

COMPARISON OF THE DENSITY OF SANDY SOIL BY ADDING PINE SEED ASH (3%, 6% AND 9%), BY PROCTOR TEST

Pérez Tirado Angel Johan¹; Quiac Huaccha Verónica Lizbeth²; Flores Ramos Doris Madeli³; Chilon Chalan Keico Jhiovana⁴; Tingal Herrera James Franco⁵

¹Universidad Privada del Norte, Cajamarca, angel.perez@upn.edu.pe

^{2,3,4,5}Universidad Privada del Norte, Cajamarca, N00381058@upn.pe, N00380916@upn.pe, N00332322@upn.pe, N00370236@upn.pe

Abstract– This experimental study evaluated the effect of adding pine seed ash (pine nuts) at percentages of 3%, 6%, and 9% on the dry density of a sandy soil using the modified Proctor test. The research stems from the need to find sustainable alternatives in civil engineering that allow for the utilization of plant residues and improve soil performance. The main objective was to determine how the density of sandy soil changes with the incorporation of pine nut ash and to evaluate its potential as a stabilization alternative. The study was conducted using a quantitative approach, employing 16 samples distributed into four experimental groups (0%, 3%, 6%, and 9% ash). The tests were performed according to the NTP 339.141 / ASTM D1557 standard, compacting each mixture in five layers and determining the maximum dry density and optimum moisture content from the resulting compaction curves. The results showed that the average dry density decreased with incorporation: 1.85 g/cm³ without ash, 1.78 g/cm³ with 3%, 1.67 g/cm³ with 6%, and 1.57 g/cm³ with 9%. This demonstrates that in the studied soil, pine nut ash does not improve compaction but rather reduces its capacity to achieve higher density values. It is interpreted that the interaction between the ash and the soil particles can alter the granular structure of the material, affecting how the particles arrange themselves during compaction. Therefore, determining the proportion of lignocellulosic residues is fundamental in sustainable geotechnical applications.

Keywords-- Pine ash, dry density, sandy soil, compaction, Proctor, sustainable stabilization.

COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD DEL SUELO ARENOSO ADICIONANDO CENIZA DE SEMILLAS DE PINO (3%, 6% Y 9%), MEDIANTE ENSAYO PROCTOR

Pérez Tirado Angel Johan¹; Quiac Huaccha Verónica Lizbeth²; Flores Ramos Doris Madeli³; Chilon Chalan Keico Jhiovana⁴; Tingal Herrera James Franco⁵

¹Universidad Privada del Norte, Cajamarca, angel.perez@upn.edu.pe

^{2,3,4,5}Universidad Privada del Norte, Cajamarca, N00381058@upn.pe, N00380916@upn.pe, N00332322@upn.pe, N00370236@upn.pe

Resumen– En este estudio experimental se evaluó el efecto de la adición de ceniza de semillas de pino (piñones) en porcentajes de 3%, 6% y 9% sobre la densidad seca de un suelo arenoso mediante el ensayo Proctor modificado. La investigación surge de la necesidad de buscar alternativas sostenibles en la ingeniería civil que permitan aprovechar residuos vegetales y mejorar el comportamiento de los suelos. El objetivo principal fue determinar cómo varía la densidad del suelo arenoso al incorporar ceniza piñones y evaluar su potencial como alternativa de estabilización. El estudio se desarrolló con un enfoque cuantitativo, utilizando 16 muestras distribuidas en cuatro grupos experimentales (0%, 3%, 6% y 9% de ceniza). Los ensayos se realizaron según la normativa NTP 339.141 / ASTM D1557, compactando cada mezcla en cinco capas y determinando la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad a partir de las curvas de compactación obtenidas. Los resultados mostraron que la densidad seca promedio disminuye con la incorporación: 1.85 g/cm³ sin ceniza, 1.78 g/cm³ con 3%, 1.67 g/cm³ con 6% y 1.57 g/cm³ con 9%. Esto evidencia que en el suelo estudiado, la ceniza de piñones no mejora la compactación, sino que reduce su capacidad para alcanzar mayores valores de densidad. Se interpreta que la interacción entre la ceniza y las partículas del suelo puede alterar la estructura granular del material, afectando la forma en que las partículas se acomodan durante la compactación. Por ello, es fundamental determinar la proporción de residuos lignocelulósicos en aplicaciones geotécnicas sostenibles.

