

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

La expansión de suelos arcillosos es un fenómeno geotécnico que se manifiesta a través de la aparición de grietas y deformaciones en edificaciones, como resultado de los cambios en el contenido de humedad del suelo. Este tipo de comportamiento del terreno representa un desafío importante para la construcción de infraestructuras seguras, especialmente en regiones donde predominan suelos con alta plasticidad.

En diversas zonas del país, se han reportado daños considerables en viviendas y estructuras, los cuales se atribuyen a este tipo de suelos. Tanto los habitantes de estas zonas como entidades técnicas han identificado estos problemas de manera recurrente.

En el pasado se han intentado aplicar soluciones empíricas o convencionales, pero en muchos casos, los resultados no han sido sostenibles ni suficientemente eficaces, es por esta situación ha generado la necesidad de buscar nuevas alternativas que permitan comprender mejor el comportamiento de estos suelos y proponer medidas más efectivas.

Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de suelos arcillosos de alta plasticidad al ser modificados con la incorporación de cal y ceniza de carbón en distintas proporciones. A través de este análisis se pretende observar cómo cambian propiedades como la plasticidad y la expansión del suelo, aportando datos que puedan ser útiles para futuras decisiones en proyectos de infraestructura contruidos sobre este tipo de terreno.

El desarrollo de esta investigación se basa principalmente en conocimientos de la Ingeniería Geotécnica, rama de la ingeniería civil que estudia el comportamiento de los suelos en su estado natural y modificado. También se integran elementos de la química del suelo y de ciencias ambientales.

Los resultados que se obtengan de este estudio podrían tener un impacto positivo en la planificación y ejecución de obras civiles, contribuyendo a reducir los riesgos asociados a los suelos expansivos y mejorando la calidad de vida de las poblaciones que habitan en zonas afectadas.

1.2. Antecedentes de trabajos relacionados

- Estabilización de suelos arcillosos con sustancias cementante, ceniza de cascarilla de arroz-cal (Camata Cari Nélida Noemi).
- Estabilización de suelos arcillosos aplicando cenizas de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho (Lux Eva Mamani Barriga).
- Análisis del comportamiento de las características físico-mecánicas de la subrasante estabilizada con cal puzolana / Mansilla Onofre.
- Análisis de la incidencia de las cenizas de carbón en la expansión de arcillas de alta compresibilidad / Chavarría Barroso.

1.3. Justificación.

1.3.1. Justificación académica.

El presente proyecto se enmarca dentro del campo de la ingeniería civil, específicamente en la geotecnia y la estabilización de suelos, que son áreas fundamentales para el desarrollo de infraestructuras seguras y duraderas, ya que los suelos juegan un papel crítico en la estabilidad de cualquier construcción.

Las teorías que respaldan este proyecto se centran en el comportamiento de los suelos expansivos, que tienen la capacidad de cambiar su volumen con la variación de humedad, lo que puede generar problemas en las estructuras construidas sobre ellos. A través de la teoría de la plasticidad y los límites de Atterberg, es posible evaluar y mejorar las propiedades del suelo.

1.3.2. Justificación sobre la aplicación técnica-práctica.

Las mezclas de cal combinadas con otros materiales como la ceniza de carbón, han demostrado tener efectos positivos en la reducción de la plasticidad y la expansión de suelos problemáticos.

El uso de la ceniza de carbón como material reciclado es una opción innovadora que, además de contribuir a la sostenibilidad, mejora la calidad del suelo al reducir sus propiedades expansivas.

Este proyecto ofrece una solución práctica al problema de la expansión y plasticidad de los suelos, lo cual es crucial en proyectos de ingeniería civil.

Los resultados de la investigación, centrados en la reducción de la plasticidad mediante la mezcla de cal y ceniza de carbón, representan una aplicación directa y efectiva en la mejora de las propiedades del suelo.

La técnica propuesta es fácil de interpretar y desarrollar en los proyectos reales, y puede ser replicada por otros ingenieros civiles enfrentados a problemas similares de suelos expansivos.

Las pruebas de caracterización, como la determinación de la granulometría, los límites de Atterberg y la expansión, son procedimientos ampliamente utilizados en la práctica geotécnica.

1.3.3. Justificación e importancia social.

La importancia social de este proyecto radica en su contribución a la mejora del entorno urbano y rural.

Los suelos expansivos son comunes en muchas regiones, y su estabilización adecuada es fundamental para garantizar la seguridad y durabilidad de las infraestructuras. Si la solución propuesta demuestra ser eficaz, podrá aplicarse en la construcción de viviendas, carreteras y otras obras civiles, mejorando la calidad de vida de las personas que habitan en zonas con suelos problemáticos. Además, el uso de ceniza de carbón como material reciclado tiene un impacto ambiental positivo al reducir la cantidad de residuos generados por los asadores locales, evitando que estos terminen en vertederos municipales.

