

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**ESTABILIZACIÓN DE UNA SUBRASANTE ARCILLOSA DE BAJA
PLASTICIDAD CON CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTOR:

Escobar Sulca, Juan Jesús
Quispe Sánchez, Giancarlo Djorkaef
Quispe Salazar, Fernando Raul
Arana Soto, Jammy Bryan

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de
BACHILLERA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
CIVIL**

AUTORA:

Huarcaya Quiquia, Rosario Belen

ASESORA:

Soto Dueñas, Milagros Del Pilar

Lima, Diciembre, 2020

RESUMEN

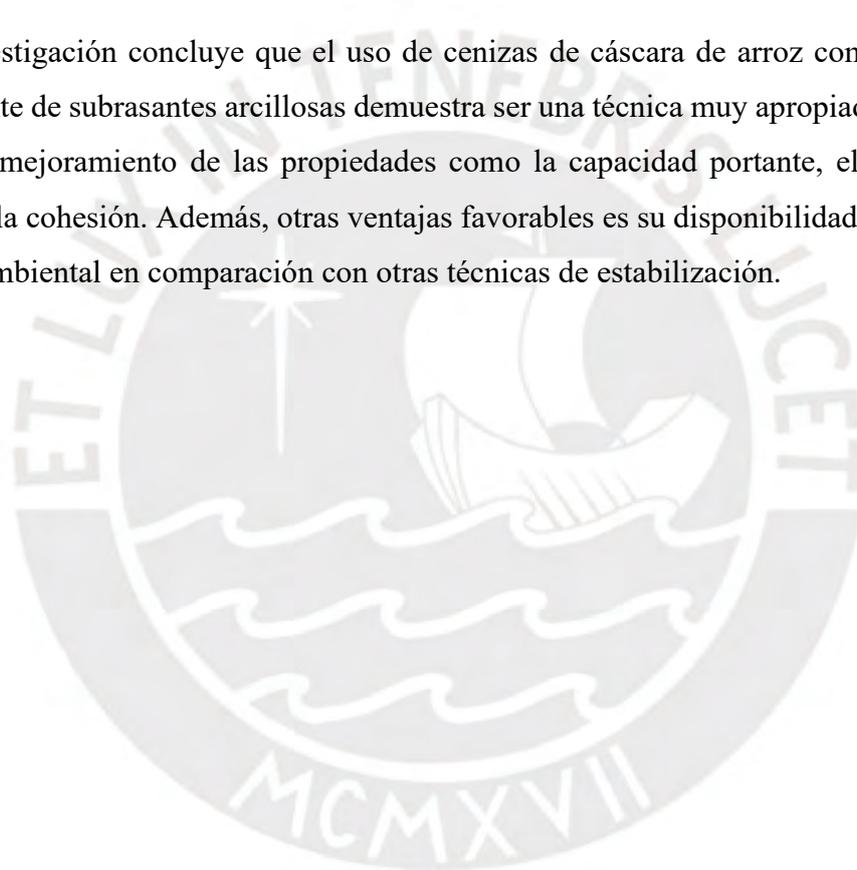
Las construcciones sobre subrasantes arcillosas son en algunos casos no recomendables debido a la inadecuada capacidad portante de este tipo de suelo para soportar las cargas de tránsito transmitidas por la estructura de un pavimento. Ante ello, la estabilización de suelos es una técnica muy utilizada en la construcción de vías pavimentadas y vías no pavimentadas ubicadas sobre subrasantes pobres. Esto debido a que los métodos de estabilización permiten mejorar las propiedades ingenieriles y de durabilidad de las subrasantes. Entonces, esta investigación busca dar a conocer una técnica de estabilización de suelos a través del uso de cenizas de cáscara de arroz. Este agente estabilizador además de mejorar las propiedades mecánicas de una subrasante, al mismo tiempo representa una solución ecoamigable. Ello puesto que el uso de las cenizas de cáscara de arroz ayuda a minimizar la producción de desechos que se eliminarán al medio ambiente.

Este trabajo de investigación consistió en el desarrollo de una revisión bibliográfica de estudios experimentales en donde se estabilizaron muestras de arcillas de baja plasticidad (CL) con diferentes porcentajes de cenizas de cáscara de arroz. Ello con el objetivo de identificar que propiedades ingenieriles mejoran en una arcilla con la aplicación de este agente estabilizador. Además, se determinó porcentajes de contenido óptimo de cenizas para las propiedades físicas, las propiedades mecánicas, las propiedades de resistencia y las propiedades hidráulicas en muestras de arcilla estabilizadas.

Respecto a las propiedades físicas, los resultados muestran un incremento del límite líquido y una disminución del límite plástico conforme aumenta el porcentaje de cenizas de cáscara de arroz. Además, la gravedad específica del material estabilizado disminuye entre un 5% a 9% con el incremento del agente estabilizante. Las propiedades mecánicas de arcillas estabilizadas muestran un incremento de la capacidad portante CBR conforme se aumenta la presencia de cenizas de cáscara de arroz; sin embargo, luego del porcentaje óptimo, el cual es cercano al 15%, el valor máximo de CBR tiende a disminuir. De los ensayos de compactación tipo Proctor, se observó que conforme se incrementa las cenizas de cáscara de arroz, la máxima densidad seca (MDD) disminuye y el contenido óptimo de humedad (OMC) aumenta. Respecto a las propiedades de resistencia, de los ensayos

de comprensión no confinada se obtuvo un contenido óptimo del 25% de cenizas de cáscara de arroz, luego del cual la resistencia a la comprensión tiende a disminuir. Lo mismo se observó de la recopilación bibliográfica de ensayos triaxiales llevados a cabo en muestras arcillosas estabilizadas con cenizas, en donde, el porcentaje óptimo fue del 25%, pasado este valor las propiedades resistentes como la cohesión y el ángulo de fricción disminuían. Finalmente, del análisis de las propiedades hidráulicas, se observó que, a mayores porcentajes de cenizas de cáscara de arroz, el coeficiente de permeabilidad tiende a disminuir debido a la cementación de las partículas de suelo que reduce la tasa de flujo en el suelo estabilizado.

La investigación concluye que el uso de cenizas de cáscara de arroz como material estabilizante de subrasantes arcillosas demuestra ser una técnica muy apropiada y óptima debido al mejoramiento de las propiedades como la capacidad portante, el ángulo de fricción y la cohesión. Además, otras ventajas favorables es su disponibilidad y el menor impacto ambiental en comparación con otras técnicas de estabilización.



ABSTRACT

Constructions on clayey subgrade are in some cases not recommended due to the inadequate bearing capacity of this type of soil to support the traffic loads transmitted by the structure of a pavement. Soil stabilization is a widely used technique in the construction of paved roads and unpaved roads located on poor subgrade. This is because the stabilization methods allow to improve the engineering properties and durability of the subgrade. So, this research seeks to present a soil stabilization technique through the use of rice husk ash. This stabilizing agent improving the mechanical properties of a subgrade, at the same time represents an eco-friendly solution. This is because the use of rice husk ash helps to minimize the production of waste that will be disposed of into the environment.

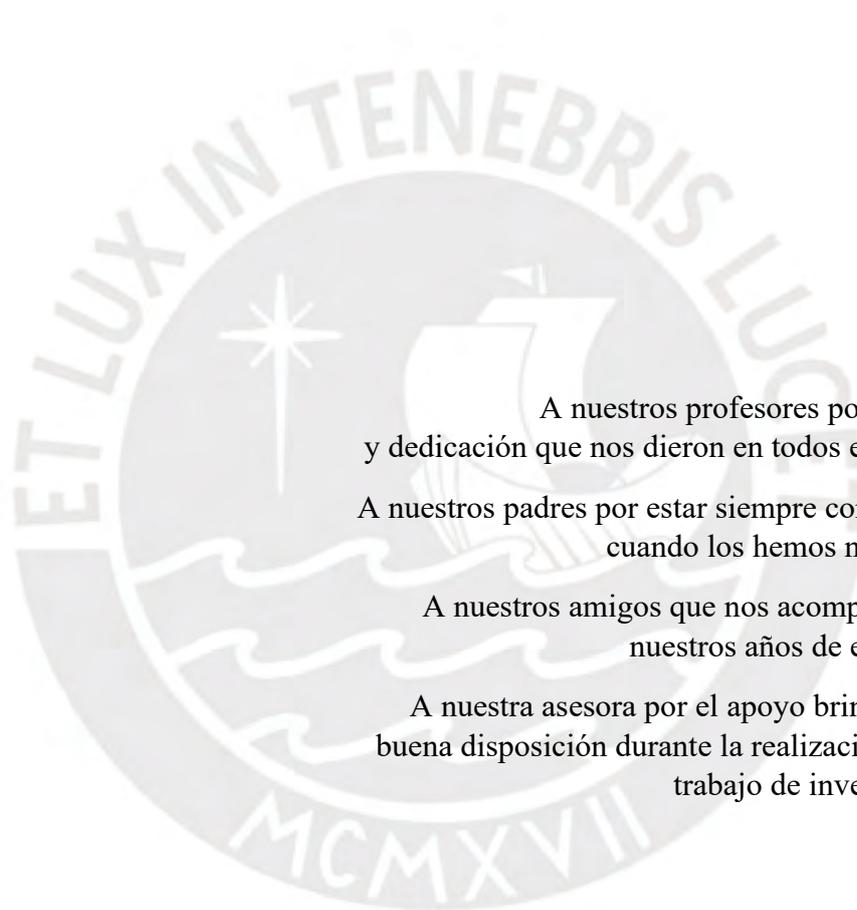
This research work consisted in the development of a bibliographic review of experimental studies where samples of low plasticity clays (CL) were stabilized with different percentages of rice husk ash. This with the aim of identifying which engineering properties improve in a clay with the application of this stabilizing agent. In addition, percentages of optimum ash content were determined for physical properties, mechanical properties, resistance properties and hydraulic properties in stabilized clay samples.

Regarding the physical properties, the results show an increase in the liquid limit and a decrease in the plastic limit as the percentage of rice husk ash increases. In addition, the specific gravity of the stabilized material decreases between 5% to 9% with the increase of the stabilizing agent. The mechanical properties of stabilized clays showed an increase in the CBR bearing capacity as the presence of rice husk ash increases; however, after the optimal percentage, which is close to 15%, the maximum CBR value tends to decrease. From the Proctor type compaction tests, it is carried out that as the rice husk ash increases, the maximum dry density (MDD) decreases and the optimum moisture content (OMC) increases. Regarding the strength properties, the unconfined compression tests obtained an optimum content of 25% of rice husk ash, after which the compressive strength tends to decrease. The same was done from the bibliographic compilation of triaxial tests carried out on clayey samples stabilized with ash, where the optimum percentage was 25%, after this value the resistant properties such as cohesion and friction angle decreased. Finally, from the analysis of the hydraulic properties, it was achieved that, at

higher percentages of rice husk ash, the permeability coefficient tends to decrease due to the cementation of the soil particles that reduces the flow rate in the soil. stabilized.

The research concludes that the use of husk ash as a stabilizing rice material for clayey subgrade proves to be a very appropriate and optimal technique due to the improvement of properties such as bearing capacity, friction angle and cohesion. In addition, other favorable advantages are its availability and the lower environmental impact compared to other stabilization techniques.





A nuestros profesores por el apoyo y dedicación que nos dieron en todos estos años.

A nuestros padres por estar siempre con nosotros cuando los hemos necesitado.

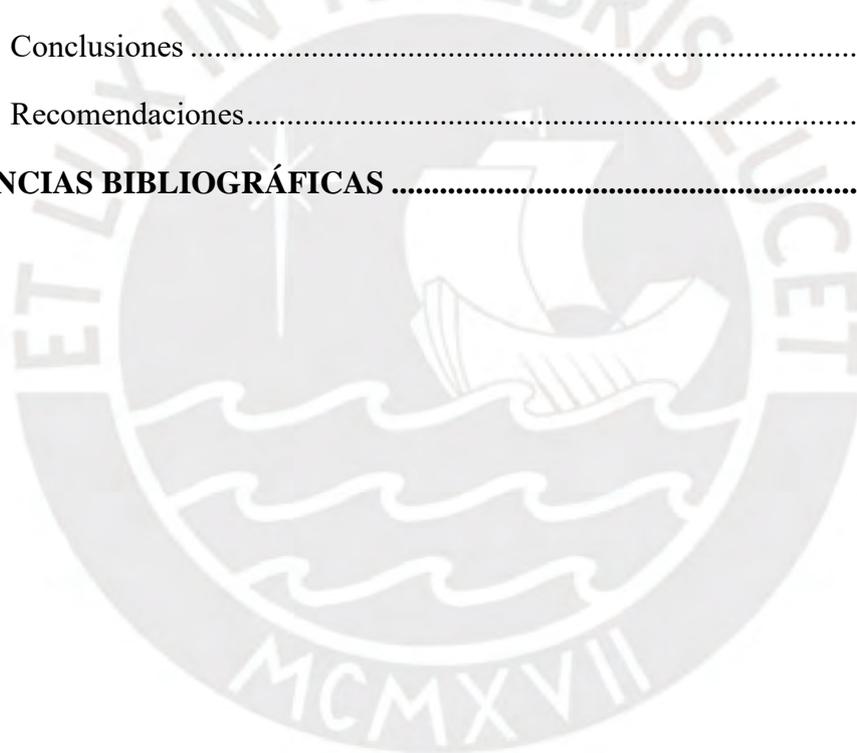
A nuestros amigos que nos acompañaron en nuestros años de estudiante.

A nuestra asesora por el apoyo brindado y su buena disposición durante la realización de este trabajo de investigación.