Palabras clave– Ceniza de pino, densidad seca, suelo arenoso, compactación, Proctor, estabilización sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos mediante la adición de cenizas vegetales con capacidad de modificar la estructura granular se ha convertido en una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible dentro de la ingeniería civil. El aprovechamiento de residuos lignocelulósicos provenientes de especies forestales no solo contribuye a la gestión responsable de desechos, sino que también ofrece la posibilidad de mejorar determinadas propiedades físicas y mecánicas del suelo. Entre estos residuos, la ceniza de

semillas de pino (piñones) presenta compuestos minerales reactivos que podrían influir en el comportamiento de suelos arenosos durante los procesos de compactación. Sin embargo, el conocimiento técnico disponible sobre su efecto directo en la densidad seca máxima de suelos arenosos obtenida mediante el ensayo Proctor aún es escaso.

Las cenizas de origen vegetal contienen compuestos minerales que pueden reaccionar o interactuar con las partículas del suelo, influyendo en la manera en que estas se organizan y se acomodan entre sí. Cuando se incorporan al material, no solo rellenan los espacios vacíos entre granos, sino que también pueden generar pequeñas reacciones químicas que ayudan a estabilizar la estructura interna del suelo. Como resultado, se producen cambios en su comportamiento físico, especialmente en aspectos relacionados con la compactación y la estabilidad.

Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de cenizas forestales en suelos expansivos puede disminuir su potencial de hinchamiento, es decir, reducir la tendencia que tienen a aumentar de volumen cuando absorben agua. Además, se ha observado que al utilizar porcentajes intermedios de adición se obtienen mejoras en parámetros vinculados a la compactación, logrando un mejor acomodo de las partículas y un comportamiento más estable en comparación con el suelo sin tratamiento [1]. Esto evidencia que las cenizas vegetales no solo actúan como un material de relleno, sino que pueden modificar de manera significativa la respuesta geotécnica del suelo.

De manera similar, otro estudio sobre cenizas provenientes de biomasa agrícola ha mostrado que al mezclarlas con el suelo se producen cambios importantes en la forma en que este se compacta, específicamente en el ensayo de Proctor, se ha observado que la adición de estos residuos vegetales puede modificar tanto la densidad seca máxima que el suelo alcanza como la cantidad de agua necesaria para lograr su mejor

compactación. Estos resultados indican que la proporción incorporada es importante, ya que pequeñas cantidades pueden favorecer, mientras que porcentajes mayores podrían afectar negativamente su estructura interna y disminuir la eficiencia de compactación [2].

Asimismo, el uso de cenizas obtenidas a partir de las semillas de pino (piñones) ha demostrado que estos residuos pueden influir de manera importante en las propiedades físicas y mecánicas de distintos materiales de construcción. En varias investigaciones se ha observado que su incorporación puede modificar características como la resistencia, el grado de compactación y la estabilidad del material, lo que indica que no se trata solo de un desecho, sino de un recurso con potencial técnico cuando se utiliza adecuadamente [3]. Esto sugiere que las cenizas de origen forestal pueden actuar como un material complementario capaz de alterar el comportamiento de sistemas granulares, mejorando o modificando su desempeño según la cantidad empleada.

Sin embargo, a pesar de estos antecedentes, todavía existe poca información específica sobre cómo se comporta la ceniza de semillas de pino (piñones) cuando se incorpora en suelos arenosos. Esta falta de información técnica hace necesario profundizar en su evaluación experimental, especialmente para comprender si su adición mejora o reduce la eficiencia de compactación del suelo.

La estabilización de suelos es un procedimiento técnico que consiste en modificar las propiedades físicas o mecánicas del material natural con el fin de mejorar su comportamiento en obras de ingeniería. Para evaluar cómo responde el suelo durante el proceso de compactación, se utiliza el ensayo Proctor modificado, el cual permite analizar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca que se alcanza bajo una energía de compactación controlada. A partir de los resultados obtenidos se construye la curva de compactación, que permite identificar dos parámetros fundamentales: la densidad seca máxima (DSM) y el contenido óptimo de humedad (COM).

