

## Estabilización superficial de suelos derivados de cenizas volcánicas con cemento en taludes de infraestructura vial

### Superficial stabilization of volcanic-ash derived soils with cement on road infrastructure slopes

Lucio G. Cruz-Velasco<sup>1</sup>   Sara M. Gómez-Rodríguez<sup>1</sup>  Yelaman F. Valbuena-Muñoz<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Grupo Invest. GEPAV, Popayán Colombia

## Resumen

**Introducción:** el presente proyecto aborda una alternativa para mitigar comportamientos desfavorables típicos de los suelos derivados de cenizas volcánicas (SDCV), especialmente en su configuración como talud. Estos terrenos suelen presentar desafíos en su estabilidad, lo que limita su uso en proyectos de ingeniería. La propuesta busca generar una solución que permita estabilizar estos suelos en zonas que requieran su utilización en proyectos de infraestructura.

**Objetivo:** el objetivo del estudio fue evaluar la efectividad de las mezclas de SDCV con cemento como una solución para mejorar la resistencia y la estabilidad de estos suelos, especialmente en condiciones de intemperismo extremo, como podría ocurrir en taludes.

**Metodología:** se realizaron pruebas de laboratorio utilizando muestras de SDCV mezcladas con cemento en diferentes proporciones. Estas muestras fueron sometidas a ciclos que simulan la acción del intemperismo para evaluar su comportamiento en condiciones extremas. Los ensayos incluyeron pruebas de resistencia a la compresión no confinada y análisis de pérdida de masa debido a la inmersión y el secado, lo que permite simular los efectos del desgaste en el tiempo.

**Resultados:** los resultados mostraron un aumento significativo en la resistencia de los SDCV tratados con cemento, con un incremento de hasta un 400% en la resistencia a la compresión no confinada cuando se utilizó un 12-15% de cemento. Además, las muestras demostraron un buen comportamiento ante el intemperismo, especialmente aquellas con un 15% de cemento, que presentaron una pérdida de masa aceptable tras los ciclos de inmersión y secado.

**Conclusiones:** el tratamiento de SDCV con cemento en proporciones de entre 13% y 15% mejora notablemente las propiedades físicas de los suelos, aumentando su resistencia y durabilidad. Este mejoramiento hace viable el uso de estos suelos en la construcción de infraestructuras viales, particularmente en la estabilización de taludes, ofreciendo una alternativa efectiva para proyectos en zonas con suelos derivados de cenizas volcánicas en disciplinas técnicas.

**Palabras clave:** cemento portland, Cenizas volcánicas, Estabilización, Resistencia, Talud.

## Abstract

**Introduction:** this project proposes an alternative solution to mitigate unfavorable behaviors typical of volcanic ash-derived soils (VADS), especially in slope configurations. These soils often present stability challenges, limiting their use in engineering projects. The aim is to provide a solution that allows for the stabilization of such soils in areas where they are needed for infrastructure projects.

**Objective:** the goal of this study was to evaluate the effectiveness of VADS-cement mixtures as a solution to improve the strength and stability of these soils, particularly under extreme weathering conditions, such as those occurring in slopes.

**Methodology:** laboratory tests were conducted using VADS samples mixed with cement in various proportions. These samples were subjected to cycles simulating the action of weathering to assess their behavior under extreme conditions. The tests included unconfined compressive strength and mass loss analysis due to immersion and drying cycles, simulating the effects of wear over time.

**Results:** the results showed a significant increase in the strength of VADS treated with cement, with an increase of up to 400% in unconfined compressive strength when using 12-15% cement. Additionally, the samples showed good performance under weathering conditions, especially those with 15% cement, which exhibited an acceptable mass loss after the immersion and drying cycles.

**Conclusions:** treating VADS with cement in proportions ranging from 13% to 15% significantly improves the physical properties of the soils, enhancing their strength and durability. This improvement makes it feasible to use these soils in the construction of infrastructure, particularly in slope stabilization, offering an effective alternative for projects in areas with volcanic ash-derived soils.

**Keywords:** Portland cement, Volcanic ash, Stabilization, Strength, Slope.

### How to cite?

Cruz-Velazco, L.G., Gómez-Rodríguez, S.M., Valbuena-Muñoz, Y.F. Estabilización superficial de suelos derivados de cenizas volcánicas con cemento en taludes de infraestructura vial. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(1) e-20114444

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i1.14444>

Recibido: 23-09-24

Evaluado: 5-11-24

Aceptado: 13-12-24

Online: 30-01-25



### Correspondence

lucruz@unicauca.edu.co



### Contribución a la literatura.

¿Por qué se hizo?

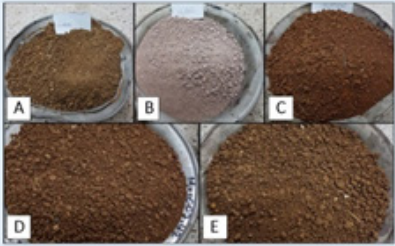
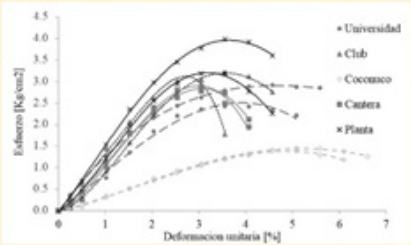
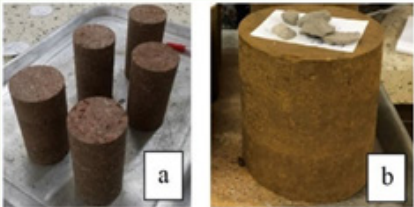
La investigación ofrece una solución alternativa para reducir algunos comportamientos desfavorables de los suelos derivados de cenizas volcánicas (SDCV), principalmente en configuración de pendientes para generar la posibilidad de estabilización de suelos en áreas donde los proyectos de ingeniería lo requieran, especialmente en la región andina colombiana, donde la infraestructura se basa en suelos derivados de cenizas volcánicas.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

La mejora del SDCV modificado con cemento (en porcentajes entre el 13% y el 15%) marca una diferencia notoria entre un antes y un después en aspectos como el aumento de la resistencia y un cambio positivo en características físicas como la durabilidad.

¿Qué resultados proporcionan estos?

Esto demuestra una opción factible que puede ser utilizada en obras de infraestructura vial, estabilización de suelos y principalmente en taludes de suelo.

OBJETIVES	METHODOLOGY	RESULTS
<p>This project aims to propose an alternative solution to limit some unfavorable behaviors typical of volcanic ash-derived soils (SDCV).</p> 	 <p>Laboratory samples of SDCV and cement mixtures were evaluated and subjected to cycles that simulate the action of weathering.</p>	<p>The results obtained show a notorious increase in strength for the cement-treated SDCV, with an increase in unconfined compressive strength tests, as well as good weathering behavior</p> 

## Introducción

En todo el mundo, los suelos derivados de cenizas volcánicas o Andisoles (1)(2) se distribuyen exclusivamente en regiones donde se encuentran volcanes activos o recientemente extintos. Dichos depósitos llenan aproximadamente el 0,84% de la superficie del planeta (3). Ese valor puede incrementarse considerando la actividad volcánica mundial, como ejemplo, la erupción volcánica de 2021 en Tajogaite (España), con un depósito de cenizas estimado de 200 millones de m<sup>3</sup> (4).

La mayoría de las cenizas volcánicas se originan en volcanes piroclásticos y/o epiclásticos. El piroclástico (2) incluye los materiales depositados a partir de corrientes densas, que son bombas balísticas cercanas a la fuente y ampliamente propagadas por las ramificaciones. Por otro lado, los epiclásticos son aquellos materiales volcánicos que han sido retirados y se reponen sobre el paisaje después de su emplazamiento, entre ellos: los escombros volcánicos procedentes de avalanchas, el flujo de escombros volcánicos, la inundación en el flanco del volcán y la tefra propagada por los vientos. La mayoría de los suelos volcánicos, las inundaciones tuvieron su origen en la tefra, que es el producto volcánico más extendido (5).

La estructura de las cenizas volcánicas está en función del contenido húmedo y controla su comportamiento geomecánico, que forma parte de los materiales alofónicos (2), un grupo especial de aluviones de origen volcánico (6). Los andisoles se clasifican en dos tipos: alofónicos, en ambientes con precipitaciones menores a 1000 mm/año; y no alofónico en lugares con precipitaciones superiores a 1000 mm/año (7).

Las cenizas volcánicas contribuyen a la formación de minerales arcillosos cuya presencia es casi exclusiva en ese tipo de suelos. Las propiedades, la estructura y la morfología de estos minerales determinan las tasas de propiedades del suelo y la forma en que interactúan con otras partículas, el aire o los líquidos (8).

La cantidad de agua en SDCV está controlada en gran medida por su permeabilidad (k) y sería la dinámica hídrica uno de los principales mecanismos encargados de determinar sus propiedades mecánicas para este tipo de suelos (9). El SDCV, en general, presenta valores de permeabilidad superiores en comparación con otros suelos, debido a las características microestructurales de las partículas arcillosas y a la estructura abierta.

Los terrenos con estructura abierta suelen tener uniones de cementación (10), que se define como un sistema que une las partículas del suelo formando agregados (8) y es consecuencia de la precipitación y cristalización de un determinado compuesto (11). Sin embargo, tales uniones de cemento son susceptibles a la desintegración debido a la carga y al proceso de humidificación, que finalmente lleva a la matriz del suelo al colapso, fenómeno conocido como descementación (10).

La estabilización del suelo se ha convertido en una opción viable para mejorar las propiedades del suelo y su resiliencia ante diferentes cargas mecánicas o condiciones ambientales (12). Entre las diferentes técnicas de estabilización se encuentra la cemento-suelo, que consiste en agregar un determinado porcentaje de cemento al suelo con el propósito de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. El cemento se mezcla estrechamente con el suelo produciendo una estructura compacta (13) que da como resultado un material denso en el que el cemento favorecerá la resistencia

mecánica haciéndolo más estable a la intemperie y a las condiciones ambientales a las que podría estar expuesto (13).

Los estabilizadores a base de cemento funcionan bien independientemente del tipo de suelo, los minerales y las condiciones de curado. En general, el incremento de la cantidad de cemento mezcla cemento-suelo aumenta la resistencia no confinada y el nivel óptimo de humedad (14,15). Además, el suelo estabilizado con cemento ofrece eficiencia económica y una baja huella de carbono (16).

En los últimos años, algunos estudios han determinado la tasa óptima de cemento para la estabilización del suelo con valores de alrededor del 5-7% para el bajo porcentaje de cemento (17) y el 10% cuando se utiliza la estabilización, y el 7% para la nanomejora (19) y el 9% para los valores más bajos de resistencia a la compresión no confinada – UCS (20). Asimismo, la regulación internacional, -Portland Cement Association (PCA)- menciona que para los suelos A-7-5, el porcentaje óptimo suele estar entre el 10% y el 16% (21).

Los suelos SDCV, en la Región Andina colombiana, representan entre el 4,5 % (2) y el 8,5 % (7) del territorio y se caracterizan generalmente por suelos residuales formados por la alteración y reacción entre las cenizas volcánicas y la roca. Cuando este tipo de suelos son sometidos a los intensos ciclos de humedad y chamuscado, típicos de las zonas tropicales, se produce un cambio en la estructura y en el estado de esfuerzo debido a la amplia gama de humedad, provocando uno de los mayores problemas en la geotecnología vial conocido como la inestabilidad del talud, manifestada como superficial, o inestabilidad por descamación superficial.