Este enfoque contribuye a la sostenibilidad, ofreciendo una alternativa ecológica que promueve la economía circular.

1.4. Planteamiento del problema.

1.4.1. Situación problemática.

Los suelos expansivos son caracterizados por su elevada plasticidad, representan un serio desafío en la ingeniería civil debido a su tendencia a expandirse al humedecerse y contraerse al secarse, lo cual genera deformaciones, grietas en edificaciones, desplazamiento de infraestructuras subterráneas y ruptura de pavimentos.

Esta problemática es un comportamiento común en suelos arcillosos finos, donde el drenaje es limitado, afectando negativamente la estabilidad y durabilidad de las obras civiles. Ante esta situación, la presente investigación se enfoca en evaluar el uso de aditivos naturales, específicamente la cal y la ceniza de carbón, como alternativa para

reducir la plasticidad del suelo, mediante su incorporación en diferentes proporciones al material arcilloso.

De no abordarse esta problemática de manera adecuada, las construcciones sobre este tipo de suelo seguirán enfrentando fallas estructurales, mayores costos de mantenimiento y riesgos de colapso.

Se plantea realizar ensayos experimentales que permitan comprobar si la mezcla de estos aditivos mejora el comportamiento del suelo, con el fin de aportar una solución técnica que permita intervenir eficazmente en proyectos de infraestructura ubicados en terrenos con alta plasticidad.

1.4.2. Delimitación del tiempo.

Los ensayos estarán influenciados de la siguiente manera.

Tabla 1. Cronograma de procedimiento de investigación

Fecha aproximada	Evento	¿Cómo tributa este dato?
Marzo-2023	Carta de solicitud de uso de laboratorio	Se presenta una carta de solicitud al director de la facultad de Ciencias y Tecnología.
14-marzo-2023	Extracción de muestras	Se realiza extracciones de muestras de suelos finos
16-marzo-2023	Se da inicio al ensayo de clasificación de los suelos finos mediante	Se empieza a clasificar los suelos extraídos en busca del suelo más desfavorable con una característica de suelo de elevada plasticidad
3-abril	Se da inicio a la caracterización de la muestra más desfavorable	Una vez encontrado la muestra más desfavorable se dio inicio a los ensayos de laboratorio de caracterización de la muestra natural
10-abril	Se da inicio con la adición de mezclas de los aditivos	Se comenzó los ensayos de límite de Atterberg adicionando diferentes porcentajes de Cal y Ceniza de Carbón a la muestra natural

2-mayo	Ensayos de compactación	Se realiza los ensayos de compactación al puro y con los incrementos de aditivos
Junio	Ensayos con el edómetro	Se preparan las muestras para dar inicio a las lecturas del comportamiento del suelo de alta plasticidad
Julio	Selección del porcentaje más optimo	Considerando su comportamiento en cada ensayo
Agosto	Presentación de borrador	Borrador completo para ser revisado y aprobado por el docente
A partir de septiembre	Pre defensa	Pre defensa con tribunales

Fuente: Elaboración propia

1.4.3. Delimitación espacial

La presente investigación se desarrolla en el laboratorio de suelos de la universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se realizaron los ensayos de caracterización y análisis del material proveniente del barrio Rosal, ubicado en municipio de Tarija, provincia Cercado de la ciudad de Tarija. En esta zona se identifican suelos del tipo CH, correspondientes a arcillas de alta plasticidad, que presentan condiciones no favorables para la ejecución de obras de infraestructura debido a su comportamiento expansivo.

El estudio se enmarca dentro del área temática de mecánica de suelos, con un enfoque específico en el mejoramiento de suelos mediante estabilización química.

La aplicación de esta investigación está orientada a optimizar las condiciones del terreno para futuras obras civiles, mediante el uso de aditivos naturales como la cal y la ceniza de carbón, con el objetivo de reducir la plasticidad del suelo y promover soluciones técnicas sostenibles en proyectos de obras civiles.

1.4.4. Formulación del problema.

¿Cómo se determina si la adición de pequeñas cantidades de Cal y Ceniza de Carbón en suelos CH reduce su plasticidad?

1.5. Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

Analizar la reducción de la plasticidad en suelos arcillosos de alta plasticidad, considerando la adición de distintos porcentajes de cal y ceniza de carbón, con la finalidad de proponer una alternativa viable para la mejora de suelos arcillosos en obras civiles.

1.5.2. Objetivos específicos.

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural de tipo arcilloso (CH).
- Evaluar el comportamiento del suelo arcilloso tratado con diferentes porcentajes de cal y ceniza de carbón.
- Determinar el porcentaje óptimo de la mezcla de cal y ceniza de carbón que reduzca significativamente la plasticidad del suelo.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos para establecer conclusiones sobre la viabilidad del tratamiento propuesto.