Índice

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Alcance de la investigación.....	3
1.4. Objetivos	3
1.5. Metodología	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Subrasante	6
2.2. Suelos arcillosos.....	7
2.3. Estabilización de suelos	9
2.3.1. Definición de estabilización	9
2.3.2. Métodos de estabilización de suelos.....	10
2.4. Cenizas de cáscara de arroz.....	12
2.4.1. Características de las cenizas de cáscara de arroz.....	12
2.4.2. Estabilización con cenizas de cáscara de arroz	13
CAPÍTULO 3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
3.1. Propiedades físicas	15
3.1.1. Límites de Atterberg.....	15
3.1.2. Gravedad específica.....	19
3.1.3. Análisis de resultados de las propiedades físicas	19
3.2. Propiedades mecánicas.....	21
3.2.1. Ensayo Proctor Modificado.....	21
3.2.2. Ensayo CBR	25

3.2.3. Análisis de resultados de las propiedades mecánicas.....	29
3.3. Propiedades de resistencia.....	32
3.3.1. Ensayo de compresión no confinada	32
3.3.2. Ensayos Triaxiales.....	35
3.3.3. Análisis de resultados de las propiedades resistentes.....	36
3.4. Propiedades hidráulicas.....	36
3.4.1. Ensayo de permeabilidad.....	36
3.4.2. Análisis de resultados de las propiedades hidráulicas.....	38
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
4.1. Conclusiones	39
4.2. Recomendaciones.....	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43



Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo de la presente investigación. Fuente: Propia.....	4
Figura 2: (a) Estructura del mineral de caolinita; (b) Estructura del mineral de Ilita; (c) Estructura del mineral de montmorillonita. Fuente: Budhu (2015).....	8
Figura 3: (a) Microfábrica floculada en ambiente de agua fresca (b) Microfábrica floculada en ambiente de agua salada; (c) Microfábrica dispersa. Fuente: Budhu (2015).	8
Figura 4: Cáscara de arroz y cenizas de cáscara de arroz. Fuente: García (2019)	12
Figura 5: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el índice de plasticidad.	16
Figura 6: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el límite líquido.....	18
Figura 7: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el límite plástico....	18
Figura 8: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en la máxima densidad seca.	22
Figura 9: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en la máxima densidad seca.	23
Figura 10: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el contenido de humedad óptima. Fuente: Modificado de Kumar Yadav et al. (2017).....	24
Figura 11: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el contenido de humedad óptima. Fuente: Modificado de Ormeño et al. (2020)	25
Figura 12: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el porcentaje de CBR.	26
Figura 13: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz y periodo de curado en la UCS.	35

Lista de tablas

Tabla 1: Categoría Subrasante.....	6
Tabla 2: Composición química de las cenizas de cáscara de arroz	12
Tabla 3: Propiedades físicas de las cenizas de cáscara de arroz.....	13
Tabla 4: Resultados de límites de Atterberg y de clasificación SUCS y AASHTO para distintas combinaciones de ceniza de cáscara de arroz y suelo.	17
Tabla 5: Resultados de los Límites de Atterberg para suelo natural y combinaciones con ceniza de cáscara de arroz. Fuente: Llamoga (2017).....	17
Tabla 6: Resumen de la variación del límite líquido y del límite plástico para diferentes contenidos de cenizas de cáscara de arroz.	21
Tabla 7: Resultados de CBR para distintas combinaciones de ceniza de cáscara de arroz y suelo.....	27
Tabla 8: Resultados de CBR para varias combinaciones de cenizas de cáscara de arroz.	28
Tabla 9: Resultados de CBR para suelo natural y combinaciones con ceniza de cáscara de arroz. Fuente: Llamoga Vásquez (2017)	29
Tabla 10: Resumen de la variación de la MDD y el OMC para diferentes contenidos de cenizas de cáscara de arroz.....	30
Tabla 11: Resumen de la variación del CBR para diferentes contenidos de cenizas de cáscara de arroz.	31
Tabla 12: Resultados de la resistencia a la compresión no confinada para distintas combinaciones de ceniza de cáscara de arroz y suelo.	32
Tabla 13: Resultado del ensayo de compresión no confinada para diferentes porcentajes de cenizas de cáscara de arroz y tiempos de curados.	33
Tabla 14: Resultados de ensayo de compresión no confinada y contenido de humedad correspondiente para distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz.	34

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los suelos arcillosos son depósitos de minerales constituidos por silicatos de aluminio hidratado y se caracterizan por presentar granos muy finos, es decir, partículas menores a 0.075 mm. En el Perú, estos tipos de suelos se encuentran en la zona norte y nororiente. Estos tipos de suelos no son adecuados para ser usados como cimentación o soporte de una obra como las edificaciones, los puentes o las carreteras. Por ello, una práctica segura es la de reemplazar ese tipo de suelos con un material con mejores características de resistencia y permeabilidad. Sin embargo, dicha práctica incluye un alto costo y algunos proyectos resulta inviable. Por ejemplo, en el caso de la construcción de una carretera, el trazo no se limita a las propiedades del estrato de soporte, por lo que en ciertos tramos se tendrá que lidiar con suelos arcillosos. Además, cuando se reemplazan estos suelos con materiales gravosos, cuya extracción se hace de canteras de en cauces de río, se dañan los ecosistemas naturales. Por lo que es importante optar por otras soluciones menos nocivas contra el ambiente y la naturaleza. Otra solución es el mejoramiento de las propiedades (estabilización) de estos suelos a partir de adiciones. Una alternativa muy utilizada es la estabilización con cal, pues, al mezclarse con el suelo reduce la humedad en el suelo, modifica sus propiedades de retención de humedad y estabilidad. La adición de cal resulta ser una buena alternativa para la problemática, pero la producción de este material implica procesos nocivos al medio ambiente. La obtención de la caliza en canteras causa la emisión de partículas nocivas. Además, la combustión en el horno y la calcinación consumen mucha energía y liberan gases de efecto invernadero, altas cantidades de CO₂ (MITECO 2018). Por ello, es importante la evaluación de otras alternativas de adiciones para el mejoramiento de estos suelos arcillosos.

En investigaciones realizadas por Roy (2017) se encuentra que, al usar cenizas de cáscara de arroz en un suelo arcilloso de alta plasticidad, se incrementó el valor CBR del suelo, así como su resistencia a la compresión no confinada, por lo que en su conclusión se recomienda su uso en el diseño de pavimentos. El Perú es un país productor de arroz en grandes cantidades, pues se producen cientos de miles de toneladas por año, en especial

en la región norte. Dado que hay mucha cantidad de arroz, eso significa que también existe mucha cantidad de cáscara de arroz por lo que su aplicación como estabilizante de subrasantes no está impedido por una falta de stock o una dependencia de otro sector que no sea el consumo humano, el cual nunca se detiene y se incrementa cada vez más por el crecimiento poblacional y los hábitos alimenticios del peruano promedio. Un problema que trae consigo la producción de arroz es que quedan desechos del proceso, aquellos desechos vienen a ser las cáscaras de arroz que, al haber en mucha cantidad, se incineran para eliminarlos y al hacer ello, se contamina el ambiente. Un enfoque que se le da a esta investigación es el poder ayudar a evitar esta dispersión de partículas en el aire y usarlo en los suelos arcillosos para de esa manera ayudar tanto al sector de la construcción como del ambiente.

1.2. Justificación

Es necesario proponer nuevos materiales que sean capaces de mejorar el suelo, de tal manera que sean aptos para la construcción de pavimentos. Estos materiales no solo tienen que ser capaces de estabilizar la subrasante del pavimento sino también tienen que ser factibles económicamente y ambientalmente. Por ello, uno de estos materiales como alternativa de solución ecoamigable y económica es la ceniza de cáscara de arroz.

En el Perú, los departamentos del norte son los principales productores de arroz, por lo que se genera una gran cantidad de residuos en su producción, siendo el más importante la cáscara de arroz en el proceso de pilado. En general, estos residuos son depositados en rellenos sanitarios por el gran volumen que ocupan, lo que implica un impacto al ambiente, y podrían ser mejor aprovechados como material estabilizante. Asimismo, como este material forma parte de los desechos en la producción de arroz, resultaría más económico que los materiales tradicionales utilizados para la estabilización de subrasantes y reduciría el costo en el diseño de un pavimento. Este es un factor muy importante sobre todo para la estabilización de subrasantes de vías rurales de poco tránsito, ya que al ser consideradas de menor importancia se les destina un menor presupuesto por parte de las municipalidades a su cargo. Un ejemplo de ello es la región de Piura, el cual posee más del 80% de vías destinadas al sector agrícola sin pavimentar y con condiciones de transitabilidad inaceptables (Raymundo and Chávez 2020). Esto significaría un problema para la población aledaña, ya que no permitiría la conexión entre localidades y reduciría la posibilidad de acceder a recursos para mejorar la calidad de

vida, convirtiéndose en un problema social. Además, la presencia de suelos arcillosos en el Perú tiene lugar en el norte y en la selva del país, por lo que la disponibilidad de materiales para el diseño de un pavimento, como grava o arena, es bastante escasa y demandaría un costo elevado. Por ello, sería importante evaluar el uso de las cenizas de cáscara de arroz como una opción más viable para subrasantes de vías rurales de bajo tránsito por la cercanía a zonas donde se produce como desecho este material.

Por todo lo mencionado, es importante el estudio de las cenizas de cáscara de arroz como nuevo material estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso, ya que no se cuenta con mucha investigación sobre el tema y, de acuerdo a ello, podría considerarse como un método de estabilización para vías rurales de bajo tránsito.

1.3. Alcance de la investigación

El presente trabajo de investigación, se centrará en el estudio de una arcilla de baja plasticidad (CL), clasificado como A-6 según ASSHTO. Se identificarán las propiedades índices e ingenieriles más importantes, en relación a la estabilización de una subrasante, de este suelo que mejoran con la aplicación de las cenizas de cáscara de arroz. Las propiedades que se estudiarán son el CBR, límites de Atterberg, la permeabilidad y la compactación tipo Proctor modificado. Se recopilará información de diversos ensayos realizados en los cuales se prueban diversos porcentajes de este material y se determinará en cuanto mejora cada propiedad de estudio para cada uno de estos. Se compararán los resultados obtenidos anteriormente y se identificará el porcentaje óptimo para cada una de las propiedades de estudio. Finalmente, se analizará la factibilidad de la aplicación de este material en la estabilización de una vía rural.

1.4. Objetivos

Objetivo General:

Evaluar el mejoramiento de una subrasante de suelo arcilloso con la aplicación de cenizas de cáscara de arroz en una vía rural de bajo tránsito

Objetivos Específicos:

- Recopilar información bibliográfica de investigaciones acerca de la estabilización en una muestra de suelo con cenizas de cáscaras de arroz
- Determinar que propiedades índices e ingenieriles de un suelo mejoran con la aplicación de las cenizas de cáscara de arroz

- Establecer un porcentaje óptimo de cenizas de cáscara de arroz respecto al peso seco de una muestra de suelo, con el cual se obtiene mejores propiedades mecánicas, de resistencia y de permeabilidad en una arcilla

1.5. Metodología

Por un lado, el enfoque de la presente investigación corresponde a un enfoque cuantitativo, el cual se caracteriza por ser secuencial y probatorio. Asimismo, a través de la recolección de información y literatura se formularon diversas hipótesis y planteamientos acerca de la estabilización de una subrasante con cenizas de cáscaras de arroz. Estas hipótesis se corroborarán a través de un estudio experimental.

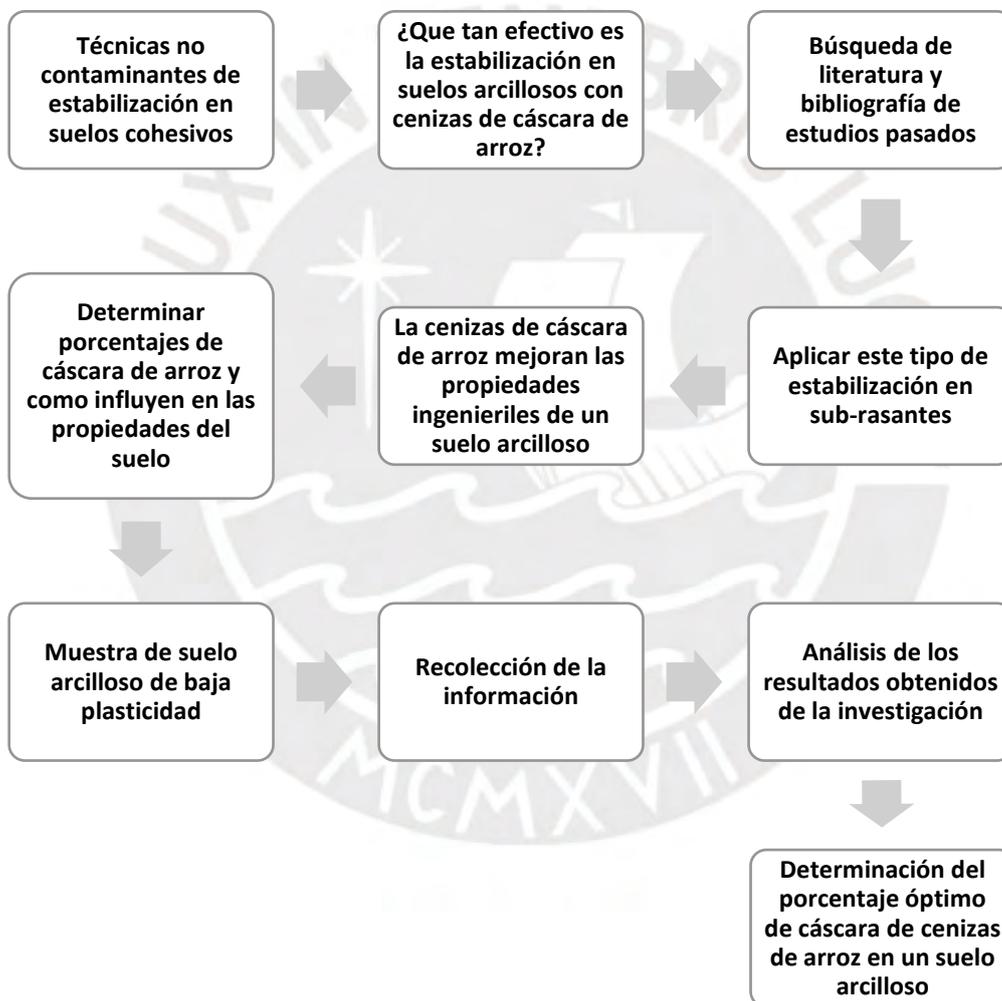


Figura 1: Diagrama de flujo de la presente investigación. Fuente: Propia.

Por otro lado, el diseño de la investigación a realizar corresponde a una metodología no experimental. Ello debido a que no se manipularan variables independientes como el porcentaje de cenizas de cáscaras de arroz, obtenidos mediante la revisión bibliográfica.

De este modo se busca analizar y discutir el efecto o influencia de distintos porcentajes de cáscaras de arroz en la estabilización de una subrasante de suelo arcilloso. Asimismo, el tipo de investigación experimental corresponde a una investigación longitudinal ya que, para lograr la validez de esta investigación se compararán con diferentes grupos o autores que realizaron estudios anteriores en las últimas décadas.

Asimismo, la presente investigación se desarrolló mediante la revisión de fuentes bibliográficas e investigaciones pasadas. El fin de ello fue determinar porcentajes de cenizas de cáscaras de arroz respecto al peso de una muestra de suelo seco. Con lo cual se determinó distintos porcentajes de mejoramiento para las diferentes propiedades ingenieriles de un suelo arcilloso como el límite líquido, el límite plástico, la permeabilidad, el CBR y la compactación tipo Proctor.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Subrasante

Según el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos del MTC (2014), la subrasante se define como el nivel del terreno sobre el cual se colocará la estructura del pavimento o el afirmado, considerando el movimiento de tierras (corte y relleno).

La subrasante es el material de suelo que sostendrá al pavimento y por ende recibirá las cargas provenientes del tránsito. Por ello, se debe asegurar que el material que lo componga sea capaz de resistir dicha carga durante su vida útil. Este material debe estar conformado por suelos seleccionados de características admisibles y compactadas por capas. Según el Manual de Ensayo de Materiales E 115 del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2016), la compactación del suelo en los últimos 30 centímetros debajo del nivel superior de la subrasante debe hacerse al 95% de la máxima densidad seca obtenida en el ensayo Proctor modificado.

Para medir la capacidad portante del suelo de la subrasante, se utiliza el CBR, el cual es un valor de resistencia comparado con el de un material estándar establecido y estará referido al 95% de la máxima densidad seca del ensayo Proctor modificado.

A partir del cálculo de CBR de la subrasante, se puede determinar categorías que se muestran en la Tabla 1 según lo indica el MTC (2014).

Tabla 1: Categoría Subrasante.