Las pendientes frecuentes causadas por descamación superficial ocurren en las carreteras colombianas, específicamente en áreas donde el suelo se deriva de suelos de cenizas volcánicas que corresponden a un 11,6% del territorio colombiano (23). La reestabilización de los mismos implica una gran inversión económica y futuros trabajos de mantenimiento durante la construcción y durante la etapa de servicio. Por lo tanto, considerando que la Región Andina se ubica en el centro del país siendo la más poblada y económicamente activa (24), la idea de una investigación para descubrir el comportamiento de los suelos volcánicos-cenizas se originó en Popayán (Cauca), con el propósito de evaluar la efectividad de las mezclas para mejorar el conocimiento respecto a dicho material, así como buscar alternativas para el asentamiento de suelos hechos con este tipo de suelos.

## Metodología

El procedimiento para la presente investigación se inició con la geolocalización de 5 sitios de prueba en el área urbana de Popayán. Los estudios realizados por IGAC (25) y SGC (26) muestran los suelos de la región y su patrón de distribución en el Cauca y dentro de Popayán. Este aspecto representa una gran ayuda para ayudar a definir aquellos lugares que podrían tener SDCV. Siendo el estudio de una estabilización superficial, las muestras fueron extraídas de taludes erosionados a no más de 10 metros de profundidad, permitiendo que la profundidad óptima representara el SDCV. En la tabla 1 se muestran las coordenadas geográficas de alta cordillera de los lugares ensayados correspondientes a la distancia al talud erosionado (tomada desde la coronación del talud hasta la superficie de la excavación), y la profundidad aproximada.

Tabla 1. Ubicación de las muestras

Ubicación	Coordenadas		Profundidad aproximada
	Norte	Oeste	
Universidad	2°26'48.34"N	76°35'49.91"O	De 8,55 m a 9 m
Club	2°27'56.97"N	76°34'40.21"O	De 4 m a 4,5 m
Coconuco	2°26'51.13"N	76°35'12.65"O	De 2,5 m a 3,5 m
Cantera	2°26'45.38"N	76°35'17.16"O	De 4,5 m a 5 m
Central eléctrica	2°25'54.28"N	76°37'14.92"O	De 8 m a 10 m

Posteriormente, el trabajo de campo se llevó a cabo siguiendo las especificaciones técnicas sugeridas por el manual INVIAS 2013 (27) sobre el manejo de muestras. Tabla 2.

Tabla 2. Guía normativa para la manipulación de muestras

Regulación	Actividad
I.N.V.E-103	Conservación y transporte de muestras de suelo.
I.N.V.E-104	Muestras de suelo de muestras inalteradas de suelo superficial.
I.N.V.E-105	Muestras de suelo a través de tubos de capa delgada.
I.N.V.E-148	CBR De suelos compactados en laboratorio y sobre muestras limpias.

Tres sesiones de muestreo. En primer lugar, se tomaron dos muestras de cada ubicación utilizando *tubos Shelby* (capas delgadas) para la extracción de "muestras inalteradas" para trabajar en los cálculos de compresión simple (kPa), evaluación de humedad natural (w%), permeabilidad (k) y masa unitaria (kg/m<sup>3</sup>).

Para el segundo ensayo, se utilizó un molde Proctor Standar de 6 pulgadas, utilizando mazo y anillo de corte y para la extracción del cilindro CBR (%) de la muestra inalterada. Un total de 2 bloques para cada uno.

Finalmente, la muestra alterada se realizó mediante el uso de sacos. Dichos especímenes se utilizarían para ensayos como: límites de Attenberg, gravedad específica, granulometría, compactación, compresión simple de muestra remodelada y estabilización de cemento.

#### Ensayos caracterizados de muestras en estado natural y sin estabilización

Después de colocar las muestras, se estudiaron las propiedades del suelo relevantes para el estudio. En la tabla 3 se muestra un resumen de dichos ensayos en muestras de estadio natural.

Tabla 3. Ensayos con muestras de estado originales

Juicio	Norma	Número de ensayos por muestra de suelo
<b>Humedad de la muestra original</b>	I.N.V.E – 122	2
<b>Ensayo CBR in situ</b>	I.N.V.E – 169	2
<b>Ensayo CBR in situ con inmersión.</b>	I.N.V.E – 169	2
<b>Ensayo de compresión no confinada en estado N</b>	I.N.V.E – 152	3-5
<b>Ensayo de permeabilidad</b>	I.N.V.E – 151	2
<b>Determinación de límites de consistencia.</b>	I.N.V.E – 126	2
	I.N.V.E – 127	
	I.N.V.E – 125	
<b>Determinación de la gravedad específica</b>	I.N.V.E – 128	1
<b>Granulometría para 200 de caudal y 200 de retención</b>	I.N.V.E – 123	1
	I.N.V.E – 106	
<b>Ensayo de compactación</b>	I.N.V.E – 141	1
<b>Ensayo de compresión simple a muestra remodelada sin cemento</b>	I.N.V.E – 152	2

#### Ensayo para muestras con estabilización de cemento

En la tabla 4 se muestran las normas utilizadas para el ensayo y los métodos seguidos para seleccionar el contenido de cemento adecuado.

Tabla 4. Regulaciones extranjeras utilizadas para probar la estabilización y ensayos para muestras estabilizadas

Regulación	Descripción
<b>D 558 – 96</b>	Métodos de ensayo estándar para las relaciones humedad-densidad de las mezclas de suelo y cemento
<b>PCA</b>	Manual de Laboratorio de Suelo-Cemento

Para desarrollar el método experimental se utilizó cemento Portland Tipo 1 (28) o Tipo UG (uso general). La selección porcentual de cemento a estudiar se basó en la clasificación ASSHTO (Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte) (28) y en los requisitos de la Asociación de Cemento Portland (29). A continuación, se establecieron las propiedades para la compactación de la mezcla cemento-suelo, para lo cual se calculó la densidad seca máxima y el contenido húmedo óptimo para cada localidad para lograr un adecuado trabajo de muestras de ensayo.

Una vez finalizado el modelado, las muestras fueron sometidas a curado en una sala de control durante 7 días con una humedad relativa no menor al 96%, para posteriormente pasar por un procedimiento húmedo y seco. Las muestras se sumergieron en agua durante 6 horas y luego se secaron en horno a 71 °C (160 °F) durante 42 horas, y finalmente se retiraron para proceder a las pruebas de compresión y durabilidad no confinadas.

## Resultados

### Caracterización de muestras en estado original

En total se encontraron 5 muestras de suelos tomadas de la zona urbana de Popayán como se muestra en la tabla 5 y figura 1.

Tabla 5. Descripción del suelo

Ubicación	Color	Profundidad	Descripción
<b>Universidad</b>	Marrón rojizo	(0,5 m-1 m)	Suelo muy seco y bastante duro al tacto
<b>Club de Campo</b>	Brownies de malva	(0,5 m-1 m)	Suelos con alto contenido de materia orgánica
<b>Coconuco</b>	Marrón oscuro	(0,5 m-1 m)	Suelo blando, con plasticidad
<b>Cantera</b>	Marrón claro	(0,5 m-1 m)	Suelo muy heterogéneo, cambios de textura, color y dureza
<b>Central eléctrica</b>	Marrón oscuro	(0,5 m-1 m)	Suelo con una variedad de rayas que significan diferentes componentes.

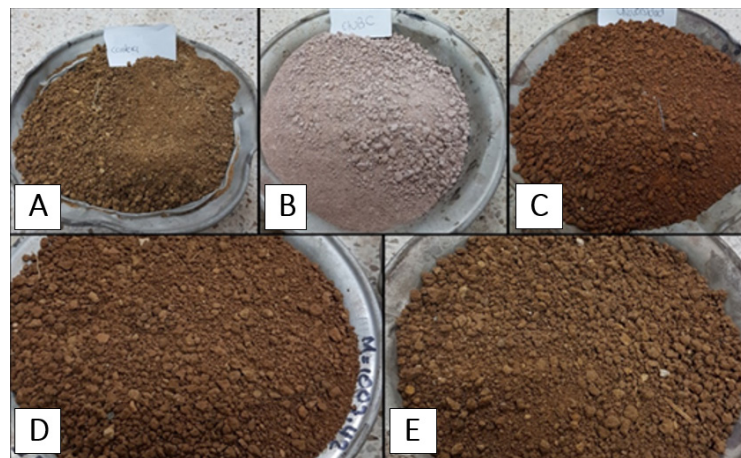


Figura 1. Especímenes de suelo: A) Cantera; B) Club Campestre; C) Universidad; D) Coconuco; e) Central eléctrica. Fuente: elaboración propia

### Gravedad específica (Gs)

Los resultados obtenidos de los tres ensayos realizados para cada muestra de suelo a lo largo de su análisis estadístico se exhiben en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la prueba de gravedad específica para diferentes especímenes

	Universidad	Club	Coconuco	Cantera	Central eléctrica
<b>Gravedad específica</b>	2.794	2.668	2.776	2.784	2.780

Es visible una pequeña diferencia entre los resultados observados con respecto a la prueba de gravedad específica, luego el grado de confianza es alto y los resultados son una representación

precisa de la propiedad estudiada. En general, la varianza presenta una diferencia mínima entre el factor estudiado para cada tipo de suelo en Popayán: con una desviación estándar de 0,0464 y un coeficiente de varianza de 1,6798. Tal resultado podría significar la composición mineral similar debido a que las condiciones de evolución pedogenética son similares para la región del suelo.

### Humedad natural (% en peso)

Los resultados presentados en la tabla 7 muestran un alto porcentaje de agua natural en cuanto a la formación de agua de mezcla, lo que demuestra indirectamente la alta retención de agua en suelos arcillosos e invita a considerar el agua como un elemento que podría afectar la resistencia satisfactoria de las muestras de suelo-cemento.

Tabla 7. Promedio de humedad para cada espécimen

	<b>Universidad</b>	<b>Club</b>	<b>Coconuco</b>	<b>Cantera</b>	<b>Central eléctrica</b>
<b>Humedad (%)</b>	63.08	32.81	52.52	54.33	55.91

### Ensayo in situ de CBR (California Bearing Ratio) y unidad de masa (densidad aparente)

El CBR mide la respuesta del suelo en su conjunto en función de las fuerzas externas. Sin embargo, esta prueba también sirve como una forma indirecta de calcular algunas otras propiedades que contribuyen a comprender su capacidad portante en cuanto a masa unitaria y cizallamiento. Tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos para la prueba CBR en estado natural con análisis estadístico (Masas unitarias)

	<b>Universidad</b>	<b>Club</b>	<b>Coconuco</b>	<b>Cantera</b>	<b>Central eléctrica</b>
<b>Unidad de masa (en campo) [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1.470	1.631	1.714	1.616	1.592
<b>Unidad de masa (seca) [kg/m<sup>3</sup>]</b>	0.901	1.228	1.156	1.048	1.021

La figura 2 presenta la variación del CBR entre la ubicación de la prueba. Es posible diferenciar que Club y Coconuco tienen los valores de rodamiento más altos, cercanos al 20% y al 15% en consecuencia. Sin embargo, cuando se someten a saturación, pierden sus propiedades estructurales y por lo tanto su resistencia, lo que permite clasificarlos como altamente sensibles a los cambios de humedad. En el lado opuesto, el suelo de cantera es el que presenta menores valores de resistencia de CBR (cercanos al 5%), aunque con alta estabilidad frente a cambios en su estructura debido a cambios de humedad. Finalmente, los suelos de la Universidad y de la Central Eléctrica presentan propiedades de porte moderadamente favorables en comparación con otros suelos, ya que responden muy bien a los cambios de humedad.