1.6. Hipótesis.

La adición de mezclas de cal y ceniza de carbón mejora la reducción de la plasticidad en suelos de alta compresibilidad.

1.7. Conceptualización y operacionalización de las variables.

1.7.1. Variable independiente:

La cantidad de Cal y Ceniza de Carbón en arcillas.

Tabla 2. Variables independientes

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Cantidad de cal-ceniza de carbón en arcillas	Se trata del incremento de Cal y Ceniza de Carbón de forma gradual al suelo seco de arcilla	Masa de suelo seco	Gramos(g)	Preparación previa de la muestra según normativa
		Cal y ceniza de carbón	Porcentaje (%)	Calculada respecto del peso total de la muestra seca. Se usará por lo menos cinco valores.

	con alta plasticidad	Mescla de suelo más cal y ceniza de carbón	Porcentaje (%)	Realizada por separado en función a los valores determinados, se variará en porcentaje
--	----------------------	--	----------------	--

Fuente. Elaboración propia

1.7.2. Variable dependiente

La plasticidad en las arcillas

Tabla 3. Variables dependientes

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Reducción de la plasticidad	Comportamiento de la arcilla en presencia de la cal y ceniza de carbón, comparados a una muestra pura demostrados en ensayos de límites de Atterberg y expansión en el odómetro	Humedad optima	Porcentaje (%)	Valor extraído de la curva de compactación de las mezclas
		Densidad máxima	(g/cm3)	Valor extraído de la curva de compactación de las mezclas.
		Límite líquido	Porcentaje (%)	El contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado liquido
		Límite plástico	Porcentaje (%)	El contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico
		Expansión	Porcentaje (%)	Con datos de la humedad optima y Densidad máxima se prepara la

				muestra para ser saturado en el odómetro
		Curado	Datos de expansión por día	Sumergido durante 48 horas
		Resultados	Informe final	Proceso de cálculos normados

Fuente. Elaboración propia.

1.8. Alcance de la investigación

El presente estudio tiene un alcance causal o explicativo, ya que busca identificar la relación causa-efecto entre la aplicación de diferentes proporciones de estabilizantes y la reducción de la plasticidad de un suelo de tipo CH (alta plasticidad), ubicado en el barrio “El Rosal” de la ciudad de Tarija.

Para ello, se realiza ensayos de laboratorio como los límites de Atterberg y su expansión. En cada tratamiento experimental se mezcla conjuntamente cal y ceniza de carbón al suelo natural, utilizando combinaciones con cal en proporciones del 3%, 4% y 5%, y ceniza de carbón en proporciones del 5%, 10%, 15%, 20% y 25%.

Estas mezclas permiten evaluar cómo varía la plasticidad del suelo según el contenido de los aditivos. Además, el ensayo de expansión fue monitoreado durante un periodo de dos días, con el objetivo de observar el comportamiento del suelo a corto plazo frente a las distintas dosificaciones aplicadas

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es un proceso mediante el cual se modifican intencionalmente las propiedades físicas, químicas o mineralógicas de un suelo natural, con el propósito de mejorar su comportamiento frente a cargas estructurales, su durabilidad en el tiempo y su estabilidad frente a condiciones ambientales adversas (Bell, 1996).

Es una técnica ampliamente empleada en ingeniería civil, especialmente en proyectos donde el suelo de fundación presenta características inadecuadas para ser utilizado directamente como soporte estructural.

En términos generales, la estabilización busca incrementar la resistencia mecánica del suelo, reducir su plasticidad, minimizar su deformabilidad y controlar su sensibilidad al agua, todo ello con el fin de garantizar condiciones óptimas para el diseño y construcción de obras civiles (Sherwood, 1993). Esta técnica permite transformar suelos problemáticos como las arcillas expansivas o los suelos muy blandos en materiales más estables y confiables para la ingeniería.

Según la definición establecida por la norma ASTM D653 (2012), la estabilización de suelos es “el procedimiento mediante el cual se aumenta la estabilidad y resistencia de un suelo mediante la adición de un agente estabilizante o la modificación de sus propiedades mediante energía mecánica”.

Esta definición abarca, tanto las técnicas físicas como químicas, lo que implica que no necesariamente se requieren aditivos externos para lograr un cambio significativo en el comportamiento del suelo.

Desde el punto de vista de Bell (1996), la estabilización representa una solución técnica efectiva y económica, ya que permite aprovechar los suelos in situ, evitando su reemplazo por materiales importados.

Esta ventaja se traduce en menores costos de transporte y menor impacto ambiental, lo que ha hecho que esta técnica cobre mayor importancia en el marco del desarrollo sostenible de infraestructuras.

