superiores a los 800°C.

5.1.8.2 Micro sílice:

La micro sílice es un subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para la producción de silicio o aleaciones de ferro silicio. Este material está constituido por una buena cantidad de sílice amorfa compuesta por partículas esféricas que se recolectan de los gases de escape de los hornos.

Vega (2006) determinó que este tipo de ceniza está formada por partículas vítreas muy finas con un área superficial de 20000 m²/kg y al ser la micro sílice

extremadamente fina tiene alto contenido de sílice amorfa convirtiéndose en un material puzolánico altamente efectivo para reaccionar con la cal durante la hidratación del cemento y formar compuestos aglomerantes (p. 21).

5.1.9 Cascarilla de arroz (CA)

Ilustración 5. Cascarillas secas de arroz



Fuente: Agro insumos

La planta de arroz, científicamente denominada *Orizac Sativa* pertenece a la familia de las gramíneas, está constituida por cuatro componentes principales el germen, el endospermo, la cutícula y la cáscara o pajilla. El germen que es la parte más rica en nutrientes, ácidos grasos, aminoácidos y enzimas constituye la parte germinal que da lugar al crecimiento del grano.

Gutiérrez citado en Aguilar (2009) indica que “el endospermo representa alrededor del 70% del volumen del grano que constituye al final del proceso el arroz blanco, la cutícula o polvillo alcanza un 6.8% en volumen en el grano de arroz y es utilizado como alimento para animales por su alto contenido de grasas .Finalmente la cáscara o pajilla, constituye aproximadamente el 20% en peso del grano y es separado en el proceso de pilado formándose verdaderas montañas de cascarilla al costado de los molinos, lo que ocasiona problemas de espacio por la acumulación de este desecho” (p. 28).

La cascarilla de arroz es un desecho agroindustrial que se produce en altos volúmenes en zonas donde se siembra y se procesa esta planta; por tanto, este desecho se puede utilizar como fuente de silicio para la obtención de silicatos de calcio. Los silicatos de calcio se utilizan en la fabricación de ladrillos de cal, en la industria del cemento y también como material de relleno en las industrias de pinturas y plásticos entre otros múltiples usos (Aguilar, J. 2009).

5.1.10 Cenizas de cascarilla de arroz

Ilustración 6. Cenizas de cascarilla de arroz



Fuente: UNAL

Las cenizas de cascarilla de arroz tienen propiedades cementantes e hidráulicas bajas cuando se trabajan por si solas, pero cuando se trabajan como conglomerado para suelos blandos, estas ayudan a aumentar las capacidades impermeables, las propiedades cementantes, debido a los altos contenidos de sílice, lo que ayuda a tener mejoramiento en las propiedades mecánicas de suelos blandos (Álzate, 2015).

De acuerdo con (Caamaño, 2016), la cascarilla de arroz es un derivado del cual se pueden obtener muchos beneficios gracias a sus altos contenidos de sílice, el cual puede ayudar a la mejora de otros elementos y, de esta manera, reducir costos y peligros ambientales, generando beneficios de estabilización de suelos arcillosos, mejorando propiedades mecánicas en los suelos blandos y finos.

Consecuentemente, Llamoga (2016), mediante su estudio de investigación obtuvo resultados como el mejoramiento de consistencia y resistencia, logrando así concluir que, para el CBR sus valores máximos agregando 4% y 7% CCA, este mejoró sus propiedades mecánicas de un 2.85% a un 4.52%.

Así mismo, Brooks (2009; citado por Caamaño, 2016), realizó una evaluación de un suelo expansivo al inducirle ceniza de cascarilla de arroz y obtuvo como resultado un aumento del 97% en la resistencia a la compresión inconfiada mientras que el CBR mejoró 47% para este estudio en específico (Allauca y Lung, 2009).

5.1.10.1 Propiedades físicas de la ceniza de cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es una fibra corta que recubre naturalmente el grano para protegerlo del ambiente. Su longitud varía entre 5 y 11 mm según la especie considerada, es de estructura ondulada y apariencia superficial irregular. Tiene

propiedades altamente abrasivas, 6 en la escala Mohs en estado natural. Una característica principal de la cáscara de arroz (CA) es su poder calorífico, ya que éste influirá en la obtención de la sílice, pues como se puede apreciar en la tabla 2, a menor contenido de humedad mayor poder calorífico y por lo tanto mayor fuente de sílice (Allauca y Lung, 2009).

5.1.10.2 Composición química de la CA y CCA

La CCA son un derivado de las cascaras del arroz, son difícilmente degradables por lo que se han buscado alternativas de uso para descongestionar y disminuir el volumen de estas; mediante las recientes investigaciones se ha encontrado que al reducirse a cenizas sirve para la estabilización de suelos arcillosos y es un agente con características químicas ideales para este tipo de procesos.

Tabla 3. Composición química de la cascarilla de arroz

CASCARILLAS DE ARROZ (CA)	
COMPONENTE	%
Carbono	39.8
Hidrógeno	5.2
Nitrógeno	0.6
Oxígeno	37.2
Azufre	0.1
Cenizas	17.8

Fuente: Varón (2005)

Por otra parte, las CCA contienen las siguientes propiedades químicas, donde el mayor porcentaje lo obtiene las cenizas de sílice, lo que la hace un buen estabilizador de suelos arcillosos (Varón, 2005).

Tabla 4. Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz

CENIZAS DE CASCARILLAS DE ARROZ (CCA)	
COMPONENTE	%
Ceniza de sílice	94.5
Óxido de calcio	0.25
Óxido de magnesio	0.23
Óxido de potasio	1.1
Óxido de sodio	0.78
Sulfato	0.56

Fuente: Varón (2005)

5.2 ESTADO DEL ARTE

5.2.1 Investigaciones de métodos de estabilización de suelos

Dentro del estado de arte se describen investigaciones prácticas, teóricas de tipo experimental y no experimental que se han desarrollado a través de los años para determinar la estabilización de los suelos mediante los diferentes métodos.

A continuación, se muestran los diferentes estudios que han realizado diversos autores acerca de los métodos de estabilización de suelos arcillosos, como lo son:

La presencia de suelos arcillosos es un detalle muy importante en el diseño de proyectos de ingeniería, esto se debe a su comportamiento geotécnico, especialmente a su capacidad de hinchamiento. Se sabe que los suelos blandos se endurecen cuando se secan y pierden gradualmente esta propiedad cuando se saturan. Este es el caso de las arcillas asociadas con baja resistencia a la compresión y hundimiento excesivo.

En su trabajo, Muntohar (2005) estudió las propiedades de suelos limosos con la adición de la ceniza de cascarilla de arroz, sus resultados mostraron que la adición de ceniza disminuye la plasticidad del suelo expansivo, en su estudio determinó que la expansión se redujo hasta casi un 100% por lo que concluyó que su porcentaje óptimo de ceniza para estabilizar este suelo era del 6%. Por otro lado, Jha y Gill (2006) estudiaron la resistencia a la compresión no confinada y la capacidad de soporte del suelo con porcentajes de 3%, 6%, 9% y 12% de ceniza de cáscara de arroz, sus resultados mostraron que la capacidad portante del suelo y su resistencia a la compresión aumentó con el incremento del contenido de ceniza. Concluyendo que el contenido óptimo es del 12% de ceniza.

Otros autores que realizaron investigación sobre este tema fueron Okafor y Okonkwo (2009) estudiaron la plasticidad, la resistencia a la compresión no confinada y el CBR de suelos lateríticos con porcentajes de 5%, 7.5%, 10% y 12.5% de ceniza de cáscara de arroz, sus resultados mostraron que el límite líquido se redujo de 35,20% a 24,80% con aumento del contenido de ceniza de 0% a 7.5%; sin embargo, para contenidos de 10% a 12.50% el límite líquido aumentó de 24,80% a 29,85% respectivamente. Lo mismo sucede con los valores de la resistencia no confinada y la capacidad portante del suelo los cuales se incrementan con el contenido de 7.50% y a partir de 10% es que empieza a disminuir considerablemente.

Por su parte Delgado (2011) analizó el efecto que tiene la cal en los límites de Atterberg, utilizando las proporciones de 2%, 4% y 6%, a través de su estudio comprobó que existe una reducción significativa del índice de plasticidad con el

incremento del porcentaje de cal; concluyendo que la proporción óptima de cal para mejorar las propiedades de los suelos es del 6%.

A su vez, Pérez (2012) estudió el efecto que produce la adición de cenizas de carbón en un suelo arcilloso. A través de su estudio en base a mezclas suelo-ceniza (80/20 y 60/40) evaluó el comportamiento geotécnico del suelo y comprobó que la mezcla de ceniza volante con el suelo arcilloso presenta un mejor comportamiento que el suelo natural ya que el CBR se incrementó de 7.7% a 23.5%. Concluyendo que su empleo es recomendado en el diseño de capa de subbase y subrasante mejorada ya que ha demostrado ser un buen material estabilizador de suelos.

5.2.2 Investigaciones de relacionadas con las CCA.

Dentro de los métodos de estabilización a estudiar en el presente trabajo, están los métodos de estabilización con cal, cemento portland, cenizas de cascarilla de arroz y escorias; cada uno de estos métodos de estabilización cuenta con diferentes atributos para el mejoramiento de los suelos arcillosos, tales mejoramientos se dan en aumentar la resistencia, reducir el potencial de hinchamiento, y debido a esto conlleva a un cambio sustancial en la clasificación de los suelos presentes (Rao, 2012).

Aparna (2014) estudió la capacidad portante del suelo con porcentajes de 10%, 15% y 20% de ceniza de cascara de arroz, sus resultados mostraron que el CBR se redujo con aumento del contenido de ceniza de 15% a 20%; sin embargo, para el contenido de 10%, el CBR se incrementó hasta 106% para muestras sin remojar, concluyendo que el contenido óptimo para estabilizar este tipo de suelos es de 10% de ceniza.

Las cenizas de cascarilla de arroz tienen propiedades cementantes e hidráulicas bajas cuando se trabajan por si solas, pero cuando se trabajan como conglomerado para suelos blandos, estas ayudan a aumentar las capacidades impermeables, las propiedades cementantes, debido a los altos contenidos de sílice, lo que ayuda a tener mejoramiento en las propiedades mecánicas de suelos blandos (Álzate, 2015).

De acuerdo con Caamaño (2016), la cascarilla de arroz es un derivado del cual se pueden obtener muchos beneficios gracias a sus altos contenidos de sílice, el cual puede ayudar a la mejora de otros elementos y, de esta manera, reducir costos y peligros ambientales, generando beneficios de estabilización de suelos arcillosos, mejorando propiedades mecánicas en los suelos blandos y finos.

Consecuentemente, Llamoga (2016), mediante su estudio de investigación obtuvo resultados como el mejoramiento de consistencia y resistencia, logrando así concluir que, para el CBR sus valores máximos agregando 4% y 7% CCA, este mejoró sus

propiedades mecánicas de un 2.85% a un 4.52%. Así mismo, Brooks (2009; citado por Caamaño, 2016), realizó una evaluación de un suelo expansivo al inducirle cenizas de cascarilla de arroz y obtuvo como resultado un aumento del 97% en la resistencia a la compresión inconfiada, mientras que el CBR mejoró 47% para este estudio en específico.

5.2.3 Clasificación de los suelos según las metodologías AASTHO y SUCS

Algunos de los métodos implementados son: utilización de las cenizas de la cascarilla de arroz, estabilización con cal, estabilización con cemento Portland, estabilización química, con escorias siderúrgicas de alto horno, utilizando sales con cementantes activos alcalinamente, y con cenizas volantes (Gómez de Santos, C. 2018); de éstos, el tratamiento de utilización de cenizas de cascarilla de arroz es el que se va a implementar en el trabajo monográfico propuesto.

Existen diferentes tipos de suelos; según Llamoga (2016), hay dos métodos para clasificar los suelos, el AASTHO y el SUCS; el primero clasifica los suelos en: 1) granulares, que tienen 35% o menos del material fino que pasa el tamiz N° 200 (grupos A-1, A-1a, A-1b; A-2, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7; y A-3); 2) Método SUCS para suelos finos, que contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz número 200 (A-4, A-5, A-6, y A-7) dentro del cual se ubica el material a estudiar, como lo son las arcillas. En cuanto a la geotecnia y a los tratamientos ingenieriles, se encuentran métodos de mejoramiento de suelos arcillosos que han sido aplicados en distintos países con similitudes en las características de dicho suelo; estos métodos aplicados experimentalmente, han mostrado grandes avances dentro del campo geotécnico y de tratamientos mecánicos que se le pueden dar a los suelos arcillosos (Alhassan, M., & Alhaji, M. 2017). Así mismo, este autor realizó un estudio sobre la utilización de cenizas de cascarilla de arroz para el mejoramiento de suelos deficientes en Nigeria, encontrando mejoras como el aumento del RHA, el cual redujo la plasticidad y aumento la estabilidad volumétrica y la permeabilidad del suelo arcilloso, así como la resistencia de este.

La importancia de la estabilización de los suelos arcillosos se hace necesaria debido a los altos problemas que trae consigo al momento de realizar un proyecto, por ellos la identificación del tipo de suelo debe ser de suma prioridad y partir de estos estudios encontrar el método más adecuado para ello; (Chicaiza, E. 2018) en su trabajo de investigación sobre la estabilización de arcillas expansivas, encontró que al adicionarles cenizas de la cascarillas de arroz en porcentajes bajos, estas sufrían cambios en sus propiedades físico – mecánicas y dependiendo la cantidad de estas cenizas podrían llegar a mejorar sustancialmente el suelo, pero si se excedían en los porcentajes se llegaba a afectar drásticamente e inestabilizaba aún más el suelo arcillosos.

Los anteriores métodos de estabilización son de carácter físico-químico, donde cada uno de estos ayudan a mejorar un conjunto de características asociadas al mejoramiento de la propiedades mecánicas del suelo, dentro de las cuales están la disminución de plasticidad mediante la adición de cal, aumento de CBR con cenizas volantes, aumento de la resistencia a la compresión mediante la adición de cemento Portland, impermeabilización y exceso de polvo mediante tratamiento químico, entre otros mejoramiento; pero en general, cada uno de estos tratamientos ayudan de manera individual el mejoramiento de todas estas características (Rivera, F. et al 2020).

La influencia de las CCA en la estabilización de subrasantes con arcillas de baja plasticidad tiene un efecto estabilizante sobre este tipo de suelos, logrando mejorar el CBR de 4.3% a 20.7% (Ormeño, E. & Rivas, N. 2020)

5.3 MATERIALES Y TÉCNICAS

El material bibliográfico se obtuvo de fuentes académicas online y plataformas digitales, Como lo son:

- Science-Direct
- Google Academic
- ResearchGate
- Scielo
- Dialnet
- DANE

Dentro de estas se hizo uso de las bases de datos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, donde se utilizó el correo institucional para poder ingresar y consultar la información requerida, en tanto a las plataformas de uso y no propiedad de la Universidad se utilizó el correo personal para poder realizar las consultas pertinentes; las consultas se realizaron bajo las palabras claves del temas tales como CCA, Propiedades mecánicas de las CCA, propiedades mecánicas de los métodos de estabilización, etc. Además de esto, se limitó el rango de búsqueda a 10 años y de esta manera se extrajeron artículos más importantes y relevantes que ayudaron a definir y complementar el marco referencial.

Se hizo uso de plataformas online de plagio gratuitas para verificar que el documento estuviese dentro de los rangos que no superaran el 0% al 25% de plagio en el documento, sin embargo, pues al ser gratuitas no son tan precisas. Se usaron las siguientes plataformas:

- Small SEO
- PlagScan
- Plagium

5.4 MARCO METODOLÓGICO

5.4.1 Metodología empleada

5.4.1.1 Enfoque de investigación

La investigación cuya metodología se basa en un estudio descriptivo, es decir; la medida o recopilación de información. El método es descriptivo ya que busca presentar de manera general el análisis documental en relación con las distintas metodologías de estabilización de suelos arcillosos. La investigación documental es un método que recopila, revisa y selecciona información por medio de la lectura crítica de documentos y materiales bibliográficos, bibliotecas, hemerotecas, centros de documentación, artículos virtuales y físicos. (Baena, 1985).