### Relaciones gravimétricas y volumétricas

La relación entre las diferentes fases constitutivas (sólido, líquido y gaseoso), permite considerar la disposición, tamaño y distribución de las partículas, la cantidad o distribución del agua, en general sobre la capacidad estructural del suelo. Tabla 9.



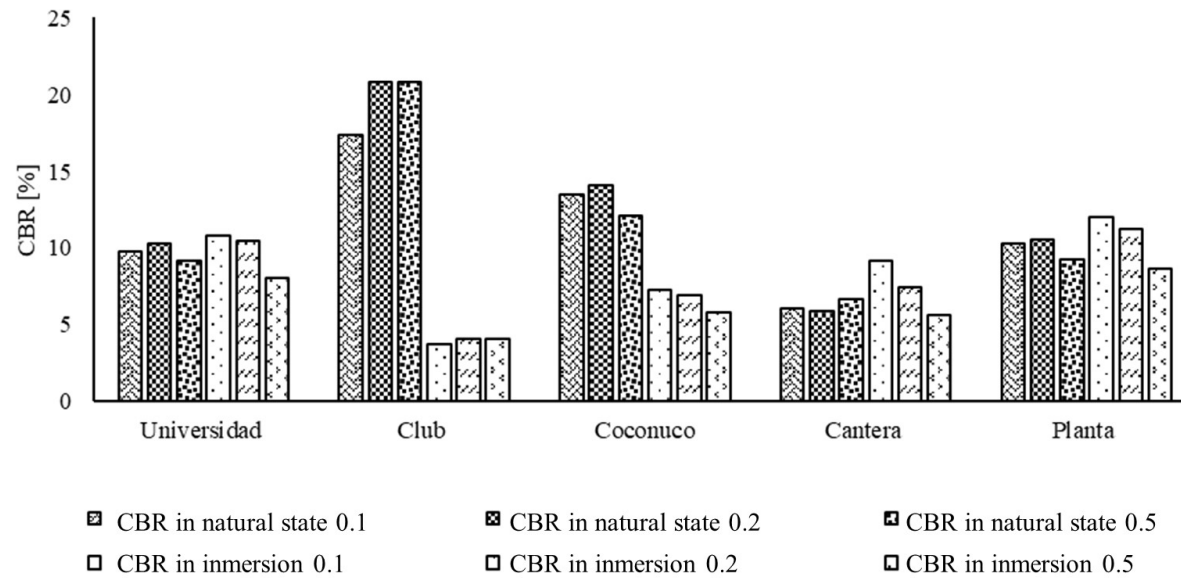


Figura 2. Valores de CBR en estado natural y CBR en inmersión en sitios de prueba

Tabla 9. Principales volumétricos y gravimétricos calculados para diferentes sitios

Espécimen	Universidad	Club	Coconuco	Cantera	Planta de energía
Gravedad específica [-]	2.794	2.668	2.776	2.784	2.780
Humedad [%]	63.083	32.806	52.524	54.329	55.906
Unidad de masa húmeda [kg/m <sup>3</sup> ]	1.470	1.631	1.714	1.616	1.592
Unidad de masa seca [kg/m <sup>3</sup> ]	0.901	1.228	1.124	1.047	1.021
Porosidad [-]	0.677	0.540	0.595	0.624	0.633
Relación de vacíos [-]	2.099	1.173	1.470	1.659	1.722
Relación de saturación [-]	0.840	0.746	0.992	0.912	0.902

La porosidad depende de diversos factores como la densidad aparente, la distribución del tamaño de las partículas, la forma de las partículas y la cementación, siendo este último, el más estudiado dentro de los objetivos de esta investigación (30). Richard et al (31) indican que el incremento de la resistencia del suelo se debe a la reducción de los espacios de porosidad, incrementando los puntos de contacto de los agregados o partículas del suelo.

Esto puede permitir atribuir la alta resistencia de los suelos de Club y Coconuco a su baja porosidad en relación a la información presentada en la figura 3. Sin embargo, este hecho hace que sean fáciles de saturar con menos volúmenes de agua, por lo que son propensos a la humedad. Esta podría ser la razón por la que este resultado de las muestras se ve afectado después de la prueba de inmersión.

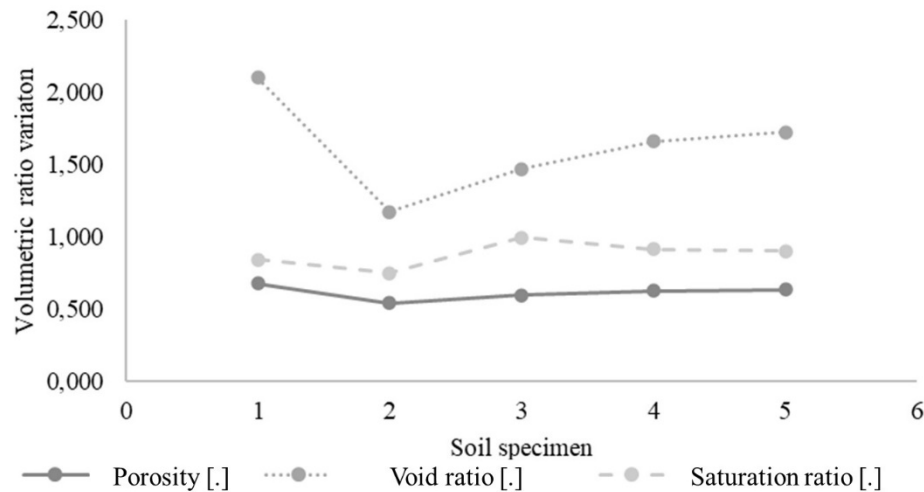


Figura 3. Variación de la relación volumétrica en 5 tipos de suelo: 1) Universidad. 2) Club. 3) Coconuco. 4) Cantera. 5) Planta de energía

### Prueba de compactación

La compactación es un procedimiento que se aplica al suelo, después de un proceso de remodelación en el que el suelo pierde su estructura original y cementación a macro escala. La compactación, como proceso mecánico, reduce los espacios vacíos en el suelo remodelado, pero no restaura ni la estructura perdida ni la cementación. Muchos autores coincidieron en que, en suelos remodelados, se producen menores relaciones de separación debido a los altos ángulos de fricción interna y a una mayor dilatación, por lo tanto, a una mayor resistencia al corte (32). Sin embargo, tal comportamiento, no es visible en SDCV, debido a que la mayor parte de su resistencia a los cortes está dada por las propiedades del cemento, luego, al remoldear, el incremento de la resistencia -debido al contacto con sus agregados-, es disminuido por la acción del cemento. Figura 4.

En cuanto al ensayo de compactación, el ensayo de laboratorio se puede realizar con diferentes niveles de energía de compactación, destacando 2 de los más comunes: Normal Energy Proctor y Modified Energy Proctor. La figura 4 muestra cómo su deformación puede cambiar en función de la energía de compactación utilizada. A mayor energía de compactación, mayor resistencia con menos deformaciones y viceversa.

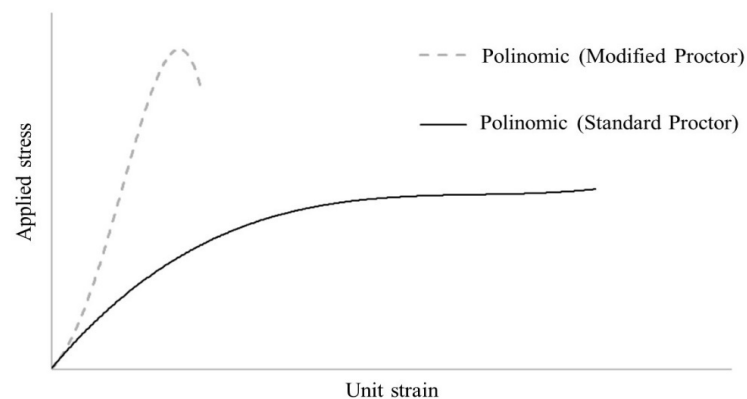


Figura 4. Comportamiento de resistencia del suelo con diferente energía de compactación. Mohd Yusoff et al. (33)

La elección de la energía de compresión para la presente prueba de investigación se basó en dos teorías. En primer lugar, la propuesta por Viveros (34) en la que se aplica una energía excesiva. La estructura original del material se puede romper, por lo que se libera el agua contenida en los poros, incrementando la cantidad de agua libre en su interior y transformando el material en una masa viscosa. La segunda teoría se refiere a las exigencias a las que está expuesto el terreno, como en las condiciones de pendiente de los suelos estudiados que requieren priorizar la resistencia perdida con mayores deformaciones sobre la alta resistencia sobre pequeñas deformaciones.

De acuerdo con ello, la prueba que permitiría evaluar las condiciones más representativas para la presente investigación fue el estándar Proctor (Tabla 10).

Tabla 10. Máxima densidad y humedad óptima para la muestra estudiada

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<b>Masa seca máxima [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1.015	1.31	1.237	1.083	1.115
<b>Humedad óptima [%]</b>	57.1	33.1	39	49.3	49.2

(1) Universidad; (2) Club Campestre; (3) Coconuco; (4) Cantera; (5) Planta de energía.

La Figura 5 muestra una disminución leve o casi nula de los espacios vacíos y, en consecuencia, un incremento en la densidad del suelo después de la compactación con energía Proctor Standard.

Según Melentijević et al. (4) las cenizas volcánicas se comportan de una manera inusual, mostrando un reblandecimiento durante el aporte de energía. Por lo tanto, los valores observados podrían confirmar esa hipótesis, ya que el nivel de mejora de la densidad aparente en relación con los espacios vacíos entre etapas es mínimo.

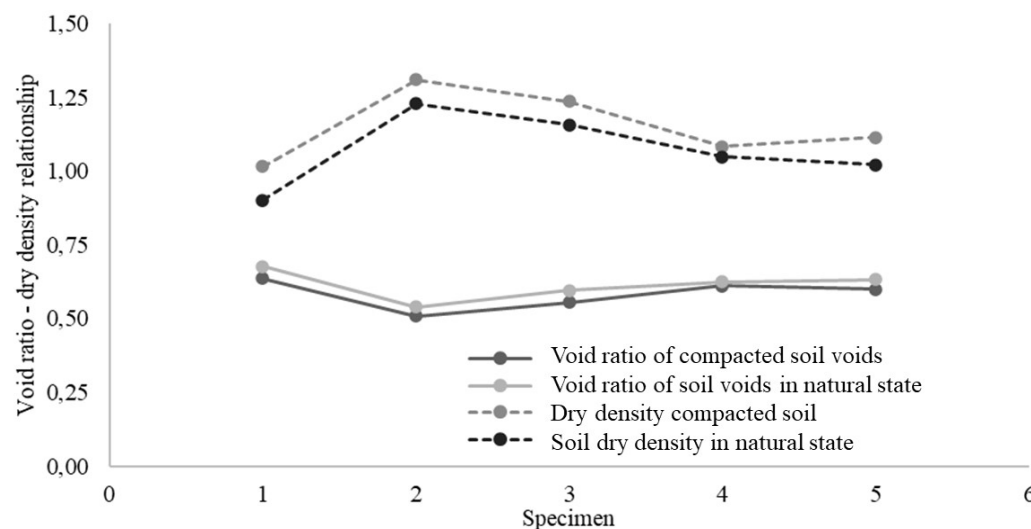


Figura 5. Comparación entre la relación de vacíos y la densidad seca [kg/cm<sup>3</sup>] del suelo en estado compactado y original. 1) Universidad 2) Campestre club 3) Coconuco 4) Cantera 5) Central eléctrica

## Ensayo de resistencia a la compresión no confinada de muestras de suelo en estado natural y remoldeado

Con respecto a la presente investigación, el ensayo de resistencia a la compresión simple cumple con los siguientes propósitos principales: como una forma de ofrecer un valor aproximado de la resistencia al corte del suelo, ya que será el principal parámetro disponible de influencia mecánica; proporcionar un estándar para evaluar el nivel de mejora de la resistencia del suelo a su etapa natural, remodelar el cemento; y para lograr la resistencia mecánica y las propiedades relacionadas del SDCV y compararlas con otros tipos de suelos.