En obras civiles, la estabilización se utiliza no solo en la preparación de plataformas o terraplenes, sino también en la mejora de subrasantes para carreteras, pavimentos,

cimentaciones superficiales, rellenos estructurales e incluso taludes o áreas de depósito. La necesidad de estabilizar suelos se vuelve aún más crítica en zonas con presencia de arcillas de alta plasticidad (suelos tipo CH), las cuales presentan altos índices de hinchamiento, retracción y cambios volumétricos peligrosos (Petry & Little, 2002).

Cabe destacar que no todos los suelos pueden estabilizarse con la misma eficacia ni mediante los mismos métodos.

La naturaleza mineralógica del suelo, su contenido de humedad, su estructura interna y su composición química influyen directamente en la elección de la técnica de estabilización más adecuada (Sherwood, 1993). Por ello, cualquier proceso de estabilización debe estar precedido por una caracterización geotécnica detallada y, en muchos casos, por ensayos de laboratorio que simulen las condiciones reales del terreno.

2.1. Tipos de estabilización de suelos

Existen diferentes métodos de estabilización, los cuales se agrupan principalmente en estabilización mecánica, química, física y biológica, dependiendo del mecanismo mediante el cual se modifican las propiedades del suelo.

La selección del tipo de estabilización más adecuado depende de factores como la naturaleza del suelo, el uso previsto de la estructura, condiciones ambientales y consideraciones económicas (Sherwood, 1993; Petry & Little, 2002).

2.1.1. Estabilización mecánica

La estabilización mecánica consiste en mejorar las propiedades del suelo sin modificar su composición química sino a través de la compactación, mezclas con otros suelos o materiales granulares. Este método incluye:

- Compactación (manual, mecánica, dinámica)
- Mezcla de suelos de distinta granulometría
- Reemplazo parcial del suelo inadecuado

2.1.2. Estabilización química

Este tipo de estabilización implica la adición de productos químicos al suelo para modificar sus propiedades físicas y químicas mediante reacciones internas.

Los agentes más comunes son:

- Cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Cemento Portland

- Ceniza volante
- Escoria granulada
- Polímeros, cloruros, enzimas o biopolímeros

Los aditivos reaccionan con los minerales arcillosos y con el agua para formar productos cementantes que aumentan la resistencia y disminuyen la plasticidad del suelo (Petry & Little, 2002). Es especialmente útil en suelos arcillosos de alta plasticidad.

“La cal y el cemento son estabilizantes ampliamente utilizados debido a su capacidad para inducir reacciones puzolánicas que mejoran la estructura del suelo.” (Bell, 1996)

2.1.2.1. Cal

La cal es un producto resultante de la descomposición de las rocas calizas (CaCO_3) por la acción del calor.

Estas rocas calentadas a más de $900\text{ }^\circ\text{C}$ se obtiene el óxido de calcio (CaO), conocido con el nombre de cal, producto sólido de color blanco y peso específico de 3300 Kg/m^3 .

Figura 1. Cal



Fuente: CALCO

La cal reacciona violentamente en contacto con el agua, con desprendimiento de calor que alcanza los $90\text{ }^\circ\text{C}$, realizándose la hidratación obteniéndose una pasta blanca llamada cal hidratada o cal apagada (hidróxido de calcio o $\text{Ca}(\text{OH})_2$). ICG & GERENCIA, 2010.

La cal es uno de los productos con la capacidad de proveer una gran variedad de beneficios, los cuales se mencionan a continuación:

- Secar
- Modificar
- Estabilizar.

En Bolivia, la cal es un material importante en diversas áreas, especialmente en la construcción, la minería y la agricultura, aunque Bolivia no tiene tanta literatura técnica y científica específica sobre la cal en comparación con otras regiones.

La producción de cal en el país está principalmente asociada a las industrias del cemento y la minería, pero también se usa en la agricultura para corregir la acidez de los suelos y en la conservación de monumentos históricos.

Figura 2. Cal procesada



Fuente: Calco

Tipos de cal:

A. Cal viva (óxido de calcio, CaO)

La cal viva en Bolivia se utiliza principalmente en la industria del cemento, en la minería, y en la producción de cal hidratada. Se obtiene a partir de la calcinación de la caliza, un recurso abundante en el país.

Usos principales en Bolivia:

- Industria del cemento: Empresas como cementos San Martín y cementos Fancesa utilizan cal viva como insumo en la fabricación de cemento portland.
- Minería: En la minería, especialmente en el tratamiento de minerales de plomo, zinc, cobre y otros metales, la cal viva se usa para neutralizar los ácidos y ayudar en el proceso de flotación de minerales. Gonzales, H. & Cárdenas, J. (2010).

B. Cal apagada (hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)

La cal apagada es uno de los productos más comunes en Bolivia, especialmente en la construcción. Se utiliza ampliamente en la preparación de morteros y en la restauración de edificaciones.