Categorías de subrasantes	CBR
S ₀ : Subrasante inadecuada	CBR<3%
S ₁ : Subrasante insuficiente	De CBR≥3% a CBR<6%
S ₂ : Subrasante regular	De CBR≥6% a CBR<10%
S ₃ : Subrasante buena	De CBR≥10% a CBR<20%
S ₄ : Subrasante muy buena	De CBR≥20% a CBR<30%
S ₅ : Subrasante excelente	De CBR≥30%

Fuente: Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos del MTC (2014)

Generalmente, los suelos por debajo del nivel de las subrasantes no son por sí mismas aptas para soportar las cargas de tránsito que recibe de las capas superiores. Pues, si el suelo de la subrasante tiene un CBR<6%, corresponde realizar un tratamiento al suelo o

una estabilización según la naturaleza del suelo (MTC-Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014). Por ello, en el presente trabajo de investigación se propone un nuevo material para la estabilización de subrasantes.

2.2. Suelos arcillosos

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y submicroscópicas derivadas de la descomposición química de los constituyentes de la roca. Este tipo de suelo se caracteriza por presentar amplio rango de humedad en el cual posee un comportamiento plástico. Asimismo, las arcillas en estado se caracterizan por presentar una alta rigidez (Terzaghi & Peck, 1996). Para entender el comportamiento de los suelos arcilloso, es necesario analizar primero su comportamiento, el cual depende de la composición mineralógica y de la microfábrica (Gonzales et al. 2002).

Los minerales son materiales cristalinos y constituyen la parte sólida de los suelos y en su mayoría está formada por átomos de oxígeno y de silicio. Por un lado, en el caso de los suelos de granos gruesos, el principal mineral es el cuarzo, el cual se caracteriza por su alta dureza y este compuesto por cristales de dióxido de silicio (SiO_2). Por otro lado, los minerales de suelos finos se caracterizan por estar compuestos de filosilicatos, los cuales se disponen en capas paralelas de sílice (Budhu 2015).

Los grupos principales de materiales cristalinos que forman los suelos de grano fino, en especial los suelos arcillosos, son los minerales de caolinita, ilita y montmorilonita. La caolinita es uno de los minerales más comunes y se encuentra en suelos sedimentarios y residuales (Terzaghi & Peck, 1996). Su composición consiste de una capa tetraédrica de sílice y una capa octaédrica de aluminio, las cuales están unidas mediante enlaces de hidrógeno (Craig and Knappett 2012). El grupo de las ilitas tiene una estructura conformada por una capa de aluminio y dos capas de sílice, las cuales están unidas por enlaces débiles de potasio (Budhu 2015). Finalmente, el grupo de esmectitas o montmorilonitas poseen una estructura similar al grupo de las ilitas, la diferencia radica en los enlaces que unen las capas. En el caso de los minerales de montmorilonita, las capas están unidas por enlaces débiles de Van der Waalls. Ello causa que las moléculas de agua puedan romper fácilmente los enlaces y separar las capas ocasionando hinchazón o expansión (Budhu 2015). Asimismo, la montmorilonita es conocida como el mineral que conforma la arcilla expansiva, la cual es responsable de los daños a estructuras

cimentadas sobre este tipo de suelo. En la Figura 2 se indican las principales capas que conforman los minerales de las arcillas, así como también los enlaces que las unen.

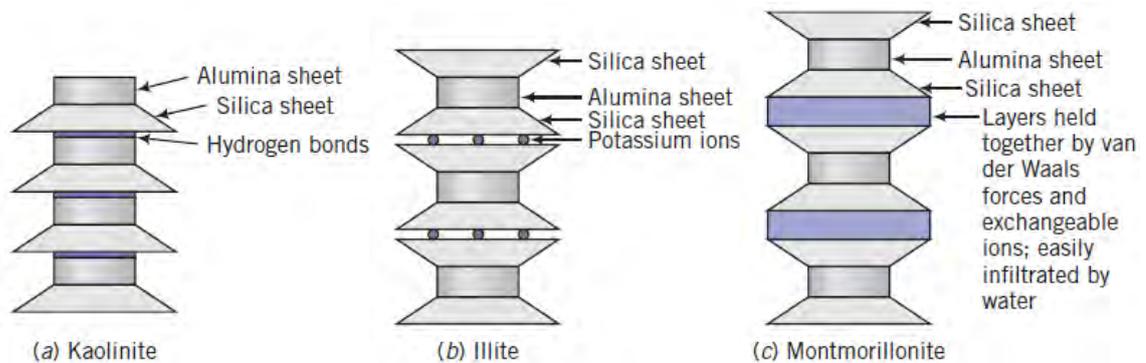


Figura 2: (a) Estructura del mineral de caolinita; (b) Estructura del mineral de Illita; (c) Estructura del mineral de montmorillonita. Fuente: Budhu (2015).

Según Gonzales et al. (2002), otro factor que define el comportamiento de un suelo cohesivo es la microfábrica. Esta se puede definir como el ordenamiento espacial de las partículas, y se relaciona con el grado de orientación, porosidad, densidad, propiedades físicos-químicas y la interacción de los cristales.

Las estructuras más comunes de microfábricas son las floculadas y las dispersas, ambas estructuras se muestran en la Figura 3. La orientación de las estructuras floculadas dependerá del ambiente bajo el cual se formaron las partículas de suelo. En otras palabras, si el desarrollo de la estructura floculada se llevó a cabo en un ambiente de agua salada, las partículas se orientarán de forma paralela; sin embargo, si esta se desarrolló en un ambiente de agua dulce, las partículas presentarán una orientación perpendicular unas a otras. En el caso de las estructuras dispersas, las partículas se orientan paralelas unas a otras (Budhu 2015).

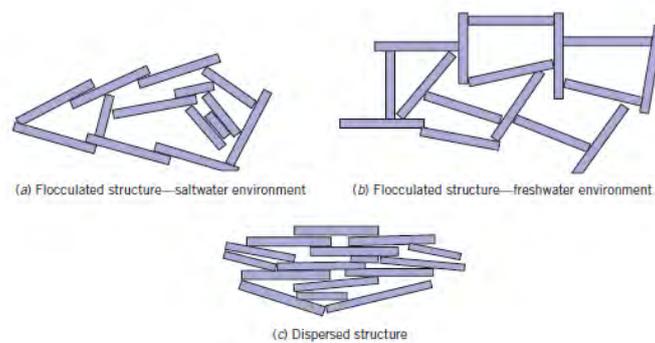


Figura 3: (a) Microfábrica floculada en ambiente de agua fresca (b) Microfábrica floculada en ambiente de agua salada; (c) Microfábrica dispersa. Fuente: Budhu (2015).

Los diversos condicionantes como la composición mineralógica, el tamaño de partículas, la temperatura, entre otros, generan múltiples tipologías o formas de organización de las partículas (Gonzales et al. 2002). Una de ellas es la tipología turbostrática, la cual se caracteriza por presentar una estructura muy densa y compacta; además, en este tipo no hay una orientación de los minerales. Otra tipología es la laminar, la cual posee una matriz formada por láminas de arcillas muy compactas y orientadas. El panal de abeja es una forma de organización que posee una matriz abierta con presencia abundante de poros. La tipología esquelética es similar a la del panal de abejas; asimismo, se encuentra presente en suelos colapsables. Finalmente, la topología oolítica está constituida por partículas esféricas que forman un empaquetamiento denso.

2.3. Estabilización de suelos

2.3.1. Definición de estabilización

La estabilización de suelos es el mejoramiento de las propiedades ingenieriles de un suelo a través de procedimientos mecánicos y mediante la incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2014). La estabilización tiene como principal fin brindar a los suelos mayor resistencia mecánica y asegurar que esta propiedad persista durante un periodo de tiempo o el periodo de vida útil de un proyecto.

Los métodos de estabilización son diversos y se pueden clasificar principalmente en físicas y mecánicas, y químicas. Los criterios a considerar para llevar a cabo la estabilización de una subrasante o base de un pavimento son los siguientes:

- La estabilización aplica para subrasantes pobres o subrasantes inadecuadas, es decir, aquellas con un valor de CBR menor a 6.
- Cuando el estrato de la subrasante sea un suelo arcilloso o limoso, y la estructura del pavimento al humedecerse genere la intrusión de las partículas de la base granular en la capa de la subrasante o cuando las partículas finas de la subrasante mediante bombeo contaminen la capa de la base granular.
- Cuando la ubicación del nivel freático este por encima de lo especificado por el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. En esos casos será necesario implementar capas drenantes o algún método de estabilización.

- Cuando el proyecto esté ubicado por encima de los 4000 m.s.n.m., será necesario evaluar el efecto de las heladas y la susceptibilidad del suelo de la subrasante y de la base al congelamiento.

Algunos aspectos que recomienda el MTC (2014) para seleccionar el método de estabilización más adecuado son el tipo de suelo a estabilizar; el uso del material estabilizante; en el caso de los métodos químicos, el tipo de aditivo estabilizador; la experiencia del Ingeniero Responsable con el uso del tipo de estabilización que se implementará; la disponibilidad del agente estabilizador y del equipo; los costos comparativos entre las posibles alternativas y el grado de mejoramiento de las propiedades mecánicas del material estabilizado.

2.3.2. Métodos de estabilización de suelos

Estabilización física y mecánica:

Este tipo de estabilización tiene como principal objetivo mejorar las propiedades del suelo de subrasante o base, sin modificar su estructura o composición química. La estabilización mecánica se basa en la reducción de la relación de vacíos del suelo mediante alguna técnica de compactación o vibración, esto permite densificar el suelo y disminuir su permeabilidad. Las técnicas de estabilización físicas modifican las propiedades del suelo mediante la inclusión de un elemento estructural. Algunos de los métodos de estabilización física y mecánica son los siguientes:

Combinación de suelos disímiles: Este tipo de estabilización se lleva a cabo mediante la combinación del material existente con un material de préstamo, con el fin de mejorar las propiedades del material de la subrasante.

Reemplazo de suelos: Consiste en sustituir el material de la subrasante por un material de préstamo con mejores propiedades mecánicas. Algunas consideraciones que se deben tomar en este tipo de estabilización son el costo por eliminación y por transporte de material.

Uso de geosintéticos como elemento de refuerzo: Las geomallas son elementos de refuerzos por excelencia. Su funcionamiento se basa en la trabazón mecánica entre las aberturas de la geomalla con las partículas del suelo. De forma general, las geomallas permiten una mejor distribución de los esfuerzos ocasionados por el tránsito y una mayor capacidad portante de la subrasante.

Uso de elementos prefabricados: Este método consiste en la incorporación de elementos prefabricados como la tierra armada. Si bien este método es de rápida instalación, se debe tomar en consideración su elevado costo (Castro 2017).

Estabilización química:

Este tipo de estabilización consiste en la mezcla de un producto químico con el material de suelo. De esta forma se modifica la estructura interna del suelo mediante reacciones fisicoquímicas o mediante la creación de una matriz que cohesione las partículas del suelo. (Bahar, Benazzoug, and Kenai 2004; Billong et al. 2009; Rivera et al. 2020). Algunos de los métodos de estabilización química son los siguientes:

Estabilización con cal: El tratamiento de una sub rasante con cal consiste en mezclar de forma conjunta el suelo con cal y agua. La cal que se utiliza para el tratamiento de sub rasante es el óxido cálcico, es decir cal anhidra o val viva, el cual se obtiene de la calcinación del hidróxido cálcico, en otras palabras, cal hidratada o cal apagada (MTC, 2014). Los suelos más apropiados para el tratamiento con cal son los de granulometría fina. Asimismo, la mezcla del suelo con cal permite que el suelo tratado sea más friable y granular, con lo cual aumentan el límite plástico, la humedad óptima de compactación, reducción del potencial de hinchamiento, incremento de la resistencia a comprensión simple e incremento de la capacidad portante del suelo (CBR).

Estabilización con cemento: La mezcla de suelo con cemento se obtiene de la mezcla de suelo con agua y cemento, seguida de una compactación y un curado, consiguiendo un material endurecido con una mayor resistencia (MTC, 2014). Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los suelos granulares y también los suelos de granos finos con baja plasticidad, es decir suelos con un límite líquido (LL) menor a 40 y un índice de plasticidad (IP) menor a 18. El MTC (2014), recomienda dosificaciones para la estabilización de suelos de acuerdo a su clasificación.

Otros tipos de estabilizaciones químicas comprenden el uso de sales, productos asfálticos, cenizas volantes, encimas y polímeros. Sin embargo, en muchos casos el uso de estos estabilizantes químicos genera altos niveles de contaminación. Por tal motivo, en los últimos años se han desarrollado nuevos métodos alternativos más económicos y ecoamigables con el ambiente. Como, por ejemplo, el uso de fibras PET, cenizas de café, residuos de mármol, bagazo de caña de azúcar, polvo de vidrio, cenizas de cáscara de arroz, etc.

2.4. Cenizas de cáscara de arroz

2.4.1. Características de las cenizas de cáscara de arroz

Las cenizas de cáscara de arroz provienen de la combustión de la cascarilla del grano de arroz, el cual se obtiene después del proceso de pilado del arroz y es considerado como un material residual (Díaz Vásquez, 2018). En la Figura 4, se muestra la cáscara de arroz y las cenizas de cáscara de arroz.



Figura 4: Cáscara de arroz y cenizas de cáscara de arroz. Fuente: García (2019)

La cáscara de arroz llega a constituir un valor aproximado de 20% del peso del total de arroz en cáscara y llega a ocupar espacios grandes por ser un material altamente expansivo (Raymundo and Chávez 2020). Por ello, es que se opta por el quemado de este material y se les da diversos usos a las cenizas resultantes. Estas aplicaciones pueden ser como combustible, abonos orgánicos, material constructivo, entre otras. Asimismo,

Las diversas aplicaciones que se le da a las cenizas de cáscara de arroz se debe principalmente a su alto contenido de sílice de hasta 96.5% en su composición (Kumar Yadav et al. 2017). La composición química obtenida por ensayos de laboratorio en una muestra de cenizas se detalla en la Tabla 2. Como se observa, el alto contenido de sílice resulta idóneo para utilizar este material como un material estabilizante de subrasante, pues presenta un potencial desempeño como adherente o cementante.

Tabla 2: Composición química de las cenizas de cáscara de arroz

Categorías de subrasantes	% en peso
Sílice (SiO ₂)	95.6
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	0.30
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1.20
Óxido de calcio (CaO)	0.30
Óxido de magnesio (MgO)	0.20

Fuente: Kumar Yadav et al. (2017)

Asimismo, las principales características físicas de las cenizas de cáscara de arroz se muestran en la Tabla 3, las cuales fueron obtenidas en base a la investigación de Hidalgo y Saavedra (2020).

Tabla 3: Propiedades físicas de las cenizas de cáscara de arroz.

Propiedad física	Valor
Humedad (%)	0.65
Densidad (Kg/m ³)	1684
Masa unitaria suelta (Kg/m ³)	205
Masa unitaria compacta (Kg/m ³)	272
% de vacíos en agregado suelto	0.88
% de vacíos en agregado compacto	0.84

Fuente: Hidalgo y Saavedra (2020)

2.4.2. Estabilización con cenizas de cáscara de arroz

La estabilización con cenizas de cáscara de arroz busca mejorar la subrasante en las principales propiedades. Las propiedades que más se estudian son las de resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad. A continuación, se detalla cómo cambian estas propiedades por la adición de las cenizas de cáscara de arroz a una muestra de suelo.