La densidad seca máxima corresponde al mayor nivel de compactación que puede alcanzar el suelo bajo condiciones específicas de ensayo, reflejando el estado en el que sus partículas se encuentran mejor acomodadas. Por su parte, el contenido óptimo de humedad representa la cantidad de agua necesaria para facilitar ese acomodo de partículas sin que el exceso de humedad afecte la estabilidad del material. En conjunto, estos parámetros permiten definir las condiciones más eficientes de compactación y constituyen una base técnica esencial para el diseño y control de calidad en terraplenes, subrasantes y otras capas estructurales en ingeniería geotécnica [4].

La forma en que el suelo se sostiene y reacciona a las cosas que suceden fuera de él está bastante ligada a lo estable que es

su estructura, lo cual básicamente nos dice lo bien que puede manejar esas fuerzas (Dexter, 1988) En suelos arenosos, Normalmente no encontrarás mucha estabilidad porque los granos pequeños no se mantienen unidos así que, la ciencia del suelo es encontrar mejores maneras de mejorar el terreno jugando con factores hechos por humanos, como agregar cemento o cosas puzolanas, como sugirió Taboada en 2008 en esta situación, El uso de ceniza de biomasa como semillas de pino aparece como una manera de saber lo buena que es la compactación, lo que podría mejorarla (Doran & Parkin, 1994) Este estudio analiza esta reacción examinando el ensayo Proctor, comprobando lo bien que se mantiene el suelo cuando mezclamos en diferentes cantidades de ceniza de pino -3%, 6%, y 9%—para encontrar una mejor manera de mantener el suelo estable [5].

Por eso, la presente investigación se enfoca en analizar el comportamiento de un suelo arenoso al agregar 3%, 6% y 9% de ceniza de semillas de pino mediante el ensayo Proctor modificado, considerando que la modificación de la estructura granular podría mejorar o disminuir la compactabilidad del material. Para abordar esta problemática, se realizó un estudio experimental que detalla el problema, hipótesis y objetivos a continuación.

De acuerdo con lo anteriormente indicado en el presente trabajo de investigación, nos formulamos el siguiente problema de investigación: ¿Cómo varía la densidad seca obtenida mediante el ensayo Proctor en un suelo arenoso al incorporar 3%, 6% y 9% de ceniza de semillas de pino (piñones)?

Se plantea como hipótesis que la incorporación de ceniza de semillas de pino, en diferentes porcentajes, modificará la densidad seca del suelo arenoso mediante el ensayo de Proctor modificado.

Para dar respuesta al problema de investigación, debemos cumplir con el siguiente objetivo general: Determinar la variación de la densidad seca del suelo arenoso al añadir 3 %, 6 % y 9 % de ceniza de semillas de pino (piñones) mediante el ensayo Proctor modificado, con el propósito de identificar el porcentaje de adición que genere la mayor eficiencia de compactación.

Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: a) Determinar y comparar la densidad seca del suelo arenoso sin adición de ceniza (muestra patrón) mediante el ensayo Proctor modificado, b) Determinar y comparar la densidad seca del suelo arenoso al añadir 3 % de ceniza de semillas de pino, c) Determinar y comparar la densidad seca del suelo arenoso al añadir 6 % de ceniza de semillas de pino, d) Determinar y comparar la densidad seca del suelo arenoso al añadir 9 % de ceniza de semillas de pino, e) Contrastar los resultados obtenidos de las mezclas con 3 %, 6 % y 9 % de ceniza respecto a la mezcla patrón (0 % de ceniza), sometidas al

ensayo Proctor, con la finalidad de evaluar el porcentaje que presenta la mayor densidad seca.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, debido a que se manipula la variable independiente (porcentaje de ceniza de semillas de pino de 0%, 3%, 6% y 9%) para evaluar su efecto directo sobre la variable dependiente (densidad seca del suelo arenoso obtenida mediante el ensayo Proctor modificado). Este enfoque permite desarrollar el estudio bajo un proceso sistemático, secuencial y verificable, donde cada fase se construye sobre la anterior, todo bajo condiciones controladas en el laboratorio de la Universidad Privada Del Norte - Cajamarca, asegurando objetividad y fiabilidad.