Usos principales en Bolivia:

- Construcción: En la construcción de viviendas de bajo costo y en la restauración de monumentos coloniales y edificios históricos. En ciudades como Potosí y Sucre, la cal apagada se emplea en la conservación de monumentos coloniales debido a sus propiedades de transpirabilidad.
- Agricultura: En la agricultura, la cal hidratada se utiliza para corregir la acidez del suelo, mejorando la fertilidad de los terrenos. Salazar, A. (2015).

C. Cal aérea

La cal aérea también se usa en Bolivia, aunque su aplicación es más limitada. Se utiliza principalmente en el ámbito de la construcción para hacer morteros y en algunos productos de acabados decorativos.

Usos principales en Bolivia:

- Restauración de monumentos históricos: Especialmente en lugares con climas secos, como en Potosí o Sucre, donde la cal aérea se utiliza para restaurar edificios coloniales, debido a su capacidad para endurecer al reaccionar con el dióxido de carbono del aire.
- Pinturas y acabados decorativos: La cal aérea también se utiliza para fabricar pinturas de cal, conocidas por sus propiedades transpirables, que son comunes en las construcciones tradicionales bolivianas. Ramírez, E. & Pacheco, S. (2012).

D. Cal hidráulica

La cal hidráulica no es tan común en Bolivia, pero se encuentra en algunas aplicaciones industriales y en la producción de cemento.

Usos principales en Bolivia:

Construcción en ambientes húmedos o sumergidos: Aunque no es tan frecuente, se utiliza en algunos proyectos específicos donde la cal hidráulica puede endurecer bajo el agua, como en la construcción de infraestructura hidráulica o en cementos especiales. Vargas, R. (2017).

E. Cal natural

La cal natural en Bolivia es menos conocida, pero algunas investigaciones apuntan a su uso en zonas rurales para la construcción de viviendas tradicionales. En áreas rurales, la cal natural puede mezclarse con otros materiales locales, como tierra y arena, para producir morteros.

Usos principales en Bolivia:

Construcción de viviendas rurales: En ciertas regiones rurales de Bolivia, especialmente en el altiplano, la cal natural se usa en la producción de morteros para construcción de viviendas en combinación con materiales como adobe o ladrillos de barro. Mendoza, P. & Céspedes, C. (2014).

F. Cal dolomítica en Bolivia

La cal dolomítica tiene aplicaciones limitadas en Bolivia debido a que su principal uso es en la industria refractaria y en procesos industriales específicos, como la producción de acero y materiales de construcción.

Usos principales en Bolivia:

Industria del acero: Aunque Bolivia no es uno de los principales productores de acero a nivel mundial, la cal dolomítica se utiliza en algunas industrias del país en la producción de materiales refractarios. López, H. & Ramos, F. (2015).

2.1.2.2. Ceniza de carbón

Las cenizas de materiales orgánicos provienen de la quema de diferentes tipos de troncos y tallos, estas cenizas presentan propiedades de un material puzolánico, altas proporciones en sílice y alúmina, a la presencia de agua éste reacciona químicamente y obtiene propiedades cementantes. Se clasifican principalmente en dos tipos: las cenizas volantes, que son pequeñas partículas que se generan y se mantienen en suspensión en los gases de combustión, y las cenizas de fondo, que son los residuos más gruesos que se acumulan en la parte inferior de la caldera.

Las cenizas de carbón contienen una mezcla de minerales, metales pesados y compuestos químicos, lo que les confiere propiedades que pueden ser aprovechadas en diversas aplicaciones, como en la producción de cemento, materiales de construcción y enmiendas para suelos. Su gestión adecuada de las cenizas de carbón es fundamental para minimizar su impacto ambiental, al tiempo que se promueve la economía circular mediante su reutilización. A. P. M. G. García.

Figura 3. Cenizas de Carbón



Fuente: Elaboración propia

En el ámbito de la ingeniería civil, las cenizas de carbón han demostrado ser un material valioso para mejorar la sostenibilidad de las construcciones. Su uso en la fabricación de concreto es uno de los más destacados, ya que las cenizas volantes pueden actuar como un aditivo que mejora la resistencia y durabilidad del concreto, al tiempo que reduce la necesidad de cemento Portland, disminuyendo así la huella de carbono de las estructuras.

Figura 4. Carbón para comercialización



Fuente: ABT

Investigaciones de B. K. Chatterjee han demostrado que la incorporación de cenizas de carbón en mezclas de concreto no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también proporciona beneficios en términos de aislamiento térmico y acústico.

Además, las cenizas de carbón pueden utilizarse en la estabilización de suelos, mejorando su capacidad de carga y reduciendo la erosión. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad en proyectos de infraestructura, sino que también ofrece una solución eficiente para el manejo de residuos industriales.

