

# Comparison of stabilizers between hydrated lime and rice hull ash for subgrade improvement in clayey soils

Quilla Romero, Nuria de los Angeles<sup>1</sup>; Mamani Mamani, Luis Yovanny<sup>2</sup>; Ibárcena Ibárcena, Valkiria Raquel<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú, [U20247044@utp.edu.pe](mailto:U20247044@utp.edu.pe), [U18204336@utp.edu.pe](mailto:U18204336@utp.edu.pe), [valkiria.ibarcena@gmail.com](mailto:valkiria.ibarcena@gmail.com)

**Abstract**– Unpaved roads with clayey soil when subjected to vehicular loads are the most likely to have problems of resistance and durability, in addition, their high content of fines will cause the emission of dust, contaminating society and the environment. The project aims to analyse the results between the stabilizers of hydrated lime (HL) and rice husk ash (RHA) through geotechnical tests carried out in the laboratory. In this research, to know their physical-mechanical properties, the tests of moisture content, granulometric analysis, Atterberg limits, modified proctor, and CBR were carried out on the soil sample by adding 8% and 12% of hydrated lime and rice husk ash. The results adding RHA, did not present LL and LP, a maximum dry density (DMS) of 1.58 g / cm<sup>3</sup> with an optimal moisture content (CHO) of 19.30% and a CBR of 18.41%, on the other hand, with HL had a LL of 32%, LP of 29% with a IP of 3%, a maximum dry density (DMS) of 1.64 g / cm<sup>3</sup> and an optimal moisture content (CHO) of 20.70% and a CBR of 35.07%. It is concluded that there were improvements with the percentages of addition concerning the sample in its natural state without additions, but the most effective in improving the physical properties of the soil was rice husk ash (RHA) and in the mechanical properties of the soil was hydrated lime (HL) both with an addition of 12%.

**Keywords**-- Rice husk ash, hydrated lime, stabilizer, subgrade, clay soils

# Comparación de estabilizadores entre la cal hidratada y ceniza de cáscara de arroz para optimización de subrasante en suelos arcillosos

Quilla Romero, Nuria de los Angeles<sup>1</sup>; Mamani Mamani, Luis Yovanny<sup>2</sup>; Ibárcena Ibárcena, Valkiria Raquel<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20247044@utp.edu.pe, U18204336@utp.edu.pe, valkiria.ibarcena@gmail.com

**Resumen**– Las carreteras no pavimentadas que presentan un suelo arcilloso al ser sometidos a cargas vehiculares son los más propensos a tener problemas de resistencia y durabilidad además por su alto contenido de finos provocará la emisión de polvo, esto contaminará a la sociedad y al medio ambiente. El objetivo del proyecto es analizar los resultados entre los estabilizadores de cal hidratada (HL) y ceniza de cáscara de arroz (RHA) mediante ensayos geotécnicos realizados en laboratorio. En esta investigación para conocer sus propiedades físico-mecánicas se realizó los ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR a la muestra de suelo adicionando 8% y 12% de cal hidratada y ceniza de cascara de arroz. Los resultados añadiendo RHA, no presentó LL y LP, una densidad máxima seca (DMS) de 1.58g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo (CHO) 19.30% y un CBR del 18.41%, por otro lado, con HL tuvo un LL de 32%, LP de 29% con un IP del 3%, una densidad seca máxima (DMS) de 1.64g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad óptimo (CHO) de 20.70% y un CBR del 35.07%. Se concluye, que hubo mejoras con los porcentajes de adición respecto a la muestra en estado natural sin adiciones, pero el más efectivo en mejorar las propiedades físicas del suelo fue la ceniza de cascara de arroz (RHA) y en las propiedades mecánicas del suelo fue la cal hidratada (HL) ambos con adición del 12%.

**Palabras clave**-- Ceniza de cáscara de arroz, cal hidratada, estabilización, subrasante, suelos arcillosos.

## I. INTRODUCCIÓN

Las carreteras no pavimentadas con suelo arcilloso presentan problemas de inestabilidad, baja resistencia y durabilidad por lo cual se requiere aplicar técnicas de estabilización de suelos [1] ya sea mecánico, físico o químico, para así obtener una mayor capacidad de soporte [2] debido a que cuando contiene presencia de agua altera su plasticidad y cambio volumétrico.

Los métodos químicos de estabilización han ganado mayor interés científico, esto conlleva a que sean estudiados más a profundidad, todo esto gracias a los estabilizadores más comunes como limos y arcillas [2], [3] o la cal y el cemento empleados para mejorar propiedades mecánicas y físicas del suelo [4].

Por otro lado, se ha utilizado la ceniza de cáscara de arroz o también conocido como RHA, un estabilizador químico no común. Para la obtención de la ceniza, la cáscara se quema en un horno que soporte una temperatura de 620 °C, luego se realiza el tamizado utilizando la malla 3 mm, lo pasante es el

producto que se usa como elemento estabilizante ya que esta ceniza contiene casi 85-92% de sílice y alrededor de 3,0% de óxido de aluminio y 1,0% de óxido de hierro. Debido al alto contenido de sílice este puede reemplazar al cemento [5].