5.4.1.2 Tipo de investigación

La presente investigación es una recopilación y revisión de información de fuentes secundarias de estabilización de suelos arcillosos. Basado en (Hernández, F. & Baptista, A. 2010) busca comprender la perspectiva de los participantes, profundizar en sus experiencias, perspectivas, opiniones, es decir, la forma en que los participantes perciben subjetivamente su conocimiento. Este estudio se encuentra centrado en la revisión documental sobre la información de investigaciones relacionadas con la estabilización de suelos y el método de cascarilla de arroz, mediante libros, artículos de investigación de fuentes confiables.

5.4.2 Técnicas de análisis de datos

Dentro de las técnicas de análisis de datos, también se realizaron consultas de artículos científicos e investigativos, trabajos de grado de pregrado y posgrado, manuales técnicos y demás fuentes de información disponibles; en donde se determinarán investigaciones internacionales, nacionales e internacionales. El análisis se realiza mediante matriz de recopilación de información y comparación entre métodos de estabilización de suelos.

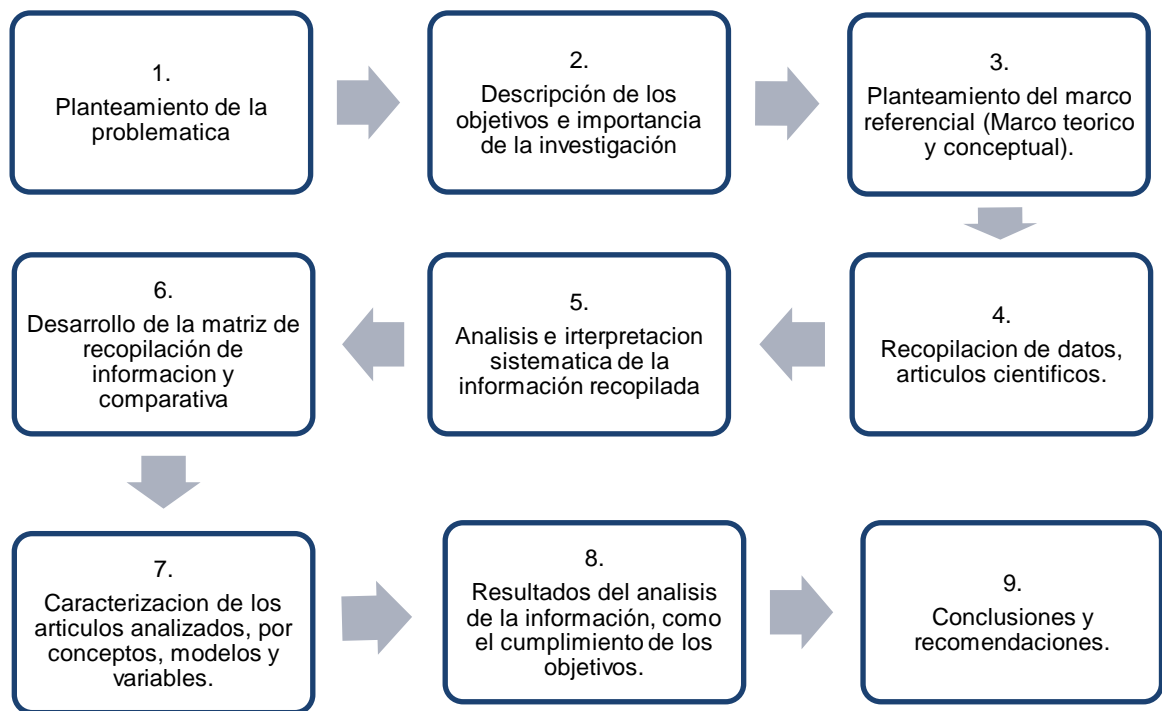
5.4.3 Delimitación

La presente investigación será exclusivamente basada en información obtenida de documentación y datos presentes en repositorios como fuentes de información secundaria, páginas educativas, científicas, trabajos de grado de pregrado y posgrado, manuales técnicos, normas nacionales e internacionales (ASTM, NTC, AASTHO), asociaciones profesionales y bases de datos (Science-Direct, Google Academic, ResearchGate, Scielo, Dialnet, DANE).

5.5 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación dentro del análisis de la conceptualización de las distintas metodologías de estabilización de suelos arcillosos se desarrolla mediante las siguientes fases que direccionan y ordenan los resultados y análisis.

Gráfico 1. Diseño de la investigación



Fuente: Elaboración propia, 2022.

5.5.1 Información faltante

Dentro de la búsqueda de herramienta e información para la complementación del documento, se vio una limitación de manera local en el país debido a que la información sobre la implementación de las CCA para la estabilización de suelos arcillosos es muy escasa; por otra parte, se optó por la investigación de información en el continente americano ya que las condiciones de países como Ecuador y Perú son muy similares a Colombia.

6 ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Ventajas y desventajas de los métodos de estabilización en suelos arcillosos.

A continuación, se las ventajas y desventajas que se presenta entre cada uno de los métodos de estabilización de suelos arcillosos. La siguiente matriz se valoró de la siguiente manera teniendo en cuenta los siguientes pasos para evaluar las ventajas:

1. Facilidad de accesibilidad al producto: se tuvo en cuenta, cantera y disponibilidad del producto en el territorio nacional, facilidad para extraerlo y transportarlo.
2. Interacción con el suelo: se evaluó el comportamiento y efecto que llega a tener el producto agregado con el suelo.
3. Porcentaje de agregado: se tuvo en cuenta que rangos de porcentajes se requiere de cada producto para llegar a estabilizar el suelo en estudio.
4. Aplicabilidad en el terreno: Para este caso se tuvo en cuenta cuál de los materiales agregados sirven para determinadas condiciones climáticas o del terreno presente.

Para las desventajas, se consideró las siguientes condiciones:

1. Impacto ambiental: Que efectos adversos puede ocasionar al entorno de la obra desarrollada, así como las afectaciones a la salud del personal al momento de aplicar el agregado.
2. Costos de aplicación: entorno y disponibilidad del agregado más cercano a la obra, esto debido a los costos de transporte desde lugares lejanos a este; teniendo en cuenta como ejemplo una obra desarrollada en los llanos, donde el principal agregado más viable podría ser las CCA, al contrario, si la obra fuera en el altiplano cundiboyacense, donde el material podría ser el cemento portland o la cal, dependiendo de la disponibilidad y análisis del terreno.
3. Desventajas ante factores climáticos: también se tiene en cuenta que material presenta mejor adaptabilidad a factores climáticos extremos y cuáles no.

4. Efectos que se puedan presentar después de aplicar el material estabilizante; si este presenta problemas de agrietamiento o algún problema asociado a material en sí.

Tabla 5. Matriz Comparativa de ventajas y desventajas entre métodos de estabilización.

	Metodo de estabilización con Cascarilla de arroz	Metodo de estabilización con Cal	Metodo de estabilización con Cenizas volantes	Metodo de estabilización con Cemento portland
Ventajas	Es un material facil de conseguir en Colombia, ya que el pais cuenta con departamentos altamente productivos en este producto agricola.	Material abundante en el pais, cuenta con importantes canteras en distintos departamentos lo que la hace adsecible en la mayoría del pais.	Se pueden reutilizar, lo que significa la disminucion de vertederos para estos casos	Es practico para utilizar en suelos de tipo arenoso, arcillosos y limosos
	Al ser un producto agricola con un uso limitado, se vuelve un producto de economico.	Es un material que tiene un intercambio iónico, principalmente con los suelos arcillosos modificando la estructura interna de estos.	reduce el indice de plasticidad, mejora la estabilidad y compactacion del suelo, y reduce la expansividad del suelo.	Bajo en costos, facil implementación, aumenta la resistencia de los suelos.
	Las características físico - químicas de la CCA son similares a productos como la caliza, ya que cuenta con altos contenidos de Sílice, lo que hace que sea un producto sustituto a otros productos como el cemento y la cal.	reduce el indice de plasticidad, mejora la estabilidad y compactacion del suelo, y reduce la expansividad del suelo.	Incrementa la capacidad portante asi como el CBR, la resistencia a traccion y a compresión	De facil implementación en terreno, producto de menor costo en el mercado y facil de transportar.
	Las proporciones de agregados para estabilizar terrenos suele ser en pequeñas cantidades de oscilan entre el 4% y el 15% dependiendo de las condiciones del suelo presente.	Principalmente se implementa en bases y subbases de los pavimentos	Una de sus principales características es que es muy resistente a climas frios.	Incrementa la capacidad portante asi como el CBR, la resistencia a traccion y a compresión
Desventajas	Se requiere altos niveles de energia al momento de incinerar la cascara de arroz	Presente un riesgo para poblaciones cercanas a las obras de aplicación debido al tamaño de las partículas	Estas cenizas volantes tienen un lento aumento en el nivel de la resistencia	En los terrenos estabilizados por este metodo, pueden sufrir agrietamiento por contracción.
	Costos elevados para la produccion de este material en los molinos de arroz. En pequeñas cantidades	utiliza un gran porcentaje de agua para una adecuada aplicación en obra, por lo cual incrementa los costos.	Se requieren de aditivos extras de acuerdo a las condiciones especificas de los terrenos y de los climas.	Al aplicarse el cemento aumenta la rigidez del terreno, si se aumenta mucho, puede ser perjudicial para la estabilidad del suelo.
	Generación de lodos	suele ser lenta la aplicación de estos productos, al igual que los demas metodos se debe tener en cuenta las condiciones del terrenos y el clima al momento de la aplicación.	Esta sujeta a los limitantes climaticos o estacionales	Si no se cura de la manera adecuada se pueden presentar grietas que conllevan mas adelante a filtraciones de agua a las capas interiores
	Al no ser tratados adecuadamente se puede incurrir en fallas que afecten la estabilidad del suelo tratado.	en proporciones inadecuadas el suelo puede sufrir complicaciones, es decir si se aplica mas de la dosis recomendada se puede alterar gravemente la plasticidad del suelo.	De los cuatro productos es el mas escazo y de dificil consecución e implementación	Debe mezclarse de manera adecuada, ya que es un material muy fino y requiere especial atención en este paso.

Fuente: Elaboración propia

6.2 COMPARACIÓN DE METODOS DE ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS POR AUTORES SEGÚN EL TIPO DE ENSAYO.

A continuación, se presentan Lo encontrado a partir de la consulta de información de investigaciones desarrolladas por diferentes autores mediante tablas de análisis las cuales inicialmente se organizaron por autores (ver anexos) y para la comparación de resultados, se organizó por similitud de ensayos realizados entre los autores, de tal manera que se tuviera a la vista los datos de un mismo ensayo, sin embargo, también se organizó de manera grafica donde se muestra la interacción entre cada método, con el fin de poder observar mejor la variabilidad entre estos. También en está matrices de análisis se muestra características propias de los suelos arcillosos y que mediante la aplicación de los distintos métodos de estabilización se dio lugar a cambios en sus propiedades físicas y mecánicas.

La información está organizada de la siguiente manera, primeramente, se da una tabla por ensayos realizados donde se muestra distintos autores y el año de realización de la prueba, junto con los porcentajes que implementaron cada uno de ellos, también se muestra el tipo de suelo que utilizaron. A partir de estos datos, se evaluó las características de cada ensayo teniendo en cuenta, tipo de suelo, país de desarrollo del ensayo, autor y porcentajes de adición a la muestra original, logrando así obtener información de primera mano para poder realizar los análisis de resultados, donde a través de estos datos se logró la comparación tanto por matrices como gráficamente.

Dentro de los trabajos analizados para las propiedades físico - mecánicas fue difícil encontrar valores de adición del producto similares en porcentaje, por lo cual se optó por tomar los valores más cercanos y analizarlos entre sí, para esto se tomó cada uno de los resultados encontrados y se organizaron inicialmente por métodos de estabilización seguido del ensayo realizado, por ejemplo Humedad óptima y a esta se buscó los autores que realizaron dicho ensayo, y a este se colocó sus porcentajes respectivos y el tipo de suelo, finalmente se graficaron estos datos y se pasó a analizar cada una de las gráficas.

6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS POR EL MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE LAS CCA

A continuación, se presenta el método de estabilización de cenizas de cascarilla de Arroz, donde se comparó distintos autores que realizaron ensayos similares, a partir de esto se tomó el ensayo, se organizó por autores junto con los porcentajes de agregado y tipo de suelo, una vez organizado de esta manera se procedió a graficar los resultados y a dar el la observación pertinente; el principal objetivo de organizar

la información de esta manera es tener por cuadro el mismo ensayo y ver la variabilidad que se tiene con respecto a otros autores, tipo de suelo e incluso porcentaje de adición del material estabilizante.

Se tomaron los ensayos más relevantes por autores, aunque en algunos casos no se encontró suficiente información por ensayo por lo que se optó por tomar una sola referencia.

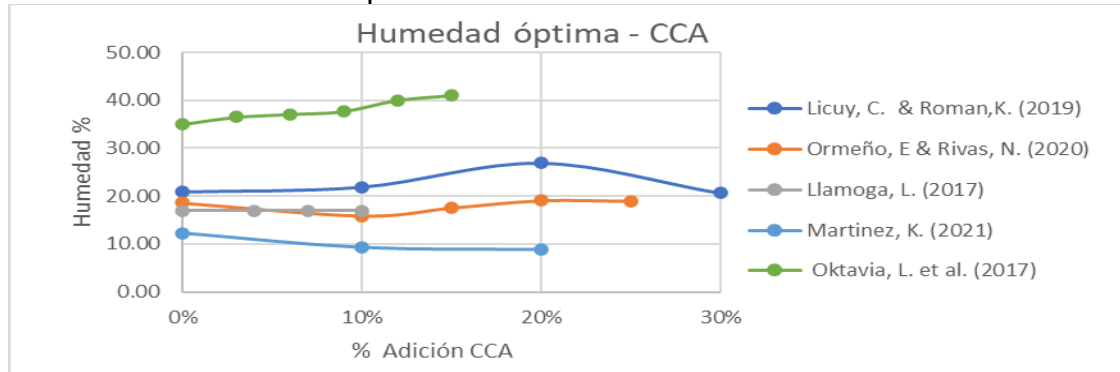
6.3.1 Estabilización de suelos arcillosos con Cenizas de cascarillas de arroz

Tabla 6. Comparación del Humedad óptima - CCA.

Estabilización con CCA									
Licuy, C & Roman, K (2019) - Ecuador		Ormeño, E & Rivas, N. (2020) - Perú		Llamoga, L. (2017) - Perú		Martinez, K. (2021) - Perú		Oktavia, L., Et al. (2017) - Indonesia	
porcentaje de adicción	Humedad Óptima (%)	porcentaje de adicción	Contenido de humedad óptimo %	porcentaje de adicción	Contenido de humedad óptimo %	porcentaje de adicción	Humedad Óptima (%)	porcentaje de adicción	Humedad Óptima (%)
Tipo suelo	MH-CH	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	SP	Tipo suelo	CH
0%	20.86	0%	18.6	0%	17	0%	12.25	0%	35
10%	21.85	10%	15.8	4%	17	10%	9.24	3%	36.5
20%	26.86	15%	17.5	7%	17	20%	8.79	6%	37.1
30%	20.59	20%	19.1	10%	17	-	-	9%	37.7
-	-	25%	19	-	-	-	-	12%	40
-	-	-	-	-	-	-	-	15%	41

Fuente: Propia

GRÁFICA 1. Humedad Óptima vs % Adición con adición de CCA



Fuente: propia

Para el contenido de humedad óptimo que se analizan dentro de la tabla 5, se puede determinar que los valores consagrados de los autores (Ormeño, E & Rivas 2020), (Llamoga, L. 2017) y (Licuy, C. & Roman, K. 2019) son valores similares que están dentro de un rango corto entre 9 % y 26.86% , A su vez se evidencia que los porcentajes de adición del material CCA esta entre 3% y 30%; por otro lado, para el

Autor (Oktavia, L. Et al. 2017) los valores de la humedad optima son altos encontrándose en un rango del 35% - 41%.