El diseño experimental que elegimos es un diseño completamente aleatorio, con cuatro condiciones distintas basadas en los porcentajes de ceniza: 0%, 3%, 6% y 9%. Cada ensayo se evaluó aplicando el ensayo Proctor modificado conforme a la norma (NTP 339.141 / ASTM D1557), lo que nos permitió trazar su curva de compactación y determinar la densidad seca máxima. Estos porcentajes se basan en investigaciones previas sobre estabilización con aditivos orgánicos, donde rangos del 3-10% han mostrado mejoras óptimas en suelos arenosos [6].

La población está constituida por el conjunto de muestras representativas del suelo arenoso el cual fue extraído de la zona de estudio en la región de Cajamarca y acondicionado previamente mediante secado al aire y tamizado. La muestra se estableció por conveniencia técnica y está conformada por un total de 16 especímenes, distribuidos en cuatro grupos experimentales: cuatro especímenes sin adición de ceniza (muestra patrón) y 12 especímenes con adiciones del 3 %, 6 % y 9 %, cuatro por cada contenido de ceniza. Esta distribución permite asegurar repetibilidad y comparación uniforme entre los grupos de ensayo.

TABLA I
DISTRIBUCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL
% DE CENIZA NÚMERO DE MUESTRAS

0 %	4
3 %	4
6 %	4
9 %	4
TOTAL	16

Como material estabilizante, utilizamos ceniza de semillas de pino (piñones), obtenida por combustión completa y tamizada en malla N° 100 (0.15 mm), lo que garantiza la fineza necesaria para interactuar adecuadamente con las partículas arenosas. Estudios previos han demostrado que la ceniza de

biomasa, debido a su alto contenido de sílice y óxidos, puede mejorar la compactación de suelos al favorecer la interacción entre partículas y generar una mayor densidad seca [7].

Los equipos utilizados en el desarrollo experimental incluyen balanza digital de precisión, tamiz de $\frac{3}{8}$ pulgadas, Molde cilíndrico para Proctor tipo A, placa base, anillo de extensión, pisón Proctor modificado, papel filtro, espátula, taras y horno



Fig. 1 Etapas del procedimiento

El procedimiento experimental se realizó en cuatro etapas, cada mezcla se elaboró incorporando los porcentajes de ceniza correspondientes y añadiendo agua en incrementos controlados para obtener diferentes puntos en la curva de compactación. Posteriormente, cada muestra fue compactada en el molde en cinco capas uniformes, aplicando 25 golpes por capa. Al finalizar la compactación, se determinó el peso húmedo del molde y se extrajo dos porciones representativas para la determinación del contenido de humedad se colocó al horno. Con esta información se calcularon las densidades secas y se construyeron las curvas de compactación para cada ensayo con diferentes porcentajes.

Para el análisis de datos, recurrimos a métodos cuantitativos usando hojas de cálculo en Excel, procesando las densidades secas para cada nivel de humedad. Para cada ensayo, obtuvimos la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo mediante ajuste gráfico. Finalmente, se compararon los valores obtenidos entre los cuatro grupos experimentales para determinar el porcentaje de ceniza que genera el mayor nivel de compactación.

Este procedimiento garantiza la confiabilidad y replicabilidad del estudio, ya que todas las etapas, desde la preparación del material hasta el análisis estadístico, se ejecutaron siguiendo el protocolo establecido por la normativa técnica.

III. RESULTADOS

TABLA II
Ensayo Proctor Modificado con 3 % de ceniza de piñón

N°	Densidad húmeda (gr/cm³)	Promedio contenido de humedad óptimo (%)	Densidad seca (gr/cm³)
1	1.78	5.12	1.69
2	1.96	6.48	1.84
3	2.10	10.93	1.90
4	1.91	13.57	1.69

Los resultados mostrados en la Tabla II corresponden al ensayo Proctor modificado realizado con una adición del 3 % de ceniza de semillas de pino. Se puede observar que la densidad seca cambia conforme varía el contenido de humedad aplicado en cada muestra, siguiendo el

comportamiento característico de los procesos de compactación. A medida que se incrementa la humedad, la densidad seca aumenta hasta alcanzar un punto máximo, y posteriormente disminuye cuando el contenido de agua supera el nivel óptimo.