Según diversas investigaciones de autores, la adición de cenizas de cáscara de arroz al suelo, específicamente arcilla, genera una disminución del índice de plasticidad conforme se agrega mayor proporción de cenizas respecto a la cantidad de suelo (Castro, 2017; Raymundo & Chávez, 2020; Kumar Yadav et al., 2017). Lo que realmente sucede es una disminución es el límite líquido y un aumento en el límite plástico, lo cual resulta en una notoria disminución del índice de plasticidad del suelo estabilizado. Esto se debe a la reducción de la compresibilidad y las características de hinchazón y, en general, a sus propiedades no plásticas de las cenizas de cáscara de arroz.

De igual forma, se evaluaron los parámetros de resistencia del suelo estabilizado mediante ensayos de CBR y ensayos de compresión no confinada en diversas investigaciones. Por un lado, los resultados de ensayos de CBR de muestras de suelos arcillosos estabilizados con cenizas de cáscara de arroz muestran que este valor aumenta conforme se aumenta la proporción de cenizas en la muestra, debido a la formación de silicatos de calcio proveniente de la reacción de la sílice de las cenizas con el calcio presente en el suelo (Kumar Yadav et al. 2017; Mondragon and Cajaleon 2019). Cabe mencionar que en el estudio de Kumar Yadav et al. (2017) también se advierte una

disminución del valor del CBR por un exceso de sílice proveniente de la ceniza. Por otro lado, también se obtuvo un aumento significativo en la resistencia a la compresión no confinada por el aumento, debido a la formación de compuestos cementantes entre el hidróxido de calcio presente en el suelo y las puzolanas de las cenizas (Kumar Yadav et al. 2017). Estos resultados se traducen en un aumento en la capacidad de soporte de resistencia del suelo de la subrasante para tolerar las cargas provenientes del tránsito. Por ello, es importante determinar una adecuada proporción de las cenizas de cáscara de arroz con el que se planea estabilizar cada tipo de suelo, de tal manera que se obtengan mejoras en las características físicas y mecánicas del suelo.

El impacto de las cenizas de cáscara de arroz en la permeabilidad del suelo depende del tipo de suelo en que se aplique, ya que esta propiedad depende de la porosidad pues la adición de cenizas de cáscara de arroz rellena los poros de la muestra de suelo e incrementa la unión entre las partículas debido a la acción cementante (Ayininuola and Olaosebikan 2013). Por ello, la permeabilidad es una propiedad que en general disminuye pero es evidente que habrá una mayor disminución del coeficiente de permeabilidad para suelos con mayor presencia de arenas que los suelos con mayor presencia de finos.

Según los estudios de Ewa et al. (2018) en cuanto al contenido de humedad, este se obtiene en relación del contenido óptimo de humedad y máxima densidad seca a partir del ensayo Proctor modificado. La adición de cenizas de cáscara de arroz a una muestra de suelo arcilloso genera un crecimiento en el contenido óptimo de humedad y un decrecimiento en la máxima densidad seca de la muestra conforme aumenta la proporción de cenizas. Por un lado, el aumento del contenido óptimo de humedad se debe al sobrante de agua retenida en la estructura del suelo como floculante. Por otro lado, la disminución de la máxima densidad seca se debe al reemplazo de suelo por las cenizas, ya que estas tienen baja gravedad específica comparadas con la del suelo.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Propiedades físicas

3.1.1. Límites de Atterberg

Ewa et al. (2018) analizaron la influencia de las cenizas de cáscara de arroz en una muestra de suelo arcilloso, para ello utilizó tres tipos de cenizas obtenidas de las localidades de Cross River, Enugu y Ebonyi. Los ensayos de Límite de Atterberg se realizaron para porcentajes de 10%, 20%, 30% y 40% de cenizas de cáscara de arroz respecto al peso seco de la muestra de suelo. Los resultados mostraron que conforme el porcentaje de cenizas de cáscara de arroz aumentaba, el límite líquido del suelo tratado disminuía. Los valores mínimos de límite líquido fueron de 59%, 56% y 54% para las localidades de Cross River, Enugu y Ebonyi, respectivamente. Estos resultados se obtuvieron para un porcentaje de cenizas de 40%. Respecto al límite plástico, Ewa et al. (2018) observaron que esta propiedad aumentaba ligeramente con el contenido de cenizas de cáscara de arroz. Los mayores valores de límite plástico fueron de 48%, 46% y 40% para las localidades de Cross River, Enugu y Ebonyi, respectivamente. De igual forma que en el límite líquido, los valores máximos de límite plástico se obtuvieron para un porcentaje de 40%. Ellos atribuyeron la disminución del límite líquido a la naturaleza no plástica de la ceniza de cáscara de arroz. Asimismo, el incremento del límite plástico generaba una disminución del índice de plasticidad del suelo estabilizado.

Según los estudios de Kumar Yadav et al. (2017), observó que existe una variación en los Límites de Atterberg al ir incrementando cada 2.5% en peso hasta 12.5% en peso el contenido de cenizas de cascara de arroz en muestras de suelo arcilloso. Por un lado, es notoria la disminución del límite líquido en cada incremento del contenido de cenizas de cascara de arroz, siendo el límite líquido de 36.06% para el suelo sin contenido de cenizas que disminuye hasta 34.49% para un contenido de 12.5% de cenizas en el suelo. Por otro lado, se observa un ligero aumento en el límite plástico de cada muestra de suelo estabilizado conforme aumentaba el porcentaje de cenizas de cascara de arroz, siendo el límite plástico de 23.7% para la muestra sin contenido de cenizas que aumenta hasta 28.33% para un contenido de 12.5% de cenizas en el suelo. Estos cambios se deben

principalmente a la reducción de la compresibilidad y al hecho de que la estabilización con cenizas brinda propiedades cementantes. Cabe mencionar que la disminución del límite líquido es menor en comparación al aumento del límite plástico. A partir de ello, se puede notar que habrá una disminución importante en el índice de plasticidad del suelo arcilloso estabilizado desde 12.36% para el suelo sin contenido de cenizas hasta 6.16% para la muestra con 12.5% de cenizas, tal y como se muestra en la Figura 5.

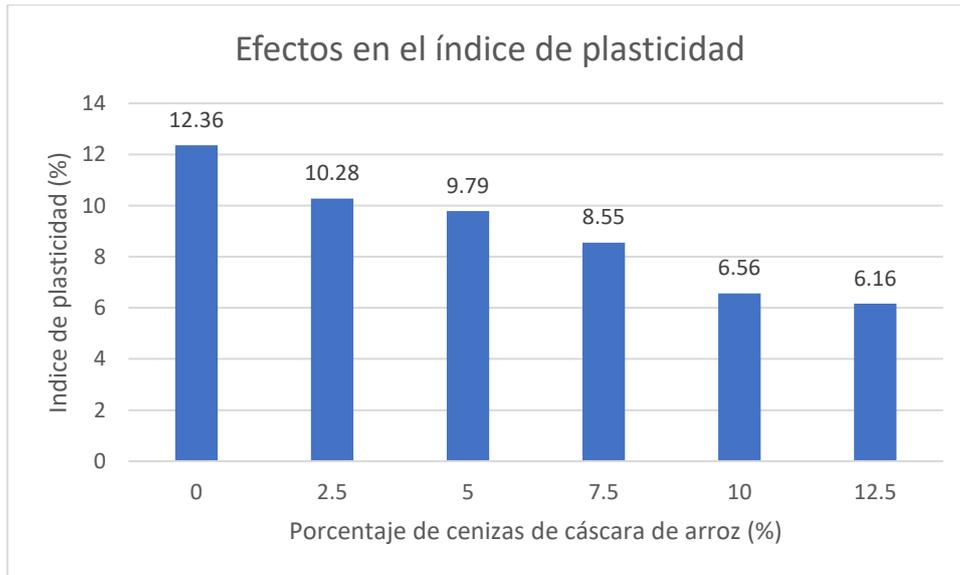


Figura 5: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el índice de plasticidad.

Fuente: Modificado de Kumar Yadav et al. (2017)

El suelo analizado por Castro (2017) tenía como límite líquido y límite plástico valores iguales a 39% y 21%, respectivamente. Los ensayos de Límite de Atterberg se realizaron para porcentajes de 10%, 20%, 30% y 40% de cenizas de cáscara de arroz respecto al peso seco de la muestra de suelo. Los resultados mostraron que conforme el porcentaje de cenizas de cáscara de arroz aumentaba, el límite líquido del suelo tratado disminuía y el límite plástico aumentaba. La Tabla 4 indica los valores de límite líquido, de límite plástico e de índice de plasticidad, además indica la clasificación SUCS y la clasificación AASHTO conseguidos con dichos valores.

Tabla 4: Resultados de límites de Atterberg y de clasificación SUCS y AASHTO para distintas combinaciones de ceniza de cáscara de arroz y suelo.

Muestras	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
SOIL 100	39.0	21.0	18.0	CL	A-6 (0)
S90 - CCA10	41.0	27.0	14.0	ML	A-5 (10)
S80 - CCA20	44.0	35.0	9.0	ML	A-5 (10)
S70 - CCA30	47.0	NP	NP	ML	A-5 (24)
S60 - CCA40	NP	NP	NP	ML	A-4 (0)

Nota: De *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante*, por Castro (2017).

En la arcilla de baja plasticidad analizada por Llamoga Vásquez (2017) en su estado natural el suelo tenía como límite líquido y límite plástico valores de 44.53% y 24.51%, respectivamente. Además, los investigadores realizaron ensayos con muestras que contenían 4%, 7% y 10% de ceniza de cáscara de arroz respecto del peso seco de la muestra de suelo. En los resultados de las muestras de 4% y 7% se observa que, al incrementar la cantidad del estabilizante, se reduce el límite líquido y el límite plástico. Por otro lado, todo lo contrario, sucede con la muestra de 10% ya que supera en ambas propiedades al suelo natural. Esto se debe a la cantidad excesiva de ceniza que provoca una disminución de los límites de consistencia. De esta manera, se evidencia que el mejor comportamiento lo tuvo la muestra con 7% de ceniza. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados de los Límites de Atterberg para suelo natural y combinaciones con ceniza de cáscara de arroz. Fuente: Llamoga (2017)

Muestras	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
Suelo Natural	44.53%	24.51%	20.02%
Suelo + 4% CCA*	36.33%	22.30%	14.03%
Suelo + 7% CCA*	27.51%	19.38%	8.14%
Suelo + 10% CCA*	46.42%	25.00%	21.42%

*CCA: Ceniza de cáscara de arroz

En el estudio llevado a cabo por Mohammed et al. (2012), se utilizaron tres suelos del tipo CL obtenidos de distintas ciudades de Irak. Estas muestras se estabilizaron con distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz y posteriormente se llevaron a cabo

los ensayos de límites de Atterberg. Los resultados se muestran en la Figura 6 y Figura 7. Las muestras pertenecen a las ciudades de Baladroz, Nahrawan y Al-Nasiriyah.

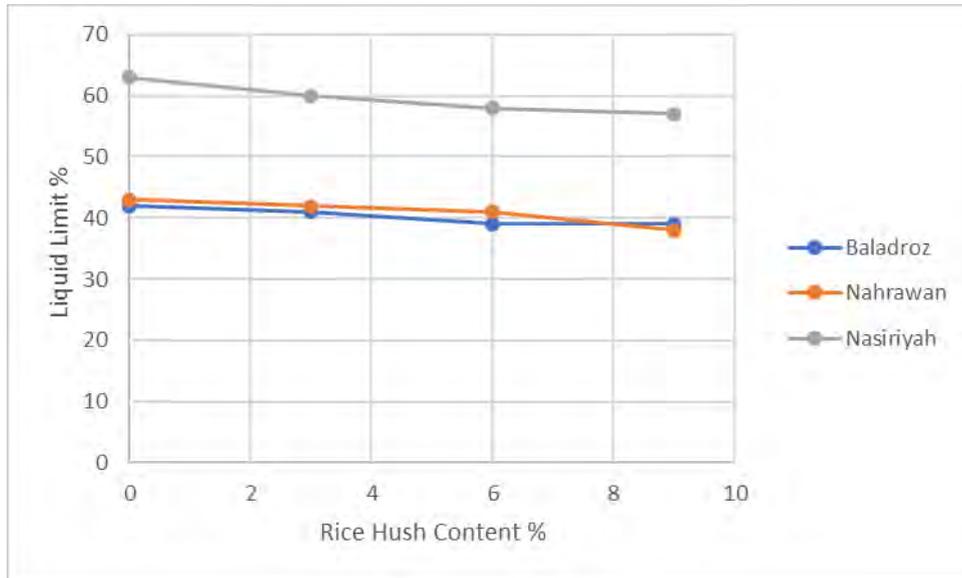


Figura 6: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el límite líquido.

Fuente: Modificado de Mohammed et al. (2012).

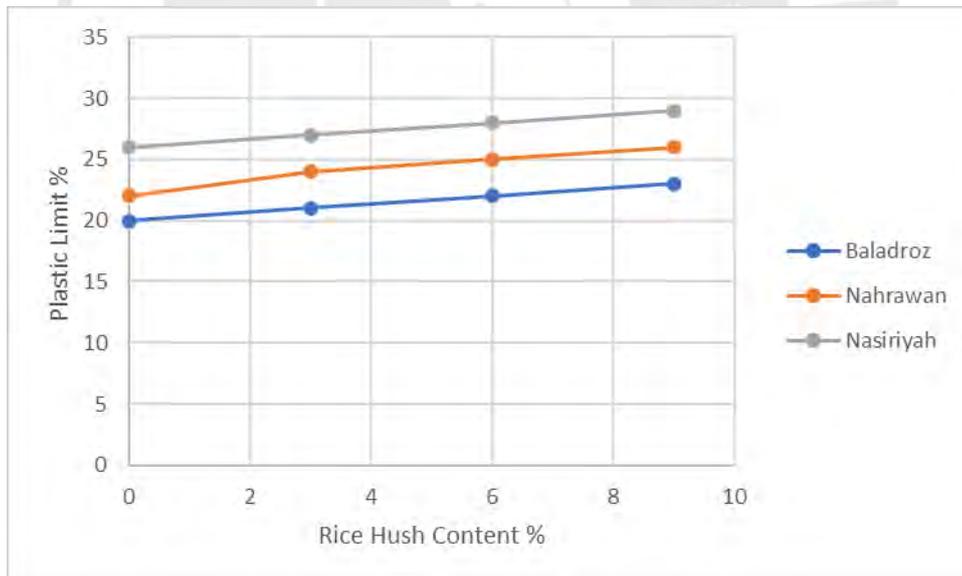


Figura 7: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el límite plástico.

Fuente: Modificado de Mohammed et al. (2012).

En la Figura 6 se aprecia una disminución en el límite líquido de los tres suelos conforme se incrementa el porcentaje de suelo, desde un promedio de 49 % para un

contenido de 0 % de arroz hasta un promedio de 45 % para un contenido de 9 %. Esto se debe al hecho de que la reacción de la cáscara de arroz, que contiene silicato de calcio, con las partículas del suelo produce compuestos que poseen propiedades cementosas. Sin embargo, esto produce un incremento en el límite plástico de los tres suelos, desde un promedio de 23 % para un contenido de 0 % hasta un promedio de 26 % para un contenido de 9 %, como se aprecia en la Figura 7. Asimismo, se observa una misma tendencia para los tres suelos, en cuanto a la disminución del su índice de plasticidad.