De esta manera también se puede observar el comportamiento del suelo arcilloso al momento de adicionar los porcentajes de CCA, Para el primer autor se puede notar que existe una disminución no tan significativa en el humedad optima, por otro lado para Ormeño la humedad tiende a disminuir con una adición del 10 y 15%, pero se reestablece en la adición del 20% y aumenta en la adición del 25%; para (Llamoga, L. 2017), el humedad se mantiene estable para su ensayo, finalmente se observa que para (Oktavia, L. Et al 2017) los porcentajes tiende a subir en las adiciones del 3 hasta el 15%.

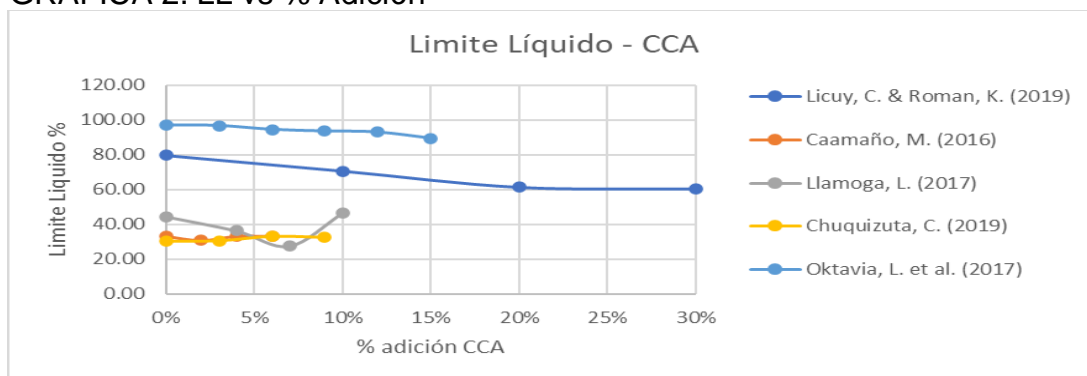
Dado lo anterior, se puede observar que efectivamente las CCA tienen influencia en los cambios de la humedad optima.

Tabla 7. Comparación del límite líquido- CCA.

Estabilización con CCA									
Licuy, C & Roman, K (2019) - Ecuador		Caamaño, M. (2016) - Colombia		Llamoga, L. (2017) - Perú		Chuquizuta, C. (2019) - Perú		Oktavia, L.; Et al. (2017) - Indonesia	
porcentaje de adición	Límite Líquido (%)	porcentaje de adición	Límite Líquido (%)	porcentaje de adición	Límite Líquido (%)	porcentaje de adición	Límite Líquido (%)	porcentaje de adición	Límite Líquido (%)
suelo	MH-CH	Tipo suelo	-	Tipo suelo	CH	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CH
0%	79.67	0%	33	0%	44.53	0%	30.33	0%	97.00
10%	70.67	2%	31	4%	36.33	3%	30.67	3%	96.70
20%	61.33	4%	33	7%	27.51	6%	33.33	6%	94.50
30%	60.33	6%	33	10%	46.42	9%	32.67	9%	93.60
-	-	-	-	-	-	-	-	12%	93.00
-	-	-	-	-	-	-	-	15%	89.50

Fuente: Propia

GRÁFICA 2. LL vs % Adición



Fuente: propia

Una de las principales características que se puede evidenciar, en el ensayo de la densidad máxima seca es la disminución del límite líquido en el suelo CH en ensayos de (Oktavia, L. Et al. 2017) y (Licuy, C. & Roman, K. 2019). y (Llamoga, L. 2017), pero en el caso de esta última adición del 10% hace incrementar este parámetro, por lo cual se podría deducir que no solo depende del tipo de suelo sino de variables propias de la muestra, tales como cantidad de muestra, cantidad de humedad presente, y por otro lado tal como se evidencia en la gráfica, las muestras naturales no tienen un mismo límite líquido por lo que este parámetro puede ser decisivo al momento de aplicar y estabilizar con CCA.

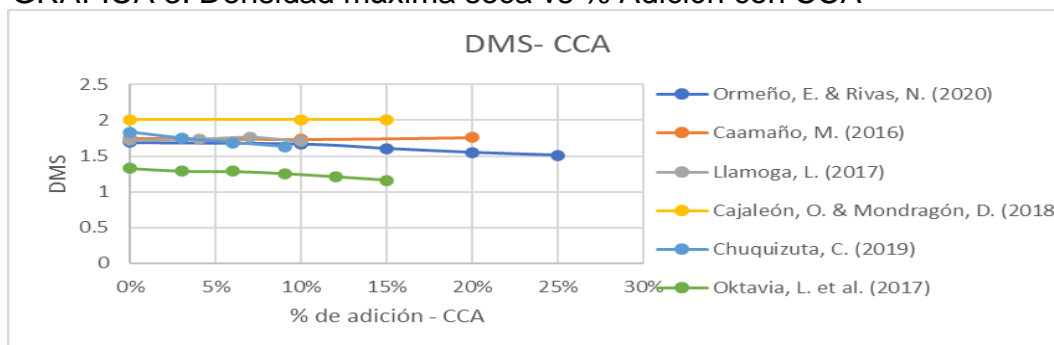
Por otro lado, los ensayos de Chuquizuta y Caamaño tienden a disminuir levemente y luego incrementan en una pequeña proporción.

Tabla 8. Comparación de la densidad máxima seca - CCA.

Estabilización con CCA					
Ormeño, E & Rivas, N. (2020) - Perú		Caamaño, M. (2016) - Colombia		Llamoga, L. (2017) - Perú	
porcentaje de adicción	Desidad Max. seca %	porcentaje de adicción	Desidad Max. seca %	porcentaje de adicción	Desidad Max. seca %
Tipo suelo	CL	Tipo suelo	-	Tipo suelo	CL
0%	1.694	0%	1.75	0%	1.722
10%	1.671	10%	1.73	4%	1.735
15%	1.608	20%	1.76	7%	1.762
20%	1.55	-	-	10%	1.707
25%	1.508	-	-	-	-
Cajaleón, O & Mondragón, D. (2018) - Perú		Chuquizuta, C. (2019) - Perú		Oktavia, L.; Et al. (2017) - Indonesia	
porcentaje de adicción	Desidad Max. seca %	porcentaje de adicción	Desidad Max. seca %	porcentaje de adicción	Desidad Max. seca %
Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CH
0%	2.006	0%	1.83	0%	1.33
10%	2.006	3%	1.75	3%	1.29
15%	2.006	6%	1.69	6%	1.29
-	-	9%	1.63	9%	1.26
-	-	-	-	12%	1.21
-	-	-	-	15%	1.16

Fuente: Propia

GRÁFICA 3. Densidad máxima seca vs % Adicción con CCA



Fuente: propia

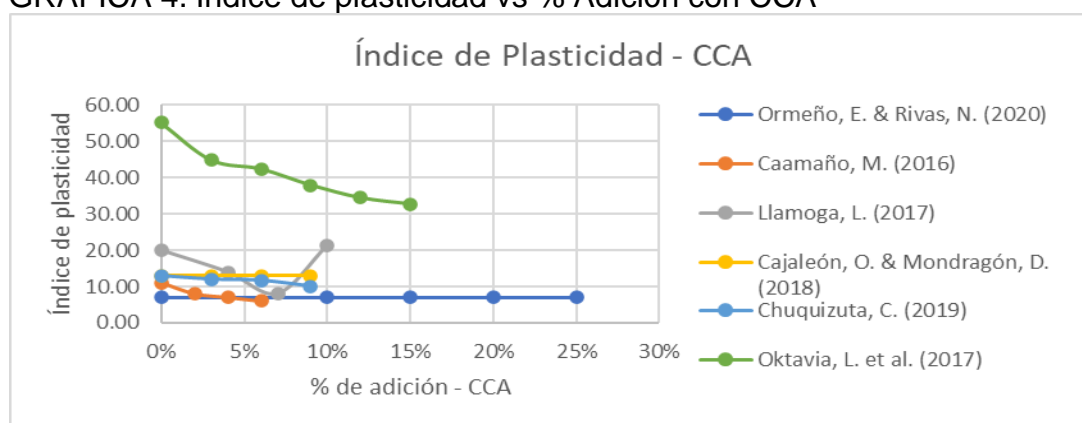
La densidad seca máxima tiene pequeñas variaciones tal como se muestra en la gráfica 3, por lo que se evidencia esta tiende a disminuir en todos los porcentajes de aplicación de la CCA.

Tabla 9. Comparación del índice de plasticidad - CCA.

Estabilización con CCA					
Ormeño, E & Rivas, N. (2020) - Perú		Caamaño, M. (2016) - Colombia		Llamoga, L. (2017) - Perú	
porcentaje de adicción	Índice de plasticidad %	porcentaje de adicción	Índice de plasticidad %	porcentaje de adicción	Índice de plasticidad %
Tipo suelo	CL	Tipo suelo	-	Tipo suelo	CL
0%	7.00	0%	11	0%	20.02
10%	7.00	2%	8	4%	14.03
15%	7.00	4%	7	7%	8.14
20%	7.00	6%	6	10%	21.42
25%	7.00	-	-	-	-
Cajaleón, O & Mondragón, D. (2018) - Perú		Chuquizuta, C. (2019) - Perú		Oktavia, L; Dewi, R & Hadinata, F (2017) - Indonesia	
porcentaje de adicción	Índice de plasticidad %	porcentaje de adicción	Índice de plasticidad %	porcentaje de adicción	Índice de plasticidad %
Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CH
0%	13.00	0%	13.00	0%	55.12
3%	13.00	3%	12.00	3%	44.84
6%	13.00	6%	11.67	6%	42.38
9%	13.00	9%	10.00	9%	37.93
-	-	-	-	12%	34.43
-	-	-	-	15%	32.72

Fuente: Propia

GRÁFICA 4. Índice de plasticidad vs % Adición con CCA



Fuente: propia

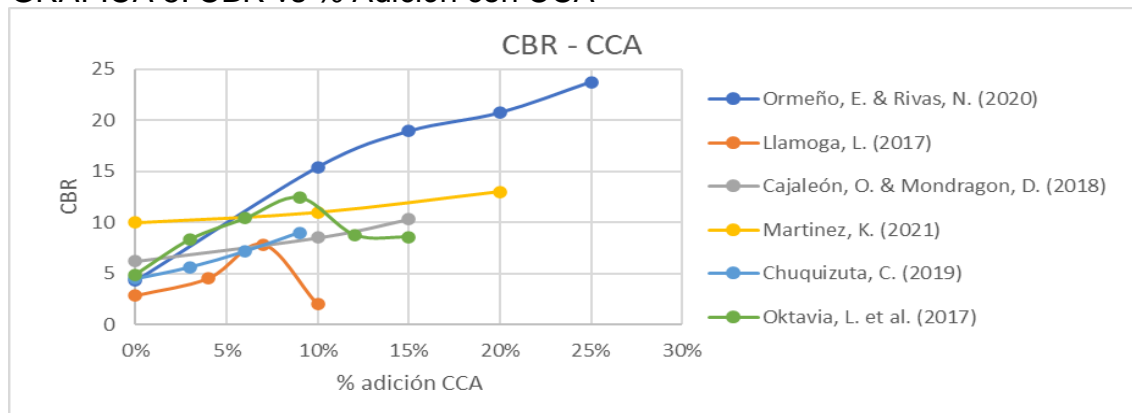
Como se puede observar en el parámetro del índice de plasticidad, este en la muestra natural no tiene el mismo valor para todas las muestras, por lo que se puede partir de este punto para afirmar la variabilidad que tiene al momento de aplicar los porcentajes de adición, esto se debe a que el suelo de aplicación de Oktavia es un tipo CH, pero los demás suelos son CL, por lo que se puede notar que estos tienen valores cercanos y comportamientos similares.

Tabla 10. Comparación del CBR - CCA.

Estabilización con CCA - CBR 95% 0.1"					
Ormeño, E & Rivas, N. (2020) - Perú		Llamoga, L. (2017) - Perú		Cajaleón, O & Mondragón, D. (2018) - Perú	
porcentaje de adición	CBR	porcentaje de adición	CBR	porcentaje de adición	CBR
Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CL
0%	4.3	0%	2.85	0%	6.2
10%	15.4	4%	4.52	10%	8.5
15%	18.9	7%	7.8	15%	10.3
20%	20.7	10%	2	-	-
25%	23.7	-	-	-	-
Martinez, K. (2021) - Perú		Chuquizuta, C. (2019) - Perú		Oktavia, L. Et al. (2017) - Indonesia	
porcentaje de adición	CBR	porcentaje de adición	CBR	porcentaje de adición	CBR
Tipo suelo	SP	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	CH
0%	10	0%	4.50	0%	4.86
10%	11	3%	5.63	3%	8.35
20%	13	6%	7.17	6%	10.41
-	-	9%	9.00	9%	12.47
-	-	-	-	12%	8.79
-	-	-	-	15%	8.57

Fuente: Propia

GRÁFICA 5. CBR vs % Adición con CCA



Fuente: propia

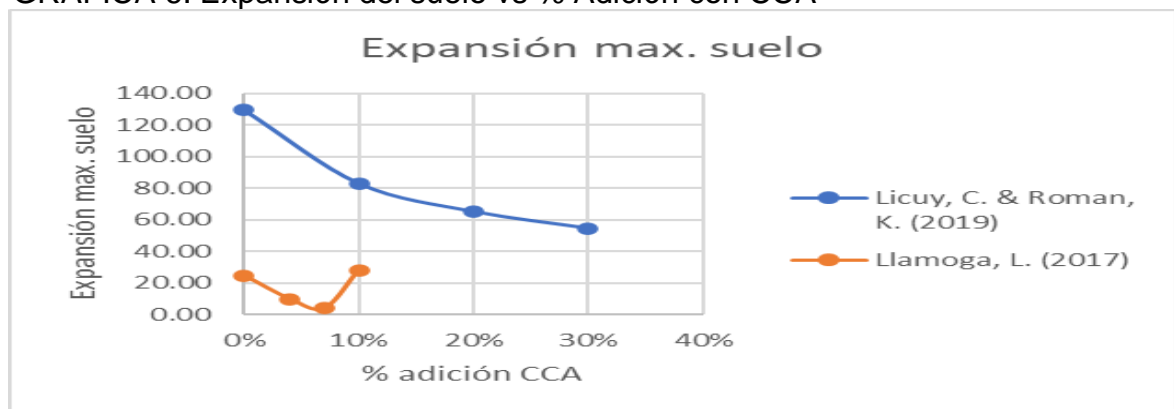
La gráfica muestra una variabilidad en el comportamiento de cada uno de los ensayos a pesar de que la muestra natural sus valores iniciales son muy cercanos, se puede apreciar que el comportamiento de estos tiende a aumentar inicialmente y a medida de la adición del porcentaje de CCA, algunos de estos siguen subiendo como otros tienden a disminuir, tal como se muestra en la gráfica 5.

Tabla 11. Comparación Índice de expansión - Resistencia compresión incofinada y modulo resiliente - CCA.