Las pruebas realizadas por [6] con RHA fueron de 4%, 9% y 12% para un suelo natural con propiedades mecánicas de CBR de 6,2%, un contenido de humedad óptimo (CHO) de 13,2% y una densidad máxima seca (DMS) de 1,82g/cm<sup>3</sup>, al adicionar los porcentajes de RHA el resultado óptimo fue el de 12% en el que el CBR aumentó entre 14,5% a 66,1%. Lo contrario, ocurrió con [2] quienes adicionaron RHA en 7,5% y 8,5% para un suelo natural con CBR de 10%, un CHO de 11,6% y una DMS de 1,76g/cm<sup>3</sup>. Su resultado fue diferente ya que con menor porcentaje de adición de 7,5% se obtuvo un aumento mayor de 12%. En el caso de [7], se realizaron 7 pruebas con diferencia de 2% en cada una, al aumentar el porcentaje de RHA se determinó que el límite líquido disminuye ligeramente y el límite plástico aumenta entre porcentajes altos, por ende, el límite plástico se reduce, este puede llegar a un 0% de índice de plasticidad provocado por la cementación puzolánica.

Por otro lado, la cal hidratada (HL) al ser un material que proviene de la adición entre el óxido de calcio (cal viva) más agua, da un polvo descolorido, estable y seguro de manipular. Este estabilizador al ser combinado con el suelo brinda propiedades físicas y mecánicas favorables, estos están relacionados con el porcentaje de cal que se usará, el tiempo de curado y el clima, sin embargo, se puede decir que existe cantidades óptimas al agregar, ya que luego de excederla, la mezcla pierde su potencial, resultando solo un aumento de volumen y reduciendo así su resistencia mecánica [8].

En el caso de [9] adicionó HL en 3%, 6%, 9%, para un suelo natural con un CBR de 79% lo cual está por debajo del mínimo que es el 80% para carreteras de bajo volumen, con una DMS de 2,1% y un CHO de 9,2% al adicionar los porcentajes de cal hidratada se obtuvo un aumento del CBR de más del 160% respecto al CHO hubo un aumento insignificante, mientras con DMS se mantuvo. De forma similar [3] adicionó los porcentajes iguales que 9 incluyendo el del 12% en este caso el límite líquido e índice líquido disminuyó mientras que aumento el límite plástico. De forma opuesta, ocurrió en [7], en el cual con el 13 % de adición de HL, se mantuvo el límite

líquido, mientras que el límite plástico aumenta y el índice de plasticidad disminuye.

Por lo tanto, al ver estas diferencias respectivas con RHA y HL, esta investigación plantea realizar un análisis comparativo entre estos estabilizadores en un mismo suelo arcilloso en carreteras carrozables para establecer las diferencias más significativas difíciles de encontrar en investigaciones que se encuentren en un mismo lugar.

Este artículo se estructura en 5 secciones: en la sección 2 se explica la metodología empleada en la investigación, es decir, se describirá la selección de la muestra y los procedimientos de los ensayos realizados. La sección 3 se expone los resultados de los ensayos, mientras que en la sección 4 se realiza el análisis de éstos. Finalmente, en la sección 5 se abordan las conclusiones.

## II. METODOLOGÍA

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se recolectó y se procesó los datos obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio. Por otro lado, su alcance es descriptivo explicativo, puesto que se describió las propiedades físico-mecánicas del suelo y se analizó los efectos del comportamiento del suelo con los estabilizadores. El método es experimental de cuasiexperimento debido a que se manipularon las variables con diferentes dosificaciones de adición de HL y RHA.

La población para el estudio está conformada por carreteras con suelos arcillosos en Perú. Los instrumentos utilizados son las normas ASTM y el manual de MC-05-14 Secciones Suelos y Pavimentos.

El procedimiento que se realizó para este estudio se dividió en 4 fases, la primera es la exploración de campo, la segunda la obtención de la ceniza de cáscara de arroz, el tercero en la elección de la proporción de los agentes estabilizantes y finalmente el procedimiento de los ensayos en laboratorio.

### A. Exploración de campo

Para la exploración del suelo, primeramente, se debe conocer el tipo de carretera que se va a trabajar, para este proyecto fue una carretera de Bajo Volumen de Tránsito teniendo un IMDA  $\leq 200$  veh/día, por lo que se consideró como mínimo 1 calicata x km con una profundidad mínima de 1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto [10].

Para la extracción de la muestra se proyectó una carretera de 1 km en el pueblo de San Antonio, distrito de Yarabamba, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, Perú, donde se realizó 2 puntos de exploración, la primera (C-1) localizada en coordenadas UTM 19 K 238720.00 m E; 8165737.00 m S y la C-2 ubicada en 19 K 238711.00 m E; 8165565.00 m S, como se muestra en la Fig. 1.

