

IMPROVEMENT OF SANDY SOIL WITH INCLUSION OF LIME (5%, 10% AND 15%): GRANULOMETRIC ANALYSIS, CONSISTENCY LIMITS AND PROCTOR COMPACTION

Pérez Tirado Angel Johan¹; Baltazar Campos Yoberth Orlando²; Cabrejos Morales Eduardo³; Graus Avila Sandy Noemi⁴; Guevara Sánchez Sandro Euler⁵; Vásquez Torres Sindi Nayeli⁶

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

^{2,3,4,5,6}Universidad Privada del Norte, Cajamarca, N00301563@upn.pe, N00430402@upn.pe, N00380543@upn.pe, N00258691@upn.pe, N00450334@upn.pe

Abstract– This study evaluated the effect of hydrated lime (5%, 10%, and 15%) on the improvement of sandy soil from Cajamarca, Peru. Standard laboratory tests were conducted, including sieve analysis (ASTM D421), Atterberg limits, and modified Proctor compaction (ASTM D1557). The results showed that lime addition increases the optimum moisture content (from 12.72% to 13.91%, 15.10%, and 14.25%) while slightly reducing the maximum dry density (from 1.61 to 1.60, 1.58, and 1.60 g/cm³). The 5% lime content proved to be the most efficient, achieving adequate compaction with a moderate increase in moisture. These findings support the use of lime as an economical and sustainable stabilizer for sandy soils.

Keywords– Calcium compounds, Soil compaction, Particle size analysis, Atterberg limits, Sandy soils.

MEJORAMIENTO DE SUELO ARENOSO CON INCLUSIÓN DE CAL (5%, 10% Y 15%): ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, LÍMITES DE CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN PROCTOR

Pérez Tirado Angel Johan¹; Sánchez Villanueva Henry David²; Vera Pampas Miguel Abdi³; Barboza Becerra Luis Alessandro⁴; Chilon Taica Alexis⁵

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

^{2,3,4,5,6}Universidad Privada del Norte, Cajamarca, N00384089@upn.pe, N00458956@upn.pe, N00409940@upn.pe, N00334137@upn.pe

Resumen– Este estudio evaluó el efecto de la cal hidratada (5 %, 10 % y 15 %) en el mejoramiento de un suelo arenoso de Cajamarca, Perú. Se realizaron ensayos de laboratorio según normas ASTM: análisis granulométrico, límites de Atterberg y compactación Proctor modificado. Los resultados muestran que la adición de cal incrementa la humedad óptima (de 12.72 % a 13.91 %, 15.10 % y 14.25 %) y reduce ligeramente la densidad seca máxima (de 1.61 a 1.60, 1.58 y 1.60 g/cm³). El 5 % de cal resultó ser la proporción más eficiente, logrando una adecuada compactación con un incremento moderado de humedad. Se concluye que la cal es una alternativa económica y sostenible para estabilizar suelos arenosos

Palabras clave– Cal, Compactación del suelo, Análisis del tamaño de las partículas, Plasticidad del suelo, Suelo arenoso.

I. INTRODUCCIÓN

¿Cómo influye la adición de cal hidratada en proporciones del 5 %, 10 % y 15 % en el mejoramiento de un suelo arenoso, según los resultados del análisis granulométrico, límites de consistencia y ensayo de compactación Proctor modificado?

En áreas como Cajamarca y otras regiones del norte del Perú, predominan suelos arenosos con baja cohesión y escasa finura, lo que conlleva a una capacidad portante limitada, alta susceptibilidad a la erosión y riesgos elevados de licuación bajo cargas sísmicas o hidráulicas [1]. Esta condición impacta directamente la seguridad y estabilidad de infraestructuras como caminos, cimentaciones y plataformas urbanas, incrementando los costos de mantenimiento y generando posibles fallos estructurales si no se intervienen adecuadamente [2].

El problema específico radica en que estos suelos arenosos reaccionan de manera deficiente ante cargas pesadas y condiciones dinámicas, provocando asentamientos diferenciales y posibles fisuras o colapsos [3]. Estas problemáticas representan un desafío técnico y económico para la ingeniería civil local, ya que la falta de soluciones

eficaces y adaptadas al contexto regional limita el desarrollo sostenible y seguro de proyectos de construcción en zonas arenosas.