Las cenizas de carbón son similares a conglomerantes puzolánicos, pero con resultados muy poco favorables en comparación a la utilización del cemento y cal, se necesita la adición de agua y presencia de un catalizador o activante como la cal en proporciones mínimas. (CKraemer y J. Pardillo, Ingeniería de carreteras).

2.1.3. Estabilización física

En la estabilización física no se cambia la composición del suelo ni se introducen aditivos, sino que se modifica el comportamiento mecánico del suelo mediante elementos de refuerzo o confinamiento, como:

- Geotextiles y geomallas.
- Columnas de grava o arena.
- Encapsulado de suelo.
- Revestimiento superficial.

Este método se utiliza con frecuencia para reforzar taludes, controlar la erosión o mejorar el desempeño de suelos blandos en cargas superficiales (Holtz et al., 2011).

2.1.4. Estabilización biológica (bioestabilización)

Es un método emergente que utiliza microorganismos o productos biológicos para modificar la estructura del suelo, como por ejemplo la precipitación inducida de carbonato de calcio (CaCO_3) por bacterias que:

- Incrementa la rigidez y reduce la permeabilidad.
- Amigable con el medio ambiente.

“Los métodos de bioestabilización, como la biomineralización microbiana, tienen el potencial de ser alternativas sostenibles a los métodos químicos convencionales.” (De Jong et al., 2006).

2.1.5. Comparación general

Tabla 4. Comparación general

Tipo de estabilización	Principio	Ejemplos	Aplicación más común
Mecánica	Compactación o mezcla	Compactadoras, suelo-grava	Caminos, rellenos
Química	Reacción con aditivos	Cal, cemento, ceniza	Suelos arcillosos, CBR bajo
Física	Refuerzo o confinamiento	Geotextiles, columnas	Taludes, suelos blandos
Biológica	Procesos microbianos	Urea, bacterias calcificantes	Aplicaciones ecológicas

Fuente; Elaboración propia

2.2. Condiciones del suelo que influyen en la estabilización

La efectividad de cualquier método de estabilización depende en gran medida de las propiedades geotécnicas y mineralógicas del suelo a tratar. Por ello, es fundamental realizar un estudio detallado de las condiciones del suelo, que incluye su tipo (textura), comportamiento mecánico, composición química, humedad, plasticidad y contenido de materia orgánica, entre otros aspectos, la caracterización del suelo permite seleccionar la técnica más adecuada y el tipo de estabilizante óptimo (Sherwood, 1993).

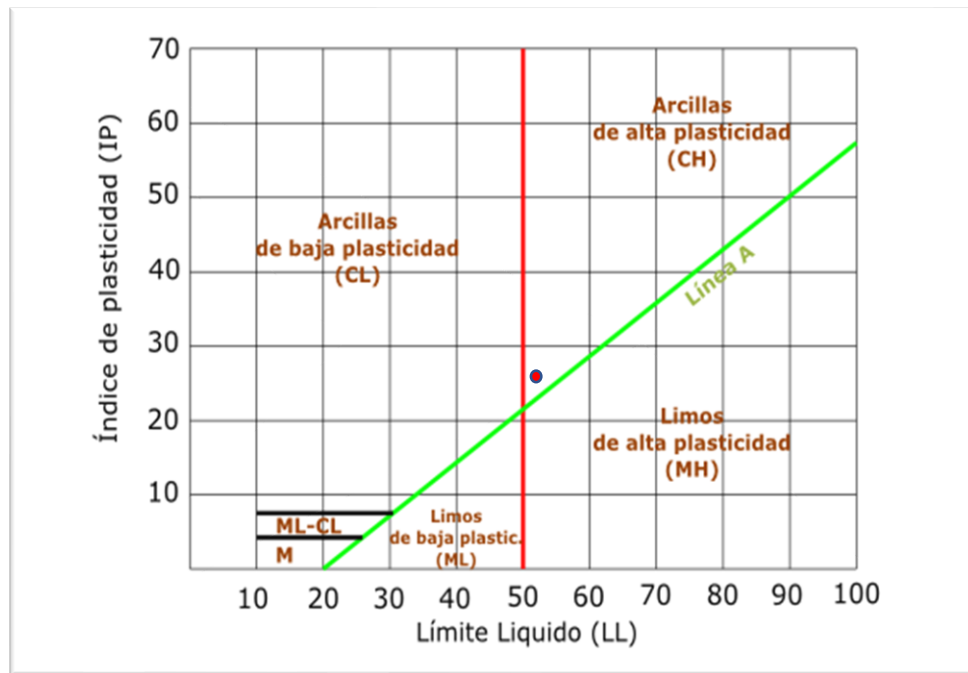
2.3. Tipo de suelo (clasificación textural y unificada)

El tipo de suelo es un factor determinante, ya que no todos responden igual ante los métodos de estabilización. Según la clasificación SUCS (Unified Soil Classification System), los suelos se dividen en:

Suelos granulares (arena, grava): son más estables naturalmente; no suelen requerir estabilización química, pero pueden necesitar compactación o refuerzo físico.