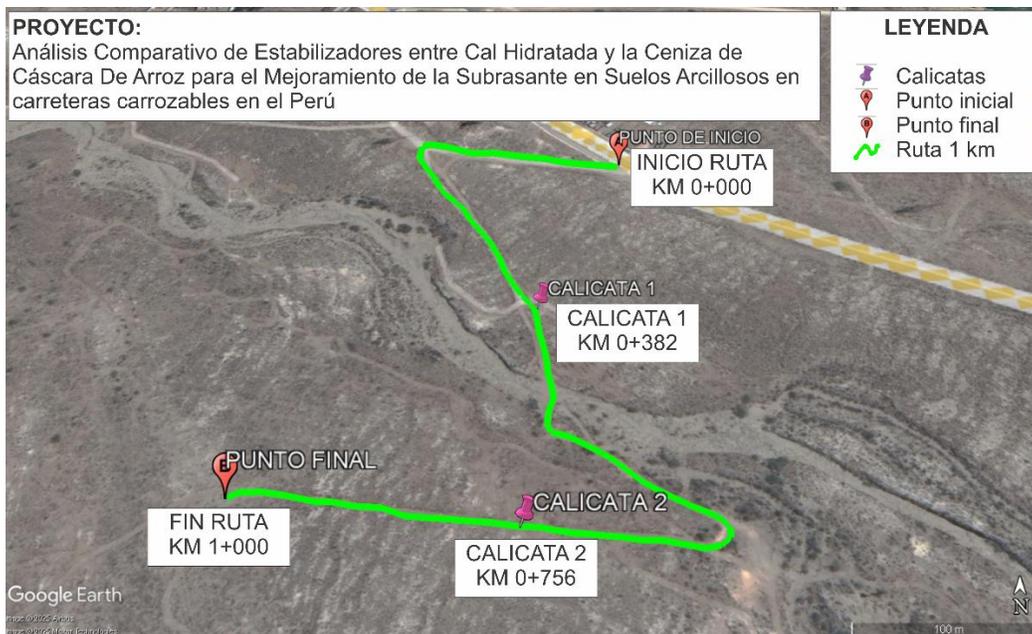


Fig. 1 Ubicación del proyecto de estudio

### B. Extracción de la muestra de suelo

Según [10], para cada punto de exploración se realizó la excavación de 1.50 m, donde se visualizó que tenían 3 estratos por cada punto de exploración, además de no obtener nivel

freático. Para conservar su humedad natural de la muestra se colocaron en bolsas de polietileno para luego ser trasladadas al laboratorio.

Para la elaboración de la ceniza se usó una bandeja de metal en la cual se colocó la cáscara (50 kg) y se encendió el fuego de forma artesanal (Fig. 2), para la retención del humo y el calor concentrado en la bandeja se usó una tapa de metal, la calcinación duró casi 24 horas aproximadamente. De todo el material quemado se obtuvo 12 kg de RHA.



Fig. 2 Calcinación de la cascarilla de arroz

### C. Ensayos de laboratorio

Los ensayos efectuados a los 02 puntos de exploración fueron realizados a las siguientes muestras, considerando el 8% y 12% basándose la dosificación en la revisión literaria:

TABLA I  
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Muestras	Descripción	Ensayos
Suelo100 (*)	Calicata 1-Estrato 1 (C1-E-1)	Proctor Modificado CBR
Suelo92+HL8	C2-E1 al 92% + Cal hidratada al 8%	Contenido de humedad Análisis Granulométrico Límites de consistencia Clasificación SUCS y AASHTO
C1-E2	Calicata 1-Estrato 2	Contenido de humedad Análisis Granulométrico Límites de consistencia Clasificación SUCS y AASHTO
C2-E1	Calicata 2-Estrato 1	
C2-E2	Calicata 2-Estrato 1	
Suelo92+RHA8	C2-E1 al 92% + Ceniza de cáscara de arroz al 8%	Contenido de humedad Análisis Granulométrico Límites de consistencia Clasificación SUCS y AASHTO Proctor modificado CBR
Suelo88+RHA12	C2-E1 al 92% + Ceniza de cáscara de arroz al 12%	
Suelo88+HL12	C2-E1 al 92% + Cal hidratada al 12%	

(\*) Por tener poca muestra de C1-E1, solamente se realizó los ensayos mencionados en la tabla I, no obstante, los técnicos de laboratorio identificaron la muestra de manera visual que tiene las mismas propiedades físicas que la C2-E1.

#### Contenido de Humedad (ASTM D2216-19)

De acuerdo con [11], este ensayo se realizó por el método A en la cual primero se pesó la masa húmeda ( $M_h$ ), en la TABLA II se visualiza la cantidad de masa que se utilizó para cada muestra ensayada.