En cuanto a los antecedentes científicos, diversos estudios han demostrado que la estabilización de suelos con aditivos como la cal hidratada mejora significativamente sus propiedades mecánicas. Según [1], la adición de agentes cementantes en suelos granulares incrementa la resistencia y modifica favorablemente los parámetros de compactación. Asimismo, [2] reportaron mejoras significativas en suelos arenosos con incorporación de materiales estabilizantes, generando reacciones que producen compuestos cementantes que aumentan la cohesión del material.

Esta investigación surge con el propósito de evaluar y validar el uso de cal hidratada como aditivo estabilizante en suelos arenosos de Cajamarca, determinando sus efectos en propiedades fundamentales mediante ensayos de laboratorio (límites de Atterberg, granulometría y Proctor modificado). El objetivo general es determinar la influencia de la adición de cal hidratada en proporciones del 5%, 10% y 15% en el mejoramiento de un suelo arenoso, mediante análisis granulométrico, límites de consistencia y ensayo de compactación Proctor modificado.

La hipótesis planteada sostiene que la incorporación de cal hidratada en proporciones del 5%, 10% y 15% mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso, aumentando su capacidad portante y reduciendo su susceptibilidad a la deformación, tal como se ha observado en estudios previos de estabilización de suelos granulares [4, 5]. La relevancia de esta investigación radica en proporcionar una alternativa técnica, económica y ecológica para el mejoramiento de suelos en regiones con características geotécnicas similares a las del norte peruano.

II. METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó con el propósito de analizar las propiedades físicas del suelo natural y determinar los cambios que se producen al aplicar un agente estabilizante a base de cal. Para ello, se recolectó una muestra representativa del material base, la cual fue secada al aire y preparada para su posterior análisis en el laboratorio. El procedimiento experimental comprendió tres etapas principales: la caracterización del suelo natural, la determinación de los límites de consistencia y la ejecución de los ensayos de compactación tipo Proctor Modificado. Además, se elaboraron mezclas del suelo con diferentes porcentajes de cal, con el fin de evaluar su efecto en la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad.

Para el desarrollo de los ensayos de laboratorio se utilizaron tamices de aberturas normalizadas (serie ASTM) y una cazoleta metálica para el análisis granulométrico; el equipo Casagrande, conformado por la copa y la cuchara correspondientes, una probeta graduada, una placa de vidrio, una espátula y una caja metálica para los límites de consistencia; además del molde Proctor estándar, un martillo de compactación de 4.54 kg con una altura de caída de 457 mm, una balanza de precisión, una estufa de secado y bandejas metálicas para el ensayo Proctor modificado. Como material estabilizante se empleó cal hidratada de uso industrial, aplicada en tres proporciones distintas en relación con el peso seco del suelo.

Primero, se realizó un análisis granulométrico mediante tamizado en seco con el objetivo de identificar la distribución de tamaños de las partículas. A partir de los resultados obtenidos, se determinaron los coeficientes de uniformidad ($C_u = 7.761$) y de curvatura ($C_c = 0.561$). Según la clasificación SUCS, el suelo corresponde a una arena mal graduada (SP), mientras que conforme a la norma AASHTO se clasifica como A-2-4 (0), lo que indica que el material presenta baja plasticidad y una predominancia de partículas de arena fina.

Coefficiente de uniformidad.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Coefficiente de curvatura

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Donde:

D10 = tamaño de tamiz que deja pasar el 10% del material

D30 = tamaño de tamiz que deja pasar el 30% del material

D60 = tamaño de tamiz que deja pasar el 60% del material

Posteriormente, se determinaron los límites de consistencia del suelo, correspondientes al límite líquido y límite plástico. Para el límite líquido se empleó el método del cono de penetración, mientras que para el límite plástico se utilizó el método del hilo de 3 mm. Los valores obtenidos fueron un límite plástico promedio de 8.7 % y un índice de plasticidad de 4.938 %, lo que indica que el material base presenta un comportamiento de baja plasticidad.