Este comportamiento se debe a que el agua facilita el acomodo de las partículas del suelo hasta cierto límite; sin embargo, un exceso de humedad genera separación entre ellas, reduciendo la eficiencia de compactación. A partir de estos datos se construyó la curva de compactación correspondiente, la cual permitió identificar el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima para la mezcla con 3 % de ceniza. En comparación con la muestra sin adición, se aprecia una ligera disminución en la densidad seca, lo que indica que esta dosificación no mejora significativamente la compactación del suelo.

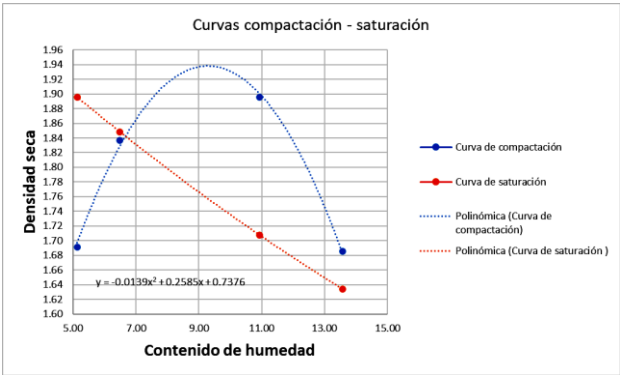


Fig. 2 Curva de compactación – saturación

A partir de la curva de compactación presentada en la Fig. 2, se determinó el contenido óptimo de humedad (COH) y la densidad seca máxima (Ds) correspondientes a la mezcla con 3 % de ceniza. Estos valores representan el punto de mayor eficiencia de compactación obtenido bajo las condiciones del ensayo.

TABLA III
Contenido óptimo de humedad (coh) y densidad seca máxima (ds) – 3 % de ceniza

COH	9.30	%
Ds	1.94	gr/cm³

En la Fig. 3 se presenta un diagrama de barras que permite comparar la densidad seca obtenida para los distintos contenidos de humedad en la mezcla con 3 % de ceniza de piñones.

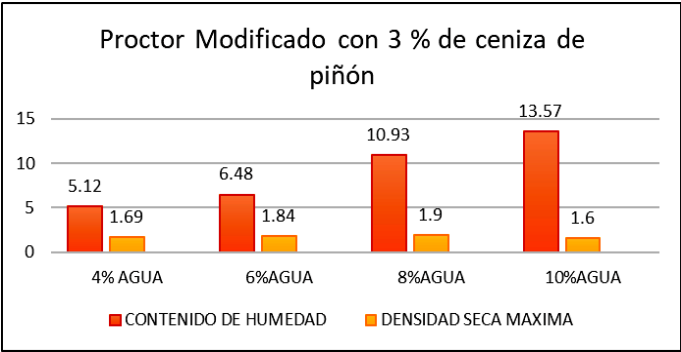


Fig. 3 Diagrama gráfico de barras comparando el 3% de ceniza con diferente % de agua

Concluido el análisis al 3 % de ceniza, se procede a evaluar el comportamiento del suelo con el 6 % de ceniza, para comparar la variación en la densidad seca y el contenido de humedad bajo las mismas condiciones de ensayo.

TABLA IV
Ensayo Proctor Modificado con 6 % de ceniza de piñón

Nº	Densidad húmeda (gr/cm³)	Promedio contenido de humedad óptimo (%)	Densidad seca (gr/cm³)
1	2.03	6.95	1.90
2	1.51	8.09	1.39
3	1.82	9.10	1.67
4	1.83	7.87	1.70

Los resultados presentados en la Tabla IV corresponden al ensayo Proctor modificado realizado con una adición del 6 % de ceniza de piñón. Se observa que la densidad seca varía en función del contenido de humedad aplicado en cada muestra, permitiendo identificar el comportamiento de compactación para este porcentaje. A partir de estos datos se elaboró la curva de compactación correspondiente en la Fig. 4.