Estabilización con CCA						
Licuy, C & Roman, K (2019) - Ecuador		Llamoga, L. (2017) - Perú		Caamaño, M. (2016) - Colombia		
Tipo suelo	MH-CH	Tipo suelo	CL	Tipo suelo	-	
porcentaje de adicción	Expansión Max. del suelo %	porcentaje de adicción	Expansión Max. del suelo %	porcentaje de adicción	Resistencia Compresión Incofinada Promedio Kpa	Módulo resiliente del suelo Mpa
0%	129.43	0%	24.83	0%	287.16	45.54
10%	82.97	4%	10.13	2%	505.20	53.64
20%	65.32	7%	4.42	4%	620.39	65.27
30%	54.72	10%	28.25	6%	428.61	62.72

Fuente: Propia

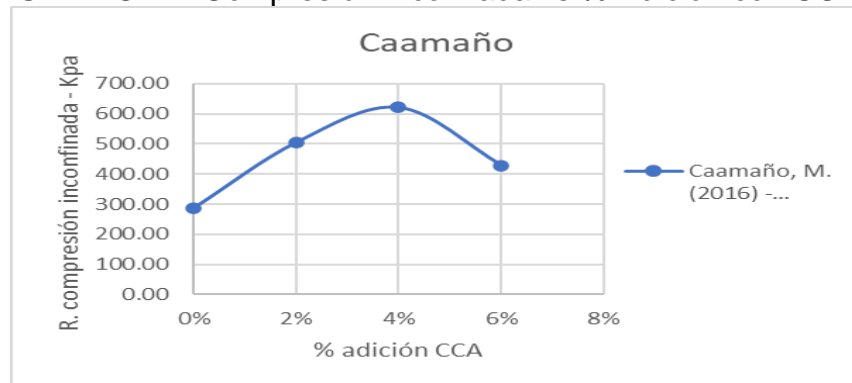
GRÁFICA 6. Expansión del suelo vs % Adición con CCA



Fuente: propia

La adición de CCA muestra que puede afectar de manera positiva el comportamiento de expansión del suelo, se nota en la gráfica 6, que hay una reducción importante en este aspecto, por otro lado, es importante ver características propias del cada suelo ya que estas influyen sustancialmente.

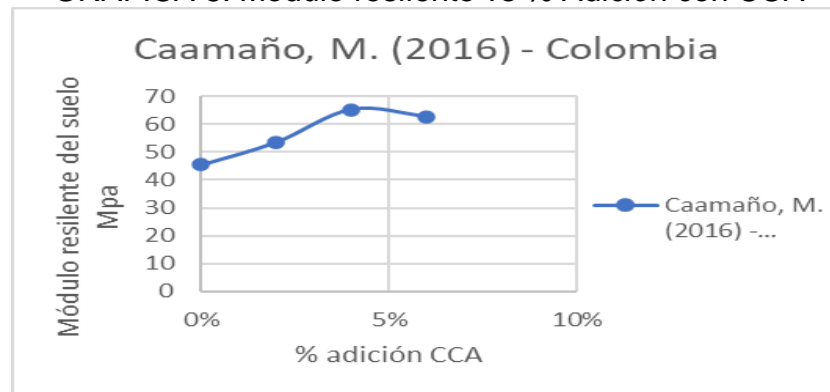
GRÁFICA 7. Compresión incofinada vs % Adición con CCA



Fuente: propia

Se puede evidenciar en este aspecto un importante mejoramiento cuando se aplica el 4% de CCA, pero a partir de este punto comienza a tener una disminución sustancial; por lo cual se puede observar que no es bueno la aplicación de porcentajes altos de CCA en suelos, ya que en lugar de mejorar las características se puede injerir daños más graves en este.

GRÁFICA 8. Modulo resiliente vs % Adición con CCA



Fuente: propia

En este aspecto se observa un mejoramiento cuando se aplica el 4% de CCA, pero a partir de este punto comienza a tener una disminución leve; por lo cual se puede observar que no es bueno la aplicación de porcentajes altos de CCA en suelos, ya que en lugar de mejorar las características se puede injerir daños más graves en este.

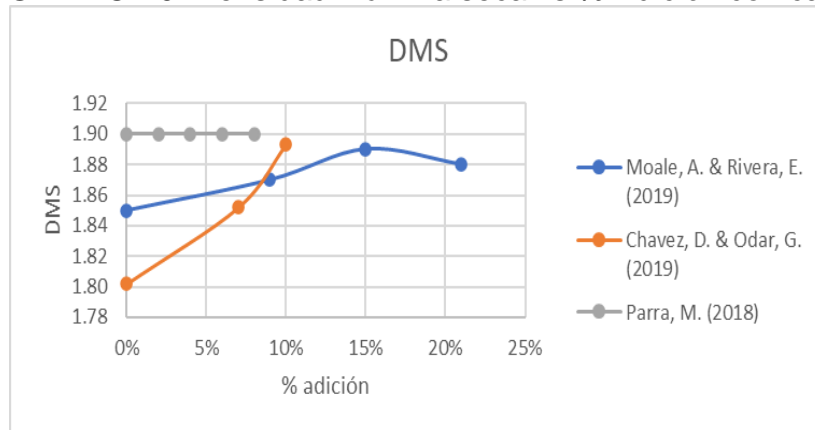
6.3.2 Estabilización de suelos arcillosos con cal

Tabla 12. comparación densidad máxima seca – con adición de cal

Estabilización con Cal					
Moale, A & Rivera, E. (2019) - Perú		Chavez, D. & Odar, G. (2019) - Perú		Parra, M. (2018) - Colombia	
porcentaje de adicción	DMS	porcentaje de adicción	DMS	porcentaje de adicción	DMS
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	
0%	1.85	0%	1.80	0%	1.90
9%	1.87	7%	1.85	2%	1.90
15%	1.89	10%	1.89	4%	1.90
21%	1.88			6%	1.90
				8%	1.90

Fuente: Propia

GRÁFICA 9. Densidad máxima seca vs % Adición con cal



Fuente: propia

El comportamiento al adicionarle Cal es de una tendencia al alza de manera positiva, es decir, el suelo mejora en porcentajes de adición de cal cercanas al 15%, a partir de este porcentaje tiende a disminuir la DMS tal como se observa en la gráfica 9.

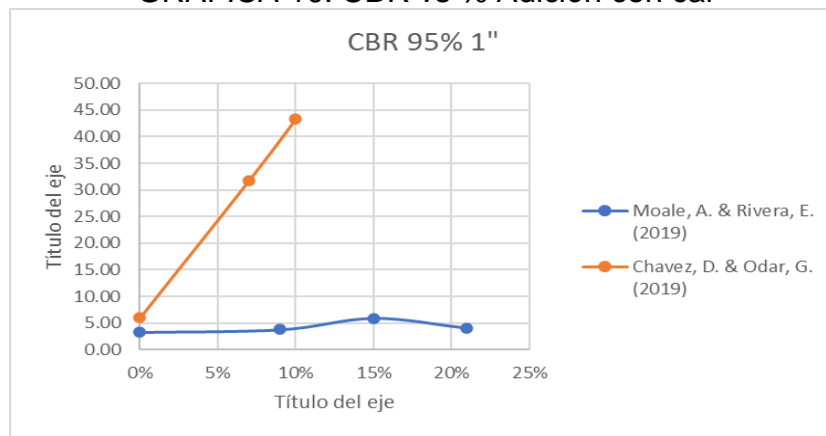
Otro aspecto importante es que la cal y de acuerdo con la gráfica 3 de DMS de CCA, el mejor método para mejora este ítem es la cal pues tiene mejores cambios en las características del suelo.

Tabla 13. Comparación CBR - cal

Estabilización con Cal			
Moale, A & Rivera, E. (2019) - Perú		Chavez, D. & Odar, G. (2019) - Perú	
porcentaje de adicción	CBR 95% 1"	porcentaje de adicción	CBR 95% 1"
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL
0%	3.30	0%	6.00
9%	3.80	7%	31.80
15%	5.90	10%	43.30
21%	4.10	-	-

Fuente: Propia

GRÁFICA 10. CBR vs % Adición con cal



Fuente: propia

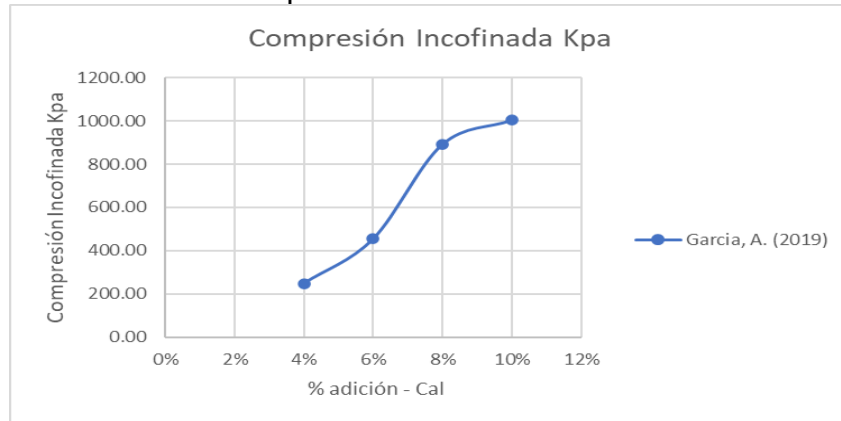
La grafica muestra un comportamiento de mejoramiento sustancial con la aplicación de (Chávez, D. & Odar, G. 2019) pero en el ensayo de (Moale, A. & Rivera, E. 2019) este cambio es leve a pesar que ambos tiene n un valor similar en su muestra inicial y a la vez comparten un mismo tipo de suelo, esto se puede dar por razones del tamaño de la muestra y por el lugar y condiciones de la zona, así también como sus valores iniciales de LL, LP e IP; por otro lado cuando se compara frente a la CCA de la gráfica 5, se puede apreciar que ambos métodos funcionan para el mejoramiento del CBR.

Tabla 14. Comparación Resistencia compresión incofinada, modulo resiliente, esfuerzos máximos- Cal.

Estabilización con Cal					
Garcia, A. (2019)- Colombia			Parra, M. (2018) - Colombia		
porcentaje de adicción	Compresion incofinada Kpa	Modulo resiliente Mpa	porcentaje de adicción	Esfuerzos maximos Kg/cm2	Rigidez
Tipo de suelo	CH		Tipo de suelo	CH	
4%	248.00	87.29	0%	0.689	0.094
6%	454.00	111.81	2%	1.104	0.290
8%	892.00	116.81	4%	2.616	0.886
10%	1004.00	162.58	6%	2.413	0.808
-	-	-	8%	1.963	1.104

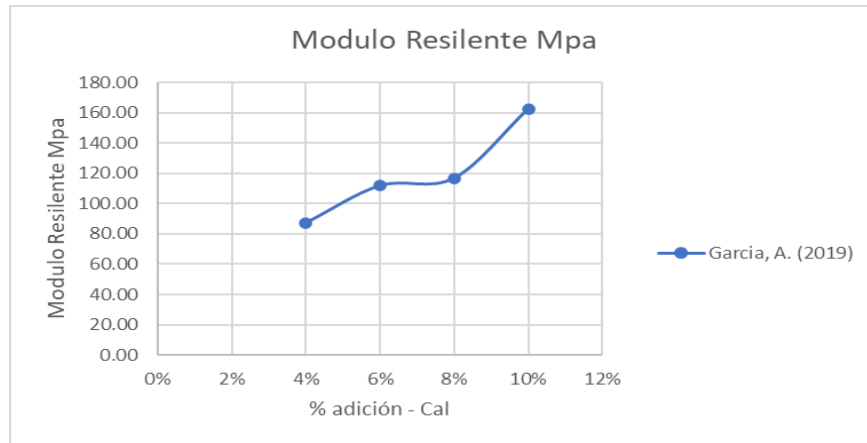
Fuente: Propia

GRÁFICA 11. Compresión incofinada vs % Adición con cal



Fuente: propia

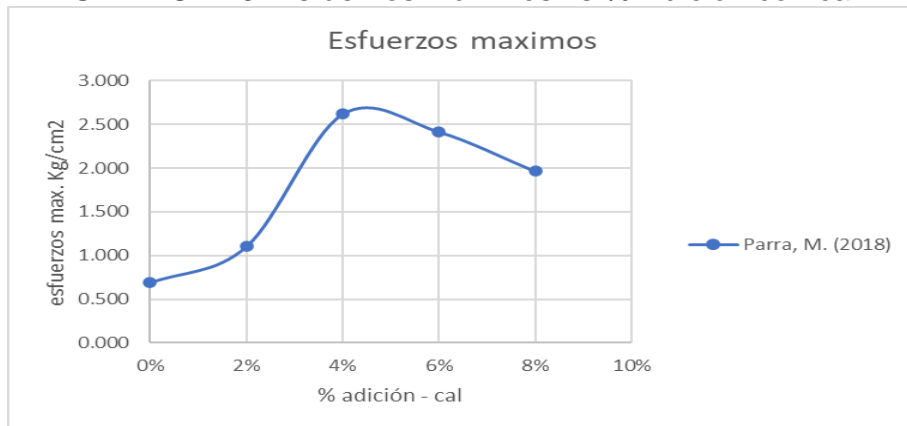
GRÁFICA 12. Modulo resiliente vs % Adición con cal



Fuente: propia

Para la gráfica 11 y 12 se puede observar que la adición de la cal ayuda a mejorar estas dos propiedades mecánicas tanto la compresión incofinada como el módulo resiliente, a su vez comparando estas graficas con las gráficas 7 y 8, se puede evidenciar que la cal tiene mayor incidencia al mejorar estos dos parámetros.

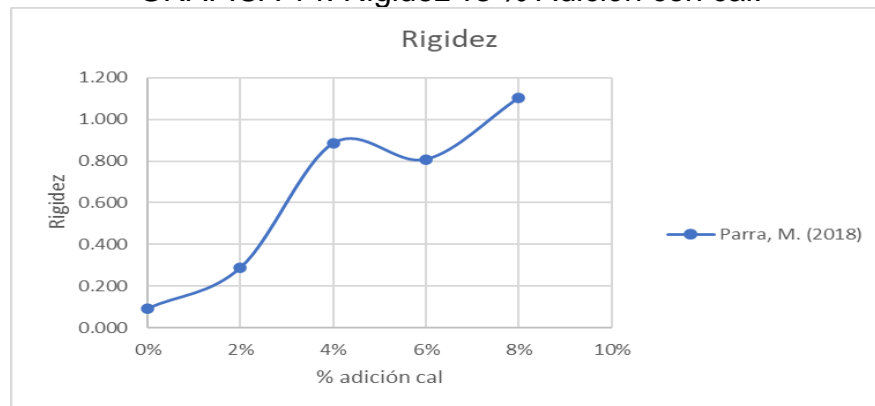
GRÁFICA 13. Esfuerzos máximos vs % Adición con cal



Fuente: propia

En este aspecto se observa un mejoramiento cuando se aplica el 4% de Cal, pero a partir de este punto comienza a tener una disminución leve; por lo cual se puede observar que no es bueno la aplicación de porcentajes altos de Cal en suelos, ya que en lugar de mejorar las características se puede injerir daños más graves en este.

GRÁFICA 14. Rigidez vs % Adición con cal.