Cuando se aplican cargas y en el interior se produce el esfuerzo de corte del suelo, la cementación absorbe la mayor parte de ellas y produce un incremento notable de la resistencia del suelo. De acuerdo con Herrera (8), los SDCV se caracterizan por su alta cementación debido a la presencia de minerales arcillosos. Por lo tanto, se puede atribuir a la resistencia desarrollada por el suelo a la autocementación en los suelos estudiados. Figura 6 .

También se puede observar un comportamiento típico de los materiales plásticos y frágiles. Suelos como los de El Club Campestre y la Universidad que presentaron mayores valores de resistencia, teniendo la tendencia al fracaso con menores deformaciones (3% y 4%) respectivamente. Esto significa: tener menos capacidad de deformación los hace más frágiles. Sin embargo, suelos como Coconuco y Quarry, tienen menor resistencia pero mayores deformaciones unitarias (10% y 11%). Esto significa que en suelos altamente dúctiles se espera que la resistencia al corte disminuya con la materia hídrica y viceversa. Esta suposición coincidía con investigaciones previas realizadas por (35), quienes encontraron que el aumento de la saturación del suelo causaba una considerable capacidad de resistencia. Pande et al. (36), menciona que dicha condición es el resultado de materiales arcillosos que se encuentran compactados o tenían humedad debajo de la capa seca, actuando de una manera más gruesa debido a la unión de sus partículas.

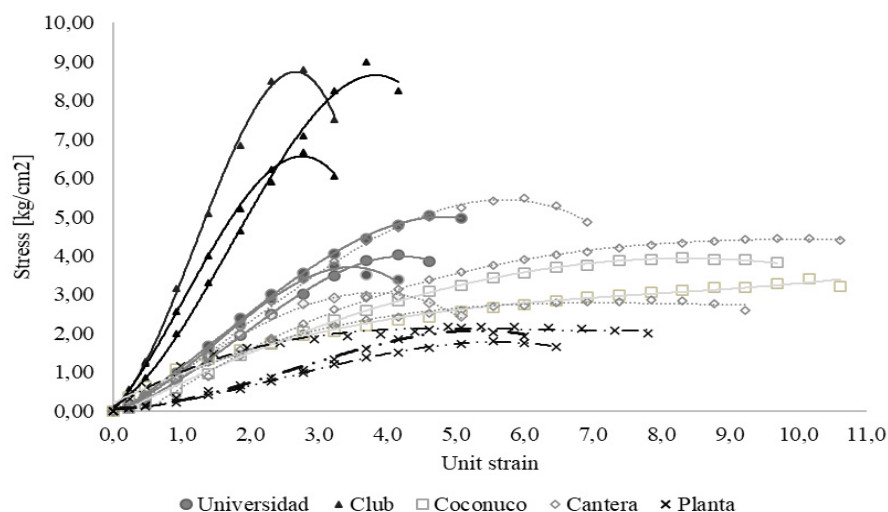


Figura 6. Curvas de esfuerzo-deformación obtenidas para cada ensayo de compresión

Así, la reducción de la cantidad de agua da como resultado un mayor ángulo de fricción ya que los granos individuales se convierten en agregados con mayores dimensiones, como se sabe, el ángulo de fricción es proporcional al tamaño del mismo.

La figura 7 muestra la variación de la resistencia a la compresión de las muestras en relación con la materia húmeda natural. Se puede observar que una tendencia a la baja es ligeramente marcada, es decir, si la cantidad de agua en el suelo es alta, la resistencia al corte disminuirá, lo cual es consistente con los hallazgos.

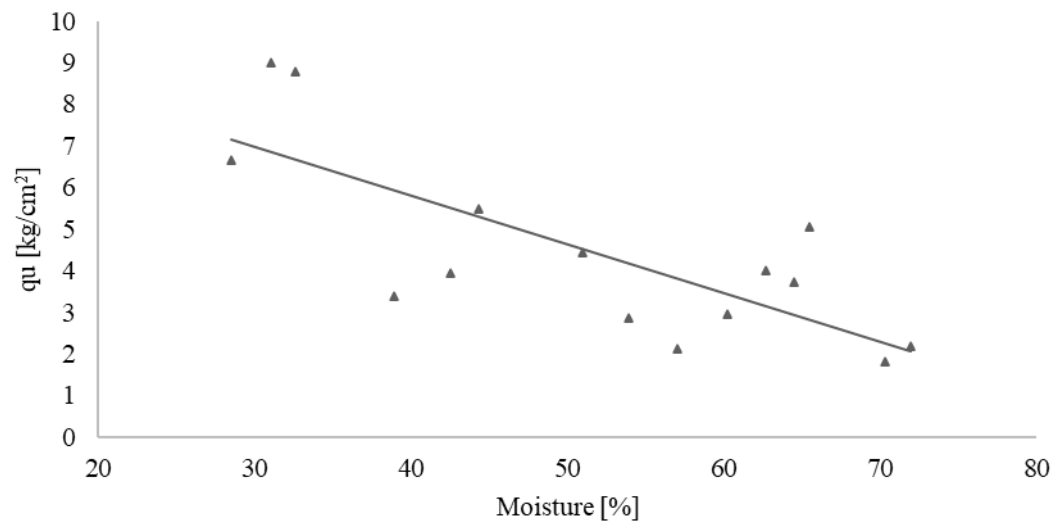


Figura 7. Relación entre el contenido de humedad y el ensayo de compresión no confinado.

También se puede observar que un valor de porosidad total (0,6 a 0,65), común para SDCV. Lince y Khalajabadi (37), encontraron valores similares a este tipo de suelos en una zona cafetalera colombiana, con variaciones de (0.50 a 0.69) en una profundidad de muestreo de 0.1 m a 0.3 m (Figura 8).

La tabla 11 representa los resultados de las pruebas de compresión no confinadas realizadas en una muestra de remodelación. A pesar de que se trata de especímenes de remodelación con cierto nivel de homogeneización debido al manejo en laboratorio, University y Power-plant muestran un alto coeficiente de variación. Esto significa la alta complejidad de la composición y comportamiento de los suelos, y es por ello que se convierten en buenos candidatos a la propuesta de mejora utilizando cemento (Figura 9).

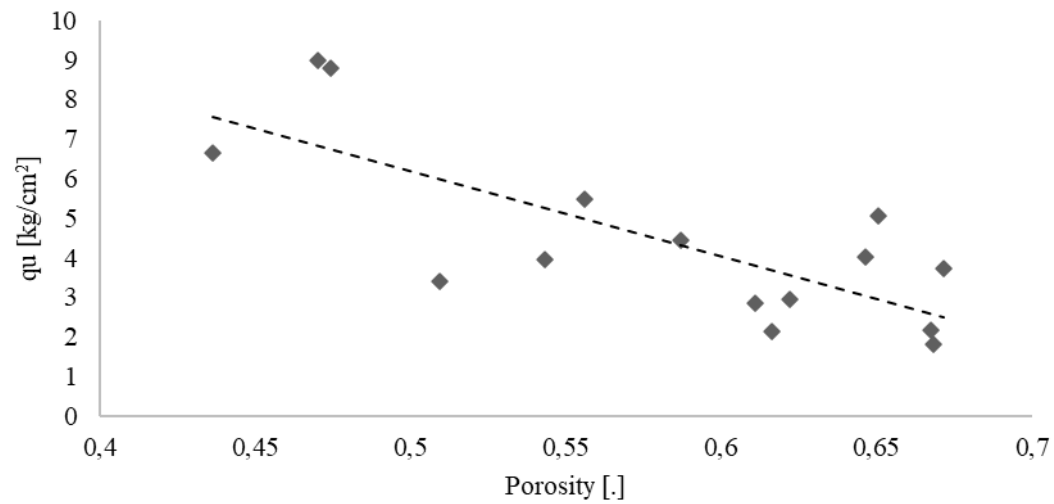


Figura 8. Porosidad y resistencia final de las muestras en el ensayo de compresión no confinada

Tabla 11. Resistencia final a la compresión de las muestras de remodelación

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<b>qu1 [kg/cm2]</b>	2.92	3.22	1.45	2.79	3.99
<b>qu2 [kg/cm2]</b>	2.43	3.05	1.40	2.88	3.20
<b>Medios [kg/cm2]</b>	2.67	3.13	1.42	2.83	3.59
<b>Cv [%]</b>	13	3.70	2.40	2.30	15.5

1) Universidad 2) Campestre club 3) Coconuco 4) Cantera 5) Central eléctrica

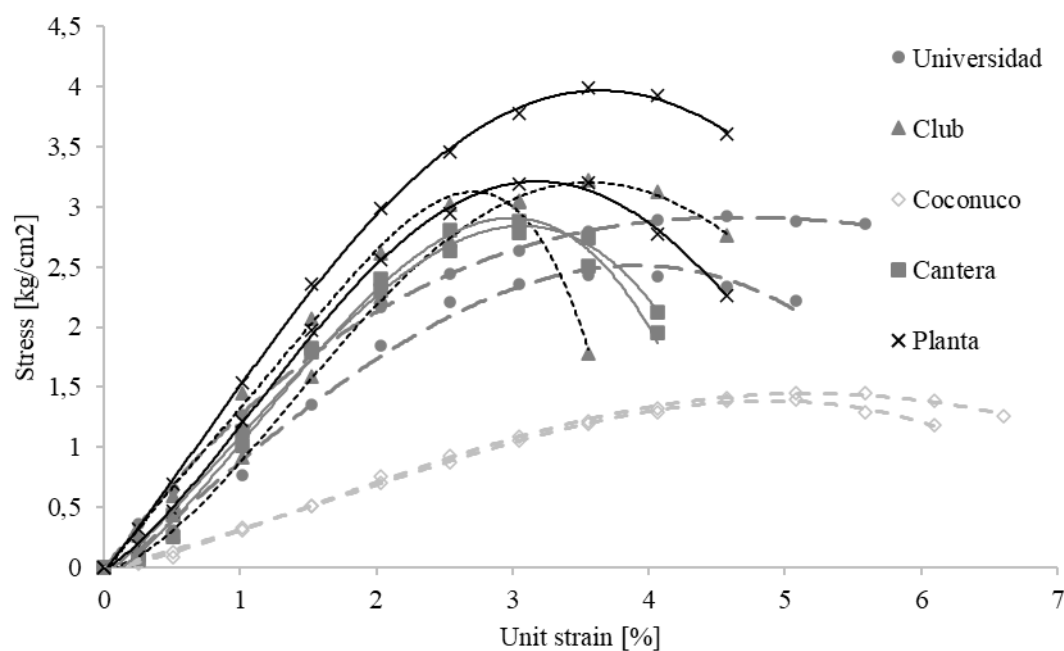


Figura 9. Curva de esfuerzo de deformación obtenida en la compresión simple en muestras remodeladas

Una de las cualidades más interesantes que muestra las características del SDCV, es la relativa a la pérdida de resistencia después de la remodelación incluso con su humedad natural. Dicha resistencia es la medida de un parámetro llamado sensibilidad, definida como la relación entre la resistencia a la compresión de la muestra inalterada ( $q_{ui}$ ) y la resistencia a la compresión de la muestra remodelada a la misma humedad ( $q_{ur}$ ). Los valores de sensibilidad muestran los niveles de afectación del suelo remodelado, por lo tanto, los valores bajos de sensibilidad representan que el suelo no está siendo afectado por la remodelación, además, podría significar una mejora cuando los valores son menores a 1.0. Por el contrario, los valores altos dan lugar a una desaturación del suelo debido a la remodelación que disminuye significativamente la resistencia. Los valores de la tabla 12 muestran los niveles de sensibilidad que pueden tener los suelos arcillosos, y la figura 10 muestra el diagrama de la sensibilidad de los suelos comparados.