TABLA II  
MASA HÚMEDA PARA EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra	Masa húmeda (g)
C1-E2	414.02
C2-E1	736.9
C2-E2	360.56
Suelo92+RHA8	156.61
Suelo88+RHA12	245.57
Suelo92+HL8	245.57
Suelo88+HL12	245.57

Luego se llevó a un horno a 110 °C durante 2 horas, después se dejó enfriar por unos 10 minutos y se pesó, nuevamente se llevó al horno por 1 hora adicional y se volvió a pesar, este procedimiento culminó cuando la masa fue constante al 1%, lo cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$Masa\ cte\ (1\%) > \frac{|M_{S1}-M_{S2}|}{M_{S2}} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

$M_{S1}$  = Masa anterior del último secado (g)

$M_{S2}$  = Masa del último secado (g)

Finalmente, cuando se llegó a una masa constante, se determinó el contenido de humedad utilizando la siguiente ecuación:

$$w = \frac{|M_h - M_s|}{M_s} \times 100\% \quad (2)$$

Donde:

$M_h$  = Masa húmeda (g)

$M_s$  = Masa seca final (g)

w = Contenido de humedad (%)

#### Análisis Granulométrico (ASTM D6913/D6913M-17)

Se realizó un tamizado por separado, uno para agregado grueso y otro para fino como se observa en la Tabla III.

TABLA III  
MASA DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Muestra	TM	Masa de ensayo
C1-E2	1 1/2 in.	10 kg
C2-E1	1 1/2 in.	10 kg
C2-E2	3 1/2 in.	20 kg
Suelo92+RHA8	No. 4	500 g
Suelo88+RHA12	No. 4	500 g
Suelo92+HL8	No. 4	500 g
Suelo88+HL12	No. 4	500 g

El procedimiento se realizó por la técnica manual, primeramente, se cuarteó la muestra, luego se eligió el tipo de caso dependiendo de su tamaño máximo (TM), para el caso de las muestras Suelo92+RHA8, Suelo88+RHA12, Suelo92+HL8 y Suelo92+HL12 se les realizó un tamizado simple, es decir, solamente se pasó desde la malla No. 4 hasta la No. 200, mientras que las muestras C1-E2, C2-E1 y C2-E2 es un tamizado compuesto, donde se tamiza por separado, uno pasa

desde 3 in. hasta No. 4 y la otra parte, se tamiza desde el tamiz No. 4 hasta la No. 200, para que finalmente se pesó la masa retenida de cada malla [12].

TABLA IV  
JUEGO DE TAMICES ESTÁNDAR

Tamiz	Abertura (mm)
3 in.	75 mm
2 in.	50 mm
1 ½ in.	37.5 mm
1 in.	25.0 mm
¾ in.	19.0 mm
¼ in.	9.5 mm
No. 4	4.75 mm
No. 10	2.00 µm
No. 20	850 µm
No. 40	425 µm
No. 60	250 µm
No. 100	150 µm
No. 140	106 µm
No. 200	75 µm

### Límites de Atterberg (ASTM D4318-17e1)

#### Límite Líquido

Para cada ensayo se necesitó una muestra de 200 g del material pasante No. 40, se mezcló la muestra con agua destilada para tener una consistencia que requiera 25-35 golpes de la copa para cerrar la ranura (Fig. 3). Se saturó por 16 horas, luego con la espátula se extendió la muestra en la copa y con la ranadura se cortó en el centro de arriba hacia abajo. Luego, con la manivela se levantó y dejó caer hasta que las 2 mitades se juntaron. A lo largo de 13 cm se quitó la muestra con la espátula. Posterior a ello, se registra el número de golpes, la masa húmeda y seca, para finalmente llevarlo al horno como indica [13].



Fig. 3. Extracción de la muestra húmeda de límite líquido en la copa de Casagrande (Suelo100)

#### Límite Plástico

Se utilizó una muestra de 2 g, para cada ensayo de Límite Líquido, con ello se creó una masa esférica entre los dedos para luego alargarla y llegar a los 3.2 de diámetro (Fig. 4). En el caso de que se fracture, se lleva nuevamente al horno para obtener una masa constante [13].



Fig. 4 Muestra del Ensayo de límite plástico (Suelo100)

### Clasificación del suelo (ASTM D2487-17e1 y ASTM D3282-15).

Para conocer el tipo de suelo tanto por Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), se debe conocer los datos del límite líquido, índice de plasticidad (ensayo de límites de Atterberg), porcentaje de gravas y finos, coeficiente de uniformidad y curvatura (ensayo granulométrico).

#### Proctor Modificado (ASTM D1557-12(2021))

El método que se utilizó fue el C de la norma ASTM D1557-12(2021), en el que se requirió 29 kg mínimo de suelo, esta muestra debe tener un tratamiento de reposo por 3 horas. Luego del reposo, esta muestra se dividió en 4, donde cada masa ensayada utilizó 5.9 kg como mínimo de suelo añadiendo una proporción de agua de 2%.

El molde se apoyó en un cimiento rígido, para la compactación se necesitó 5 capas con 56 golpes por cada capa, después al quitar el collarín en la última capa se debe prever que este no sobrepase los 6 mm, el exceso se debe enraizar, se limpia a sus alrededores y finalmente se pesa su masa. De acuerdo con [16] menciona la importancia de que al dar la vuelta al molde sobre el collarín y con el pistón se debe dar unos pequeños golpes para que la muestra se desplace y sea llevada al horno.