3.1.2. Gravedad específica

Castro (2017) realizó ensayos de gravedad específica de los sólidos (Gs) en 5 muestras de suelo arcilloso estabilizadas con porcentajes de 0%, 10%, 20%, 30% y 40%. Los resultados de Castro (2017) muestran valores de Gs igual a 2.63, 2.60 2.56, 2.50 y 2.41 para porcentajes de 0%, 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente. Se aprecia que hay una disminución de la gravedad específica conforma se incrementa los porcentajes de cenizas de cáscara de arroz, esto se debe a la influencia de la ceniza de cáscara de arroz el cual posee menor gravedad específica. Por ello, al añadir cenizas de cáscara de arroz en función al peso seco del suelo arcilloso, el volumen del añadido es mayor al que reemplaza al suelo. Así, la mezcla del suelo arcilloso con cenizas de cáscara de arroz resulta tener menor peso específico.

Del mismo modo, en el caso de un estudio realizado por Eberemu et al. (2013), en un suelo CL de gravedad específica 2.54, al añadir cenizas de cáscara de arroz en porcentajes del peso seco del suelo, la gravedad específica disminuyó a 2.5, 2.44, 2.37, 2.31, para aumentos de 4%, 8%, 12 % y 16% respectivamente.

Asimismo, en el estudio realizado por Mohammed et al. (2012) para 3 suelos de Irak del tipo CL, se obtuvo una disminución en la gravedad específica desde un promedio de 2.69 hasta un promedio de 2.54 para un contenido de 9 % de cáscara de arroz. Esta disminución puede ser atribuida al valor bajo de gravedad específica de esta, la cual está alrededor de 2.04.

3.1.3. Análisis de resultados de las propiedades físicas

A manera de resumen, los resultados obtenidos por diferentes autores se muestran en la Tabla 6. En tal cuadro se observa que el límite líquido de un suelo arcilloso tiende a disminuir conforme se estabiliza con porcentajes mayores de cenizas de cáscara de arroz.

Caso contrario ocurre con el límite plástico, el cual tiende a aumentar cuando se utilizan mayores porcentajes de material estabilizante.

La disminución del límite líquido puede generarse por diferentes factores. Por ejemplo, para Ewa et al. (2018), la reducción del límite líquido se debe a la naturaleza no plástica de las cenizas de cáscara de arroz. Para Kumar Yadav et al. (2017) la disminución del límite líquido en una muestra de suelo se atribuye a la reacción entre las partículas óxido de calcio (CaO) del suelo arcilloso y las cenizas de cáscara de arroz, los cuales forman compuestos que poseen propiedades de cementación como los silicatos de calcio. Para este investigador la reducción del límite líquido es un indicador de la reducción de la comprensibilidad y de las características de expansión de las arcillas. Respecto al límite plástico, esta propiedad se incrementa conforme aumenta el contenido de cenizas de cáscara de arroz. Ello es producto del efecto cementante formado en la estabilización de las arcillas con las cenizas.

El aumento del límite plástico y la disminución del límite líquido en suelos arcillosos generan la reducción del índice de plasticidad. Ello puede ocasionar en algunos casos un cambio en la clasificación del tipo de suelo. Por ejemplo, en el estudio de Castro (2017) se observó que la muestra natural de suelo correspondía a una arcilla de baja plasticidad (CL). Sin embargo, para un porcentaje de 40% de cenizas de cáscara de arroz, la clasificación de la muestra de suelo correspondía a un limo de baja plasticidad (ML).

Asimismo, la estabilización de muestras de suelos arcillosos con cenizas de cáscara de arroz muestra una reducción de la gravedad específica. Ello se debe al bajo valor de la gravedad específica de las cenizas, el cual es en promedio 2.04 (Mohammed et al. 2012). La reducción de la gravedad específica varía entre 5% a 9% y dependerá del contenido de cenizas.

Tabla 6: Resumen de la variación del límite líquido y del límite plástico para diferentes contenidos de cenizas de cáscara de arroz.

Autor	Tipo de suelo	LL	LP	IP	Cenizas de cáscara de arroz (%)
Ewa et al (2018)	Cross River (CL)	64.0	40.3	23.7	10
	Enugu (CL)	61.5	40.0	21.5	10
	Ebonyi (CL)	60.0	33.0	27.0	10
	Cross River (CL)	59.0	48.0	11.0	40
	Enugu (CL)	56.0	46.0	10.0	40
	Ebonyi (CL)	54.0	40.0	14.0	40
Kumar Yadev (2017)	CL	36.1	23.7	12.4	0
		34.5	28.3	6.2	12.5
Castro (2017)	CL	39.0	21.0	18.0	0
	ML	NP	NP	NP	40
Llamoga (2017)	CL	44.5	24.5	20.0	0
		27.5	19.38	8.1	7
		46.4	25	21.4	10
Mohammed Yousif et al. (2012)	CL				
	Baladroz	41.0	20.0	21.0	0
	Nahrawan	42.0	22.0	20.0	0
	Nasiriyah	63.0	26.0	37.0	0
	Baladroz	39.0	23.0	16.0	9
	Nahrawan	38.0	26.0	12.0	9
	Nasiriyah	58.0	29.0	29.0	9

3.2. Propiedades mecánicas

3.2.1. Ensayo Proctor Modificado

Máxima Densidad Seca (MDD)

Los resultados de Ewa et al. (2018) muestran que el aumento de las cenizas de cáscara de arroz en una muestra de suelo disminuye su máxima densidad seca (MDD). Por ejemplo, para la muestra de suelo tratada con las cenizas de cáscara de arroz de la localidad Cross River, la mayor disminución del MDD fue desde 1.72 kg/m³ a 1.28 kg/m³, cuando el contenido de cenizas era de 20%. Lo mismo ocurrió para las localidades de Enugu y Ebonyi, en las cuales el menor valor de MDD fue de 1.31 kg/m³ y 1.26 kg/m³, respectivamente. Ewa et al. (2018) atribuyeron la disminución de la MDD al reemplazo

del suelo por porcentajes de cenizas de cáscara de arroz, las cuales presentaban menores valores de gravedad específica que la muestra de suelo. Otro factor importante de la reducción de la MDD era el revestimiento de las partículas de suelo con las partículas de cenizas, lo cual daba como resultado partículas más grandes con orificios mayores, por ello la densidad del suelo estabilizado era menor.

De igual forma, los resultados de Kumar Yadav et al. (2017) evidencian una disminución en los valores de máxima densidad seca conforme aumenta el porcentaje de cenizas de cascara de arroz en la muestra se suelo arcilloso. Como se observa en la Figura 8, la mayor disminución se da cuando el contenido de cenizas es de 12.5%, lo cual puede deberse a que las cenizas de cáscara de arroz agregadas sean de menor gravedad específica que la del suelo y generen esta disminución en la compactación. Cabe mencionar que la disminución es prácticamente constante hasta cuando el contenido de cenizas es de 7.5% y luego hay un notorio cambio para cuando el contenido de cenizas es de 10%.

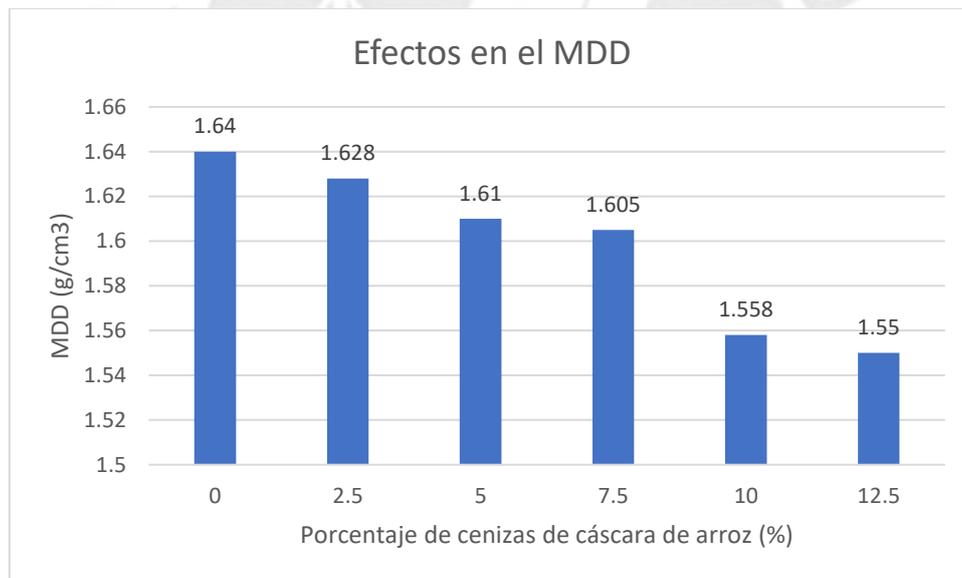


Figura 8: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en la máxima densidad seca.

Fuente: Modificado de Kumar Yadav et al. (2017)

Del mismo modo, Eberemu et al. (2013) realizaron estudios para un suelo CL añadiendo cenizas de cáscara de arroz en porcentajes del peso seco del suelo, y se obtuvo una disminución de la MDD a mayor contenido de cenizas de cáscara de arroz. Si bien la MDD disminuye porque las cenizas de cáscara de arroz tienen menor peso específico,

la disminución de MDD con mayor contenido del añadido no está desconectada de la floculación y la aglomeración simultáneas iniciales de partículas de arcilla causadas por el intercambio catiónico. Es decir, las partículas de arcilla con carga negativa retienen las partículas de cenizas de cáscara de arroz con carga positiva, se obtiene así un incremento de volumen y una disminución del peso específico.

Ormeño et al. (2020) observaron una disminución de la máxima densidad seca para una muestra de suelo del tipo CL al agregar distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz, desde 0 a 25 %. Esto se aprecia en la Figura 9, en la que se puede observar que para una muestra de suelo puro el MDD es de 1.694 g/cm³ y para una muestra de suelo con un contenido de ceniza de 25 % es de 1.508 g/cm³. Esto se da debido a que la gravedad específica de la ceniza es menor a la de la muestra de arcilla usada.

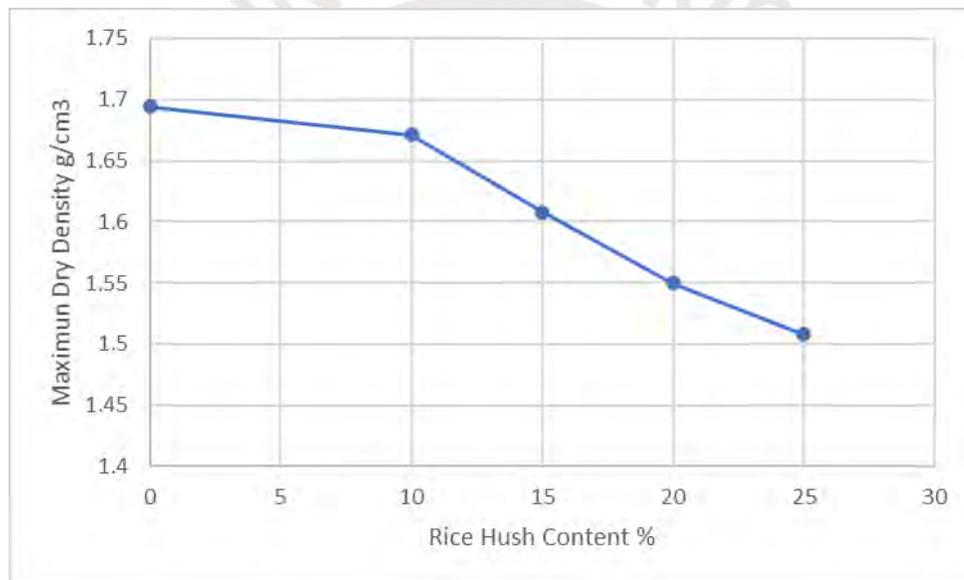


Figura 9: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en la máxima densidad seca.

Fuente: Modificado de Ormeño et al. (2020)

Contenido óptimo de humedad (OMC)

Ewa et al. (2018) observaron un incremento del contenido óptimo de humedad (OMC) conforme aumentaban los porcentajes de cenizas de cáscara de arroz. De forma general el valor del OMC aumentó de 18.3% a 21.6% con las muestras de cenizas de las localidades de Cross River y Enugu, asimismo, el valor de OMC aumentó a 23.1% en Ebonyi. 23%. Ewa et al. (2018) encontraron en su investigación que el aumento del OMC se debía a que a mayores proporciones de cenizas de cáscara de arroz la fracción fina de

arcilla disminuía, con lo cual se forman partículas gruesas porosas que absorbían mayor cantidad de agua.

Asimismo, Kumar Yadav et al. (2017) notaron que al aumentar la proporción de cenizas de cáscara de arroz en la muestra de suelo también aumentaba el contenido de humedad óptima, siendo 23.8% el mayor valor de OMC cuando el contenido de cenizas es de 12.5%. Como se puede observar en la Figura 10, los valores aumentan de 16.3% hasta 23.8%, lo cual puede deberse al reemplazo de material fino por material más grueso y supone la necesidad de más agua para lograr la compactación de la mezcla de suelo y cenizas.

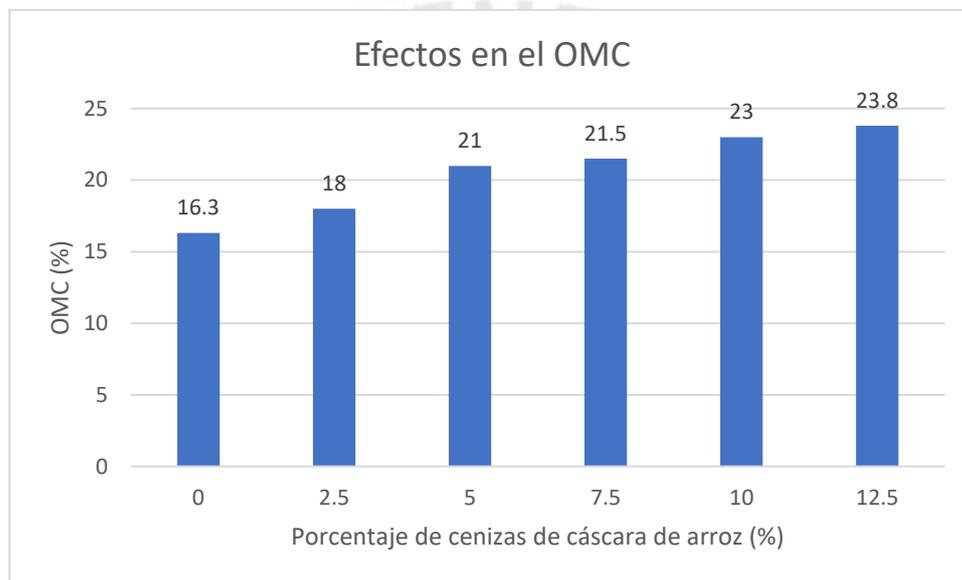


Figura 10: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el contenido de humedad óptima.

Fuente: Modificado de Kumar Yadav et al. (2017)

Otro factor al que se le atribuye el aumento de contenido óptimo de humedad, es debido al aumento de finos de las cenizas de cáscara de arroz con áreas de superficie más grandes que requerirían más agua para la hidratación (Eberemu et al., 2013).