Tabla 12. Valores de sensibilidad clásicos en suelos arcillosos

Sensibilidad	Descripción
>1	Insensible
1-2	Baja sensibilidad
2-4	Sensibilidad media
4-8	Sensible
8-16	Extra sensible
>16	Rápido

Modificado de Das (2019). Clasificación de las arcillas en función de la sensibilidad (38)

En general, se puede inferir que los suelos estudiados presentaron valores de sensibilidad baja a media ( $St < 3$ ), perdiendo la mitad o casi tres veces su resistencia a la compresión, lo cual es consistente con una sensibilidad baja y media (1.89 – 2.98) reportada por Colmenares et al. (23) en Galicia (municipio Pereira). Por otro lado, el suelo ensayado en la Central Eléctrica muestra un valor típico debido principalmente a sus fuertes cambios en dureza, color, textura y, en general, a sus diferentes propiedades entre las muestras tomadas.

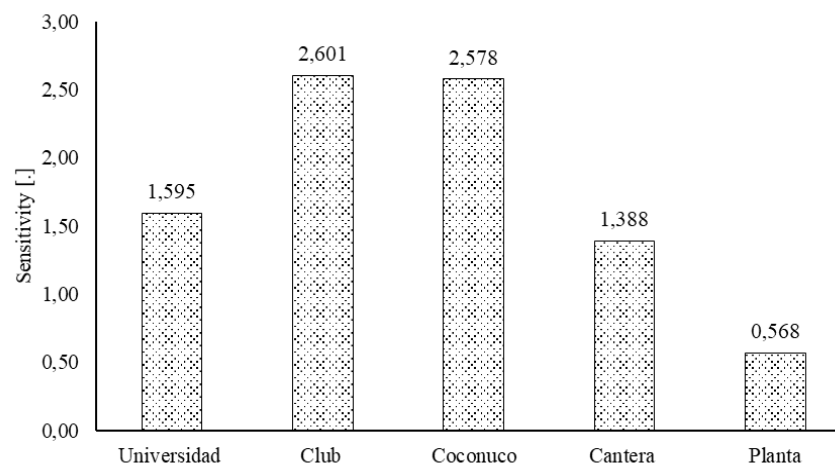


Figura 10. Sensibilidad al remoldeo de muestras.

### Ensayo de permeabilidad (k)

La determinación de la permeabilidad en suelos se estudia indirectamente a través de ensayos de consolidación. En la tabla 13 se muestra el resultado obtenido para cada suelo analizado.

Tabla 13. Tabla consolidada de permeabilidad después de datos estadísticos

Muestra	Permeabilidad - k			
	M1 [cm/s]	M2 [cm/s]	Medios [cm/s]	Cv [%]
<b>Universidad</b>	1.40E-08	4.56E-08	2.98E-08	75.2
<b>Club</b>	9.23E-08	7.17E-08	8.20E-08	17.8
<b>Coconuco</b>	1.77E-07	2.17E-07	1.97E-07	14.7
<b>Cantera</b>	9.43E-08	3.24E-08	6.34E-08	69.1
<b>Planta de energía</b>	1.69E-07	1.37E-07	1.53E-07	14.8

M1: Lanzamiento 1, M2: Los valores de varianza del coeficiente de lanzamiento proceden a través de la fórmula de muestra.

Teniendo en cuenta que los valores de varianza del coeficiente sugieren una gran imprevisibilidad en torno a la permeabilidad, dichas propiedades oscilan dentro del valor normal para suelos francos y arcillosos.

### Ensayo de tamaño de partículas finas de suelo (ensayo de granulometría)

La estructura del suelo se refiere a la disposición, agrupación, tamaño y forma de las partículas individuales. La grabulometría puede ser una de las pruebas más básicas, pero no menos importante. Su objetivo es determinar la distribución de las partículas en una muestra. Se basa en dos pruebas estandarizadas por la normativa del INVIAS. La primera etapa busca una correcta preparación de las muestras (I.N.V.E-106). La segunda etapa se desarrolla mediante 2 procedimientos que permiten la distribución granulométrica aproximada de partículas mayores o menores de 75 $\mu$ m (#200).

En la figura 11, se muestra que la Universidad, Club Campestre y Cononuco presentan un alto contenido de arcilla en sus composiciones ( $D < 0.002$ ); mientras que las muestras de la central eléctrica y la cantera tienen niveles más bajos. Esto podría estar relacionado con la profundidad a la que se tomaron las muestras, por lo tanto, con el nivel de exposición a la meteorización y la meteorización, lo que sugiere una menor metheorización y partículas de mayor tamaño directamente relacionadas con la profundidad.



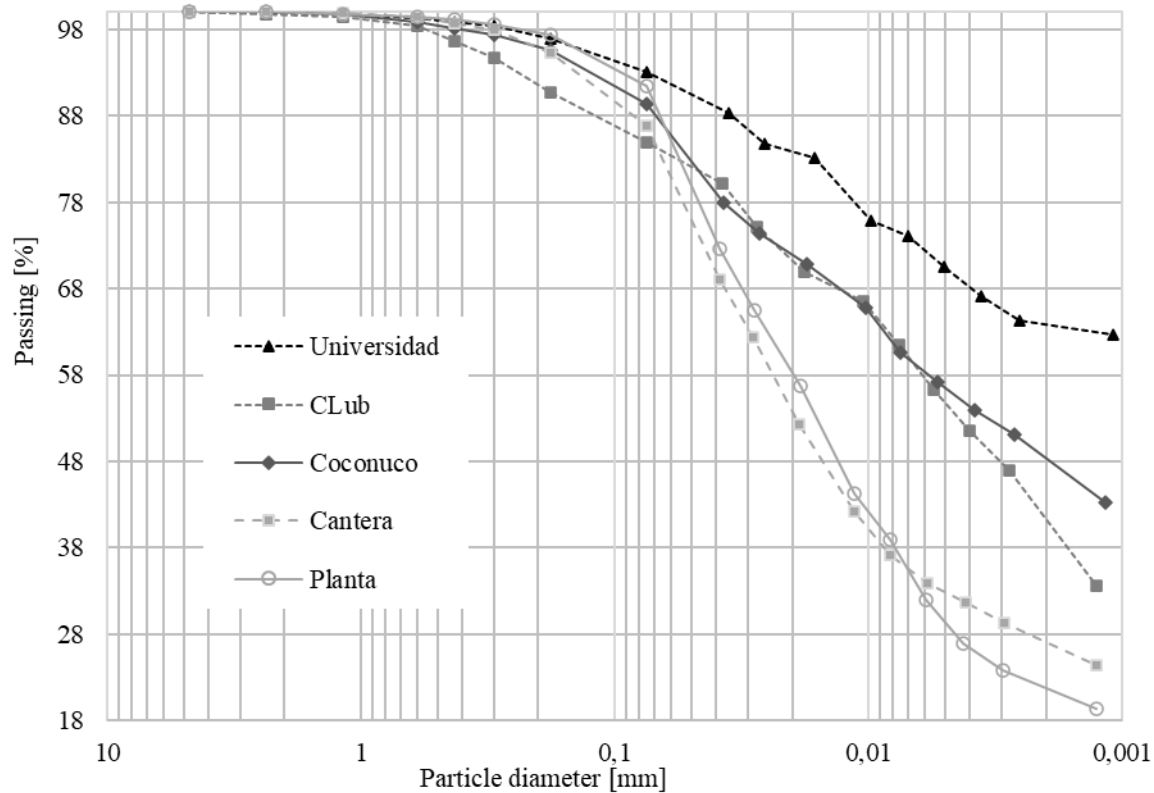


Figura 11. La curva granulométrica que muestra la distribución de las partículas en cada suelo analizado

#### Consistencia del suelo (cálculo de los límites de Atterberg)

La consistencia del suelo se refiere a sus fuerzas de adhesión y cohesión que actúan sobre él de acuerdo con las diferentes fuerzas de humedad y aplicadas. Su definición resalta la importancia del agua en su interior, ya que es el elemento encargado de cambiar la firmeza de los suelos. En suelos finos, la fuerza de adherencia y la cohesión permiten que las partículas permanezcan adheridas al aplicar una fuerza determinada, actuando como la resistencia que ofrece el suelo cuando se remodela o amasa. La tabla 14 presenta los resultados para los límites de Atterberg y la tabla 15 el índice de consistencia de los suelos.

Tabla 14. Resultados de la prueba de Atterberg Limits

[%]	Universidad	Club	Coconuco	Cantera	Planta de energía
<b>Límite de líquido</b>	100	55	89	94	86
<b>Límite de plástico</b>	56	34	41	48	48
<b>Contracción Limit</b>	31	30	28	31	33

Tabla 15 Índice de consistencia del suelo.

[%]	Universidad	Club	Coconuco	Cantera	Planta de energía
<b>Índice de plasticidad</b>	44.11	20.25	47.94	46.04	38.28
<b>Índice de caudal</b>	-30.59	-18.67	-30.32	-42.51	-18.02
<b>Índice de tenacidad</b>	-1.50	-1.30	-2.45	-1.25	-2.51
<b>Índice de contracción</b>	25.41	4.59	12.89	17.01	15.12

La tabla anterior muestra que el valor más bajo de plasticidad pertenece a la ubicación del Club. Tal comportamiento significa que un pequeño cambio en la cantidad de humedad en el suelo puede producir grandes cambios en su consistencia, pasando rápidamente de un semisólido a un semilíquido. La tabla 16 sugiere que la mayoría de los suelos estudiados presentan una consistencia blanda en estado natural, típica en suelos con un intervalo de plasticidad, a excepción de la muestra Club, que tiene una consistencia dura, es decir, que oscila entre semisólida y sólida. La relación entre la consistencia y la resistencia mecánica de los suelos se puede comprobar en el ensayo de resistencia y compresión confinada, donde los suelos que variaron en los valores de plasticidad tuvieron un comportamiento más dúctil cuando se sometieron a carga vertical que la muestra de la ubicación del Club, que tuvo mayor resistencia pero menor plasticidad. También se puede ver cómo Coconuco, Cantera y Central Eléctrica tuvieron valores más altos con actividad arcillosa, lo que significa una mayor capacidad de retención de agua.

Tabla 16. Determinación de consistencia y actividad arcillosa en suelos estudiados

Muestra		Universidad	Club	Coconuco	Cantera	Planta de energía
<b>Índice de liquidez</b>	Valor [%]	0.164	-0.07	0.25	0.14	0.22
	Evaluación	Gama de plásticos	Sólido semisólido gama	Gama de plásticos	Gama de plásticos	Gama de plásticos
<b>Índice de concientidad</b>	Valor [%]	0.84	1.07	0.75	0.86	0.78
	Evaluación	Gama de plásticos	Sólido a Semisólido gama	Gama de plásticos	Gama de plásticos	Gama de plásticos
<b>Actividad</b>	Valor [%]	0.69	0.50	1.02	1.71	1.80
	Evaluación	Arcilla inactiva	Arcilla inactiva	Activo Normal	Activa clay	Arcilla activa

La figura 12 y la tabla 17, Muestran la clasificación de los suelos por los dos sistemas internacionales más reconocidos. De acuerdo con el SUCS, el total de los suelos de las localidades son francos con alta plasticidad (MH). Sin embargo, como clasificación AASTHO, es más cercano definirlos como franco-arcillosos parte del grupo A-7-5.