Índice de Plasticidad (IP)

$$IP = LL - LP$$

Donde:

LL: Límite líquido

LP: Límite plástico

Con el propósito de evaluar el impacto del agente estabilizante, se llevaron a cabo ensayos de compactación tipo Proctor Modificado (ASTM D1557), utilizando el Método A, que consiste en compactar el material en cinco capas, aplicando 25 golpes por capa con un martillo de 4.54 kg desde una altura de 457 mm. Se realizaron pruebas tanto del suelo natural (sin estabilizar) como de las mezclas con adición de cal en las tres proporciones establecidas previamente. Para el procesamiento de los resultados, se calcularon los principales parámetros de compactación, incluyendo el peso específico húmedo (γ_h), el contenido de humedad (w) y el peso específico seco (γ_d), mediante las fórmulas que se muestran a continuación:

Peso específico húmedo (γ_h)

$$\gamma_h = \frac{\text{Peso total}}{\text{Volumen del molde}}$$

Contenido de Humedad (w)

$$\gamma_h = \frac{\text{Peso total}}{\text{Volumen del molde}} * 100\%$$

Peso específico seco (γ_d)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \left(\frac{W}{100}\right)}$$

- Suelo natural: 12.72% de humedad óptima y 1.61 g/cm³ de densidad seca.
- Con 5 % de cal: 13.91 % y 1.60 g/cm³.
- Con 10 % de cal: 15.10% y 1.58 g/cm³.
- Con 15 % de cal: 14.25% y 1.60g/cm³.

Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos con antecedentes teóricos y experimentales, con el fin de analizar el comportamiento del suelo estabilizado, haciendo énfasis en la variación de la compactación y en la influencia del contenido de cal sobre la estabilidad volumétrica del material.

TABLA I
RESUMEN DE DATOS INICIALES PARA LA
ELABORACIÓN DEL ENSAYO PROCTOR

I D	Descripción	Und	Muestra 0	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A	Peso inicial de la muestra	kg	2500	2500	2500	2500
B	Porcentaje de adición	%	0	5	10	15
C	Cal	kg	0	125	250	375
D	Peso total	kg	2500	2375	2250	2125
E	Peso por capa	kg	500	500	500	500

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo Proctor.

Los resultados obtenidos de los ensayos fueron organizados y analizados mediante métodos cuantitativos. Se elaboraron las curvas granulométricas, las curvas de compactación y los gráficos que relacionan la densidad seca con el contenido de humedad. Asimismo, se calcularon los coeficientes de uniformidad y curvatura, junto con los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Finalmente, se compararon los resultados del ensayo Proctor modificado entre el suelo natural y las mezclas estabilizadas, permitiendo evaluar el efecto de la cal en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del material.

III. RESULTADOS

Ensayo de granulometría en seco

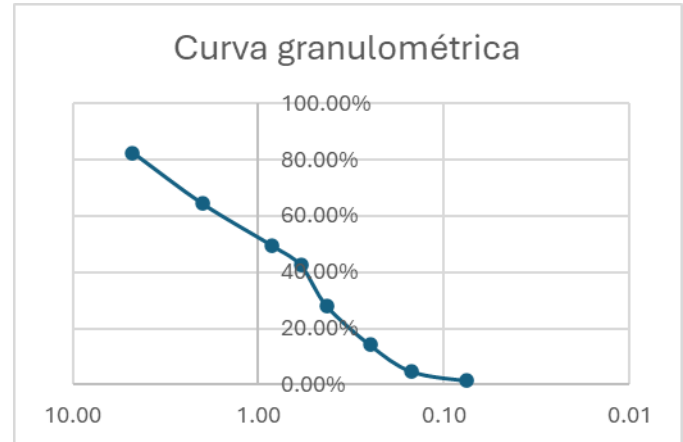
TABLA II
RESUMEN DE DATOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA
EN SECO

MUESTRA: 3000.00 gr					
TAMIZ		PRP (gr)	%RP	%RA	%PASA
Nº	ABERTURA (mm)				
Nº 4	4.75	526	17.54%	17.54%	82.46%
N 10	2.00	543.73	18.13%	35.67%	64.33%
N 20	0.85	441.76	14.73%	50.40%	49.60%
N 30	0.59	215.32	7.18%	57.58%	42.42%
N 40	0.43	428.49	14.29%	71.87%	28.13%
N 60	0.25	418.83	13.97%	85.83%	14.17%
N100	0.15	280.13	9.34%	95.17%	4.83%
N 200	0.075	99.48	3.32%	98.49%	1.51%
CAZOLETA		45.26	1.51%	100.00%	0.00%
TOTAL		2999.00			

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de granulometría en seco.

La tabla II muestra los resultados del ensayo de granulometría en seco, con una muestra de 3000 g. Los resultados evidencian que el material presenta una distribución heterogénea de tamaños, donde la mayor concentración se encuentra en los tamices N° 4 y N° 10 (17.54% y 18.13% respectivamente). El material retenido acumulado hasta el tamiz N° 40 alcanza el 71.87%, indicando una proporción significativa de partículas gruesas. Solo el 1.51% del material pasa el tamiz N° 200, lo que sugiere un bajo contenido de finos en la muestra analizada.