Asimismo, según los estudios realizados por Ormeño et al. (2020) para una muestra de suelo del tipo CL mezclada con distintos porcentajes de ceniza de cáscara de arroz, se obtuvo un incremento en el contenido óptimo de humedad. Para un contenido de ceniza del 0 %, suelo puro, se tiene un valor de OMC de 10.60 %, el cual incrementa a 15.80 %, 17.50 %, 19.10 % y 19.80 % para contenidos de ceniza de 10 %, 15 %, 20 % y 25 % respectivamente. Esto se puede apreciar en la Figura 11.

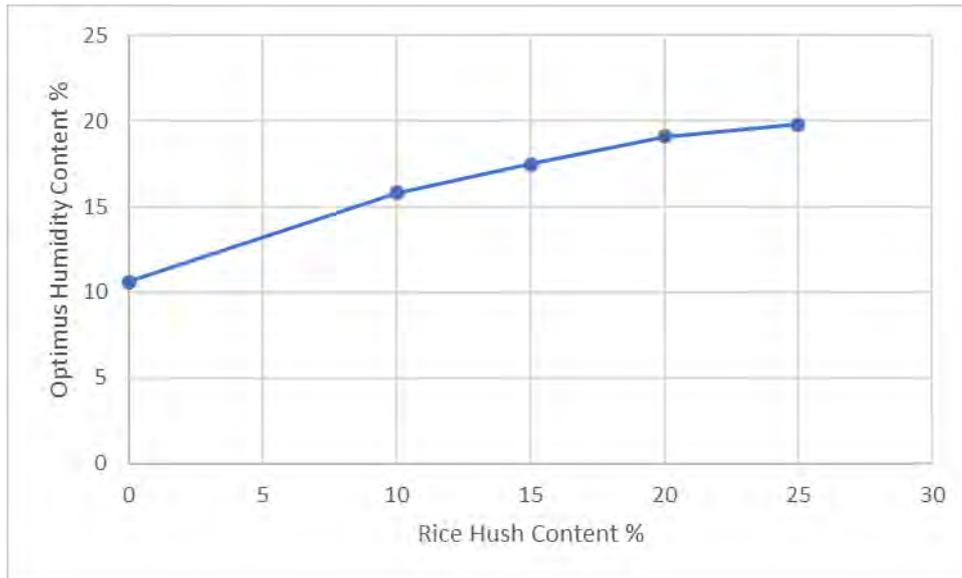


Figura 11: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el contenido de humedad óptima.

Fuente: Modificado de Ormeño et al. (2020)

3.2.2. Ensayo CBR

La muestra de suelo natural analizada por Ewa et al. (2018) tenía como propiedades mecánicas un CBR para muestras saturadas igual a 6.89%. Los investigadores utilizaron porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de cenizas de cáscara de arroz. Ewa et al. (2018) observaron que los mayores valores de CBR se obtenían para un porcentaje de 10% de cenizas, luego del cual el CBR disminuía, inclusive llegaba a valores menores de CBR que en la muestra de suelo sin estabilización. El grado de mejora de CBR fue de 63.4%, 20% y 14.5% de las muestras estabilizadas con las cenizas de Cross River, Ebonyi y Enugu, respectivamente.

Ewa et al. (2018) llegaron a la conclusión que el mejoramiento del CBR se debía al alto contenido de sílice de las cenizas de cáscara de arroz, las cuales formaban componentes cementantes con la interacción de las partículas CaOH de la muestra de suelo arcilloso. Luego de llegar al porcentaje óptimo de cenizas, el decrecimiento del CBR se debía a la excesiva cantidad de cenizas de cáscara de arroz que no movilizaba alguna reacción con las partículas de suelo. En consecuencia, las cenizas ocupaban mayor volumen y reducían la unión cementante.

Del mismo modo, Kumar Yadav et al. (2017) observaron que al agregar 2.5%, 5%, 7.5%, 10% y 12.5% de peso de cenizas de cáscara de arroz a las muestras de suelo arcilloso, estas generaban un aumento del valor del CBR hasta un 18.83% para un

porcentaje de 7.5% de cenizas, a partir del cual el valor del CBR disminuía conforme aumentaba dicha proporción de cenizas, tal y como se puede observar en la Figura 12. Este aumento y disminución del CBR se debe principalmente a la formación de silicatos de calcio por la reacción de la sílice que contiene la ceniza y el calcio que contiene el suelo, el cual luego no es posible de reaccionar por el exceso de contenido de sílice en las cenizas de cáscara de arroz y por ello disminuye el valor del CBR después de seguir aumentando la proporción de cenizas en las muestras de suelo estabilizado.

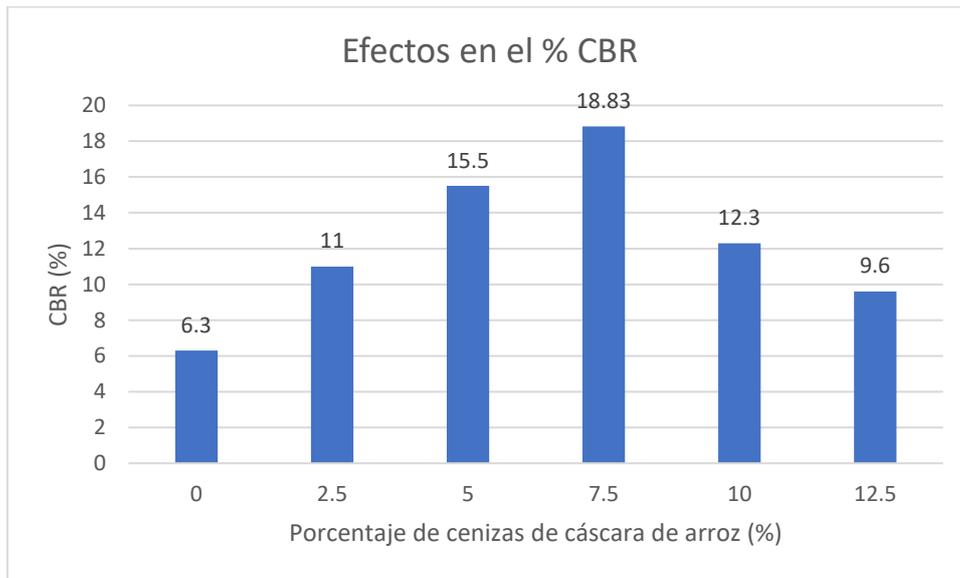


Figura 12: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz en el porcentaje de CBR.

Fuente: Modificado de Kumar Yadav et al. (2017)

Castro (2017) realizó ensayos de CBR en una muestra de suelo arcilloso obtenido de la localidad de Moyobamba. El CBR del material arcilloso sin estabilización de cenizas de cáscara de arroz fue de 5%. Castro (2017) apreció que el valor de CBR iba incrementándose hasta un límite luego del cual disminuía. En su investigación, el valor óptimo de CBR para diferentes combinaciones fue del 20% de ceniza de cáscara de arroz, el cual permitió un incremento de 5 a 19.40, es decir aumentó 4 veces su capacidad de soporte de resistencia. Se resumen los resultados obtenidos en su investigación en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados de CBR para distintas combinaciones de ceniza de cáscara de arroz y suelo.

Muestras	CBR (%)
SOIL 100	5.00
S90 - CCA10	16.30
S80 - CCA20	19.40
S70 - CCA30	13.20
S60 - CCA40	13.00

Nota: De *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante*, por Castro (2017).

Asimismo, el ensayo CBR permite determinar el grado de expansión de una muestra de suelo. Los resultados obtenidos de Castro (2017) muestran que para diferentes porcentajes de cenizas de cáscara de arroz hay una disminución de las propiedades de expansión de un muestra de suelo arcilloso de baja plasticidad (CL). La muestra de suelo utilizada en la investigación de Castro (2017) presentaba un grado de expansión de 1.91%. Para un valor de 40% de cenizas de cáscara de arroz se obtuvo un grado de expansión igual a 0%.

Kumar Aditya et al. (2014) utilizaron muestras de suelo arcilloso mezcladas con contenido de cenizas de cáscara de arroz que variaban de 0% a 35%. Estas muestras de suelo se mantuvieron en cuartos de curado durante 7, 14, 28, 56 y 128 días. Luego de transcurridos el periodo de curado, las muestras se sumergieron en agua por otros 4 días. La adición de cenizas de cáscara de arroz para todos los porcentajes analizados, condujo a un incremento del CBR en comparación con la capacidad portante del suelo sin estabilizante. El contenido óptimo de porcentaje de cenizas de cáscara de arroz fue de 25% de cenizas, después del cual este aumento de capacidad portante disminuía gradualmente. También se observó que el CBR aumentaba a medida que se incrementaba el periodo de curado. Estos aumentos fueron de aproximadamente 9%, 5,4%, 5,1%, 1,5% y 2,2%, respectivamente, durante 7, 14, 28, 56 y 128 días de curado con respecto a 3 días de curado para un porcentaje de cenizas de cáscara de arroz de 25%. Los resultados de CBR obtenidos de la investigación de Kumar Aditya et al. (2014) se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados de CBR para varias combinaciones de cenizas de cáscara de arroz.

Porcentaje de cenizas de cáscara de arroz (%)	CBR					
	Días de curado					
	3	7	14	28	56	128
0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
5	4.4	4.8	5.5	6.2	6.8	7.1
10	6.5	7.8	8.4	9.1	9.6	9.7
15	8.2	9.7	10.2	11.0	11.5	11.8
20	10.3	11.0	11.6	12.3	12.8	13.0
25	11.0	12.0	12.4	13.2	13.5	13.7
30	10.1	11.0	11.5	12.6	13.1	13.5
35	9.8	10.5	11.0	11.6	11.9	12.1

Nota: De Performance evaluation of structural properties for soil stabilized using rice husk ash, por Kumar Aditya et al. (2014).

La muestra de suelo sin estabilizar analizada por Galvez y Santoyo (2019) muestra un valor de CBR de 3.92, el cual va incrementando conforme se aumenta el porcentaje de cenizas en la muestra de suelo. El mayor valor de CBR es de 13.77 y se alcanza cuando el contenido de cenizas es del 15%, mientras que para los casos con contenido de cenizas de 10% y 3% los valores de CBR son de 10.93 y 6.68 respectivamente.

Según estudios de Díaz (2018), se analizaron muestras de suelo arcilloso estabilizados con 10%, 15%, 20% y 25% en peso de cenizas de cáscara de arroz. Al realizar el ensayo de CBR al 95%, se obtuvo un valor de 8% para la muestra sin contenido de cenizas de cáscara de arroz. Los valores de CBR para las demás muestras aumentaban de acuerdo al aumento de la ceniza de cascara de arroz en la muestra ensayada hasta un valor de 13.8% para el caso de la muestra estabilizada con 20% de ceniza, luego el CBR vuelve a disminuir a 11.3% para el caso de la muestra estabilizada con 25% de ceniza. Los valores de CBR para las muestras de suelo arcilloso estabilizadas con 10% y 15% de cenizas son 9% y 11.5% respectivamente.

Las muestras de suelo que estudió Llamoga Vásquez (2017) tenían un CBR de 2.85% en su estado natural, lo cual califica que es una subrasante inadecuada. Se hicieron ensayos en suelos con contenido de ceniza de cáscara de arroz en porcentajes de 4%, 7% y 10% respecto de su peso seco. Para las muestras de 4% y 7% a medida que aumentaba la cantidad de estabilizante, se incrementaba la resistencia portante del suelo. Por otro lado, en la muestra de 10% ocurrió todo lo contrario pues llegó a ser menor que el suelo

natural. El mejor valor se obtuvo con el 7% de ceniza obteniendo un CBR de 7.8%, lo cual la califica como un suelo de sub-rasante adecuada y eso la hace adecuada para la construcción. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados de CBR para suelo natural y combinaciones con ceniza de cáscara de arroz. Fuente: Llamoga Vásquez (2017)

Muestras	CBR (0.2")
Suelo Natural	2.85%
Suelo + 4% CCA*	4.52%
Suelo + 7% CCA*	7.80%
Suelo + 10% CCA*	2.00%

*CCA: Ceniza de cáscara de arroz

3.2.3. Análisis de resultados de las propiedades mecánicas

A modo de resumen, en la Tabla 10 se colocarán los resultados de la máxima densidad seca y el contenido óptimo de agua de los ensayos de compactación realizados por las investigaciones citadas. En cuanto a la máxima densidad seca (MDD), se tiene una reducción de dicho parámetro conforme aumenta el contenido de cenizas de cáscara de arroz. Ello se debe a que las partículas de cenizas de cáscara de arroz son más livianas, de menor peso específico, que los suelos arcillosos. Así, al reemplazar las partículas del suelo con las cenizas de cáscara de arroz se tiene menor masa y peso en el mismo volumen. Además de lo mencionado, la reducción se asocia a la formación de partículas más grandes debido a la floculación y aglomeración, las cenizas de cáscara de arroz forman un revestimiento de las partículas del suelo debido al intercambio catiónico. Las partículas del suelo con carga negativa retienen las partículas del añadido con carga positiva. De esa manera, se obtiene partículas más grandes que dan lugar a poros u orificios más grandes y se reduce la MDD.

En cuanto al contenido óptimo de humedad (OMC), se tiene un aumento de este parámetro conforme se aumenta el contenido de cenizas de cáscara de arroz. Ello se explica por lo mencionado anteriormente, debido a la floculación y aglomeración se forman partículas más grandes y porosas capaces de contener más humedad. Además, al aumentar la proporción de cenizas esto implica la reducción de una fracción de arcilla y se obtiene materiales más gruesos con gran superficie de área, para lo cual se necesita más agua para compactar la mezcla suelo-ceniza. Incluso, también podría haber partículas

de las cenizas de cáscara de arroz que con áreas de superficie más grande que requieran más agua para la hidratación.

Tabla 10: Resumen de la variación de la MDD y el OMC para diferentes contenidos de cenizas de cáscara de arroz.

Autor	Tipo de suelo	MDD (kg/m ³)	OMC (%)	Cenizas de cáscara de arroz (%)
Ewa et al (2018)	Cross River (CL)	1.72	18.3	0
	Enugu (CL)	1.72	18.3	0
	Ebonyi (CL)	1.72	18.3	0
	Cross River (CL)	1.28	21.63	20
	Enugu (CL)	1.31	21.63	20
	Ebonyi (CL)	1.26	23.06	20
	Eberemu et al (2013)	CL	1.94	11.6
Ensayo P. Modificado	CL	1.89	12	4
	CL	1.79	13.5	8
	CL	1.62	18	12
	CL	1.57	18.9	16
	CL	1.57	18.9	16
Kumar Yadav et al. (2017)	CL	1.64	16.3	0
	CL	1.628	18	2.5
	CL	1.61	21	5
	CL	1.605	21.5	7.5
	CL	1.558	23	10
	CL	1.55	23.8	12.5
Ormeño et al. (2020)	CL	1.694	10.6	0
	CL	1.671	15.8	10
	CL	1.608	17.5	15
	CL	1.55	19.1	20
	CL	1.508	19.8	25

En la Tabla 11, se muestra un resumen de los resultados obtenidos por los distintos autores citados. Se observa que en todos los casos la tendencia es muy similar, la cual corresponde a un incremento del CBR conforme se va creciendo el porcentaje de cenizas de cáscara de arroz, sin embargo, a partir de un porcentaje determinado para el cual se logra el valor máximo de CBR, el valor de este comienza a disminuir. Este incremento se da por diversos factores.