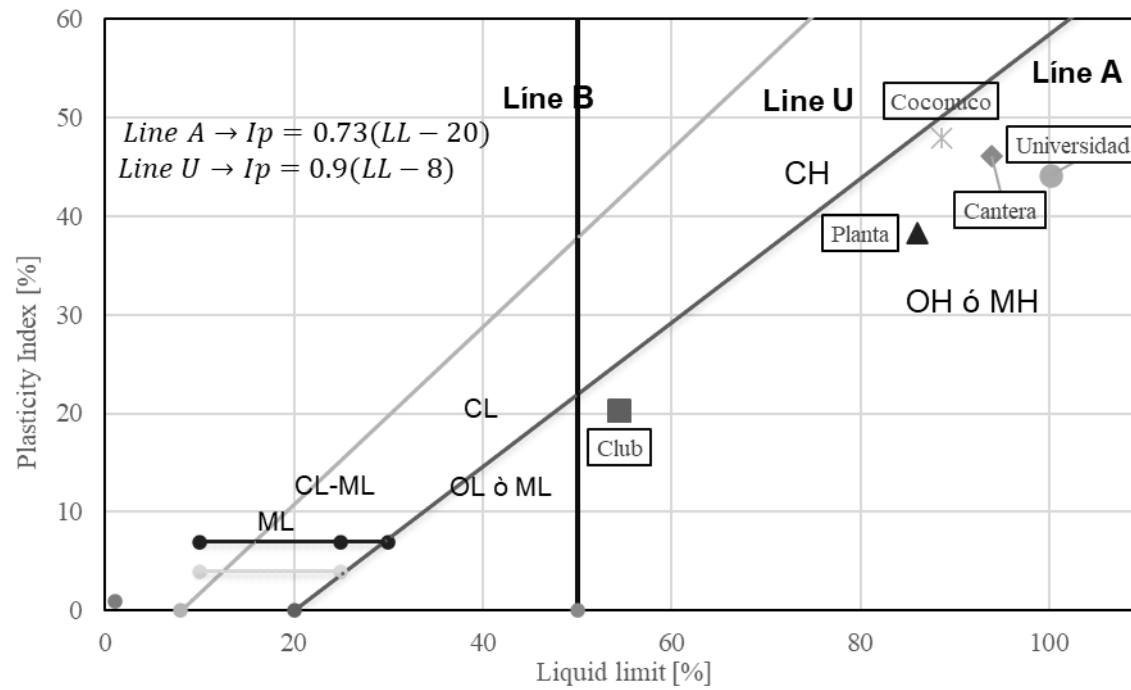


Figura 12. Método Casagrande de clasificación de suelos.

Tabla 17. Clasificación de suelos con el método internacional SUCS y AASTHO

Muestra	Sistema	SUCS	AASHTO
	Nomenclatura	MH u OH	A-7-5(20)
	Descripción	Alta plasticidad, franco o Alta plasticidad orgánica Marga	Marga-arcilloso
<b>Club</b>	Nomenclatura	MH u OH	A-7-5(15)
	Descripción	Alta plasticidad, franco o Alta plasticidad orgánica Marga	Marga-arcilloso
<b>Coconuco</b>	Nomenclatura	MH u OH	A-7-5(20)
	Descripción	Alta plasticidad, franco o Alta plasticidad orgánica Marga	Marga-arcilloso
<b>Cantera</b>	Nomenclatura	MH u OH	A-7-5(20)
	Descripción	Alta plasticidad, franco o Alta plasticidad orgánica Marga	Marga-arcilloso
<b>Planta de energía</b>	Nomenclatura	MH u OH	A-7-5(20)
	Descripción	Alta plasticidad, franco o Alta plasticidad orgánica Marga	Marga-arcilloso

### Estabilización de muestras con aditivo de cemento

Luego de la caracterización de las muestras en su estado original, se seleccionaron Club, Universidad y Cantera, considerando los resultados en la tabla 18. Para lograr resultados comparativos válidos, los porcentajes de cemento donde se establecieron (Tabla 19) .

Tabla 18. Criterio valorada para la selección de muestras estándar

Muestra	Nivel de plasticidad (%)	Compresión simple. Muestra de estado original (kPa)	Compresión simple. Muestra remodelada (kPa)
Club	34	799.634	307.438
Universidad	56	418.450	262.034
Cantera	48	486.802	277.920

Tabla 19. Porcentajes de cemento para estabilización

Muestra a estabilizar	Clasificación ASSHTO	Cemento Porcentajes en estudio (%)
Club	A-7-5 (15)	8, 11, 12, 13, 15
Universidad	A-7-5 (20)	8, 11, 12, 13, 15
Cantera	A-7-5 (20)	8, 11, 12, 13, 15

Los resultados obtenidos de la prueba de compactación normal al agregar diferentes porcentajes de cemento muestran que los suelos de Cantera y Universidad, que contienen un límite de plasticidad de 48% y 56% en consecuencia, mostraron valores muy cerrados a la humedad óptima entre [45% -51%] y rango de densidad máxima de [1.10-1.13] g/cm<sup>3</sup>. Por otro lado, la muestra ensayada de Club con un límite de plasticidad del 34%, inferior a los resultados obtenidos, mostró un resultado promedio de 34% de humedad óptima y una densidad de 1,34 g/cm<sup>3</sup> (Tabla 20).

Tabla 20. Relación entre la humedad-densidad en las muestras

Suelo: Club					
Cemento [%]	8	11	12	13	15
Humedad óptima [%]	33.3	33.1	33	33.7	34
Densidad máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	1.33	1.34	1.34	1.34	1.34
Suelo: Universidad					
Cemento [%]	8	11	12	13	15
Humedad óptima [%]	48.5	50.6	45.7	45.6	45.7
Densidad máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	1.1	1.13	1.13	1.13	1.13
Suelo: Cantera					
Cemento [%]	8	11	12	13	15
Humedad óptima [%]	48.7	50.4	50.9	44.7	44.8
Densidad máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	1.11	1.13	1.09	1.12	1.15

La tabla 21 muestra el número de especímenes analizados por muestra de suelo. El método utilizado se basó en la norma INV E-152-13 (27). Para el ensayo de durabilidad, se aplicó una técnica de cepillado en todas las muestras: sus propiedades después del cemento se determinaron por la cantidad de pérdida de peso y/o disminución al aplicar la resistencia de los ciclos húmedos y secos figura 13.

Tabla 21. Ensayo muestreado realizado en cada tipo de suelo a tratar

Muestra	Cemento [%]					Total / muestra
	8	11	12	13	15	
<b>Resistencia ilimitada</b>	13	13	13	13	13	65
<b>Durabilidad</b>	2	2	2	2	2	10

En el proceso de humedad y secado tendría la participación de propiedades de durabilidad y resistencia. Los principales factores que afectan la integridad estructural del suelo son las condiciones ambientales (variaciones de temperatura y humedad) y las exigencias impuestas, que terminan por debilitarlo (39).

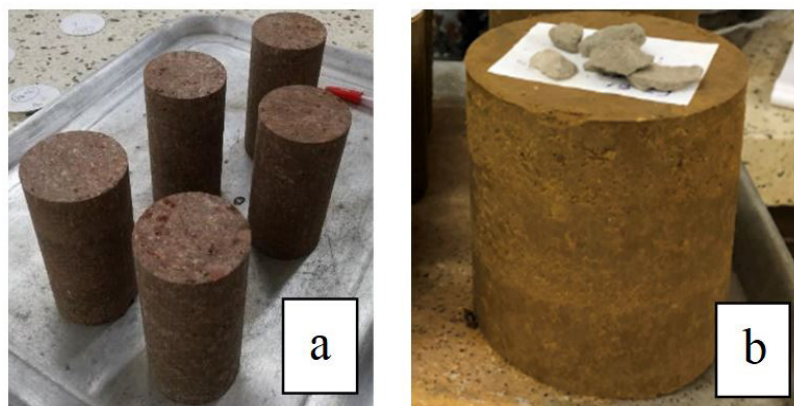


Figura 13. a) probetas compactadas de ensayo de compresión no confinadas b) probetas de durabilidad

En general, se puede observar que en los tres suelos estabilizados, las curvas de compactación, después de la adición de cemento, experimentaron una reducción en cuanto a la humedad óptima y un incremento en su densidad máxima. Esto podría explicarse desde los siguientes puntos de vista: (i) mayor formación de agregados durante la hidratación del cemento, disminuyendo su superficie específica y por lo tanto su capacidad de absorción y retención de agua. (ii) El incremento de la densidad tiene que ver con la dosis de suelo y cemento, ya que el material resultante tendrá propiedades similares a las materiales iniciales, por lo tanto, algunas propiedades como la densidad aumentarán en una tasa proporcional a la cantidad de mezcla Figura 14 y Figura 15.

En relación a los demás suelos, muestra una variación significativa en cuanto a densidad y humedad en las curvas de compactación. Dicha variación podría explicarse de la siguiente manera: (i) la granulometría del suelo sugirió un alto contenido en arcilla (>60%), es decir, una alta retención de agua en la superficie específica y un potencial de matriz; (ii) con el cemento agregado y las partículas formadas por partículas floculadas de mayor tamaño, el suelo experimenta un cambio dramático en el tamaño de sus partículas, en comparación con otros dos suelos, se reduce la granulometría menos delgada que no se vio afectada por la superficie específica y se reduce la retención de agua, junto con su capacidad de retenerla produciendo un comportamiento del suelo similar a los más gruesos (Figura 16).

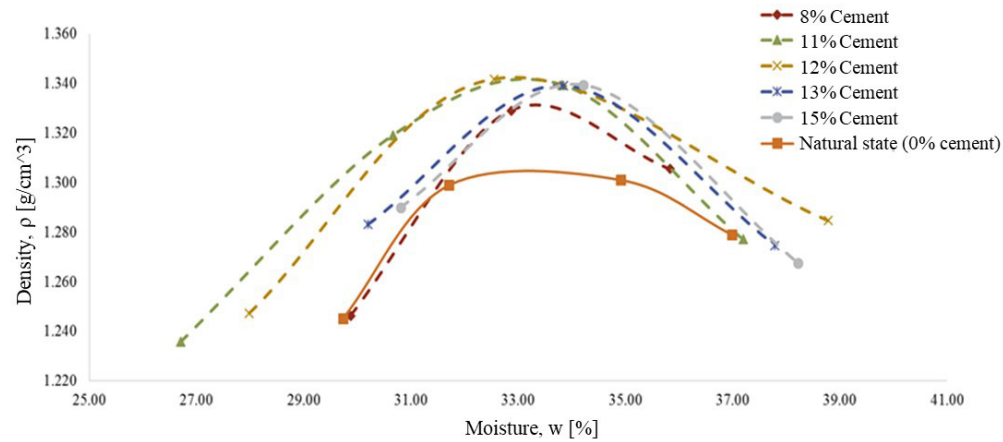


Figura 14. Curva de compactación natural y curva de compactación del cemento en la muestra del Club Campestre