GRÁFICO I
CURVA GRANULOMÉTRICA CON LA DISTRIBUCIÓN DE
PARTÍCULAS



Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de granulometría en seco.

El gráfico I muestra la curva granulométrica con la distribución de partículas, representando el porcentaje que pasa acumulado versus el tamaño de abertura de los tamices en escala logarítmica. La curva presenta una forma característica de un agregado bien graduado, con descensos progresivos a través de los diferentes tamices. Este patrón de distribución es fundamental para determinar la calidad del agregado según la normativa establecida.

Ensayo de límites de consistencia

TABLA III
RESULTADOS DEL ENSAYO DE LIMITE LIQUIDO

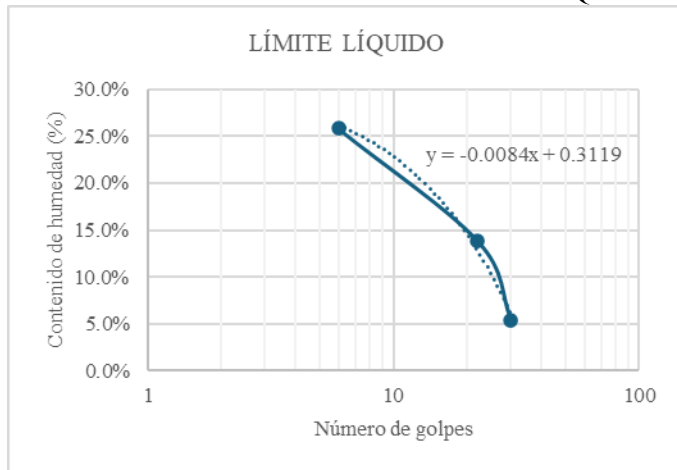
ID	DESCRIPCIÓN	UND	LL1	LL2	LL3
A	Identificación del Recipiente	Nº			
B	Suelo húmedo + Peso del Recipiente	gr	32.34	31.66	31.46
C	Suelo Seco + Peso del Recipiente	gr	31.26	31.11	31.24
D	Peso de la tara	gr	27.08	27.13	27.2
E	Peso del Agua	gr	1.08	0.55	0.22
F	Peso Suelo Seco	gr	4.18	3.98	4.04
G	Número de Golpes	N	6	22	30
H	Contenido de Humedad	%	25.8%	13.8%	5.4%

I	Límite Líquido	%	21.7%	13.6%	5.6%
J	Límite Líquido Promedio	%	13.638%		

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de límite líquido.

La tabla III muestra los resultados del ensayo de límite líquido realizado mediante el aparato de Casagrande. El límite líquido promedio obtenido es de 13.638%, determinado a partir de tres repeticiones con diferentes números de golpes (6, 22 y 30). Los contenidos de humedad correspondientes a cada ensayo fueron 21.7%, 13.6% y 5.6% respectivamente. Este valor representa el contenido de agua en el cual el suelo transita del estado plástico al estado líquido, siendo un parámetro esencial para clasificar el tipo de suelo y determinar su comportamiento ante cambios de humedad.

GRÁFICO II
CURVA DE FLUIDEZ DEL ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO



Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de límite líquido.

El gráfico N° 02 representa la curva de fluidez del ensayo de límite líquido, mostrando la relación entre el número de golpes (escala logarítmica) y el contenido de humedad (escala aritmética). La intersección de la curva con la ordenada correspondiente a 25 golpes proporciona el valor del límite líquido. Este gráfico es fundamental para validar la consistencia de los resultados y asegurar que la tendencia observada sea lineal dentro de los rangos recomendados.