Fuente: propia

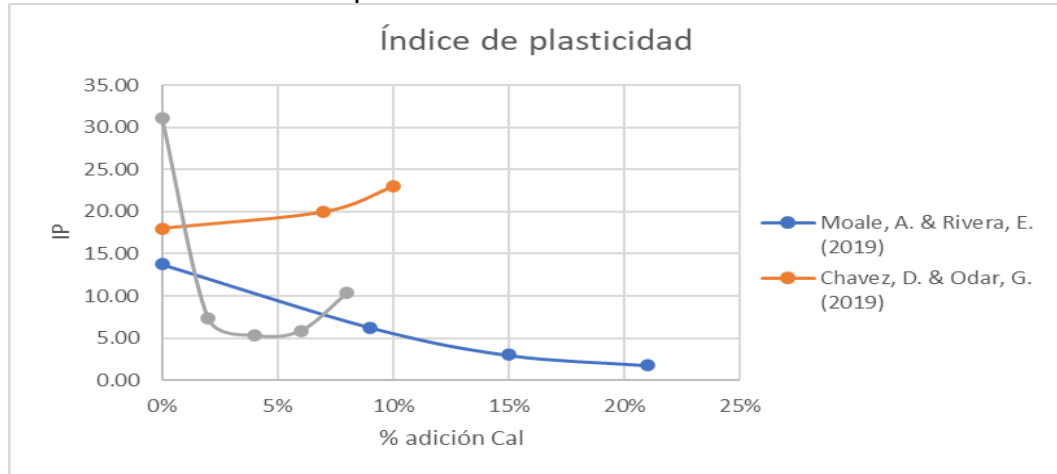
En este aspecto se observa un mejoramiento cuando se aplica el 4% de cal, pero a partir de este punto comienza a tener una disminución leve, pero nuevamente aumenta su rigidez a partir de adiciones del 6% de cal.

Tabla 15. Comparación índice de plasticidad - cal

Estabilización con Cal					
Moale, A & Rivera, E. (2019) - Perú		Chavez, D. & Odar, G. (2019) - Perú		Khan, A. (2014) - Bangladesh	
porcentaje de adición	Índice de plasticidad %	porcentaje de adición	Índice de plasticidad %	porcentaje de adición	Índice de plasticidad %
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CH
0%	13.73	0%	18.00	0%	31.1
9%	6.27	7%	20.00	2%	7.33
15%	2.99	10%	23.00	4%	5.32
21%	1.78	-	-	6%	5.87
-	-	-	-	8%	10.36

Fuente: Propia

GRÁFICA 15. Índice de plasticidad vs % Adición con cal



Fuente: propia

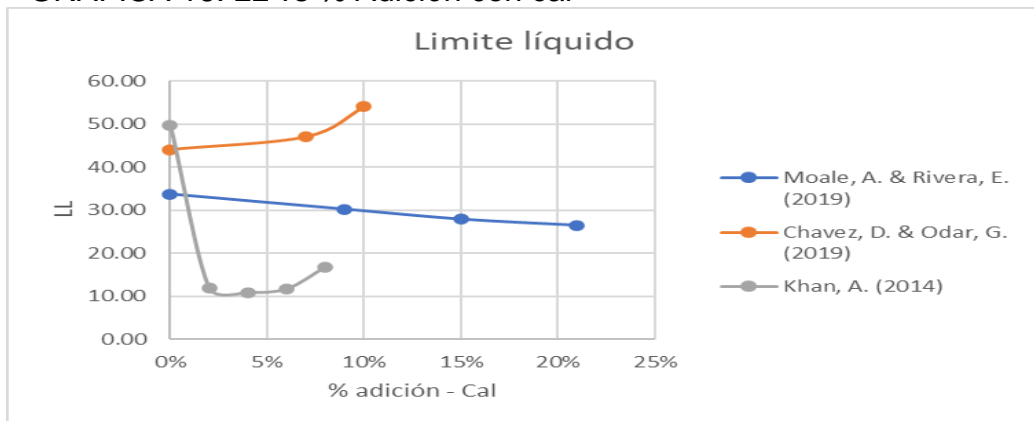
Por otra parte el IP con la adición de la cal y tal como se observa en la gráfica 15, se nota un comportamiento disperso en cada uno de los ensayos realizados, ya que estos no muestran un patrón uniforme en los resultados, algunos disminuyen sustancialmente, otros lo hacen levemente al descenso mientras otro tienda a aumentar el IP, pero al comparar este ítem con la gráfica 4, donde estas tienen un comportamiento más parejo y uniforme uno a otros, de esta manera se puede decir que el método más eficaz para mejorar este parámetro entre CCA y la Cal, es el CCA al tener un mejor comportamiento y resultados más confiables.

Tabla 16. Comparación Limite Líquido - cal

Estabilización con Cal					
Moale, A & Rivera, E. (2019) - Perú		Chavez, D. & Odar, G. (2019) - Perú		Khan, A. (2014) - Bangladesh	
porcentaje de adicción	Limite Líquido %	porcentaje de adicción	Limite Líquido %	porcentaje de adicción	Limite Líquido %
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CH
0%	33.70	0%	44.00	0%	49.8
9%	30.18	7%	47.00	2%	11.9
15%	27.86	10%	54.00	4%	10.86
21%	26.43	-	-	6%	11.72
-	-	-	-	8%	16.82

Fuente: propia

GRÁFICA 16. LL vs % Adicción con cal



Fuente: propia

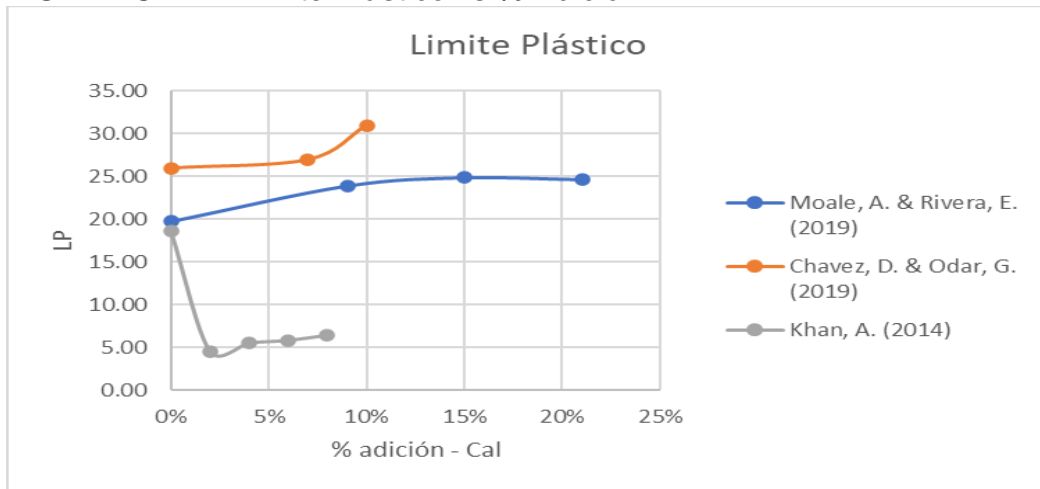
Por otra parte el LL con la adicción de la cal y tal como se observa en la gráfica 16, se nota un comportamiento disperso en cada uno de los ensayos realizados, ya que estos no muestran un patrón uniforme en los resultados, algunos disminuyen sustancialmente, otros lo hacen levemente al descenso mientras otro tienda a aumentar el LL, pero al comparar este ítem con la gráfica 2, donde estas tienen un comportamiento más parejo y uniforme uno a otros, de esta manera se puede decir que el método más eficaz para mejorar este parámetro entre CCA y la Cal, es el CCA al tener un mejor comportamiento y resultados más confiables.

Tabla 17. Comparación Limite Plástico - cal

Estabilización con Cal					
Moale, A & Rivera, E. (2019) - Perú		Chavez, D. & Odar, G. (2019) - Perú		Khan, A. (2014) - Bangladesh	
porcentaje de adición	Limite Plastico %	porcentaje de adición	Limite Plastico %	porcentaje de adición	Limite Plastico %
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CH
0%	19.79	0%	26.00	0%	18.7
9%	23.91	7%	27.00	2%	4.57
15%	24.87	10%	31.00	4%	5.54
21%	24.65	-	-	6%	5.85
-	-	-	-	8%	6.46

Fuente: propia

GRÁFICA 17. Límite Plástico vs % Adición



Fuente: propia

Por otra parte, el LP con la adición de la cal y tal como se observa en la gráfica 17, se nota un comportamiento disperso en cada uno de los ensayos realizados, ya que estos no muestran un patrón uniforme en los resultados, algunos disminuyen sustancialmente, otros lo hacen levemente al descenso mientras otra tienda a aumentar el LP.

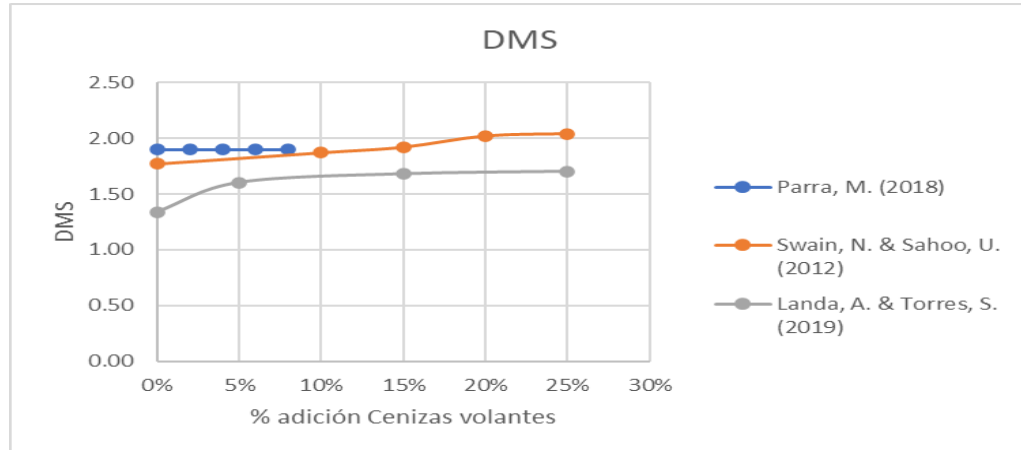
6.3.3 Estabilización de suelos arcillosos con cenizas volantes

Tabla 18. Comparación de densidad máxima seca

Estabilización con cenizas volantes					
Parra, M. (2018) - Colombia		Swain, N. & Sahoo, U. (2012) - India		Landa, A. & Torres, S. (2019) - Perú	
Tipo de suelo		Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL
porcentaje de adicción	DMS	porcentaje de adicción	DMS	porcentaje de adicción	DMS
0%	1.90	0%	1.77	0%	1.34
2%	1.90	10%	1.87	5%	1.60
4%	1.90	15%	1.92	15%	1.68
6%	1.90	20%	2.02	25%	1.70
8%	1.90	25%	2.04	-	-

Fuente: Propia

GRÁFICA 18. Densidad máxima seca vs % Adicción de cenizas volantes



Fuente: propia

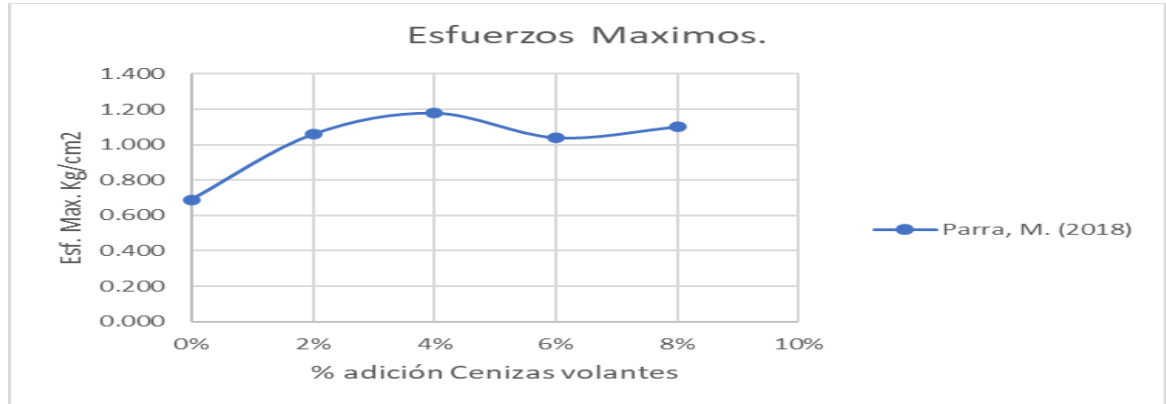
Igual que los anteriores métodos, las cenizas volantes ayudan a mejorar la DMS, por lo que se puede notar en la gráfica 18, aunque en esta se haga más leve que en comparación de la gráfica 9 – cal y similar a la gráfica 3 – CCA, por lo que se puede notar un mejor ítem de mejoramiento con cal en este aspecto.

Tabla 19. Análisis esfuerzo Max.; Rigidez y expansión del suelo.

Estabilización con cenizas volantes					
Parra, M. (2018) - Colombia				Landa, A. & Torres, S. (2019) - Perú	
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL
porcentaje de adicción	Esfuerzos maximos Kg/cm2	porcentaje de adicción	Rigidez	porcentaje de adicción	expansión del suelo
0%	0.689	0%	0.094	0%	5.90
2%	1.059	2%	0.224	5%	3.90
4%	1.180	4%	0.251	15%	3.60
6%	1.040	6%	0.184	25%	3.20
8%	1.101	8%	0.186	-	-

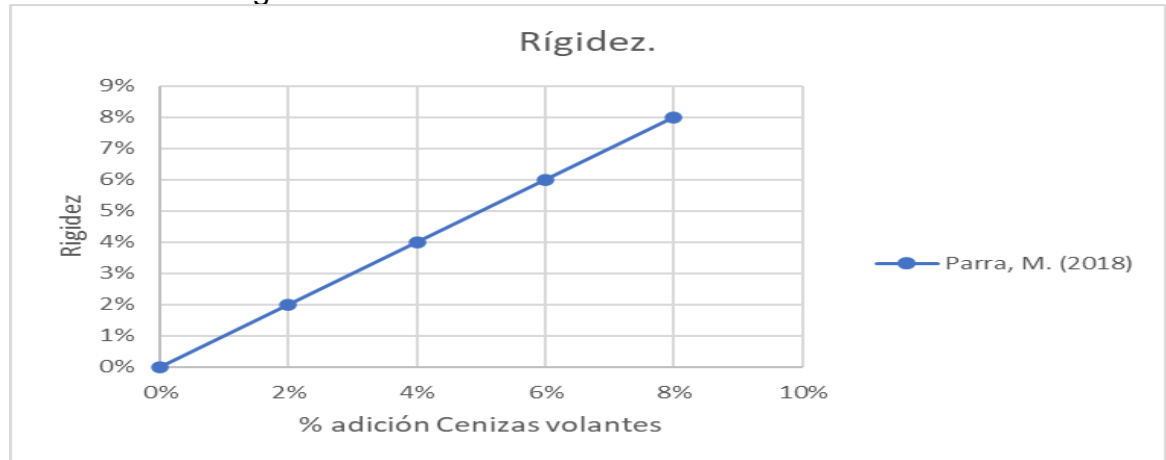
Fuente: Propia

GRÁFICA 19. esfuerzo Max vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

GRÁFICA 20. Rigidez vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

GRÁFICA 21. Expansión del suelo vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

En cuanto a los ítems de Análisis esfuerzo Máximos, Rigidez y expansión del suelo de las gráficas 19, 20 y 21 respectivamente, se puede notar que en el caso de la gráfica 19, los esfuerzos máximos tienden a mejorar, pero llega un momento donde bajan su efectividad y luego vuelve a subir los esfuerzos máximos, este comportamiento es similar a que tiene la adición con cal, grafica 13.

Por otro lado, en la gráfica 20, la rigidez del suelo con cenizas volantes tiende a subir de manera lineal en cada uno de los porcentajes de adición, y al compararlo con la adición de cal, este parámetro de la gráfica 14, tiene comportamiento variable, en concepto es más viable y confiable la estabilidad con cal para este parámetro.