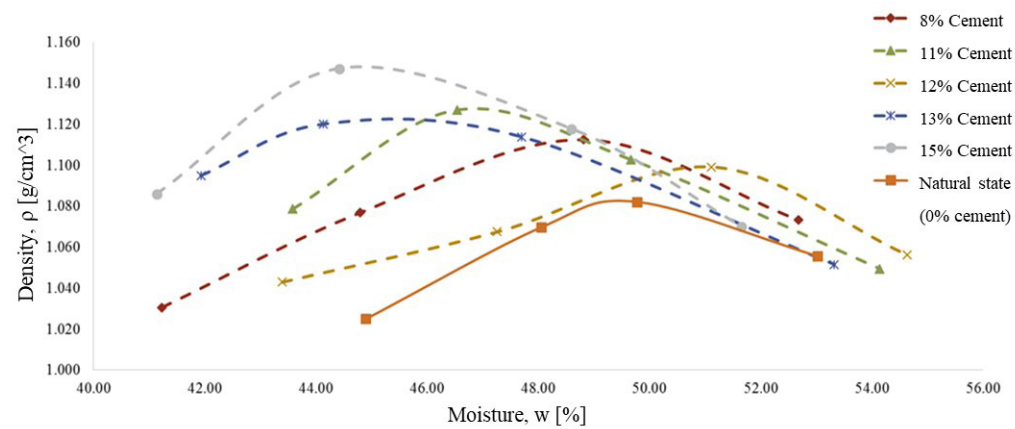


Figura 15. Curva de compactación natural y curva de compactación de cemento en la muestra de cantera

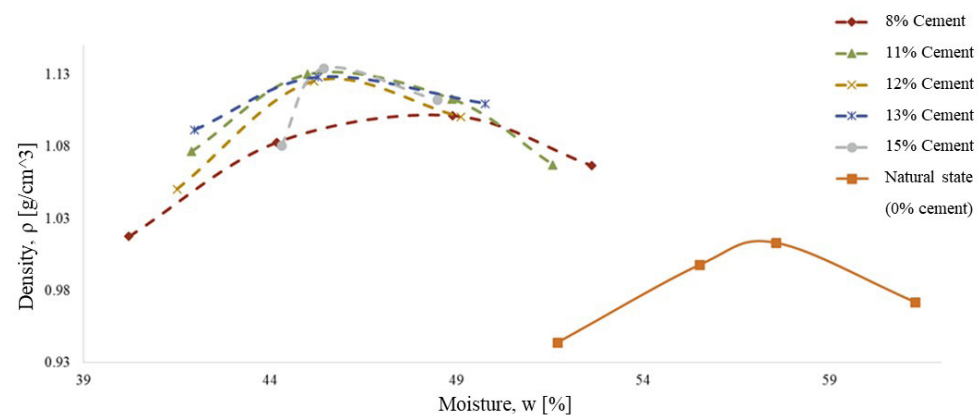


Figura 16. Curva de compactación natural y curva de compactación de cemento en muestra universitaria

En cuanto a la cantidad de agua utilizada para la hidratación del cemento-suelo, parte de ella se destina a la hidratación del cemento [Wd] y otra se evapora dejando espacios vacíos que reducen

su durabilidad y resistencia. Entendiendo que la reducción de las relaciones es positiva para las propiedades de la mezcla de endurecimiento, ya que incrementa su resistencia, las relaciones bajas [Wd/C] pueden estar relacionadas con una mayor resistencia a la compresión no confinada. De esta manera, de acuerdo con la figura 17, el suelo que tiene las relaciones más bajas [Wd/C] es el suelo Club, y como se esperaba, desarrolló una mayor resistencia a la compresión no confinada (Figura 18).

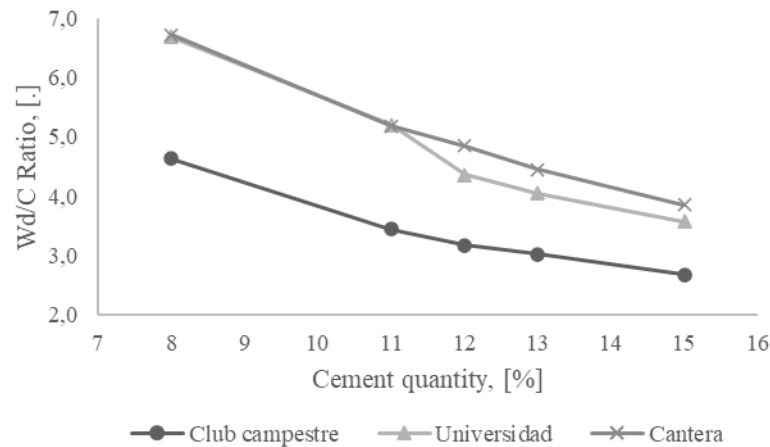


Figura 17. Comportamiento de la relación Wd/C y cantidad de cemento

Puede ser posible inferir que las relaciones obtenidas [Relación Wd/C] en la presente investigación son altas, y si disminuyeran, se puede lograr una mejora de la resistencia obtenida. Por lo tanto, se propone una evaluación de la resistencia de la estructura del suelo si se somete a una mayor energía de compactación, lo que podría mostrar la reducción del agua y un incremento de la resistencia no confinada. La evaluación propuesta sugeriría disminuir la capacidad de deformación del suelo hacia una mayor resistencia, lo cual de acuerdo con el suelo durante el servicio, necesitaría ser analizado y evaluado cuidadosamente. Por último, es importante mencionar que la reducción de dichas cantidades de cemento genera beneficios económicos, debido a una menor cantidad del mismo.

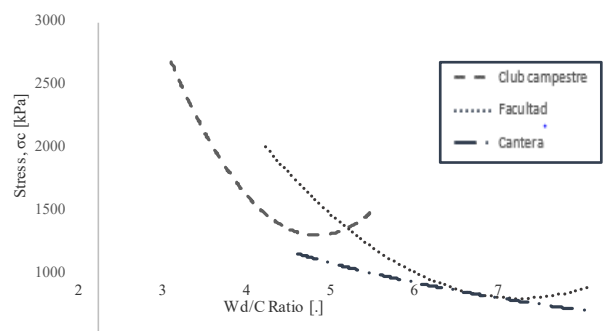


Figura 18. Comportamiento de resistencia a la compresión no confinada con relación Wd/C

Por otro lado, teniendo como punto de partida los resultados recogidos en el ensayo no confinado en suelos naturales y remodelados en estado, tabla 22.

Tabla 22. Valores de sensibilidad para muestras de suelos no estabilizados

Muestra de suelo	Resistencia en estado natural [kPa]	Resistencia remodelada [kPa]	Sensibilidad (S)
Club de campo	815.40	313.47	2.601
Universidad	426.64	267.52	1.595
Cantera	496.35	283.42	1.751

Debido a esto, se recomienda que durante la remodelación se tomen en cuenta los siguientes factores para evaluar el mejoramiento del suelo de acuerdo a su estado original. En primer lugar, cuando se destruye la estructura original del suelo mediante la remodelación, su resistencia se reduce debido a la condición cementada, luego, desde el punto de vista químico, se produce una ruptura del enlace electroquímico entre las partículas, así como la redistribución del agua observada se convierte en agua libre (autor). En segundo lugar, tiene que ver con la compactación del suelo, de acuerdo con el grado de modelo impuesto durante la compresión representado por la energía aplicada, la densidad del suelo y las propiedades de resistencia aumentadas produciendo una estructura más homogénea. En tercer lugar, relacionado con la reducción de la resistencia durante el proceso de compactación en un suelo de cenizas volcánicas al incrementar la cantidad a golpes.

El objetivo de los tres suelos ensayados fue desarrollar, dentro de las cenizas volcánicas, rangos con un IP bajo, un IP medio y un IP alto. (Tabla 23).

Tabla 23. Resumen de propiedades

Propiedad	Club de Campo	Universidad	Cantera
Arcilla [%]	69.9	83.5	52.2
Franco [%]	30.1	16.5	47.8
LL [%]	54	100	94
LP [%]	34	56	48
Masa unitaria de humedad [kg/m <sup>3</sup> ]	1.63	1.47	1.62
Superficie específica (S <sub>s</sub> )	Bajo	Alto	Alto
Masa unitaria seca [kg/m <sup>3</sup> ]	1.22	0.901	1.05
Porosidad, n nat [.]	0.54	0.67	0.62
Relación de vacío, e nat [.]	1.17	2.09	1.66
W natural [%]	32.81	63.08	54.32
G <sub>s</sub>	2.65	2.79	2.78
K [cm/s]	8.2E-08	3.0E-08	6.3E-08
qu-natural [kPa]	815	426	496
Masa máxima de la unidad seca. [kg/m <sup>3</sup> ]	1.31	1.015	1.083
W <sub>opt</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	33.1	57.1	49.3
qu-remodelado [kPa]	313	267	283
Estabilización del cemento Qu max	2755 Cemento 15%	1483 Cemento 13%	2151 Cemento 15%
Clasificación SUCS	MH	MH	MH

Los resultados referidos a las proporciones de cemento, encontraron que un valor óptimo está entre 13 – 15 % sobre el contenido de cemento, el cual está por encima de los valores encontrados por Niu et al. (18), donde mencionan una proporción óptima de 10 % de cemento. Sin embargo, es importante aclarar que las investigaciones utilizaron un 9% de estabilizantes. Para Rohmatun et al. (20), el contenido óptimo es del 7%, sin embargo, también aclara una ayuda para el llenado del



valor más bajo de UCS de UCS de 2353.60 kPa. Para Otilia et al. (17), el contenido óptimo estaría entre 5-7%. Sin embargo, recordemos que existe un trabajo que muestra un bajo contenido de cemento, explicando que entre sus conclusiones, se encontró que según el parámetro encontrado "sería viable para un grupo de terraplenes, con un estudio previo de resistencia a la deformidad y trabajos de puesta en marcha", descartando subrasante o corona de terraplén. Por otro lado, el ACP (21) menciona que para los suelos A-7-5, el porcentaje óptimo de cemento suele estar entre 10% y 16%, coincidiendo con los hallazgos del presente estudio.

## Conclusiones

El estudio del suelo modificado con cemento, establece una diferencia notoria entre el antes y el después de los derivados del suelo de cenizas volcánicas como el incremento de la resistencia y un cambio positivo en las características físicas como la durabilidad, convirtiéndose en una contribución para el avance de la Ingeniería Civil en la Región Andina en Colombia.

El desarrollo de la estabilización de la técnica con cemento Portland presentó resultados físicos satisfactorios de acuerdo a su comportamiento de durabilidad. En las muestras tratadas con un 15% de cemento, la masa suelta valorada se muestra aceptable debido a que ofrecen una resistencia favorable a la intemperie. El uso del cemento como tecnología alternativa ha permitido ofrecer resultados rápidos y eficientes en cuanto al tratamiento de suelos derivados de cenizas volcánicas. Los resultados muestran que cuando se utiliza el 13% y el 15% es posible evitar con éxito el desconchado de los taludes de la infraestructura, ofreciendo una mejor opción asequible que otros sistemas de estabilización, evitando la estabilización superficial de taludes de corte o terraplén en una vía, que causan perjuicios o efectos negativos en el servicio vial, además, la técnica de estabilización cemento-suelo no requiere una inversión permanente en limpieza de material removido.

El análisis cualitativo de la falla presentada en el ensayo de compresión no confinada muestra que las más comunes en los suelos derivados de cenizas volcánicas son de extensión frágil dúctil y cortante.

### Directrices de estabilización para el diseño

La factibilidad de tres estabilizaciones está fuertemente correlacionada con la superficie específica (LL y Ss tienen una relación proporcional exponencial), debido a que los suelos con menor límite líquido muestran una mayor factibilidad para ser estabilizados y mejorados con cemento. (por ejemplo, Club Campestre), que será una propiedad de información fundamental a conocer respecto al gasto de cemento en una futura estabilización.

Así mismo, los altos niveles de líquido están evidenciando que no es posible, incluyendo la mejora, alcanzar un empaque adecuado (relaciones de vacíos bajos), entonces, esta sería una variable importante a considerar al momento de estabilizar con cemento. Esta variable termina siendo muy sensible debido a su comportamiento exponencial (Ss vs. LL).