TABLA IV
RESULTADOS DEL ENSAYO DE LIMITE PLÁSTICO

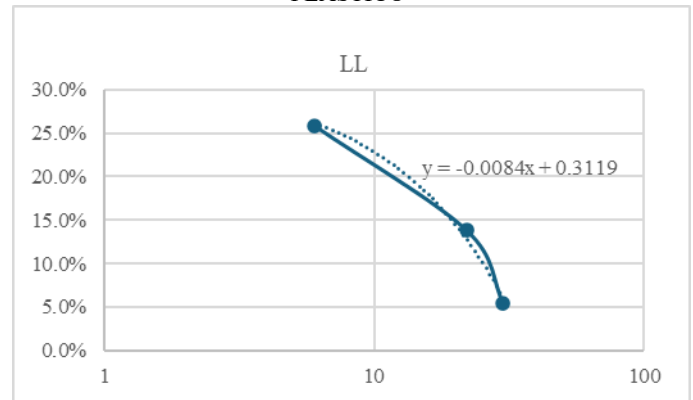
ID	DESCRIPCIÓN	UND		
A	Identificación del recipiente	N°	LP1	LP2
B	Suelo húmedo + Peso del Recipiente	gr	32.51	32.24
C	Suelo Seco + Peso del Recipiente	gr	32.11	31.56
D	Peso de la tara	gr	26	25.3
E	Peso del Agua	gr	0.4	0.68
F	Peso Suelo Seco	gr	6.11	6.26
H	Contenido de Humedad	%	6.5%	10.9%

I	Promedio Límite Plástico	%	8.7%
---	--------------------------	---	------

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de límite plástico.

La tabla IV muestra los resultados del ensayo de límite plástico. El promedio del límite plástico es de 8.7%, determinado a partir de dos repeticiones. El índice de plasticidad (IP), calculado como la diferencia entre el límite líquido (13.638%) y el límite plástico (8.7%), es de aproximadamente 4.94%. Este índice es determinante en la clasificación del suelo según sistemas como SUCS y AASHTO, indicando la capacidad del material para deformarse sin fracturarse.

GRÁFICO III
CURVA DE FLUIDEZ DEL ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO



Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de límite líquido.

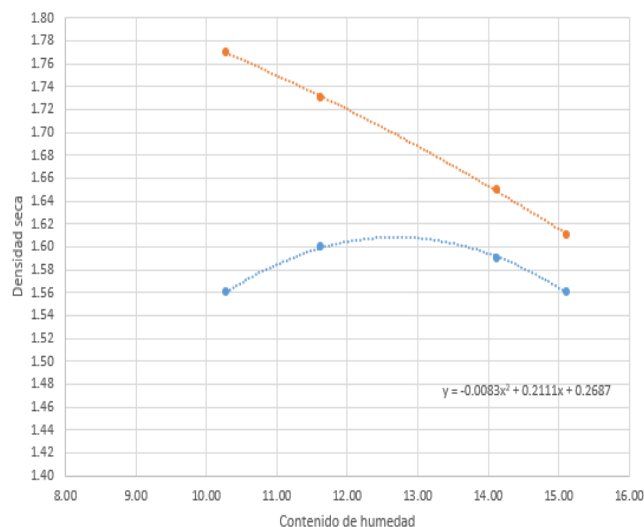
$$I_p = LL - LP$$

$$IP = 13.638 - 8.7 = 4.938\%$$

El gráfico III muestra la Carta de Plasticidad de Casagrande, que permite clasificar los suelos finos en función de su límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP). La ubicación del punto representativo del suelo analizado en esta carta, considerando LL = 13.638% e IP = 4.938%, proporciona información sobre la clasificación y características de compresibilidad del material. Este es uno de los métodos más utilizados internacionalmente para la identificación y clasificación de suelos cohesivos.

Ensayo de Proctor

GRÁFICO IV
ENSAYO DE PROCTOR PATRÓN
Curvas compactación - saturación

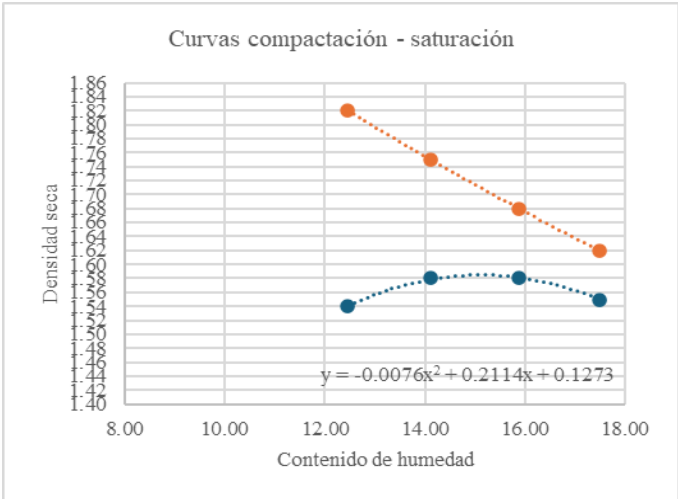


Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de Proctor.