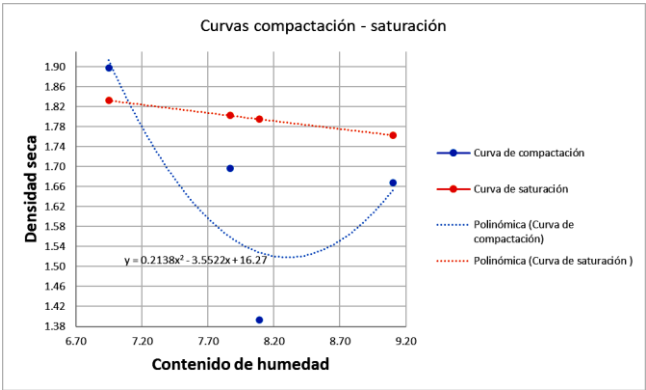


Fig. 4 Curva de compactación – saturación

A partir de la curva de compactación presentada en la Figura 4, se determinaron el contenido óptimo de humedad (COH) y la densidad seca máxima (Ds) de la mezcla con 6 % de ceniza.

TABLA V
Contenido óptimo de humedad (coh) y densidad seca máxima (ds) – 6 % de ceniza

COH	8.31	%
Ds	1.52	gr/cm ³

A continuación, en la Fig. 5 se muestra un diagrama de barras que permite comparar la densidad seca obtenida para los diferentes contenidos de humedad en la mezcla con 6 % de ceniza.

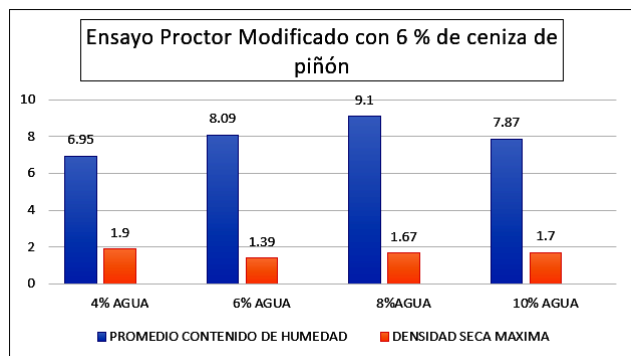


Fig. 5 Diagrama gráfico de barras comparando el 6% de ceniza con diferente % de agua

Luego de analizar el comportamiento de la mezcla con 6 % de ceniza, se continuo a realizar el ensayo correspondiente al 9 %, buscando observar cómo el aumento del contenido de ceniza modifica las condiciones de compactación del suelo.

TABLA VI
Ensayo Proctor Modificado con 9 % de ceniza de piñón

Nº	Densidad húmeda (gr/cm³)	Promedio contenido de humedad óptimo (%)	Densidad seca (gr/cm³)
1	1.56	3.49	1.51
2	1.63	4.43	1.56
3	1.69	1.52	1.67
4	1.74	11.93	1.55

A partir de los resultados obtenidos para la mezcla con 9 % de ceniza, se construyó la curva de compactación, la cual permitió analizar la variación de la densidad seca en función del contenido de humedad aplicado.

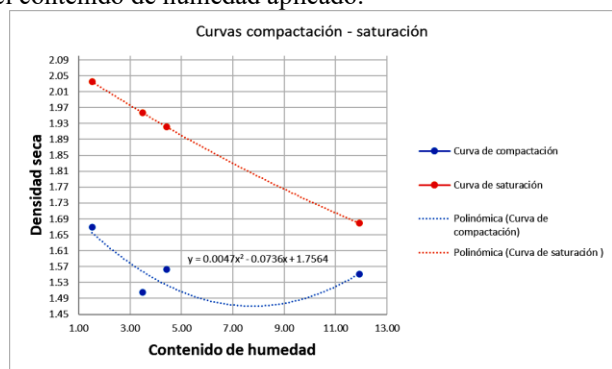


Fig. 6 Curva de compactación – saturación

A partir de la curva de compactación obtenida para la mezcla con 9 % de ceniza, se identificó el contenido óptimo de humedad (COH) y la densidad seca máxima (Ds), valores que corresponden en el cual el material alcanza su mejor grado de compactación bajo la energía aplicada.