Una de las consideraciones relevantes es que la evaluación más importante del límite líquido a la cantidad de arcilla que se pudo ver en los suelos del Club Campestre y de la Cantera. Donde el club tiene más arcilla, pero menos superficie específica, de ahí su comportamiento más favorable.

En general, el sistema de estabilización que utiliza cemento en suelos derivados de cenizas volcánicas podría refinarse para la protección de taludes. Es eficaz porque, en cualquier cantidad de cemento utilizada, siempre el método mostró mejoría en cuanto a una mayor resistencia que la muestra original, incluso las estabilizadas en cualquier ciclo. Esto demuestra que los sistemas podrían ser utilizados para la estabilización en el efecto de las laderas de descamación.

Debido a la variabilidad y característica minera de las cenizas volcánicas, sería necesario que cada suelo desarrollara un diseño de estabilización individual.

### Agradecimientos

A la Universidad del Cauca por su apoyo en el proceso de investigación, educación y desarrollo del proyecto.

## Referencias

1. Huaman Carrion J. Caracterización morfogénica y clasificación por su capacidad de uso mayor de suelos con pastos. Chiara, Ayacucho [Tesis de pregrado]. Ayacucho: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; 2024. Disponible en: <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/24398842-531e-4b10-9246-ac540b37ee9a>
2. Ramírez Castillo JA. Estudio bibliográfico sobre las propiedades físico – químicas de Suelos Andisoles en el departamento de Nariño [Tesis de pregrado]. Manizales: Universidad de Caldas; 2024. Disponible en: <https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/20002>
3. Valencia Ocampo M. Evaluación de la escorrentía y calidad de aguas en áreas de ribera de fuentes hídricas con diferentes usos en Andisoles de la zona media del río Chinchiná [Tesis de pregrado]. Manizales: Universidad de Caldas; 2023. Disponible en: <https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/19500>
4. Melentijević S, López-Andrés S, Estaire J. Propiedades químicas, mineralógicas y geotécnicas de la ceniza volcánica de Tajogaite (La Palma, Islas Canarias, España). *Transp Geotech* [Internet]. 2024 [Consultado 1 Oct 2024]; 48: 101326. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101326>
5. Sigurdsson H. *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2nd. ed. [Internet]. Academic Press; 2015 [revisado 2015; citado 2024 Jul 10]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00175-7>
6. Latorre Balaguera AM. Comportamiento Volumétrico de un Suelo no Saturado Derivado de Cenizas Volcánicas del Departamento del Cauca, Colombia [Tesis de maestría]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 2020. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77532>
7. Berdesí Jaimés AF. Dinámica geoquímica en andisoles alto andinos, caso de estudio, la microcuenca Las Palmas [Tesis de maestría]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2023. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85460>
8. Herrera Ardila MC. Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en Colombia: Estudio fundamental e implicaciones en Ingeniería [Tesis doctoral]. Bogotá: Universidad de Los Andes; 2006. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/7812>

9. Guerrero Castro CC, Cruz Velasco LG. Clasificación de suelos finos de Popayán: Basada en la sensibilidad química de los fluidos de poro - suelos derivados de cenizas volcánicas. 1st. ed. Popayán: Universidad del Cauca; 2018.
10. Paul A, Chakraborty P. Caracterización microestructural de arena aluvial que contiene terrones de suelo cohesivos durante la carga y la inundación. *Int J Civ Eng [Internet]*. 2024 [Consultado 1 Oct 2024]; 22: págs. 2041-2058. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40999-024-00974-1>
11. Ruge Cárdenas JC, Molina-Gómez F, Pinto da Cunha R. Comparación experimental entre la sensibilidad y la cementación en el comportamiento no drenado de suelos arcillosos. *Ingeniare. Rev. chil. Ing [Internet]*. 2021 [Consultado 1 Oct 2024]; 29(1): p. 109-119. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052021000100109>
12. Reddy AS, Iyer KKR, Dave TN. Estabilización del suelo activada por álcalis como una vía sostenible para el desarrollo de infraestructura geotécnica resiliente. *Indian Geotech J [Internet]*. 2024 [Consultado 1 Oct 2024]; 54: págs. 945-970. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00893-x>
13. Gómez CM. Suelo cemento: Alternativas de pavimentación para vías de bajo tráfico. *Noticreto Virtual [Internet]*. 2017 [Consultado 10 Jul 2024]; (143). Disponible en: <https://www.asocretovirtual.com/noticreto-virtual/noticreto-143/noticreto-143.html>
14. Anburuvel A. L La ingeniería detrás de la estabilización de suelos con aditivos: una revisión del estado del arte. *Geotech Geol Eng [Internet]*. 2024 [Consultado 1 Oct 2024]; 42: págs. 1-42. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02554-x>
15. Shinde B, Sangale A, Pranita M, Sanagle J, Roham C. Utilización de materiales de desecho para la estabilización del suelo: una revisión exhaustiva. *Prog Eng Sci [Internet]*. 2024 [consultado 15 Nov 2024]; 1 (2-3): 100009. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100009>
16. Roshan MJ, Rashid ASBA Características geotécnicas de los suelos estabilizados con cemento desde varios aspectos: una revisión exhaustiva. *Arab J Geosci [Internet]*. 2024 [Consultado 1 Oct 2024]; 17 (1). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11796-1>
17. Pantoja Quiscualtud O, Cruz Velasco LG, Muñoz-Mendez V. Estudio básico de suelos derivados de ceniza volcánica modificados con cemento (bajos contenidos de cemento. *Rev. UIS Ing [Internet]*. 2024 [Consultado 15 Nov 2024]; 23(4): p. 1-16. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/15377>
18. Niu W, Guo B, Li K, Ren Z, Zheng Y, Liu J, Lin H, Men X. Estabilización de suelos blandos basada en material cementoso mediante estabilizador: evaluación de viabilidad y durabilidad. *Constr Build Mater [Internet]*. 2024 [consultado 15 Nov 2024]; 425: 136046. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136046>
19. Niroumand H, Balachowski L, Parviz R. Técnica de mejora de suelos Nano utilizando cemento. *Sci Rep [Internet]*. 2023 [consultado 15 Nov 2024]; 13: 10724. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37918-z>
20. Rohmatun, Suparma LB, Rifa'I A, Rochmadi. Determinación del contenido óptimo de cemento

- para la estabilización de suelos arenosos limosos como capa base. *Int J Geomate* [Internet]. 2024 [consultado 15 Nov 2024]; 26(115): págs. 124-33. Disponible en: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/4215>
21. Asociación de Cemento Portland. *Boletín de Ingeniería: Manual de construcción suelo-cemento*. Estados Unidos: PCA, 1995.
22. Guerrero C, Cruz L. Estudio experimental de clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas en el suroccidente colombiano con el método SUCS, el AASHTO y un nuevo método de clasificación de suelos. *Ing Desarrollo* [Internet]. 2018 [Consultado 10 Jul 2024]; 36(2): p. 378-397. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/852/85259689007/movil/>
23. Colmenares J, Jaramillo M, Rave D, Rubio G. Estudio sobre los parámetros de sensibilidad y compresibilidad de suelos derivados de cenizas volcánicas en el área de expansión de Pereira [Internet]. 2020 [Consultado 3 Oct 2024]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/20252/TrabajoDeGrado-GeraldineRubio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
24. Baena Salazar D, Fuentes Hernández J, Pino Reyes L, Marín Durán S, Horta Pérez S, Fonseca González W. *Contexto Regional Andina* [Internet]. Observatorio Regional ODS; 2020 [Consultado 26 Nov 2024]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/47782>
25. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología. *Estudio General De Suelos y Zonificación De Tierras*. En: *Estudio General De Suelos y Zonificación De Tierras*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia; 2009. p. 102. <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=78211>
26. Gómez J, Montes NE, Marín E., compiladores. 2023. *Mapa Geológico de Colombia 2023*. Escala 1:1 500 000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2023. Disponible en: [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc\\_1\\_5M2023.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1_5M2023.aspx)
27. Instituto Nacional de Vías. *Normas de ensayo de materiales para carreteras* [Internet]. 2013 [Consultado 10 Jul 2024]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
28. ASTM Internacional. C150/C150M-22: Especificación estándar para cemento Portland. [Internet]. West Conshohocken, Pensilvania: ASTM International; 2024. Disponible en: [https://www.astm.org/c0150\\_c0150m-22.html](https://www.astm.org/c0150_c0150m-22.html)
29. Asociación de Cemento Portland. *Manual del Inspector de Cemento de Suelos*. Skokie: Asociación de Cemento Portland; 2001. 64 págs. [https://www.cement.org/wp-content/uploads/2024/07/pa050-03\\_reduced-size.pdf](https://www.cement.org/wp-content/uploads/2024/07/pa050-03_reduced-size.pdf)
30. Nimmo JR. Porosidad y distribución del tamaño de los poros. *Enciclopedia de Suelos en el Medio Ambiente*: Elsevier. 2024; 3: págs. 295-303.
31. Richard G, Cousin I, Sillon JF, Bruand A, Guerif J. Efecto de la compactación sobre la porosidad de un suelo limoso: influencia sobre las propiedades hidráulicas no saturadas. *Eur J Soil Sci* [Internet]. 2001 [consultado 15 Nov 2024]; 52 (1): págs. 49-58. Disponible en: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00357.x>
32. Fondjo AA, Theron E, Ray RP. Evaluación de la resistencia al cizallamiento no saturado basada en las propiedades del índice del suelo. En: *Teoría y Aplicaciones de la Investigación en Ingeniería Vol. 2*. 2024. págs. 67-94. Disponible en: <https://doi.org/10.9734/bpi/taer/v2/8340A>

33. Yusoff S, Bakar I, Wijeyesekera D, Zainorabidin A, Azmi M, Ramli H. Los efectos de la energía compacta diferente en las propiedades geotécnicas de Kaolin y Laterite. en: Conferencia Internacional de Física e Ingeniería Aplicadas (ICAPE2016); 2017; Penang, Malasia. Disponible en: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4998380>
34. Viveros Rosero L. Influencia del proceso de compactación en la resistencia al corte de un suelo derivado de ceniza volcánica [Tesis de maestría]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 2014. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60252>
35. Fathipour H, Tajani SB, Payan M, Chenari RJ, Senetakis K. Impacto de la infiltración transitoria en la capacidad portante final de zapatas de tiras cargadas oblicua y excéntricamente en suelos parcialmente saturados. *Int J Geomech* [Internet]. 2022 [Consultado 1 Oct 2024]; 23 (2): 04022290. Disponible en: <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-7463>.
36. Pande P, Giri J, Ali MS, Mohammad F, Raut J, Raut S, Sathish T, Giri P. Análisis comparativo de la resistencia al corte saturado-insaturado bajo carga no drenada: validación experimental y predicción de ANN de suelos arcillosos. *AIP Avances* [Internet]. 2024 [Consultado 1 Oct 2024]; 14 (7): 075118. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/5.0206783>.
37. Lince, L. A. y Sadeghian, S. (2023). Propiedades hidrofísicas de suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con el material parental. *Rev Invest Agraria y Ambiental* [Internet]. 2023 [citado 3 oct 2024]; 14(1): p. 51 - 84. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.5891>.
38. Das BM. *Mecánica Avanzada de Suelos*. 5ª ed. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2019.
39. Rojas JW, Consoli NC, Heineck KS. Durabilidad de un suelo contaminado y tratado con cemento. *Rev Ing Constr*. 2008; 23 (3), 8. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732008000300004](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732008000300004)