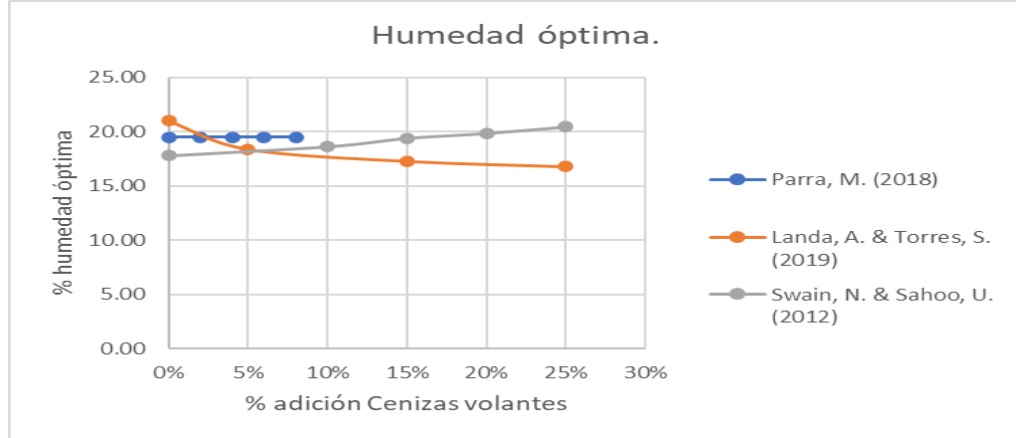
Finalmente, la expansión del suelo con cenizas volantes tiene un mejoramiento, ya que ayuda a disminuir dicha expansión tal como se observa en la gráfica 21, similar a los mejoramientos con CCA.

Tabla 20. Análisis físico - mecánicas cenizas volantes

Estabilización con cenizas volantes					
Parra, M. (2018) - Colombia		Landa, A. & Torres, S. (2019) - Perú		Swain, N. & Sahoo, U. (2012) - India	
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL
porcentaje de adición	Humedad óptima %	porcentaje de adición	Humedad Óptima %	porcentaje de adición	Humedad óptima %
0%	19.50	0%	21.00	0%	17.82
2%	19.50	5%	18.40	10%	18.65
4%	19.50	15%	17.30	15%	19.42
6%	19.50	25%	16.80	20%	19.87
8%	19.50	-	-	25%	20.46

Fuente: Propia

GRÁFICA 22. Humedad óptima vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

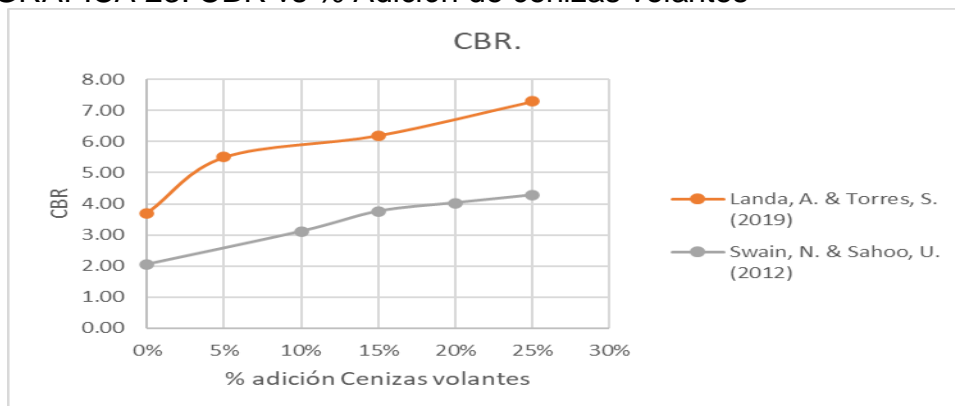
El mejoramiento de la humedad óptima con adición de cenizas volantes es de manera leve como se muestra en la gráfica 22, contrario a lo que pasa en la gráfica 1 con la adición de CCA, donde se observa un comportamiento más variable en los resultados y donde cada uno de los ensayos tiende a tener algún grado de mejoramiento en las adiciones con las CCA.

Tabla 21. Comparación CBR

Estabilización con cenizas volantes			
Landa, A. & Torres, S. (2019) - Perú		Swain, N. & Sahoo, U. (2012) - India	
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CL
porcentaje de adicción	CBR 95% 1"	porcentaje de adicción	CBR
0%	3.70	0%	2.06
5%	5.50	10%	3.12
15%	6.20	15%	3.76
25%	7.30	20%	4.03
		25%	4.28

Fuente: propia

GRÁFICA 23. CBR vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

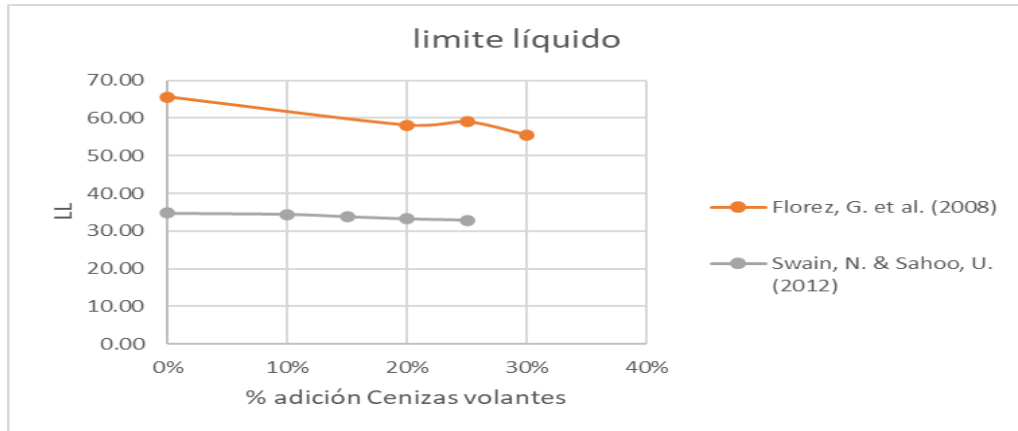
Las cenizas volantes tienden a tener un mejoramiento relevante frente a las gráficas 5 y 12, sin embargo, frente a la CCA los comportamientos en los datos tienden a mejorar más con las cenizas volantes, pero siendo muy parejos en los resultados, por otro lado, frente a la cal, el método más confiable sería las cenizas volantes, ya que los ensayos son muy similares entre sí.

Tabla 22. Comparación LL.

Estabilización con cenizas volantes							
Florez, G.; Et al.. (2008)- Colombia				Swain, N. & Sahoo, U. (2012) - India			
Tipo de suelo		CH		Tipo de suelo		CL	
porcentaje de adicción	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %	porcentaje de adicción	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
0%	65.60	25.44	40.16	0%	34.79	20.24	13.34
20%	58.10	24.19	33.91	10%	34.48	20.79	13.89
25%	59.00	24.93	34.07	15%	33.83	21.28	12.55
30%	55.50	26.87	28.63	20%	33.21	21.54	10.68
-	-	-	-	25%	32.85	22.09	9.16

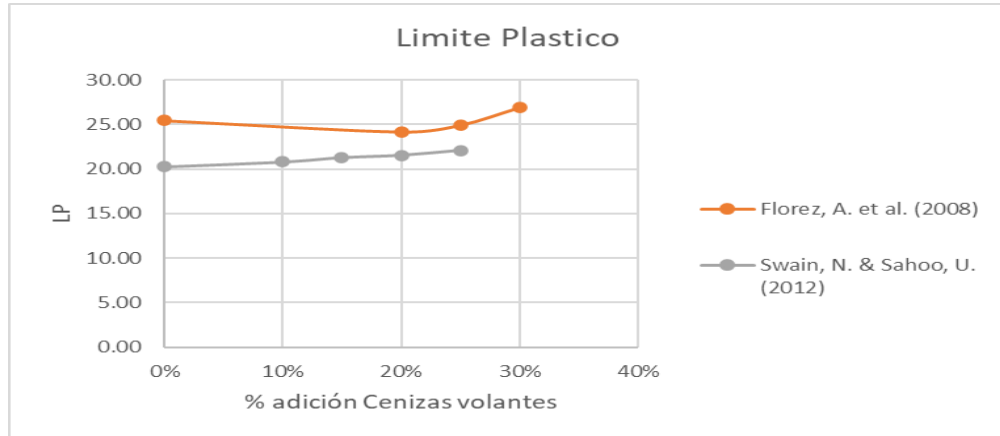
Fuente: propia

GRÁFICA 24. LL vs % Adición de cenizas volantes



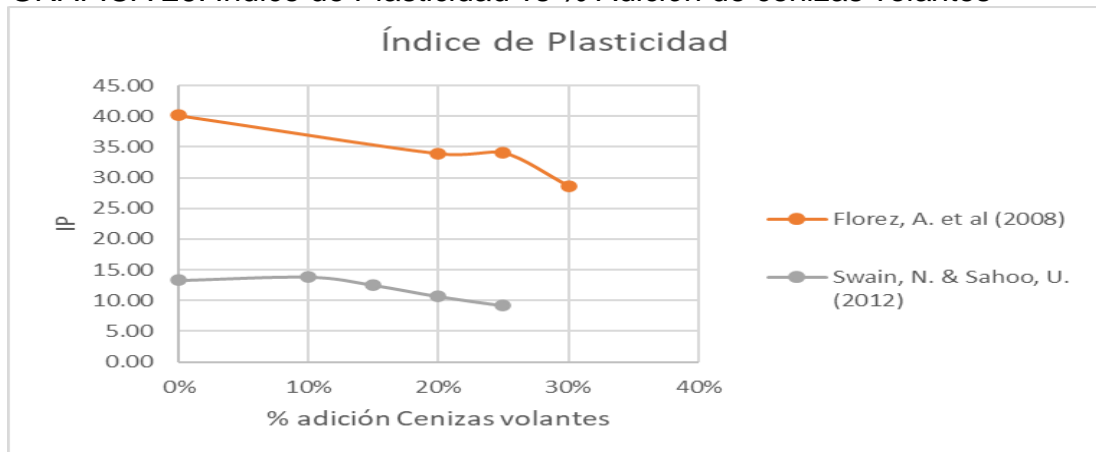
Fuente: propia

GRÁFICA 25. Límite Plástico vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

GRÁFICA 26. Índice de Plasticidad vs % Adición de cenizas volantes



Fuente: propia

Al igual que los anteriores límites de Atterberg, el mejoramiento en estos parámetros se ve influenciado por los porcentajes de adición de cada uno de, sin embargo, en estos casos, la nota más relevante al mejorar un límite de Atterberg es saber muy bien las condiciones propias del terreno, ya que estas tienen influencia directa en los resultados de los ensayos.

En este caso particular, y al comparar los límites de Atterberg con las adiciones de CCA y Cal, las cenizas volantes tienen mejores comportamientos, seguido de las CCA y con poca confiabilidad esta la adición con cal cuyos resultados son muy variables entre sí.

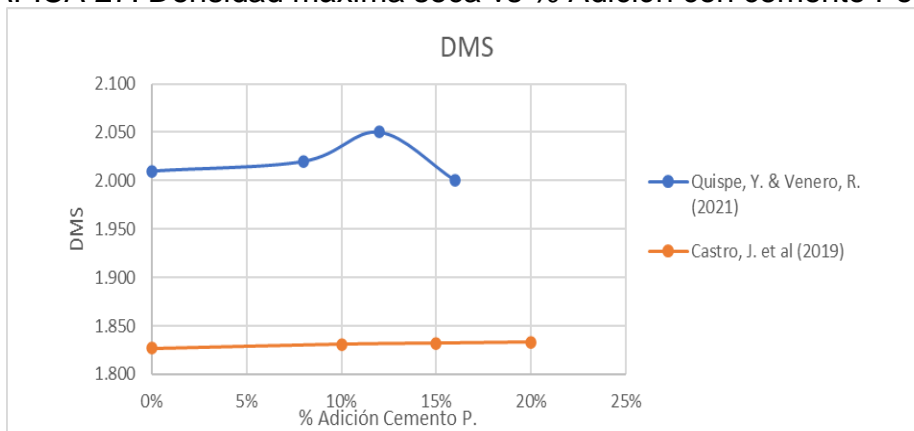
6.3.4 Estabilización de suelos arcillosos con cemento portland

Tabla 23. Comparación densidad máxima seca - cemento portland

Estabilización con cemento portland			
Quispe, Y. & Venero, R. (2021) - Perú		Castro, J. et al. (2019) - Perú	
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CH
porcentaje de adicción	DMS	porcentaje de adicción	DMS
0%	2.010	0%	1.827
8%	2.020	10%	1.831
12%	2.050	15%	1.832
16%	2.000	20%	1.833

Fuente: Propia

GRÁFICA 27. Densidad máxima seca vs % Adición con cemento Portland



Fuente: propia

La DMS al agregarse cemento portland, tiende a mejorar levemente gráfica 27, sin embargo frente a la gráfica 18 cenizas volantes estas son más uniformes en los resultados, teniendo mejor aceptación de la adición del componente; por otro lado

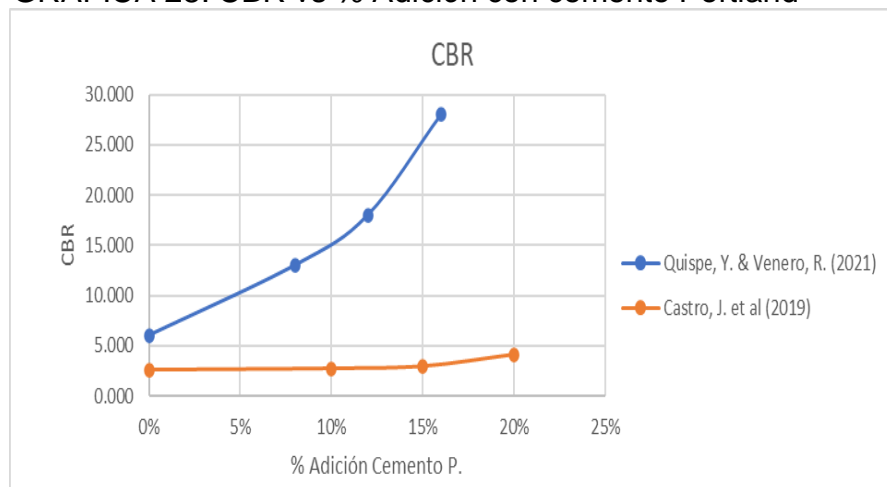
frente a la cal, gráfica 9, este tiene mejor comportamiento aunque sus datos y resultados son variables, sin embargo con las CCA, gráfica 3, los comportamientos entre estos dos parámetros, las CCA, son más uniformes con tendencia a la mejora en esta propiedad.

Tabla 24. Comparación CBR - cemento portland

Estabilización con cemento portland			
Quispe, Y. & Venero, R. (2021) - Perú		Castro, J. et al. (2019) - Perú	
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CH
porcentaje de adicción	CBR 95% 1" %	porcentaje de adicción	CBR 95% 1"
0%	6.000	0%	2.600
8%	13.000	10%	2.740
12%	18.000	15%	2.960
16%	28.000	20%	4.105

Fuente: Propia

GRÁFICA 28. CBR vs % Adición con cemento Portland



Fuente: propia

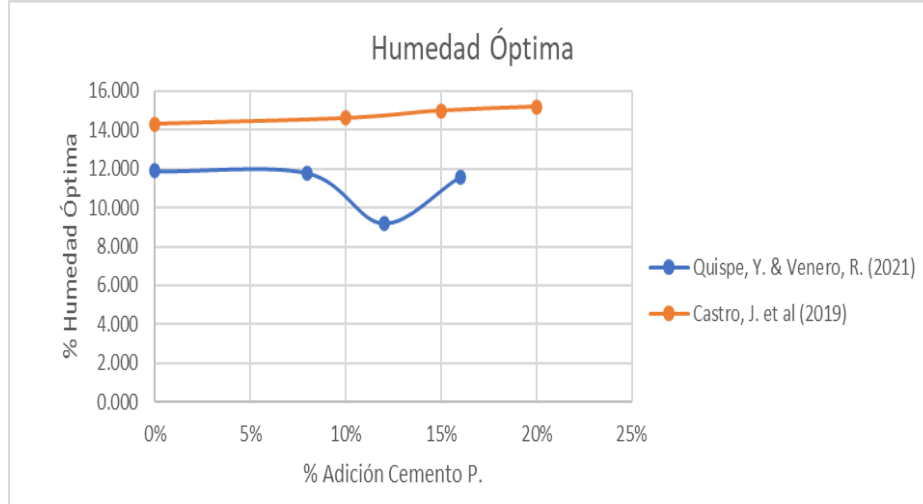
El cemento portland tienden a tener un mejoramiento frente a las gráficas 5 CCA, 12 Cal y 23 cenizas volantes, sin embargo, frente a la CCA los comportamientos varían con pequeñas diferencias, pero siendo muy parejos en los resultados, por otro lado frente a la cal, los comportamientos son similares aunque con pequeñas diferencias, y frente a las cenizas volantes este parámetro si tiene variaciones relevante, donde las cenizas volantes tienen mejor comportamiento y nivel de mejoramiento más confiable que los demás métodos.