#### California Bearing Ratio (CBR) (ASTM D1883-21)

Para este ensayo se utilizó 3 moldes de CBR en total, donde se necesitó una masa de 6 kg de muestra para cada uno,

en la base de cada molde se debe colocar el papel filtro, luego se debe conocer el contenido de humedad óptimo, que es el resultado del ensayo Proctor Modificado, con ello se realiza el mismo procedimiento del Proctor, con la diferencia en el número de golpes, en este caso, para el molde uno se realizó 10 golpes, el segundo, 25 golpes y el tercero, 56 golpes con el apisonador, y en cada molde se debe compactar en 5 capas.

Culminado el Proctor, se fija de vuelta la placa de base colocando otro papel filtro en la parte superior para luego añadir las sobrecargas además de situar el dial con el trípode para el registro colocándolo en cero. Luego deben ser sumergidas por 4 días, pasando ese tiempo se saca el molde del agua y dejar drenar aproximadamente 15 min.

Posteriormente, se midió las lecturas de la presión de 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.200, 0.300, 0.400 y 0.500 in. Para hallar su penetración, esto se realizó con la máquina de CBR y para cada molde se pesó la muestra antes de ingresar al equipo y después [17].

### III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidencian la modificación de las propiedades física mecánicas del suelo con el empleo de RHA y HL.

En la Tabla V se observa que existe un mayor porcentaje de arena y finos que pasan la malla No. 4, es decir, que no contiene mucha cantidad de gravas, por ende, contiene arena, limo y arcilla en su mayor proporción tanto para un suelo natural como la adición de los agentes estabilizantes.

TABLA V  
RESULTADOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Muestra	% Grava	% Arena	% Finos
C1-E2	0,97	76,27	15,84
C2-E1	6,51	57,16	36,33
C2-E2	39,24	38,03	22,74
Suelo92+RHA8	100	58,45	41,55
Suelo88+RHA12	100	59,69	40,31
Suelo92+HL8	100	62,46	37,54
Suelo88+HL12	100	61,80	38,20

En la Tabla VI, para el suelo natural de los estratos se observa que C1-E2 no tiene índice de plasticidad IP, es decir, no presenta arcilla, mientras que C2-E1 y C2-E2 si presentan límites, su IP confirma que tiene presencia de arcilla, comparando tanto el suelo natural con los estabilizadores se visualiza que añadiendo el RHA, este suelo combinado con el estabilizador convirtió el suelo a una arena, eliminó la arcilla que tenía el suelo natural, mientras que con el HL redujo el IP y tiene poca arcilla, y se deduce que añadiendo estos estabilizadores al suelo arcilloso ha reducido extremadamente hasta el punto de no contener límites, y como menciona la norma, si cumple para el caso de del suelo con HL.

TABLA VI  
RESULTADOS DE LÍMITES Y CLASIFICACIÓN

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clasificación
C1-E2	-	NP	NP	-
C2-E1	26	11	15	CL
C2-E2	31	16	15	CL
Suelo92+RHA8	-	NP	NP	-
Suelo88+RHA12	-	NP	NP	-
Suelo92+HL8	33	28	5	ML
Suelo88+HL12	32	29	3	ML

En la Tabla VII, conociendo los datos mencionados anteriormente para hallar el tipo de suelo, primero, para los estratos de las calicatas (suelo natural) se puede afirmar que el suelo contiene arcilla, segundo, añadiendo el agente RHA, ese suelo arcilloso, se mejoró y se convirtió en un suelo arena limoso, mientras que con el aditivo HL, también se convirtió en un suelo arena limoso, pero todavía contiene limo de alta plasticidad.

TABLA VII  
RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN

Muestra	SUCS	AASHTO
C1-E2	SM	A-2-4 (0)
C2-E1	SC (CL)	A-6 (0)
C2-E2	GC (CL)	A-2-6 (0)
Suelo92+RHA8	SM	A-4 (1)
Suelo88+RHA12	SM	A-4 (1)
Suelo92+HL8	SM-SC (ML)	A-4 (1)
Suelo88+HL12	SM (ML)	A-4 (0)

Conociendo las propiedades geotécnicas del suelo natural, se eligió el más crítico para realizar el ensayo del CBR, por ende fueron la C2-E1 y también, como se mencionó en la tabla I, la C1-E1, con ello, según [10], para utilizar los estabilizadores el CBR debe ser menor a 6%, y como se visualiza en la Tabla IX, el CBR al 95% tiene 2.5 y se considera una subrasante muy mala, entonces cumple con el objetivo que es mejorar la subrasante utilizando los estabilizadores. En las Tablas VIII Y IX se presenta los resultados del ensayo del Proctor modificado y CBR para un suelo natural, y añadiendo tanto RHA y HL con un porcentaje de 12%.