Por un lado, para Ewa et al. (2018) y Kumar Yadav et al. (2017), el incremento se daba gracias a la reacción de la sílice, presente en las cenizas de cáscara de arroz, y el CaOH, presente en las partículas de suelo arcilloso que producía agentes cementantes. Sin

embargo, al seguir aumentando el porcentaje de cenizas, se llegaba a un porcentaje óptimo de estas, el cual se daba cuando la reacción consumía la mayor cantidad de CaOH activo. A partir del cual, el continuar aumentándolo generaba un decrecimiento en el CBR, puesto que ya no se producía reacción alguna y el porcentaje residual de cenizas reducía la unión cementante.

Por otro lado, para Kumar Aditya et al. (2014), es posible incrementar, aún más, el CBR mediante la implementación de técnicas de curado, puesto que el incremento de humedad permite una mejora en el comportamiento del compuesto cementante que se produce en la reacción que se menciona anteriormente.

Tabla 11: Resumen de la variación del CBR para diferentes contenidos de cenizas de cáscara de arroz.

Autor	Tipo de Suelo	Días de Curado	Cenizas de cáscara de arroz (%)	CBR (%)
Ewa et al (2018)	Cross River (CL)	-	0	6.89
		-	10	11.26
		-	25	< 6.89
	Enugu (CL)	-	0	6.89
		-	10	7.89
		-	25	< 6.89
Kumar Yadav et al (2017)	CL	-	0	6.30
		-	7.5	18.83
		-	12.5	9.60
Castro (2017)	CL	-	0	5.00
		-	20	19.4
		-	40	13.00
		-	40	13.00
Kumar Aditya et al (2014)	CL	3	0	2.00
		3	25	11.00
		3	35	9.80
		14	0	2.00
		14	25	12.40
		14	35	11.00
		128	0	2.00
		128	25	13.70
Galvez y Santoyo (2019)	CL	-	0	3.92
		-	15	13.77
		-	15	13.77
Diaz (2018)	CL	-	0	9.70
		-	20	15.20
		-	25	14.80
Llamoga (2017)	CL	-	0	2.85
		-	7	7.80
		-	10	2.00

En consecuencia, es posible afirmar que el porcentaje óptimo para el cual se da el mayor valor de CBR depende de la composición del suelo que se quiera mejorar; es decir, existe una relación directa entre el contenido de CaOH del suelo y el porcentaje óptimo de cenizas. Asimismo, se puede afirmar que la implementación de métodos de curado y el incremento en los días de aplicación de este permiten obtener mejores resultados.

3.3. Propiedades de resistencia

3.3.1. Ensayo de compresión no confinada

Castro (2017) analizó las propiedades de resistencia de una muestra de suelo de baja plasticidad estabilizada con porcentajes de cenizas de cáscara de arroz de 10%, 20%, 30% y 40%, para ello realizó ensayos de compresión no confinada. La resistencia a compresión de la muestra de suelo sin cenizas de cáscara de arroz fue de 6.91 kg/cm². Castro (2017) observó que el comportamiento de resistencia para la muestra de suelo estabilizada con cenizas de cáscara de arroz aumentaba hasta un contenido de 20%, luego del cual el valor de resistencia empezaba a disminuir. A modo de resumen, se muestra la Tabla 12 con los resultados de resistencia a la compresión no confinada.

Tabla 12: Resultados de la resistencia a la compresión no confinada para distintas combinaciones de ceniza de cáscara de arroz y suelo.

Muestras	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
SOIL 100	6.91
S90 - CCA10	8.20
S80 - CCA20	8.77
S70 - CCA30	6.26
S60 - CCA40	4.60

Nota: De *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante*, por Castro (2017).

Kumar Yadav et al. (2017) realizaron ensayos de compresión no confinada en especímenes cilíndricos preparados al contenido óptimo de humedad y a la máxima densidad seca. Estos especímenes después de la compactación fueron colocados en bolsas de polietileno y curados por 7, 14, 28, 56 y 128 días. La mezcla de las cenizas de cáscara de arroz con la muestra de arcilla de baja plasticidad evidenció un considerable incremento del UCS como se observa en la . Por un lado, se observaron mejoras rápidas hasta un 25% del suelo estabilizado con las cenizas, después del cual la mejora disminuyó. Según, Kumar Yadav et al. (2017) la disminución de los valores de UCS después de la

adición del 25% de cenizas se debe a la formación de enlaces débiles entre el suelo y el compuesto cementoso formado. Por otro lado, los investigadores atribuyeron el incremento inicial de la resistencia al alto contenido de dióxido de sílice (72.2%). Este compuesto genera un material puzolánico al reaccionar con el calcio de la arcilla. El material puzolánico fue el encargado de incrementar la resistencia de la mezcla de cenizas de cáscara de arroz y arcilla.

Tabla 13: Resultado del ensayo de compresión no confinada para diferentes porcentajes de cenizas de cáscara de arroz y tiempos de curados.

Porcentaje de cenizas de cáscara de arroz (%)	UCS (kPa)				
	Días de curado				
	7	14	28	56	128
0	83	83	83	83	83
5	115	125	128	136	140
10	126	139	143	151	156
15	135	150	154	160	164
20	142	155	161	167	171
25	144	157	165	170	174
30	141	150	158	167	170
35	119	131	137	153	162

Nota: De Performance evaluation of structural properties for soil stabilized using rice husk ash, por Kumar Yadav et al. (2017).

En un estudio realizado por Eberemu et al. (2013), se realizaron ensayos de compresión no confinada a muestras de un suelo CL con una variación de -2%, 0% +2% y 4% del contenido de humedad óptima y con 24 horas de tiempo de curado. Se ensayaron muestras con distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz de 4%, 8%, 12% y 16%. A continuación, se muestra, en la Tabla 14, un resumen de los resultados de la resistencia a compresión máxima y el contenido de humedad correspondiente (para caso todos los casos una variación de -2% del contenido de humedad óptimo) para cada contenido de cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 14: Resultados de ensayo de compresión no confinada y contenido de humedad correspondiente para distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz.

CCA (%)	Máxima resistencia a compresión no confinada (kN/m ²)	Contenido de humedad (%)
0	884	9.6
4	713	10
8	614	11.5
12	513	16
16	478	16.9

Fuente: The use of compacted tropical clay treated with rice husk ash as a suitable hydraulic barrier material in waste containment applications por Eberemu et al. (2013).

Se observa una disminución de la resistencia a compresión no confinada conforme se añade cenizas de cáscaras de arroz en porcentajes del peso seco del suelo. Ello se debe a que, a mayor contenido de cenizas de cáscaras de arroz, mayor es el contenido óptimo de humedad. Al obtener un mayor contenido de humedad, los tejidos del suelo se desfloculan cada vez más por lo que se reducía de la resistencia al cizallamiento. Así disminuye el factor básico responsable de la resistencia de un suelo: la fricción entre las partículas del suelo en contacto. Además, el aumento de agua dio como resultado una pérdida de cementación entre las partículas, lo que provocó una pérdida de resistencia (es decir una reducción de la resistencia a la cohesión). Sin embargo, con un mayor tiempo de curado la mezcla de suelo arcilloso y cenizas de cáscaras de arroz se hubiera dado la reacción puzolánica debido la presencia de óxido de silicio en las cenizas de cáscara de arroz que puede reaccionar con hidróxido de calcio en el suelo. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Phanikumar & Nagaraju (2018), se realizaron ensayos de compresión no confinada para un suelo arcilloso CH con distintos porcentajes de cenizas de cáscara de arroz: 10%, 20% y 30%. A continuación, se muestra en la Figura 13, los resultados de la resistencia a compresión no confinada para cada porcentaje del añadido y cada tiempo de curado (0, 7 o 28 días).

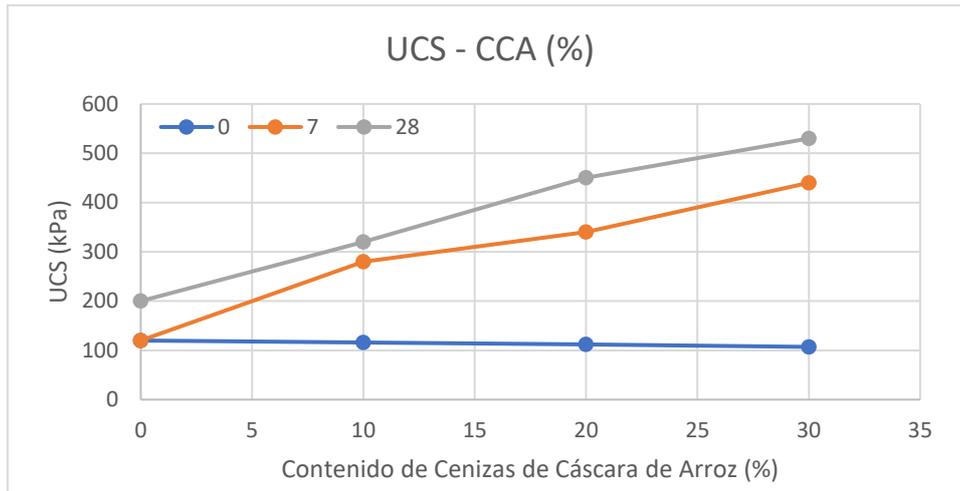


Figura 13: Efectos del porcentaje de cenizas de cáscara de arroz y periodo de curado en la UCS.

Fuente: Modificado de Phanikumar & Nagaraju (2018)

Se observa un gran aumento de la UCS con el aumento del contenido de cenizas de cáscara de arroz para un periodo de curado de 7 días y 28 días. En cambio, para un periodo de curado de 0 días, se tiene una ligera reducción de la UCS conforme añado cenizas de cáscara de arroz. Ello evidencia la importancia del periodo de curado para obtener una mezcla más resistente.

3.3.2. Ensayos Triaxiales

Kumar Yadav et al. (2017) llevaron a cabo ensayos UU en muestras de suelos arcillosos estabilizadas con cenizas de cáscara de arroz. Los investigadores seleccionaron el ensayo UU debido su rapidez y a la gran cantidad de especímenes que debían ser ensayados. Los esfuerzos de confinamiento que utilizaron fueron de 100, 150 y 200 kPa. Los resultados mostraron que el suelo estabilizado con cenizas de cáscara de arroz tuvo una influencia positiva en el esfuerzo desviador. Los mayores valores de esfuerzo desviador se observaron para un contenido de 25% de cenizas; sin embargo, luego del cual, el esfuerzo desviador comenzó a disminuir gradualmente. Asimismo, se observó que la estabilización con cenizas de cáscara de arroz generó un aumento de la cohesión y del ángulo de fricción interna. Por ejemplo, la cohesión de la arcilla de baja plasticidad fue de 29 kPa, para un 25% de cenizas de cáscara de arroz y curados de 7, 14, 28, 56 y 128 días se obtuvo una cohesión de 46, 48, 51, 54 y 56 kPa, respectivamente. Lo mismo ocurrió con el ángulo de fricción interna de la arcilla (10°), el cual para 25% de cenizas

de cáscara de arroz aumentó a 22°, 24°, 25°, 25.5° y 26° para curados de 7, 14, 28, 56 y 128 días, respectivamente.

3.3.3. Análisis de resultados de las propiedades resistentes

Según los datos obtenidos de los ensayos de las investigaciones, para el caso de compresión no confinada, se observa un aumento de la resistencia a medida que se el porcentaje de ceniza de cáscara de arroz respecto del suelo seco también aumenta. Los resultados muestran un crecimiento hasta una combinación de 25% de ceniza de cáscara de arroz con 75% de suelo seco, después de superar dicha relación la resistencia comienza a bajar. Este comportamiento se debe al exceso de ceniza de cáscara de arroz, ya que requiere más humedad para llegar a su densidad óptima y esto genera en consecuencia, que las partículas pierdan cohesión. Por otro lado, se han hecho ensayos haciendo uso del curado de las muestras, lo cual ha demostrado ser un aporte a la resistencia, ya que con solo 7 días de curado se ha llegado a cuadruplicar la resistencia en comparación a no hacer tal proceso. A medida que más días se cura, más resistencia obtiene la muestra, pues el máximo tiempo de curado encontrado fue de 128 días y hasta ese momento siguió ganando resistencia el espécimen. Esto se puede explicar dado que se genera una reacción química en la muestra, que provoca ese comportamiento. Sin embargo, no se vio afectado el porcentaje óptimo de ceniza de cáscara de arroz, pues la máxima resistencia se encontró nuevamente al 25% de contenido. En los ensayos triaxiales se observó el mismo comportamiento llegando a las mismas conclusiones que en los ensayos de compresión simple.

3.4. Propiedades hidráulicas

3.4.1. Ensayo de permeabilidad

Ayininuola & Olaosebikan (2013) analizaron en 4 muestras de suelos estabilizadas cada una con porcentajes de 3%, 5%, 7%, 10% y 15% de cenizas de cáscara de arroz. Las muestras se clasificaron de acuerdo al sistema de clasificación SUCS, estas correspondían a dos muestras SM-SC, una muestra de CL y una muestra de MH, todas estas fueron extraídas de la localidad de Ibadan en Nigeria. Ayininuola & Olaosebikan (2013) realizaron ensayos de permeabilidad en cada una de las muestras, obteniendo como resultado una disminución del coeficiente de permeabilidad (K) conforme se incrementaba el contenido de cenizas de cáscara de arroz. Los autores justificaron la

disminución del coeficiente K debido al intercambio de cationes de Al^{+3} y Ca^{+2} , presentes en las cenizas de cáscara de arroz, con los iones monovalentes de las partículas de suelo. Este intercambio iónico formó enlaces fuertes que no permitían el paso del agua. Asimismo, los investigadores llegaron a la conclusión que las cenizas de cáscara de arroz al poseer productos químicos como el CaO y otros óxidos metálicos, forman hidróxidos al entrar en contacto con el agua, lo cual cementa las partículas del suelo. En consecuencia, la tasa de flujo de agua se reduce debido a la cementación de las partículas. La reducción del coeficiente de permeabilidad se observó principalmente en las muestras con mayor contenido de arena, es decir en las muestras de SM-SC. En cambio, en las muestras de suelo con mayor contenido de finos la disminución de la permeabilidad era mínima. Por ejemplo, las muestras de SM-SC disminuyeron su coeficiente de permeabilidad desde $1.5 \cdot 10^{-6}$ m/s y $0.98 \cdot 10^{-6}$ m/s a $0.70 \cdot 10^{-6}$ m/s y $0.60 \cdot 10^{-6}$ m/s, respectivamente. En cambio, en las muestras de CL y MH, los valores de K disminuyeron desde $0.66 \cdot 10^{-6}$ m/s y $0.56 \cdot 10^{-6}$ m/s a $0.58 \cdot 10^{-6}$ m/s y $0.52 \cdot 10^{-6}$ m/s, respectivamente.