Suelos finos (limos, arcillas): tienden a presentar mayor plasticidad, retención de agua y problemas de expansividad; son los más comunes para estabilización química con cal o cemento (Bell, 1996).

Figura 5. Clasificación de materiales en función de los límites de Atterberg.



Fuente: William Lambe, Mecánica de suelos.

En particular, los suelos tipo CH (arcillas de alta plasticidad) son los más problemáticos y los que más comúnmente requieren tratamientos especiales debido a su alta capacidad de hinchamiento y contracción (Petry & Little, 2002).

Figura 6. Suelo grueso (Grava)



Fuente: Dreamstime

“Las arcillas plásticas suelen responder bien a la estabilización con cal, ya que su estructura permite la reacción puzolánica con los iones de calcio.” (Sherwood, 1993)

Figura 7. Plasticidad en suelos



Fuente: TYPCO

Figura 8. Muestra de suelos



Fuente: EcuRed

2.4. Índice de plasticidad (IP)

El índice de plasticidad (IP) es una medida clave para decidir la estabilización, ya que suelos con IP elevado (>20) tienen mayor tendencia a problemas como agrietamiento por retracción, pérdida de soporte en condiciones húmedas, y elevada deformabilidad.

Suelos con $IP < 10$ generalmente no requieren estabilización.

Suelos con IP entre 10 y 20 pueden estabilizarse con cemento o cal dependiendo de su actividad.

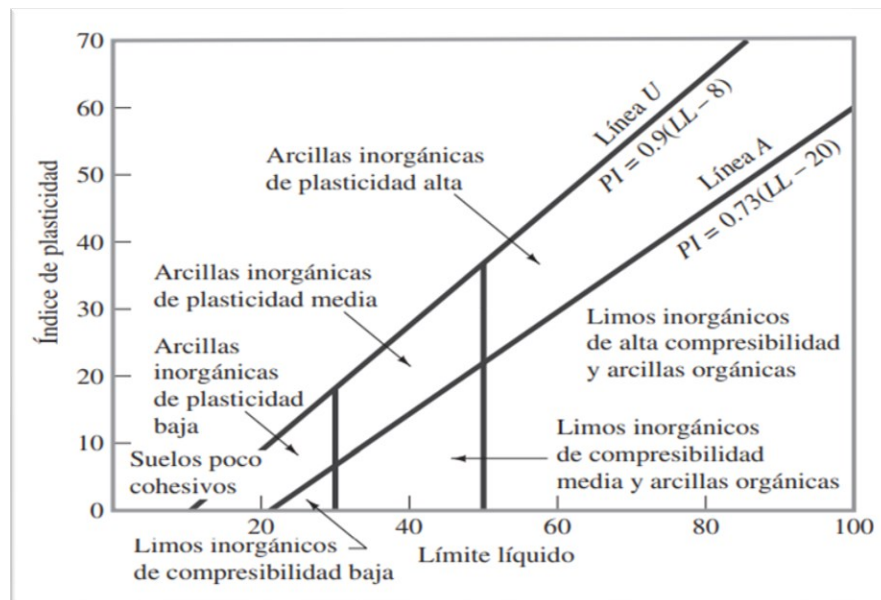
Suelos con $IP > 20$ suelen ser candidatos ideales para mezclas de cal y adiciones minerales como ceniza de carbón (Bell, 1996).

Tabla 5. Predicción de la expansividad del suelo por índice de plasticidad.

Grado de expansión	IP: %	
	Chen	IS 1498
Bajo	0-15	<12
Medio	10-35	12-23
Alto	20-55	23-32
Muy alto	>35	>32

Fuente: Chen 1975, IS1498

Figura 9. Carta de plasticidad



Fuente: Braja M.DAS. Henderson.

2.5. Humedad natural y capacidad de retención de agua

Los suelos finos, especialmente arcillosos, tienen una alta afinidad por el agua, lo que influye negativamente en su compactación y resistencia.

Un alto contenido de humedad natural puede reducir la eficiencia de la estabilización, ya que:

- Dificulta la reacción con estabilizantes químicos.
- Disminuye la densidad seca alcanzable.

Figura 10. Suelo húmedo



Fuente: InfoAgronomo

Figura 11. Parámetros de humedad del suelo



Fuente: Proain.

2.6. Contenido de materia orgánica

Los suelos con alto contenido de materia orgánica (>2%) presentan baja reactividad con cal o cemento, ya que las sustancias orgánicas pueden inhibir las reacciones de estabilización.