TABLA VIII  
RESULTADOS DEL PROCTOR MODIFICADO

Muestra	Suelo100	Suelo88+RHA12	Suelo88+HL12
CHO (%)	12,60	19,30	20,70
DSM (g/cm <sup>3</sup> )	1,91	1,58	1,64

Interpretando los resultados, en la TABLA VIII, se evidencia que, añadiendo un estabilizador al suelo, se ha reducido la DSM mientras que CHO aumentó.

Por otra parte, analizando las Fig. 9, 10 y 11 se visualiza que, añadiendo los estabilizadores, sus curvas cambiaron, mientras que la curva del suelo tiene una tendencia a un suelo cohesivo, agregando los estabilizadores, las curvas de la Fig. 10 y Fig. 11 se transformó a un suelo arenoso.

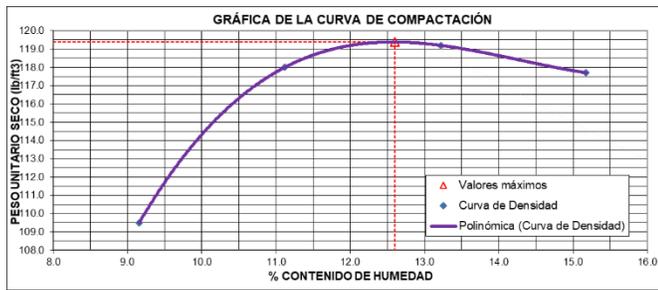


Fig. 9 Gráfica del Proctor Modificado (Suelo100)

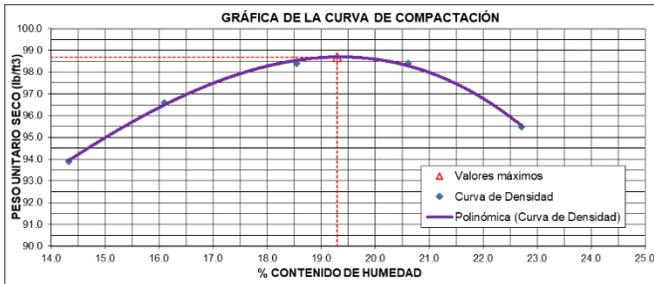


Fig. 10 Gráfica del Proctor Modificado (Suelo88+RHA12)

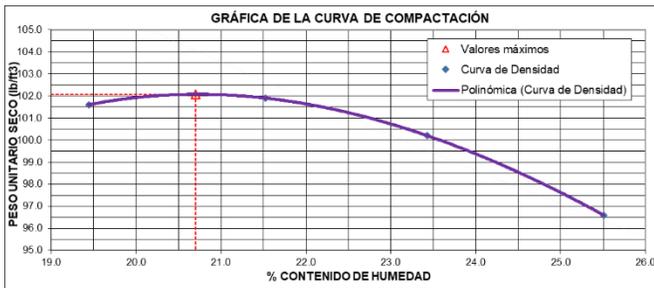


Fig. 11 Gráfica del Proctor Modificado (Suelo88+HL12)

Para el caso del ensayo del CBR, se visualiza en la tabla IX, que el suelo natural que presentaba una subrasante inadecuada, se ha convertido, para el caso de la ceniza en una subrasante buena, mientras que para la cal hidratada es muy buena.

TABLA IX  
RESULTADOS DEL ENSAYO CBR

Muestra	Suelo100	Suelo88+RHA12	Suelo88+HL12
CBR al 95% de la MDS	2,51	18,41	35,07

#### IV. DISCUSIÓN

Se realizaron dos calicatas en el sector de San Antonio, Yarabamba, Arequipa con el fin de realizar el estudio de suelo respecto a sus propiedades físicas y mecánicas, según su granulometría muestra que el suelo natural cuenta con un alto porcentaje de material granular como es la arena y un bajo porcentaje de finos, esto se da porque la geología de la ciudad Arequipa cuenta con un 70% de grava y arena mal graduadas y un 30% de arcillas, limos y gravas y arena bien graduadas según [18], pero al adicionar los estabilizadores ceniza de cascara de arroz y cal hidratada aumentó el porcentaje de finos. Mientras en los artículos [2], [6], muestran pruebas que fueron realizadas

en el departamento de Cajamarca, la granulometría del suelo natural de estos artículos muestra porcentajes altos en finos y un bajo porcentaje de grava y arena esto se da porque la geología de Cajamarca es distinta al de Arequipa.