TABLA VII
Contenido óptimo de humedad (coh) y densidad seca máxima (ds) – 9 % de ceniza

COH	7.83	%
Ds	1.47	gr/cm ³

Con el fin de analizar de forma comparativa la relación entre la densidad seca máxima y el contenido de humedad, se presentó el diagrama de barras correspondiente a la mezcla con 9 % de ceniza.

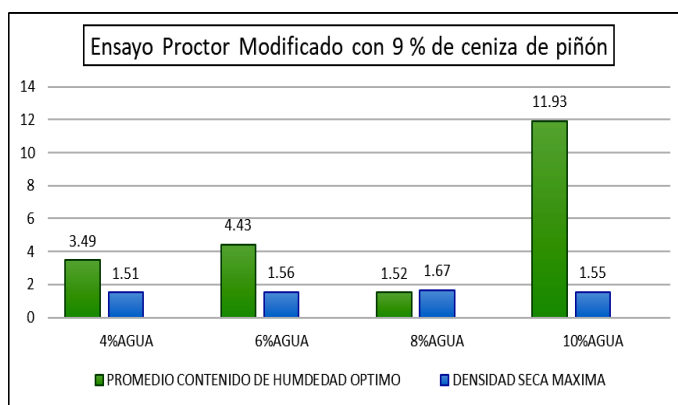


Fig. 7 Diagrama gráfico de barras comparando el 9% de ceniza con diferente % de agua

IV. DISCUSIÓN

Los resultados indican que la densidad seca promedio del suelo arenoso disminuye progresivamente al añadir ceniza: 1.85 g/cm³ sin adición, 1.78 g/cm³ con 3%, 1.67 g/cm³ con 6% y 1.57 g/cm³ con 9%. Contrario a lo esperado, la adición de ceniza no mejoró la compactación del suelo, y dosis mayores redujeron la densidad seca. **En relación con el objetivo general, no se identificó un porcentaje de adición que genere una mayor eficiencia de compactación respecto a la muestra patrón, ya que en todos los casos la densidad seca fue inferior.** Este comportamiento sugiere un efecto no lineal, donde pequeñas cantidades podrían inicialmente favorecer el relleno de vacíos, pero al incrementarse, la ceniza actúa como un material que lubrica o reduce la fricción entre partículas, disminuyendo la eficiencia de compactación.

Comparando con estudios previos sobre estabilización con cenizas de biomasa reportan que el contenido de sílice y

óxidos mejora la densidad y la compactabilidad en ciertos suelos, principalmente arcillosos o mixtos [5]. En nuestro caso, el suelo arenoso mostró una respuesta distinta, probablemente debido a su baja cohesión inicial y tamaño de partícula uniforme, lo que evidencia que los efectos de la ceniza dependen del tipo de suelo y no pueden extrapolarse directamente de estudios con suelos cohesivos. En cuanto a la hipótesis se rechaza, debido a que planteaba que la densidad seca aumentaría con la adición de ceniza y que existiría un porcentaje óptimo, los resultados solo confirman parcialmente el efecto: no se observa incremento en densidad seca respecto a la muestra patrón, y no se identifica un porcentaje de adición que mejore la compactación, contradiciendo la hipótesis planteada. Por tanto, se valida la necesidad de ajustar las expectativas sobre el uso de ceniza de pino en suelos arenosos.

En términos de implicaciones prácticas, los hallazgos sugieren que la ceniza de semillas de pino (piñones), al menos en los porcentajes probados (3%, 6% y 9%), no es un estabilizante eficiente para suelos arenosos en la región de Cajamarca. Sin embargo, el estudio aporta información relevante sobre la interacción suelo-ceniza y sirve para guiar futuros ensayos con otros tipos de ceniza o mezclas de suelos. Entre las limitaciones técnicas se identifican: el reducido tamaño de muestra (16 especímenes), la variabilidad natural del suelo extraído y la falta de caracterización química detallada de la ceniza utilizada, lo que puede afectar la interpretación de resultados y la generalización. Además, no se evaluaron efectos a largo plazo ni resistencia mecánica adicional, lo que restringe la aplicación inmediata en obras reales.