Tabla 25. Comparación Humedad óptima - cemento portland

Estabilización con cemento portland			
Quispe, Y. & Venero, R. (2021) - Perú		Castro, J. et al. (2019) - Perú	
Tipo de suelo	CL	Tipo de suelo	CH
porcentaje de adicción	Humedad Óptima %	porcentaje de adicción	Humedad Óptima %
0%	11.900	0%	14.300
8%	11.800	10%	14.600
12%	9.200	15%	15.000
16%	11.600	20%	15.200

Fuente: Propia

GRÁFICA 29. Humedad óptima vs % Adición con cemento Portland



Fuente: propia

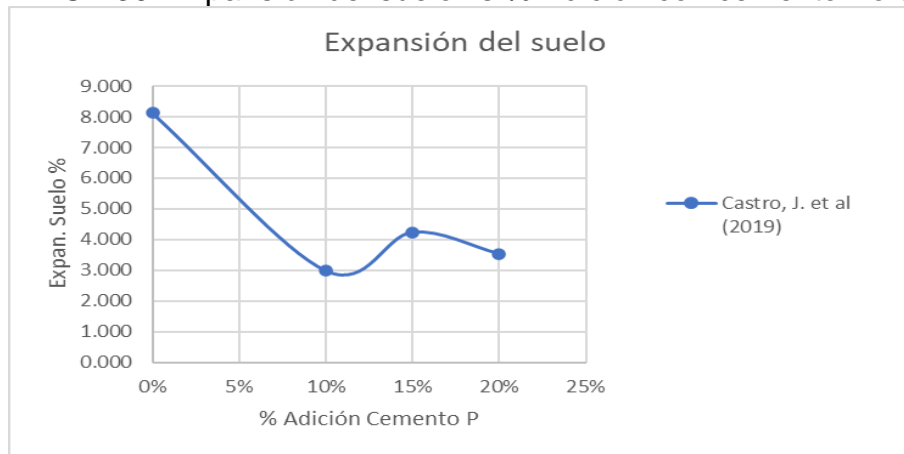
El mejoramiento de la humedad óptima con adición de cemento portland es de manera leve como se muestra en la gráfica 29, contrario a lo que pasa en la gráfica 1 con la adición de CCA, donde se observa un comportamiento más variable en los resultados y donde cada uno de los ensayos tiende a tener algún grado de mejoramiento en las adiciones con las CCA, y es similar al comportamiento de la gráfica 22 con adición de cenizas volantes, aunque en este se tiene una pequeña variabilidad en uno de los ensayos.

Tabla 26. Análisis expansión del suelo - cemento portland

Estabilización con cemento portland	
Castro, J. et al. (2019) - Perú	
Tipo de suelo	CH
porcentaje de adicción	expansión del suelo %
0%	8.120
10%	2.980
15%	4.240
20%	3.540

Fuente: Propia

GRÁFICA 30. Expansión del suelo vs % Adicción con cemento Portland



Fuente: propia

Así como los anteriores métodos aplicados al mejoramiento de la expansión de suelos mediante la adición de los agregados trabajados, se puede observar que hay una reducción en este parámetro, por lo que se puede evidenciar los métodos trabajado sirven para controlar la expansión de estos suelos.

6.4 ANALISIS COSTOS – BENEFICIOS

Al momento de realizar el análisis de costos y beneficio de cada uno de los métodos de estabilización utilizados en este trabajo, se debe tener en cuenta factores tales como distancia de las canteras o puntos de venta del material a adicionar, disponibilidad del material, el tipo y características del suelo a trabajar, entre otros factores externos a la obra.

Los costos que se deben tener para el mejoramiento de una subrasante de tipo arcilloso por km, teniendo en cuenta que el ancho normal de carreteras terciarias y secundarias en el país son de 7m aproximadamente.

Para el caso de las cenizas de cascarilla de arroz, tal como se comentó en el trabajo en general, es un desecho orgánico de la industria arrocera, por lo cual el valor del mercado de este material es de bajo costo llegando a ser de 20.000 pesos por cada 25 kilos del producto (Fedearroz, 2022).

Una de las ventajas al momento de comprar las cenizas de cascarilla de arroz, es que Colombia es un país productor de este insumo agrícola, por lo cual es de facilidad conseguirlo; los principales puntos o molinos de arroz son en los departamentos del Casanare, meta, Tolima y huila (DANE Primer semestre 2022), siendo Casanare el principal productor de arroz del país.

Debido a la falta de información verídica sobre el valor por m³ o tonelada de las cenizas de cascarilla de arroz y solo teniendo como referencia a Fedearroz se opta por tomar el valor de las CCA por m³ de 800.000 pesos colombianos y por aparte se cotiza el costo de acuerdo con el valor por m³ de transporte, aplicación y mano de obra.

Por otro lado, los aglutinantes como cemento, cal y cenizas de escoria son de más fácil obtención.

6.4.1 Factores directos e influyentes en la estabilidad

- Equipos y maquinaria: dentro de las maquinarias también influyen aspectos que se han de tener en cuenta tales como: los costos ocasionados por arriendo o adquisición de los equipos, periodos de amortización, trabajado u operario del equipo, combustible, mantenimiento, desgastes de piezas y transporte a obras y retiradas.
- Materiales estabilizantes: estos dependen de factores como disponibilidad, distancia de canteras, condiciones climáticas, impuestos sobre el material y operarios.
- Rendimientos: Los factores que influyen en los rendimientos están sujetos a los volúmenes a estabilizar, geometría del terreno y espesor de las capas, volumen del material estabilizante, tipo de suelo a estabilizar, organización del proyecto.

6.4.2 Factores que aumentan el desgaste

- Topografía de los terrenos
- Tipo de material

- Tamaño del material

Los elementos que más se desgasta en obras son los siguientes:

- Picas
- Porta picas

Estos elementos son fundamentales para la realización de la escarificación y desgarrar del terreno, por lo cual cuando hay desgaste de estas piezas y no se tiene el recambio, la maquinaria queda parada y sin operaciones lo cual genera más costos en los proyectos.

Maquinaria que implica costos de transporte

- Camiones cisterna
- Silos
- Maquinaria pesada

6.4.3 Consideraciones para disminuir costos

- Organización del proyecto: comprender todo el plan de ejecución, logística y coordinación; establecer los organigramas y actividades, definir las fortalezas y cómo afrontar los posibles contratiempos en la obra.
- Proveedores de materiales estabilizantes: para todo proyecto es necesario tener proveedores lo más cercanos a los proyectos, pero sin embargo en este aspecto se puede no siempre se puede cumplir a totalidad, en este ítem es importante tener proveedores secundaria en caso de que el proveedor principal sufra percances ya si contrarrestar pérdida de tiempo en la ejecución del proyecto.
- Otros factores que pueden disminuir los costos son: supervisión de las piezas que se desgastan con facilidad, puntos de vertederos de material excedente, puntos de aprovechamiento de aguas y maquinaria de respaldo o auxiliar.

6.5 MATRIZ COSTO – BENEFICIO

A continuación, se presenta el análisis de costos de la estabilización de una subrasante utilizando los materiales estabilizantes tal como se definió en el objetivo número 3, los valores se tomaron de la gobernación de Boyacá (*suministro, extendida y compactación base estabilizada con cemento portland según diseño*); a partir de esta información se consultó los precios unitarios de los demás productos

y utilizando la misma información de la gobernación se obtuvo los valores totales por método de estabilización.

Tabla 27. Valor productos por Kg y cada 110 Kg

PRODUCTO	Kg	CANTIDAD	VALOR
CEMENTO PORTLAND	730	110	\$ 80,300.00
CAL	939	110	\$ 103,290.00
CENIZAS VOLANTES	842	110	\$ 92,620.00
CCA	800	110	\$ 88,000.00

Fuente: Gobernación de Boyacá

Tabla 28. Precios unitarios de estabilización de suelos

DESCRIPCIÓN	U.M.	Vr.	CANTIDAD	Vr. Parcial
MATERIALES				
CEMENTO GRIS	Kg	\$ 730.00	110	\$ 80,300.00
MATERIAL DE BASE GRANULAR (Invias)	M3	\$ 58,706.67	1.3	\$ 76,318.67
EQUIPOS				
CARROTANQUE	hr	\$ 74,712.95	0.07	\$ 5,229.91
MOTONIVELADORA POTENCIA MÍNIMA 120 HP Y MAX. 215 H	hr	\$ 157,100.00	0.07	\$ 10,997.00
VIBROCOMPACTADOR CA-15 O SIMILAR	hr	\$ 98,968.79	0.07	\$ 6,927.82
HERRAMIENTA Y EQUIPO MENOR (% M.O.)	%	\$ 8,471.39	5	\$ 423.57
MANO DE OBRA				
AUXILIAR DE OBRA 1 (A)	jr	\$ 72,300.17	0.1	\$ 7,230.02
OFICIAL DE OBRA 2 (A)	jr	\$ 124,137.15	0.01	\$ 1,241.37
costo total de la actividad				\$ 188,668.35

Fuente: Gobernación de Boyacá

Tabla 29. Precios de estabilización de suelos por M3

ACTIVIDAD	UNIDAD MEDIDA	VALOR
SUMINISTRO, EXTENDIDA Y COMPATACION BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO PORTLAND SEGUN DISEÑO	M3	188.688,36
SUMINISTRO, EXTENDIDA Y COMPATACION BASE ESTABILIZADA CON CAL SEGUN DISEÑO	M3	\$ 211,658.35
SUMINISTRO, EXTENDIDA Y COMPATACION BASE ESTABILIZADA CON CENIZAS VOLANTES SEGUN DISEÑO	M3	\$ 200,988.35
SUMINISTRO, EXTENDIDA Y COMPATACION BASE ESTABILIZADA CON CCA SEGUN DISEÑO	M3	\$ 196,368.35

Fuente: Propia

De acuerdo con la anterior información, se puede evidenciar que el método de estabilización más económico teniendo en cuenta los precios unitarios de la gobernación de Boyacá es el del cemento portland, dentro de esto, por otro lado, se debe tener en cuenta que si la estabilización del suelo es distinta al departamento de Boyacá se debe reevaluar los precios y tener en criterio el concepto del ingeniero de acuerdo con los resultados del laboratorio.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Tal y como hemos podido comprobar, la estabilidad de los suelos depende principalmente de condiciones únicas de los lugares y tipo del terreno y en general estas condiciones dan lugar a la variabilidad de los resultados iniciales de cada muestra natural; lo que se logró evidenciar en este trabajo descrito fue que efectivamente las proporciones de materiales estabilizantes si influyen en las condiciones y propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, sin embargo el mejoramiento de este está sujeto a condiciones propias de la muestra inicial.
- Los Tras el análisis, podemos deducir que los materiales estabilizantes como la cal y el cemento portland son los más usados en el país debido a la alta producción y facilidad de conseguir dichos materiales, por otro lado, materiales como las CCA y las cenizas volantes, son en proporción más difíciles de encontrar, sin embargo la estabilización de los suelos arcillosos con estos estabilizadores surten efectos positivos, tal como se observó en el presente trabajo, la adición en pequeños porcentajes interactúan con el suelo dando mejoras a las propiedades del suelo, pero uno de los factores que más se debe tener en cuenta es el porcentaje de adición, el cual varía dependiendo de las condiciones iniciales de la muestra.
- Se observa que gracias a todo lo anterior, se interpretar que los ensayos y resultados obtenidos en el análisis de resultados varían de acuerdo con el país o región en el cual se realizó dicho ensayo; esto se observa en el análisis realizado donde muestras desarrolladas en regiones cercanas entre sí, los resultados no varían sustancialmente como se observa en Perú, pero si varía mucho con respecto a si se compara con países asiáticos.
- Gracias a todo lo anterior, podemos interpretar que las CCA son un material confiable para la estabilidad de suelos finos y mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos gracias a los altos índices de sílice que contiene el producto, a su vez, el material de las CCA tiene comportamientos similares a los del cemento portland y los de la cal en cuanto a estabilización de suelos se refiere, esto de acuerdo con lo encontrado en los resultados, donde se evidencia en las gráficas realizadas este comportamiento de mejora principalmente de las propiedades de las Subrasantes.
- Ahora que hemos visto todas las anteriores investigaciones sobre las CCA alrededor del mundo, se puede observar que en Colombia son limitadas y se basan en su gran mayoría en trabajos realizados para optar a títulos de grado universitario, la falta de investigación en este campo aun es bajo, pero con gran

potencial, teniendo en cuenta que el país es uno de los productores principales de arroz en Latinoamérica. El aprovechamiento de este recurso tiene doble beneficio, tanto para el medio ambiente como para la estabilidad de los suelos arcillosos.

- Las ventajas de utilizar un material estabilizante diferente a productos químicos ayudan a mejorar las condiciones y bajar los riesgos de contaminación y perjuicio del medio ambiente y de los trabajadores que manipulan dichos productos.
- Los costos y beneficios que trae la estabilización con estos productos están sujetas a las condiciones propias tales como ubicación de la obra, topografías, tipos de suelos y amaño de la obra, este factor de costo y beneficio con estos productos es relativamente más económicos al ser comparados con otros métodos de estabilización como la eléctrica o cambio total del material.
- Como cumplimiento del objetivo número 3, se planteo la matriz de costo – beneficio teniendo en cuenta que es para el desarrollo y estabilización de su tramo vial, en este aspecto se tuvo en cuenta el costo implicado por material de transporte, uso de maquinaria especializada, mano de obra y materiales estabilizantes, pero en el aspecto de beneficio, este se da por condiciones propias de la región por lo que se tomó teórico esta parte. Cada proyecto define a partir de las características si se evalúa desde los beneficios directos o indirectos.
- De acuerdo con la información suministrada en la matriz de costo - beneficio, se puede evidenciar que el método de estabilización más económico teniendo en cuenta los precios unitarios de la gobernación de Boyacá es el del cemento portland, por lo que además de las propiedades mecánicas mejoradas la opción al momento de este trabajo es el cemento portland, pero enalteciendo que las CCA ya que tienen importantes avances asimilándose al cemento portland.
- El manual de estabilización es una extensión de este trabajo monográfico, se toma partes y se complementa de manera teórica, donde tal fin del documento es mostrar una secuencia mínima de que pasos y recomendaciones se deben seguir al momento de trabajar con estabilización de suelos. Allí se muestra en su desarrollo algunos equipos y maquinarias, dosificaciones, recomendaciones e instrucciones de los pasos a seguir en obra.

8 BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, C. & Borda, Y. (2015). Revisión del estado del arte del uso de polímeros en la estabilización de suelos. [Monografía pregrado]. Universidad Santo Tomás. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/3923/Bordayeraldin2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Aguilar, S. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. (Tesis de Maestría). Universidad de Sucre, Sucre, Colombia. 2.

Allauca, P. et al. (2009). Uso de la sílice en hormigones de alto desempeño. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

Alhassan, M. & Alhaji, M. (2017). Utilization of rice husk ash for improvement of deficient soils in Nigeria: a review. *Nigerian Journal of Technology*, 36(2), 386-394.