Con respecto a la plasticidad del suelo es necesario realizar los límites de Atterberg con el fin de hallar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Esta prueba muestra un suelo natural con plasticidad media ya que el índice de plasticidad está en un rango de 7% y 20% según [10]. Al adicionar los estabilizadores ceniza de cascara de arroz (RHA) con porcentajes de 8% y 12%, no presento límites de consistencia en ninguno de estos dos casos, esto se da por varios factores como el tipo de arroz, el proceso de quemado y el lugar de origen por ende se puede analizar que redujo un 100% su IP, la misma deducción presenta [7] ya que con 8% y 12% de adición de RHA también redujo en un 90% a 100% el índice de plasticidad. Mientras HL con un 8% de adición, resulta un aumento del límite líquido en un 6,45% a 26,45%, además un aumento radical del límite plástico que supera el 100% y el índice de plasticidad disminuye en un 33,3 % y con una adición del 12% de HL aumentó el límite líquido entre 6% a 23%, respecto al límite plástico aumentó radicalmente superando el 100% y el índice de plasticidad bajo en un 80% ,por ende se puede analizar que al aumentar el porcentaje de adición este reducirá más el IP ,este estudio muestra una similitud con los resultados de los siguientes artículos realizados por [3], [9] ya que en estas pruebas también se lograron tener un aumento del límite líquido que no supera el 20%, un aumento de limite plástico que superan el 100% y una disminución del índice de plasticidad entre un 30% a 80%.

Respecto al CHO y la DMS se realizó el ensayo Proctor modificado con muestra patrón del 12% de adición para cada caso, con respecto al RHA mostro un aumento del 53,1%, y una reducción de 2.61% respectivamente al igual que los artículos [5], [19], mientras con HL mostró un aumento del 64.2% y una reducción de 2.1% respectivamente al igual que los artículos [20], [21]. Según los ensayos de contenido de humedad, se mostró un aumento mayor con la cal hidratada esto se da porque este aditivo está compuesto con moléculas de agua lo que lo hace más hidrófilo, esto quiere decir que tendrá más afinidad al agua, mientras la ceniza de cascara de arroz tiene una estructura porosa lo cual permite una liberación de agua fácilmente, respecto a la densidad seca máxima (DMS) la reducción fue similar en los dos casos, ya que estos estabilizadores tienen baja densidad y al ser combinado la masa de la muestra disminuye.

Respecto al CBR al 95% de la DMS muestra que el suelo natural está por debajo del 3% por ello que se clasifica como una subrasante inadecuada según [10]. Para esta prueba se tomó como muestra patrón el 12% de adición de ceniza de cascara de arroz y cal hidratada, la ceniza de cascara de arroz (RHA) mostro un aumento de CBR de 2.51% a un 18.41%, mientras la cal hidratada (HL) aumento su CBR de 2.51% a 35.47%, los aumentos de CBR en los dos casos fueron positivos logrando así una subrasante buena y excelente.

Comparando los CBR utilizando los estabilizadores, se puede confirmar que el estabilizante con cal hidratada (HL) tiene mayor resistencia ante la ceniza de cáscara de arroz (RHA).

## V. CONCLUSIONES

Se comprobó que la ceniza de cáscara de arroz (RHA) y la cal hidratada (HL) influyen en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, ya que se encontraron mejoras en reducir el índice de plasticidad con el 8% y 12% de adición para cada caso y el aumento del CBR con adición del 12% para cada caso, mientras con el 8% no se pudo realizar las pruebas.

Según SUCS el suelo natural para la C1-E1 y C2-E1 se clasificaron como arena arcillosa de baja plasticidad SC(CL), mientras que al adicionar los porcentajes de cáscara de arroz (RHA) se clasificó como arena limosa (SM) y al adicionar cal hidratada (HL) se clasificó arena limosa con limo de alta plasticidad SM(ML), respecto a la plasticidad del suelo la adición con ceniza de cáscara de arroz (RHA) fue superior a la cal hidratada por reducir el índice de plasticidad en un 100%, clasificándolo como un suelo exento de arcilla.

La cal hidratada mostro un aumento de contenido de humedad optimo (CHO) en un 64.2% mientras con el RHA aumento en 53.1%, respecto a la densidad seca máxima (DSM) los resultados fueron similares porque los dos bajaron en un 2% a 3%.

El suelo en estado natural, conto con un CBR al 95% de la DMS, un valor de 2.51g/cm<sup>3</sup> mientras que, el suelo con adición de 12 % de RHA, incremento el CBR aun 18.41% y con el HL con adición de 12% el CBR aumentó a un 35.07%, mostrando así un incremento en los dos casos, por ende, la subrasante tendrá una adecuada resistencia y durabilidad, pero el más efectivo fue la cal hidratada (HL) con una diferencia de 17.06%.

Según el análisis, la ceniza cáscara de arroz es la más efectivo en mejorar las propiedades físicas del suelo como la disminución del índice de plasticidad, mientras la cal hidratada fue más efectivo respecto a las propiedades mecánicas como el aumento de CBR del suelo, por ende, estos estabilizadores fueron muy eficientes en mejorar un suelo arcilloso.

El RHA es un material puzolánico que mejora las propiedades físicas y mecánicas en suelos arcillosos por su alto contenido de sílice, este aditivo debe ser usado a menudo ya que la cáscara de arroz es producida en cantidades grandes resultando así un problema de desperdicio, además resulta ser muy económico y fácil de usar.