En el estudio realizado por Eberemu et al. (2013), del mismo modo, se obtuvo una reducción a medida que se aumentaba el contenido de cenizas de cáscara de arroz. Esto se debe a que las cenizas permiten un mayor contenido óptimo de humedad. Este ayuda a desflocular la estructura de las partículas reduciendo los espacios vacíos y disminuyendo la capacidad de la conductividad hidráulica. Eberemu et al. (2013) también midieron la contracción volumétrica empleando muestras compactadas utilizando el esfuerzo de compactación de Proctor Modificado. Los resultados indican que para una mayor cantidad de cenizas de cáscara de arroz se obtuvo un mayor contenido de humedad. Esto se debió a que la contracción por secado en suelos de grano fino depende del movimiento de las partículas como resultado de la tensión del agua de los poros desarrollada por los meniscos capilares. Si dos muestras de arcilla tuvieran la misma humedad, pero diferente estructura, la que es la más desfloculada y dispersa se contraerá más, pues posee poros más pequeños que permitirán tensiones capilares mayores y un movimiento relativo más fácil de partículas. Además de ello, cuando se tiene un mayor contenido de agua de moldeo, se tiene más agua en los espacios vacíos, lo que deriva en una mayor contracción al secarse, ya que la contracción volumétrica es proporcional al volumen de agua que sale de los espacios porosos. Lo explicado anteriormente, se evidencia en los resultados de los ensayos de Eberemu et al. (2013), en la que para el

esfuerzo de compactación de Proctor Modificado se obtuvo una contracción volumétrica de 2.4 % para el suelo sin añadir cenizas de cáscara de arroz, y 4.2 % para una mezcla del suelo arcillo con 16% de su peso seco en cenizas de cáscara de arroz.

3.4.2. Análisis de resultados de las propiedades hidráulicas

A partir de los resultados mostrados en cuanto a coeficiente de permeabilidad, se observa que la permeabilidad disminuye conforme aumenta el contenido de cenizas de cáscara de arroz en la muestra de suelo arcilloso de baja plasticidad (CL). Esta disminución es en pequeñas cantidades por tratarse de un suelo cohesivo como es la arcilla, lo cual sería más notoria si se tratase de un suelo granular por ser más permeable. La disminución del coeficiente de permeabilidad fue de un máximo de 12% aproximadamente para la muestra de suelo con un contenido de 15% de cenizas de cáscara de arroz. Esto se debe básicamente por dos razones. Por un lado, los enlaces fuertes que se forman por el intercambio iónico entre los cationes de Al^{+3} y Ca^{+2} presentes en las cenizas de cáscara de arroz con los iones monovalentes de las partículas de suelo no permiten el paso del agua. Por otro lado, la cementación de las partículas por la presencia de óxidos metálicos en contacto con el agua reduce la tasa de flujo. Asimismo, esta disminución de la permeabilidad genera un aumento la humedad óptima de la muestra para su compactación, por lo que se genera un aumento en la contracción volumétrica por contener mayor cantidad de agua en los espacios vacíos.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Las propiedades de las cenizas de cáscara de arroz dependen en gran medida de la temperatura de incineración, el tiempo de combustión, el tiempo de enfriamiento y el tipo de combustión (combustión completa o combustión parcial).

Se concluye que el tipo de ceniza adecuada para la actividad puzolánica es la amorfa en lugar de la cristalina. Ello debido a que las transformaciones estructurales de la sílice afectan la reactividad de la ceniza, ya que cuanto mayor es la superficie de la sílice (estructura cristalina), mayor es la extensión de las reacciones químicas con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Otra conclusión importante corresponde al análisis de los límites de consistencia. Por un lado, el límite líquido en muestras de suelos arcillosos estabilizadas con cenizas de cáscara de arroz disminuye conforme se incrementa la presencia de material estabilizante. Esto se debe a la naturaleza no plástica de las cenizas de cáscara de arroz y a la formación del material cementante de silicatos de calcio. Por otro lado, el límite plástico en materiales arcillosos tiende a aumentar para porcentajes elevados de cenizas de cáscara de arroz. Ello se debe al material cementante que se forma durante la estabilización de arcillas con cenizas de cáscara de arroz.

Con respecto a la gravedad específica, se concluye que, a mayores porcentajes de cenizas de cáscara de arroz, el valor de la gravedad específica en suelos arcillosos estabilizados disminuye. Esto debido al bajo valor de gravedad específica de las cenizas respecto a las arcillas.

En cuanto a la compactación de la mezcla de suelo arcilloso y cenizas de cáscara de arroz depende de la naturaleza plástica del suelo. Sin embargo, se puede deducir un comportamiento general de disminución de la máxima densidad seca y aumento del contenido óptimo de humedad al aumentar el contenido del añadido. Pues, se forman partículas más grandes, con mayor superficie y mayor porosidad. De esta forma, deducimos que la adición de ceniza mejora el suelo, en el sentido que se necesitará menos energía para realizar la compactación. Cabe señalar que se debe controlar el contenido de cenizas de cáscara de arroz, pues al requerir mayor contenido de humedad y reducir la

densidad, se puede reducir la resistencia (se reducen las fuerzas de rozamiento entre las partículas).

De los datos revisados, es posible concluir que el porcentaje óptimo de cenizas de cáscara de arroz es de 15%, aunque este valor podría variar hasta en 10 %, lo cual dependerá de las características y composición de suelo que se requiera mejorar. El valor de CBR se incrementa hasta un valor máximo conforme el porcentaje de cenizas se va acercando al valor óptimo, mencionado antes. Esto se debe a que, al llegar al porcentaje óptimo, se consume la mayor cantidad posible de CaOH activo del suelo y, en consecuencia, se llega al límite de mejora del suelo.

Respecto a los ensayos de compresión no confinada, estos ensayos indican que directamente la propiedad índice mejorada es la de cohesión. Basado en la evidencia, se afirma que el porcentaje óptimo de ceniza de cáscara de arroz respecto del peso seco del suelo es de 25% dado que con dicha cantidad se lograron resistencias máximas. Hasta ese porcentaje toda ceniza añadida incrementa su resistencia, pero al sobrepasarlo, su resistencia comienza a bajar. Esto se debe a que cuando más ceniza se le añade, más humedad requiere la muestra para llegar a su condición óptima. Consecuencia de ello, las partículas del suelo pierden cohesión y, por ende, resistencia. En los ensayos triaxiales se halló el mismo valor óptimo de ceniza de cáscara de arroz que en los ensayos de compresión no confinada, lo cual indica que en ambos casos tiene el mismo comportamiento.

Con respecto a las propiedades hidráulicas, se concluye que, a mayores porcentajes de cenizas de cáscara de arroz en el suelo arcilloso, el valor del coeficiente de permeabilidad disminuye. Esto debido a la cementación de las partículas del suelo con los óxidos metálicos presentes en las cenizas de cáscara de arroz, lo cual reduce la tasa de flujo en el suelo estabilizado y aumenta la contracción volumétrica.

Además, se concluye que curar las muestras con ceniza de cáscara de arroz es un proceso importante, pues este incrementa de manera muy significativa la resistencia y el CBR, con tan solo 7 días se puede llegar a cuadruplicar la resistencia en comparación si no se hiciera dicho proceso. Al incrementar la cantidad de días, sigue subiendo la resistencia, pero a menor velocidad luego de haber transcurrido una semana.

Finalmente, en base al análisis realizado, se concluye que el uso de cenizas de cáscara de arroz es muy óptimo como material estabilizante de una subrasante rural arcillosa de

baja plasticidad. Esto se evidencia con el considerable aumento en el valor del CBR, el cual es una propiedad importante como medida de la capacidad portante del suelo, así como en la influencia en las demás propiedades. Asimismo, esta mejora del CBR se traduce en una disminución del costo del proyecto a diferencia si se realizara otro tipo de estabilización o si se construyera un pavimento como tal, lo cual es importante por tratarse de subrasantes de vías rurales.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda analizar la estabilización de suelos arcillosos considerando temperaturas de incineración de cenizas de cáscara de arroz mayores 900 °C, de esta forma busca determinar el grado de mejora en la estabilización de suelos arcillosos, pero con la sílice cristalina.

En la presente investigación se analizó el uso de cenizas de cáscara de arroz como material puzolánico; sin embargo, se recomienda analizar el uso en conjunto de cal y cenizas de cáscara de arroz como estabilizadores de suelos arcillosos.

Es importante controlar la cantidad de cenizas de cáscara de arroz, pues al añadir se reduce el peso específico y se requiere mayor contenido de humedad, ambos efectos inciden en la resistencia del suelo, pues se reduce la fricción entre las partículas, se pierde cohesión. Aunque, también, se debe considerar la reacción puzolánica que podría darse debido al alto contenido de óxido de silicio en las cenizas de cáscara de arroz. Se debe de alguna forma garantizar las condiciones propicias para la reacción puzolánica.

Un hecho muy importante que se halló en los ensayos de resistencia fue cuando se hizo un proceso de curado, lo cual incrementó aún más la resistencia del suelo. Por ello, se recomienda hacer este proceso el máximo tiempo posible para lograr mejor resultados. Si bien, no es factible realizar el proceso de curado a la subrasante de una vía rural por el limitado presupuesto destinado, este se puede dar de forma natural en temporadas de lluvias en la sierra y selva peruana, así garantizar una mayor incidencia en las mejoras de resistencias de la mezcla de suelo arcilloso y cenizas de cáscara de arroz.

En la presente investigación, se muestran pocas referencias bibliográficas con respecto a la influencia de las cenizas de cáscara de arroz en las propiedades hidráulicas de subrasantes arcillosas. Por ello, se recomienda analizar dicha influencia al estabilizar

suelos para subrasantes, lo cual permitiría realizar un análisis más detallado y con mayor cantidad de resultados para comparar.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayininuola, Gbenga M., and Oluwatobi I. Olaosebikan. 2013. "Influence of Rice Husk Ash on Soil Permeability." *Transnational Journal of Science and Technology* 3(10):29–33.
- Bahar, R., M. Benazzoug, and S. Kenai. 2004. "Performance of Compacted Cement-Stabilised Soil." *Cement and Concrete Composites* 26(7):811–20. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.
- Billong, Ndigui, U. C. Melo, F. Louvet, and D. Njopwouo. 2009. "Properties of Compressed Lateritic Soil Stabilized with a Burnt Clay-Lime Binder: Effect of Mixture Components." *Construction and Building Materials* 23(6):2457–60. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.017.
- Budhu, Muni. 2015. *Soil Mechanics Fundamentals*. edited by J. Wiley and S. Ltd. Chichester: Wiley Blackwell.
- Castro, Axel. 2017. "Universidad Nacional De Ingenieria Facultad De Ingenieria Civil." Universidad Nacional de Ingeniería.
- Craig, R. F., and J. A. Knappett. 2012. *Craig 's Soil Mechanics*. seventh ed. edited by S. Press. New York.
- Díaz, Fernando. 2018. "Mejoramiento de La Subrasante Mediante Ceniza de Cáscara de Arroz En La Carretera Dv San Martin – Lonya Grande, Amazonas 2018." *Universidad César Vallejo*.
- Díaz Vásquez, Fernando. 2018. "Mejoramiento de La Subrasante Mediante Ceniza de Cáscara de Arroz En La Carretera Dv San Martin – Lonya Grande, Amazonas 2018." *Universidad César Vallejo*.
- Eberemu, Adrian O., A. A. Amadi, and K. J. Osinubi. 2012. "The Use of Compacted Tropical Clay Treated with Rice Husk Ash as a Suitable Hydraulic Barrier Material in Waste Containment Applications." *Waste and Biomass Valorization* 4(2):309–23. doi: 10.1007/s12649-012-9161-3.
- Ewa, D., G. A. Akeke, and D. Okoi. 2018. "Influence of Rice Husk Ash Source Variability on Road Subgrade Properties." *Nigerian Journal of Technology* 37(3):582. doi: 10.4314/njt.v37i3.4.
- Galvez, PAOLA, and Jessica Santoyo. 2019. "" Estabilización De Suelos Cohesivos a Nivel De Subrasante Con Ceniza De Cáscara De Arroz ,," Universidad Nacional de Jaén.
- García, Ximena Julieta. 2019. "De Pacaisapa – Ayacucho Utilizando Residuos Industriales Para Evaluarlo En Muro Hipotético de Tierra Estabilizado Mecánicamente (MSEW)." 146.
- Gonzales, Luis, Mercedes Ferrer, Luis Ortuño, and Carlos Oteo. 2002. *Ingeniería Geológica*. Prentice H. edited by S. Ayerra. Madrid.
- Hidalgo, and Saavedra. 2020. "Análisis de La Adición de Cáscara de Arroz y Bagazo de Caña de Azúcar En La Subrasante de Pavimentos Para La Estabilización de Suelos Arcillosos En El Departamento de San Martín."
- Kumar, Aditya, Praveen Kumar, and G. D. Ransingchung. 2014. "Performance Evaluation of

- Structural Properties for Soil Stabilised Using Rice Husk Ash.” *Road Materials and Pavement Design* 15(3):539–53. doi: 10.1080/14680629.2014.891533.
- Kumar Yadav, Anjani, Kumar Gaurav, Roop Kishor, and S. K. Suman. 2017. “Stabilization of Alluvial Soil for Subgrade Using Rice Husk Ash, Sugarcane Bagasse Ash and Cow Dung Ash for Rural Roads.” *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(3):254–61. doi: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001.
- Llamoga Vásquez, Luz Yanet. 2017. “Evaluación Del Potencial de Expansión y Capacidad Portante de Suelos Arcillosos Usados En Subrasantes Al Adicionar Ceniza de Cascarrilla de Arroz, Camajarca 2016.”
- Ministerio de Transportes y comunicaciones. 2014. “Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.” 305.
- MITECO. 2018. “Fabricación de Cal (Emisiones de Proceso).” 1–12.
- Mohammed, Y. Fattah, H. Rahil Falah, and Al-Soudany Kawther, Y. H. 2012. “Improvement of Clayey Soil Characteristics Using Rice Husk Ash.Pdf.” *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 3(1):12–18.
- Mondragon, Darwin, and Omar Cajaleon. 2019. “Facultad de Ingeniería Facultad de Ingeniería.” *Ucv* 68.
- MTC-Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2014. “MANUAL DE CARRETERAS MC-05-14 Sección Suelos y Pavimentos.” 301.
- MTC-Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2016. “Manual Ensayo de Materiales.”
- Ormeño, E., N. Rivas, G. Duran, and M. Soto. 2020. “Stabilization of a Subgrade Composed by Low Plasticity Clay with Rice Husk Ash.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 758(1). doi: 10.1088/1757-899X/758/1/012058.
- Phanikumar, B. R., and T. V. Nagaraju. 2018. “Effect of Fly Ash and Rice Husk Ash on Index and Engineering Properties of Expansive Clays.” *Geotechnical and Geological Engineering* 36(6):3425–36. doi: 10.1007/s10706-018-0544-5.
- Raymundo, José, and Jhonatan Chávez. 2020. “Materiales Alternativos Para Estabilizar Suelos: El Uso de Ceniza de Cáscara de Arroz En Vías de Bajo Tránsito de Piura.” 131–40.
- Rivera, Jhonathan F., Ana Aguirre-Guerrero, Ruby Mejía de Gutiérrez, and Armando Orobio. 2020. “Estabilización Química de Suelos - Materiales Convencionales y Activados Alcalinamente (Revisión).” *Informador Técnico* 84(2):43–67. doi: 10.23850/22565035.2530.
- Roy, Aparna. 2017. “Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Cement.” *International Research Journal of Engineering and Technology(IRJET)* 4(2):49–54.
- Terzaghi, Karl, and Ralph B. Peck. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice Third Edition*. 3rd editio. New York: john wiley & sons.
- Yousif, M., F. Rahil, and K. Y Al-Soudany. 2012. “Improvement of Clayey Soil Characteristics Using Rice Husk Ash.Pdf.” *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 3(1):12–18.