Aparna, R. (2014). Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Cement. In *Magazine of the Institute of Technology University of Burdwan*, 5(1) pp. 49-54.

Cajaleón, O. & Mondragón, D. (2018) Estabilización de suelos arcillosos agregando cenizas de cáscaras de arroz para la subrasante en el km+ 17 Pimpingos, Choros. [Tesis pregrado]. Universidad César Vallejo: Perú. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/40609/CAJALEON_S OC.%20MONDRAGON_DD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castro, A. et al. (2019). "Soluciones de innovación para problemas de cimentación sobre suelos cohesivos altamente plásticos", *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, vol. 10, no. 1, 54-62. Disponible en: <http://revistas.unitecnar.edu.co/index.php/sth/article/view/9/53>

Castro, A. (2017) Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (5° ed. ed.). México: Limusa. ISBN: 9681864891

Chicaiza, E. & Oña, F. (2018). Estabilización de arcillas expansivas de la provincia de Manabí con puzolana extraída de ceniza de cascarilla de arroz. [Tesis pregrado]. Escuela Politécnica Nacional De Quito. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19624/1/CD-9026.pdf>

Haji, F. et al. (1992) Geotechnical properties of a chemically stabilized soil from Malaysia with rice husk ash as an additive. *Geotechnical and Geological Engineering*, 10(2), 117-134.

Huezo, M. & Orellana, C. (2009). guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el Salvador. Trabajo para optar el título de Ingeniero civil, Universidad de El Salvador, Salvador.

Jha, J. & Gill, K. (2006). Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la estabilización de suelos. En *Revista de Ingeniería de la India*, 85(2) pp. 33-39.

Khan, A. (2014, mayo). Improvement of plasticity index value of swelling clay soil by lime stabilization [conference]. International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2013 (ICMERE2013), Chittagong, Bangladesh.

Licuy, C. & Román, K. (2019). Estudio de la estabilización de arcillas expansivas utilizando el 10, 20 y 30% en peso, de puzolanas de ceniza del volcán Tungurahua y ceniza de la cascarilla de arroz en composiciones iguales. [Tesis pregrado]. Escuela Politecnica Nacional De Quito. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20630>

Llamoga, L. (2017). Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. Universidad Privada del Norte, Perú. Tomado y recuperado de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/11195/Llamoga%20V%c3%a1squez%2c%20Luz%20Yanet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, R. & Zapata G. (2021). Estabilización de suelo con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante en el distrito – Tumbes [Tesis pregrado]. Universidad Cesar Vallejo: Perú. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/81333>

Castro, A. and Navarro J. D. (2019) “Análisis de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico,” Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <http://hdl.handle.net/10757/626119>

Morales, D. (2015). Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante la activación alcalina u su uso en vías no pavimentadas. (Tesis de Grado). Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

Muntohar, A. (2005). Propiedades geotécnicas de las arcillas expansivas estabilizadas con ceniza de cascara de arroz. En *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 13(3) pp. 36-47.

Okafor, F. & Okonkwo, U. (2009). Effects of Rice Husk Ash on some Geotechnical Properties of Lateritic Soil. *Electronic Journal of Practices and Technologies-Nigeria*, 1586(1078) pp.67-74.

Oktavia, D. et al. (2019). The Effects of Rice Husk Ash Substitution on Physical and Mechanical Properties of Clay. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 8(7), 465-470.

Ormeño, E. & Rivas, N. (2020) Estudio experimental para determinar la influencia de la aplicación de Cenizas de Cáscara de Arroz (RHA) en la estabilización de una subrasante de suelo arcilloso de baja plasticidad en Chota- Cajamarca. [Tesis pregrado]. Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas. Disponible en: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/653974/Orme%c3%b1o_ME.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Portilla, F. et al. (2022). Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante. [Tesis pregrado]. Universidad Técnica De Ambato. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34106>

Rao, K. et al. (2012). A laboratory study on the effect of rice husk ash & lime on the properties of marine clay. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(1), 345–353.

Rivera, J. et al. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 202–226. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Salas, J. (1975). "Geotécnica y Cimientos". Vol. I. "Propiedades de los Suelos y de las Rocas." 2da Edición. Editorial Rueda, pp. 466.

Sharma, N. et al. (2012). Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 10.1007/s10706-012-9532-3. 10.1007/s10706-012-9532-3.

Valverde, A. et al. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4055/2213>.

Vega, A. (2006). Actividad Puzolánica de la ceniza de cascarilla de arroz. (Pasantía Internacional). Universidad de Cuenca, La Habana, Cuba

Zapata, R. (2018). Tipos de suelos: caracterización de suelos arcillosos y limosos. Recuperado 2 de mayo de 2022, Disponible en:<https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>

9 ANEXOS

9.1 ANEXO 1

Anexo 1. Mejoramiento de suelos arcillosos por Licuy, C. & Román, K. (2019)

Estabilización con CCA							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Límite Líquido (%)	c (Kg/cm ²)	Gravedad específica	Humedad Óptima (%)	Indice de expansión
Licuy, C & Roman, K (2019) - Ecuador	M1	0%	89.00	0.23	2.78	25.36	17.53
		10%	74.00	1.03	2.73	24.77	102.93
		20%	63.00	0.90	2.68	30.60	67.44
		30%	60.50	0.87	2.64	23.91	57.29
	M2	0%	83.00	0.30	2.75	19.66	135.65
		10%	69.00	1.24	2.62	21.86	78.93
		20%	67.00	0.98	2.60	25.24	73.55
		30%	64.00	0.95	2.58	18.57	58.29
	M3	0%	67.00	0.51	2.78	17.56	82.75
		10%	69.00	0.95	2.62	18.93	67.04
		20%	54.00	1.31	2.58	24.73	54.98
		30%	56.50	1.34	2.55	19.30	48.58

Fuente: elaboración propia

Anexo 2. Mejoramiento de suelos arcillosos por Ormeño, E. & Rivas, N. (2020).

Estabilización con CCA						
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Indice de Plasticidad	Contenido de humedad óptimo %	Desidad Max. seca %	CBR %
Ormeño, E & Rivas, N. (2020) Perú	M0	0%	7%	18.6	1.694	4.3
	M1	10%		15.8	1.671	15.4
	M2	15%		17.5	1.608	18.9
	M3	20%		19.1	1.55	20.7
	M4	25%		19	1.508	23.7

Fuente: elaboración propia

Anexo 3. Mejoramiento de suelos arcillosos por Llamoga, L. (2017).

Estabilización con CCA - límites de consistencia							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	LL	LP	IP	Wn	
Llamoga, L. (2017) - Perú	M0	0%	44.53%	24.51%	20.02%	17.00%	
	M1	4%	36.33%	22.30%	14.03%	17.00%	
	M2	7%	27.51%	19.38%	8.14%	17.00%	
	M3	10%	46.42%	25.00%	21.42%	17.00%	
	Estabilización con CCA - ensayo proctor						
	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Expansión Max. del suelo	Densidad Max. Seca	95 %Densidad Max. Seca	CBR 0.2"	
	M0	0%	24.83%	1.72%	1.64%	2.85%	
	M1	4%	10.13%	1.74%	1.65%	4.52%	
	M2	7%	4.42%	1.76%	1.67%	7.80%	
	M3	10%	28.25%	1.71%	1.62%	2.00%	

Fuente: elaboración propia

Anexo 4. Mejoramiento de suelos arcillosos por Martínez, K. (2021).

Estabilización con CCA						
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	CBR 100 % 0.1"	CBR 95 % 0.1"	Densidad Max. Seca	Humedad Óptima (%)
Martínez, K. (2021) - Perú	M0	0%	15	10	1.75	12.25
	M1	10%	16	11	1.73	9.24
	M2	20%	20	13	1.76	8.79

Fuente: elaboración propia

Anexo 5. Mejoramiento de suelos arcillosos por Cajaleón, O & Mondragón, D. (2018).

Estabilización con CCA						
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Indice de Plasticidad	Contenido de humedad óptimo %	Desidad seca %	CBR %
Cajaleón, O & Mondragón, D. (2018) - Perú	M0	0%	13%	9.4	2.006	6.2
	M1	10%	13%	9.4	2.006	8.5
	M2	15%	13%	9.4	2.006	10.3

Fuente: elaboración propia

Anexo 6. Mejoramiento de suelos arcillosos por Caamaño, M. (2016)

Estabilización con CCA							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adición	Resistencia Compresión Inconfinada Promedio Kpa	Módulo resiliente del suelo Mpa	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
Caamaño, M. (2016) - Colombia	M0	0%	287.16	45.54	33	22	11
	M1	2%	505.20	53.64	31	23	8
	M2	4%	620.39	65.27	33	26	7
	M3	6%	428.61	62.72	33	27	6

Fuente: elaboración propia

Anexo 7. Mejoramiento de suelos arcillosos por Chuquizuta, C. (2019).

Estabilización con CCA							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adición	DMS	CBR 0.1" 95%	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
Chuquizuta, C. (2019) - Perú	M0	0%	1.83	4.50	30.33	17.33	13.00
	M1	3%	1.75	5.63	30.67	19.00	12.00
	M2	6%	1.69	7.17	33.33	21.67	11.67
	M3	9%	1.63	9.00	32.67	22.67	10.00

Fuente: elaboración propia

Anexo 8. Mejoramiento de suelos arcillosos por Oktavia, L. Et al. (2017).

Estabilización con CCA							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adición	Humedad Óptima (%)	Límite Líquido (%)	CBR	Indice de plasticidad %	Desidad Max. seca %
Oktavia, L; Dewi, R & Hadinata, F (2017) - Indonesia	M0	0%	35	97.00	4.86	55.12	1.33
	M1	3%	36.5	96.70	8.35	44.84	1.29
	M2	6%	37.1	94.50	10.41	42.38	1.29
	M3	9%	37.7	93.60	12.47	37.93	1.26
	M4	12%	40	93.00	8.79	34.43	1.21
	M5	15%	41	89.50	8.57	32.72	1.16

Fuente: elaboración propia

9.1.1 Estabilización de suelos arcillosos con Cal

Anexo 9. Mejoramiento de suelos arcillosos por García, A. (2019).

Estabilización con cal				
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Compresion inconfiada Kpa	Modulo resilente Mpa
Garcia, A. (2019)- Colombia	M0	4%	248.00	87.29
	M1	6%	454.00	111.81
	M2	8%	892.00	116.81
	M3	10%	1004.00	162.58

Fuente: elaboración propia

Anexo 10. Mejoramiento de suelos arcillosos por Moale, A. & Rivera, E. (2019).

Estabilización con cal							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	CBR 95% 1"	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
Moale, A & Rivera, E. (2019) - Perú	M0	0%	1.85	3.30	33.70	19.79	13.73
	M1	9%	1.87	3.80	30.18	23.91	6.27
	M2	15%	1.89	5.90	27.86	24.87	2.99
	M3	21%	1.88	4.10	26.43	24.65	1.78

Fuente: elaboración propia

Anexo 11. Mejoramiento de suelos arcillosos por Chávez, D. & Odar, G. (2019).

Estabilización con cal							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	incremento (%) CBR 95% 1"	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
Chavez, D. & Odar, G. (2019) - Perú	M0	0%	1.80	6.00	44.00	26.00	18.00
	M1	7%	1.85	31.80	47.00	27.00	20.00
	M2	10%	1.89	43.30	54.00	31.00	23.00

Fuente: elaboración propia

Anexo 12. Mejoramiento de suelos arcillosos por Parra, M. (2018)

Estabilización con cal - resistencia a la compresión							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	Esfuerzos maximos Kg/cm2	Rigidez	Humedad óptima %	Gs
Parra, M. (2018) Colombia	M0	0%	1.90	0.689	0.094	19.50	1.99
	M1	2%		1.104	0.290		
	M2	4%		2.616	0.886		
	M3	6%		2.413	0.808		
	M4	8%		1.963	1.104		

Fuente: elaboración propia

Anexo 13. Mejoramiento de suelos arcillosos por Khan, A. (2014).

Estabilización con cal - resistencia a la compresión					
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
Khan, A. (2014) Bangladesh	M0	0%	49.8	18.7	31.1
	M1	2%	11.9	4.57	7.33
	M2	4%	10.86	5.54	5.32
	M3	6%	11.72	5.85	5.87
	M4	8%	16.82	6.46	10.36

Fuente: elaboración propia

9.1.2 Estabilización de suelos arcillosos con Cenizas volantes

Anexo 14. Mejoramiento de suelos arcillosos por Parra, M (2018)

Estabilización con cenizas volantes - resistencia a la compresión							
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	Esfuerzos maximos Kg/cm2	Rigidez	Humedad óptima %	Gs
Parra, M. (2018) Colombia	M0	0%	1.90	0.689	0.094	19.50	1.99
	M1	2%		1.059	0.224		
	M2	4%		1.180	0.251		
	M3	6%		1.040	0.184		
	M4	8%		1.101	0.186		

Fuente: elaboración propia

Anexo 15. Mejoramiento de suelos arcillosos por Flórez, G. Et al. (2008)

Estabilización con cenizas volantes					
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %
Florez, G;. Et al.. (2008)- Colombia	M0	0%	65.60	25.44	40.16
	M1	20%	58.10	24.19	33.91
	M2	25%	59.00	24.93	34.07
	M3	30%	55.50	26.87	28.63

Fuente: elaboración propia

Anexo 16. Mejoramiento de suelos arcillosos por Landa, A. & Torres, S. (2019).

Estabilización con cenizas volantes						
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	CBR 95% 1"	Humedad Óptima %	expansión del suelo
Landa, A. & Torres, S. (2019) - Perú	M0	0%	1.34	3.70	21.00	5.90
	M1	5%	1.60	5.50	18.40	3.90
	M2	15%	1.68	6.20	17.30	3.60
	M3	25%	1.70	7.30	16.80	3.20

Fuente: elaboración propia

Anexo 17. Mejoramiento de suelos arcillosos por Swain, N. & Sahoo, U. (2012).

Estabilización con cenizas volantes								
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	Limite Líquido %	Limite Plastico %	Indice de plasticidad %	CBR	Humedad óptima %	DMS
Swain, N. & Sahoo, U. (2012) - India	M0	0%	34.79	20.24	13.34	2.06	17.82	1.77
	M1	10%	34.48	20.79	13.89	3.12	18.65	1.87
	M2	15%	33.83	21.28	12.55	3.76	19.42	1.92
	M3	20%	33.21	21.54	10.68	4.03	19.87	2.02
	M4	25%	32.85	22.09	9.16	4.28	20.46	2.04

Fuente: elaboración propia

9.1.3 Estabilización de suelos arcillosos con Cemento portland

Anexo 18. Mejoramiento de suelos arcillosos por Castro, J. Et al. (2019)

Estabilización con cemento portland						
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	CBR 95% 1"	Humedad Óptima %	expansión del suelo %
Castro, J. et al. (2019) - Perú	M0	0%	1.827	2.600	14.300	8.120
	M1	10%	1.831	2.740	14.600	2.980
	M2	15%	1.832	2.960	15.000	4.240
	M3	20%	1.833	4.105	15.200	3.540

Fuente: elaboración propia

Anexo 19. Mejoramiento de suelos arcillosos por Quispe, Y. & Venero, R. (2021).

Estabilización con cemento portland					
Autor	cantidad de Muestras	porcentaje de adicción	DMS	CBR 95% 1" %	Humedad Óptima %
Quispe, Y. & Venero, R. (2021) - Perú	M0	0%	-	6.000	-
	M1	8%	2.020	13.000	11.800
	M2	12%	2.050	18.000	9.200
	M3	16%	2.000	28.000	11.600

Fuente: elaboración propia

9.2 ANEXO 2 - MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

Anexo 20. Manual de procedimientos de métodos estabilizantes de suelos arcillosos