TABLA V		
RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR PATRÓN		
Contenido Optimo de Humedad =	12.72	%
Densidad seca =	1.61	gr/cm³

El gráfico IV representa la curva de compactación del suelo natural sin adición de cal. En el eje horizontal se muestra el contenido de humedad (%), y en el eje vertical la densidad seca (g/cm³). La curva presenta una forma parabólica típica, alcanzando su punto máximo a una densidad seca de 1.61 g/cm³ con una humedad óptima de 12.72 %. Este comportamiento indica que el material requiere una cantidad moderada de agua para lograr su máxima compactación, característica común en suelos arenosos con bajo contenido de finos.

GRÁFICO V
ENSAYO DE PROCTOR CON EL 5% DE CAL

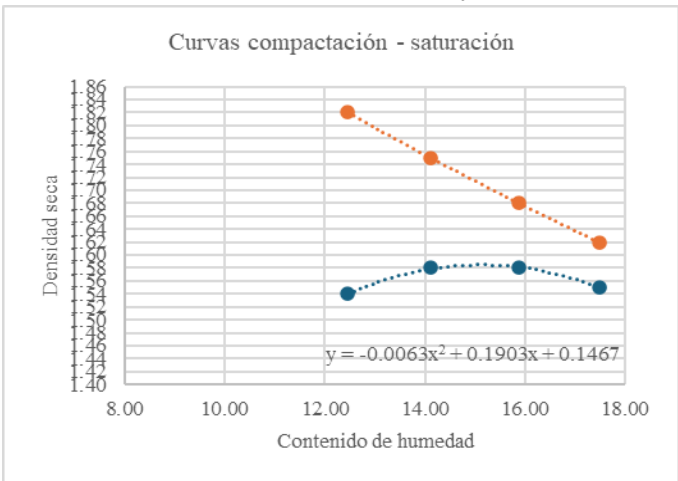


Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de Proctor con el 5% de cal

El gráfico V muestra la curva de compactación del suelo con 5 % de cal. Se observa un ligero incremento en la humedad óptima (13.91 %) y una leve disminución en la densidad seca máxima (1.60 g/cm³) en comparación con el suelo natural. Este comportamiento sugiere que la cal, al reaccionar con el agua y las partículas finas, genera productos cementantes que modifican la estructura del suelo, aumentando la demanda de humedad, pero sin afectar significativamente su compactación. La forma de la curva sigue siendo suave y parabólica, típica de materiales estabilizados.

TABLA VI		
RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR CON EL 5% DE CAL		
Contenido Optimo de Humedad =	13.91	%
Densidad seca =	1.60	gr/cm³

GRÁFICO VI
ENSAYO DE PROCTOR CON EL 10% DE CAL



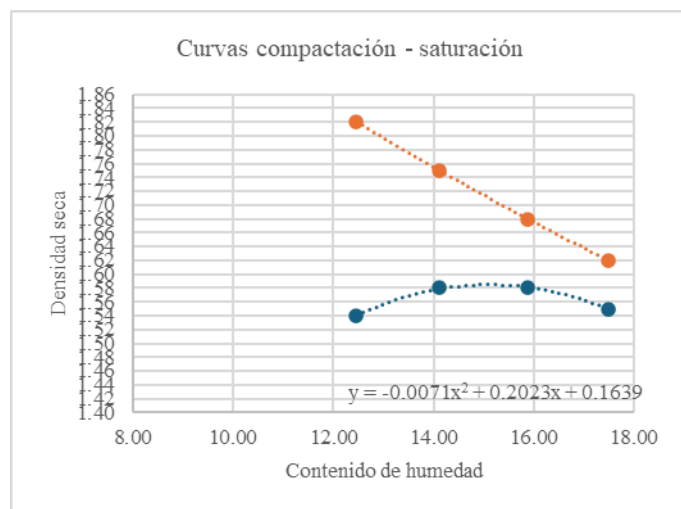
Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de Proctor con el 10% de cal

TABLA VII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR CON EL 10% DE CAL

Contenido Optimo de Humedad =	15.10	%
Densidad seca =	1.58	gr/cm ³

El gráfico VI corresponde a la mezcla con 10 % de cal, donde se evidencia un mayor desplazamiento hacia la derecha de la curva, indicando un aumento en la humedad óptima hasta 15.10 %, mientras que la densidad seca máxima disminuye a 1.58 g/cm³. Este resultado refleja que una mayor proporción de cal provoca una reacción más intensa con el agua, requiriendo más humedad para alcanzar la compactación óptima. No obstante, el exceso de cal puede generar una ligera reducción en la densificación del material debido al aumento del volumen de los productos de hidratación y la floculación de las partículas.