Como recomendaciones, se sugiere explorar ensayos con suelos de diferente granulometría o cohesión, mezclas con otros estabilizantes orgánicos o inorgánicos para evaluar sinergias, caracterización química completa de la ceniza para entender los efectos de compuestos específicos como sílice, óxidos y material orgánico residual, y ensayos a mayor escala y bajo condiciones de campo para validar la aplicabilidad práctica en carreteras, terraplenes y cimentaciones ligeras. En conclusión, la discusión evidencia que, aunque la ceniza de semillas de pino posee compuestos potencialmente estabilizantes, su efecto depende fuertemente del tipo de suelo y de la dosificación. Los resultados contribuyen al conocimiento geotécnico sobre aditivos orgánicos en suelos arenosos y orientan futuras investigaciones hacia optimizar el uso de residuos lignocelulósicos en ingeniería civil sostenible.

V. CONCLUSIONES

- ❖ Se determinó la variación de la densidad seca de un suelo arenoso al añadir 3 %, 6 % y 9 % de ceniza de semillas de pino mediante el ensayo Proctor modificado, cumpliendo con el objetivo general de la investigación.
- ❖ Los resultados evidencian que la densidad seca disminuye progresivamente conforme aumenta el porcentaje de ceniza incorporado, lo que indica que no se mejora la eficiencia de compactación del suelo.
- ❖ No se identificó un porcentaje óptimo de adición que supere la densidad seca de la muestra patrón, por lo que la ceniza de semillas de pino (piñones), en los porcentajes estudiados, no actúa como estabilizante efectivo en suelos arenosos.
- ❖ La hipótesis planteada fue rechazada, ya que no se observó un incremento en la densidad seca con la adición de ceniza, sino una reducción en comparación con el suelo sin tratamiento.
- ❖ El comportamiento obtenido demuestra que la efectividad de las cenizas vegetales depende del tipo de suelo y el porcentaje empleado, por lo que sus resultados no pueden aplicarse de manera directamente a otros tipos de suelos.

VI. REFERENCES

- [1] Farah, R., Nalbantoglu, Z. y Abiodun, AA (2024). Estabilización de suelos expansivos con ceniza de piña. *Global NEST Journal* , 26 (3), 1-8. <https://doi.org/10.30955/gnj.005378>
- [2] “Efectos de la quema controlada de cenizas de cáscara de arroz sobre las propiedades geotécnicas del suelo” (2021) *Journal of Agricultural Engineering* , 52(4). doi: 10.4081/jae.2021.1216 .
- [3] Rodríguez Ortiz, J. P. (2024). Propiedades Mecánicas De Un Suelo Con Adición De Ceniza De Pino Y Eucalipto, Baños Del Inca - Cajamarca
- [4] “ASTM D 1557 Modified Proctor Compaction Test Methods,” *Universidad Privada del Norte*, Documento académico, 2025. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-del-norte/mecanica-de-suelos/astm-d-1557-modified-proctor-compaction-test-methods/147109324>
- [5] Kannan, G., O’Kelly, B. C., & Sujatha, E. R. (2023). Geotechnical investigation of low-plasticity organic soil treated with nano-calcium carbonate. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(2), 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.05.004>
- [6] Marchiori, L., Studart, A., Vitoria Morais, M. ., Albuquerque, A., Andrade Pais, L. ., Eugênia Boscov, M. ., & Cavaleiro, V. (2022). Caracterización Geotécnica de Cenizas de Biomasa para Refuerzo de Suelos y Material de Revestimiento. *Ciencia de materiales KnE*, 7 (1), 219–224. <https://doi.org/10.18502/kms.v7i1.11626>
- [7] Alvarez, C. R., Fernandez, P. L., & Taboada, M. A. (2012). Relacion de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la region Pampeana. *Ciencia del suelo*, 30(2), 173-178.