Hubo limitaciones con respecto a los ensayos de CBR ya que solamente se realizó ensayos de CBR, para el suelo 100%, con RHA al 12% y HL al 12%, lo recomendable, era realizar un CBR por cada estrato, para así conocer mejor la resistencia del suelo, asimismo, no se realizó este ensayo utilizando el 8%,

solamente se conoció sus propiedades físicas, el motivo es la economía, ya que este ensayo es costoso.

Por otro lado, los estratos 3 de la calicata 1 y 2, no se realizó sus ensayos, ya que se identificó tanto en campo y expertos en laboratorio que era un suelo arenoso, por ende, si se realizaba el CBR, el resultado iba a ser alto, por ende, no se iba cumplir con el objetivo del proyecto.

## AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece al Laboratorio G y S S.R.L. por su gran servicio en realizar los ensayos y obtener resultados verídicos para este proyecto de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] A. Kumar Yadav, K. Gaurav, R. Kishor, and S. K. Suman, "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*, vol. 10, no. 3, pp. 254–261, May 2017, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001.
- [2] J. Torres Goicochea and T. E. Guillén Sheen, "Incorporation of Rice Husk Ash for the Improvement of Mechanical Properties of Clay Soils for the Paving of the Santa Rosa de Combayo Highway, Cajamarca," *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, pp. 1–10, Jul. 2023, doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.263.
- [3] A. H. Ahmed, A. M. Hassan, and H. A. Lotfi, "Stabilization of Expansive Sub-grade Soil Using Hydrated Lime and Dolomitic-Limestone By-Product (DLP)," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 1605–1617, Apr. 2020, doi: 10.1007/s10706-019-01115-5.
- [4] F. Mousavi, E. Abdi, and S. A. Borz, "Forest Road Subgrade Improvement by Lime and Sodium Nanoalginate Used as Stabilizers for Clay Soils," *Forests*, vol. 14, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/F14071332.
- [5] B. H. J. Pushpakumara and W. S. W. Mendis, "Suitability of Rice Husk Ash (RHA) with lime as a soil stabilizer in geotechnical applications," *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 13, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s40703-021-00169-w.
- [6] J. L. Piedra Tineo, J. J. Vásquez Acosta, and G. G. Arriola Carrasco, "Evaluación de la estabilización de un suelo expansivo utilizando ceniza de cáscara de arroz, Distrito de Jaén, Cajamarca, Perú," *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 8, no. 2, 2021, doi: 10.26495/icti.v8i2.1914.
- [7] J. A. Silva, M. I. M. da C. V. Bello, and S. R. de M. Ferreira, "Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada," *Journal of Environmental Analysis and Progress*, vol. 5, no. 2, 2020, doi: 10.24221/jeap.5.2.2020.3205.232-256.
- [8] P. K. Corrêa, "Avaliação das características físico-mecânicas de um solo melhorado com cal hidratada: estudo de caso na cidade de Palhoça/SC," 2019. Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/4572>
- [9] K. Tang, F. Zeng, L. Shi, L. Zhu, Z. Chen, and F. Zhang, "Mechanical Behavior of Hydrated-Lime-Liquid-Stabilizer-Treated Granular Lateritic Soils," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 6, p. 5601, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065601.
- [10] Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial, *Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014.
- [11] American Society for Testing and Materials, "ASTM D2216-19 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass," 2019, *Pennsylvania*.
- [12] American Society for Testing and Materials, "ASTM D6913/D6913M-17 Standard Test Methods for Particle-Size

- Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis,” 2021, *Pennsylvania*.
- [13] American Society for Testing and Materials, “ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,” 2018, *Pennsylvania*.
- [14] American Society for Testing and Materials, “ASTM D2487-17e1 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System),” 2020, *Pennsylvania*.
- [15] American Society for Testing and Materials, “ASTM D3282-24 Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes,” 2024, *Pennsylvania*.
- [16] American Society for Testing and Materials, “ASTM D1557-12(2021) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)),” 2021, *Pennsylvania*.
- [17] American Society for Testing and Materials, “ASTM D1883-21 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils,” 2021, *Pennsylvania*.
- [18] Geotecnia Facil, “Geología de Arequipa, Perú y sus riesgos geológicos.” Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: <https://geotecniafacil.com/geologia-arequipa-peru/>
- [19] K. Raja, S. Venkatachalam, K. Vishnuvardhan, R. Siva Rama Krishnan, V. Tamil Selvan, and N. Vetriselvan, “A review on soil stabilization using rice husk ash and lime sludge,” *Mater Today Proc*, vol. 65, pp. 1205–1212, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.178.
- [20] R. P. de Lima, A. E. P. G. de Avila Jacintho, N. C. da S. Forti, and L. L. Pimentel, “Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada,” *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 27, no. 1, p. e13143, May 2022, doi: 10.1590/S1517-707620220001.1343.
- [21] A. Kumar Yadav, K. Gaurav, R. Kishor, and S. K. Suman, “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*, vol. 10, no. 3, pp. 254–261, May 2017, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001.