GRÁFICO VII
ENSAYO DE PROCTOR CON EL 15% DE CAL



Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de los datos obtenidos en el laboratorio para el ensayo de Proctor con el 15% de cal.

TABLA VII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR CON EL 15% DE CAL

Contenido Optimo de Humedad =	14.25	%
Densidad seca =	1.60	gr/cm ³

El gráfico VII muestra la curva de compactación del suelo con 15 % de cal. En este caso, la humedad óptima disminuye levemente a 14.25 % y la densidad seca máxima se mantiene en 1.60 g/cm³. Esto sugiere que a partir de esta proporción la cal ya no contribuye significativamente a mejorar la

compactación, evidenciando una posible saturación del material. El comportamiento del suelo estabilizado con altos porcentajes de cal tiende a estabilizarse, lo que coincide con estudios previos que señalan que el incremento excesivo del aditivo no siempre mejora la densificación.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la incorporación de cal modificó las propiedades del suelo arenoso, aumentando la humedad óptima y disminuyendo levemente la densidad seca máxima. Con 5 % de cal se logró una densidad de 1.60 g/cm³ y una humedad óptima de 13.91 %, evidenciando una mejor compactación. Al aumentar al 10 %, la densidad bajó a 1.58 g/cm³ y la humedad subió a 15.10 %, reflejando una reacción más intensa entre la cal, el agua y los minerales del suelo. Con 15 % de cal la densidad volvió a 1.60 g/cm³ y la humedad descendió a 14.25 %, indicando que el material alcanzó su punto de saturación y ya no presenta mejoras adicionales.

Estos resultados son coherentes con lo expuesto por [1] y [2], quienes demostraron que porcentajes entre 5 % y 7 % de cal generan los mayores beneficios en suelos arenosos. Del mismo modo, [5] señala que al superar el 10 % de cal, las reacciones químicas se estabilizan y no se producen incrementos apreciables en la densificación. En este estudio, el 15 % confirma dicha tendencia, manteniendo valores similares al 5 %, lo que evidencia un equilibrio químico y estructural en el suelo.

La estabilización con cal entre 5 % y 10 % mejora la cohesión, reduce la plasticidad y optimiza la humedad de trabajo del suelo arenoso, lo que la convierte en una opción adecuada para obras viales, cimentaciones y plataformas. Aunque el 15 % de cal no incrementa la densidad, proporciona una estructura más rígida y estable, útil en aplicaciones que requieren mayor resistencia y menor deformabilidad. En conjunto, la cal se presenta como una alternativa técnica, económica y sostenible para mejorar suelos arenosos en zonas del norte del Perú.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales confirman la hipótesis planteada: la incorporación de cal hidratada modifica significativamente las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos, optimizando su compactación y cohesión estructural. La adición de cal en proporciones del 5 %, 10 % y 15 % generó variaciones consistentes en los parámetros del ensayo Proctor, evidenciando un aumento progresivo en la humedad óptima y una leve reducción en la densidad seca máxima. Estos cambios validan el efecto estabilizador de la cal sobre la estructura granular del suelo, mejorando su comportamiento frente a cargas y condiciones de humedad.

La proporción del 5 % de cal resultó ser la más eficiente, al mantener una densidad seca de 1.60 g/cm³ y una humedad óptima de 13.91 %, logrando el equilibrio ideal entre compactación, plasticidad y trabajabilidad. A medida que se incrementó el contenido de cal (10 % y 15 %), se observó una disminución leve de la densidad y una estabilización en la respuesta mecánica, lo que evidencia una posible saturación del medio granular. Este hallazgo demuestra que adicionar más del 10 % de cal no mejora significativamente la compactación ni la estabilidad estructural del suelo. Los resultados concuerdan con estudios de [3] y [4], quienes sostienen que el rango óptimo de estabilización con cal para suelos arenosos se encuentra entre 5 % y 7 %. Asimismo, se reafirma lo señalado por [7], quienes reportaron que un exceso de aditivo no contribuye a mejoras adicionales en densificación. Esta concordancia con la literatura valida la confiabilidad técnica del procedimiento y la solidez de los resultados obtenidos.

La estabilización con cal representa una alternativa técnica, económica y ambientalmente sostenible para el mejoramiento de suelos arenosos en regiones del norte del Perú. Su aplicación entre 5 % y 10 % es recomendable en la construcción de bases y subbases viales, plataformas de cimentación y rellenos estructurales, al mejorar la capacidad portante, reducir la plasticidad y aumentar la durabilidad frente a la erosión y las cargas dinámicas. Además, su bajo costo y disponibilidad local la convierten en una opción viable para proyectos de infraestructura sostenible.

La investigación se centró en ensayos de laboratorio con mediciones a corto plazo, sin considerar el efecto del tiempo de curado o las variaciones ambientales. Por ello, se recomienda que futuros trabajos incorporen ensayos de resistencia a la compresión no confinada, pruebas de durabilidad a diferentes edades de curado y modelos de comportamiento bajo cargas cíclicas o sísmicas, a fin de consolidar un marco técnico más amplio sobre la estabilización de suelos arenosos con cal.

Asimismo, es importante destacar que el comportamiento observado en la variación de la humedad óptima y la densidad seca máxima puede explicarse por los procesos fisicoquímicos propios de la estabilización con cal, tales como la floculación-aglomeración y las reacciones puzolánicas. En una primera etapa, la cal provoca la reducción de la plasticidad y la reordenación de las partículas del suelo, lo que incrementa la demanda de agua; posteriormente, se generan compuestos cementantes como los silicatos y aluminatos de calcio hidratados (CSH y CAH), responsables del aumento de la rigidez y resistencia del material a largo plazo. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado por y también por estudios clásicos como los de Bell (1996) y Little (1995), quienes indican que el contenido óptimo de cal depende directamente de la mineralogía del suelo y que un

exceso puede generar una estructura más frágil debido a la presencia de cal no reaccionada. En ese sentido, los resultados obtenidos no solo confirman la eficiencia del 5 % de cal en términos de compactación inmediata, sino que también sugieren que este porcentaje podría representar un equilibrio adecuado entre trabajabilidad y desarrollo de resistencia mecánica a mediano y largo plazo, especialmente en suelos arenosos con bajo contenido de finos como el analizado.

VI. REFERENCIAS

- [1] Moale Quispe, A. B., & Rivera Justo, E. J. (2019). *Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica* (Trabajo de investigación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú). Repositorio Académico – Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://hdl.handle.net/10757/648846>
- [2] Estabilización de suelos arenosos. Requejo Carrillo, R. 2021. Universidad San Sebastián, Chile/Perú. Disponible en PDF: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/20.500.12802/7706/1/Requejo%20Carrillo%20Ricardo%20Sahir.pdf>
- [3] Estabilización de suelos arcillosos con adición de cal y cenizas de cáscara de cebada. Tesis, Perú, 2021. Disponible en PDF: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/20.500.12894/10352/1/T010_623846_23_T.pdf
- [4] Incorporación de cal y arena para el mejoramiento de la subrasante de suelos granulares – Proctor modificado. Becerra G. & Cárdenas, 2023. Tesis Profesional, Universidad Tecnológica del Perú. Disponible en PDF: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/20.500.12867/7573/1/R.Becerra_G.Cardenas_Tesis_Titulo_Profesional_2023.pdf
- [5] Suelos tratados “in situ” con cal. España, 2010. Documento técnico, Asociación de Obras Públicas de Andalucía. Disponible en PDF: https://www.aopandalucia.es/inetfiles/area_tecnica/calidad/Recomendaciones_y_pliegos_varios/Recomendaciones_tratamiento_suelos_con_cal_Version_Diciembre_2010.pdf
- [6] Influencia de estabilizantes económicos en la mejora de suelos en Perú. Huamán Rojas, 2024. Universidad Continental. Disponible en PDF: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15130/1/IV_FIN_105_TE_Huaman_Rojas_2024.pdf
- [7] Hernández Gonzales, L. A. (2016). *Consolidación química de suelos con Cal y cemento Portland en tramos viales a más de 2300 msnm, aplicando las normas del MTC-2014, caso: Camino vecinal La Libertad-Miraflores-Burgos, Huarango, San Ignacio, Cajamarca*.
- [8] Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237.
- [9] Little, D. N. (1995). *Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. National Lime Association.
- [10] Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1972). *Soil Stabilization: Principles and Practice*. Butterworths.