En estos casos se recomienda remover la capa orgánica, o utilizar aditivos especiales. Los suelos turbosos, pantanosos o con residuos agrícolas deben ser evaluados con pruebas de laboratorio (Sherwood, 1993).

Figura 12, Suelo con materia orgánica



Fuente; Coarval

2.7. Presencia de sulfatos o sales solubles

Los suelos con presencia de sulfatos solubles pueden reaccionar adversamente con estabilizantes como el cemento o la cal, formando compuestos expansivos como la ettringita, que causan agrietamientos y pérdida de integridad estructural (Petry & Little, 2002).

2.8. Parámetros geotécnicos adicionales

Otros parámetros importantes incluyen:

- Densidad seca máxima y humedad óptima (determinadas mediante ensayo Proctor).
- Resistencia no confinada (ensayo UCS).
- Capacidad de carga CBR (California Bearing Ratio).
- Coeficiente de permeabilidad (importante para control de infiltración).

2.9. Naturaleza de los suelos arcillosos expansivos

Los suelos arcillosos expansivos, también conocidos como suelos con arcilla activa o suelos de tipo "bentonita", presentan una estructura mineral específica, compuesta

principalmente por minerales de arcilla, como la montmorillonita, que tienen la capacidad de absorber agua. Según la investigación de Donald W. H. (1986), los minerales de arcilla, debido a su estructura laminar, pueden intercalarse con moléculas de agua, lo que les permite hincharse considerablemente.

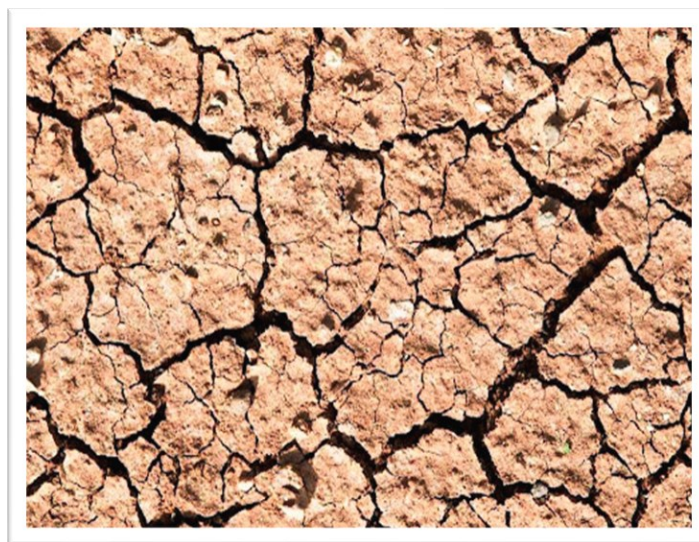
Figura 13. Camino con presencia de arcillas



Fuente: Tarija 200

Este proceso de hinchazón puede variar dependiendo de la cantidad de agua presente en el suelo y la composición mineralógica. En condiciones de sequía o desecación, estos suelos tienden a contraerse, lo que produce un comportamiento cíclico que afecta la estabilidad de las construcciones.

Figura 14. Arcillas expansivas



Fuente: Geonovatek

2.9.1. Causas de la expansión

Las causas de la expansión de los suelos arcillosos están relacionadas principalmente con la variabilidad del contenido de agua en el suelo.

Figura 15. Causas de suelos expansivos



Fuente: Elaboración propia

Según Bishop et al. (1994), la cantidad de agua presente en un suelo arcilloso puede cambiar por diversas razones, como las precipitaciones estacionales, la irrigación excesiva, o la fluctuación en el nivel freático.

Cuando el contenido de agua aumenta, las partículas de arcilla absorben este líquido y aumentan su volumen, causando la expansión del suelo.

Este fenómeno se ve exacerbado en zonas donde las precipitaciones son irregulares, lo que puede generar ciclos de expansión y contracción.

2.9.2. Impacto en las estructuras

El impacto de la expansión de los suelos arcillosos en las estructuras construidas sobre ellos puede ser significativo. Según Fredlund y Rahardjo (1993), la expansión puede afectar la integridad de los cimientos, causando asentamientos diferenciales y fisuras.

Figura 16. Ruptura de suelos



Fuente: JH ingeniería estructural

Estos movimientos del suelo pueden comprometer la estabilidad de edificios, carreteras y otras infraestructuras, incrementando los costos de reparación y mantenimiento.

El comportamiento no homogéneo de la expansión también puede llevar a daños estructurales a lo largo del tiempo, por lo que el reconocimiento temprano de su presencia es crucial en la planificación de proyectos de construcción.

2.10. Procesos y métodos de estabilización de suelos

La estabilización de suelos no se limita únicamente a la selección de un aditivo o técnica, sino que involucra una serie de etapas técnicas bien definidas que deben cumplirse para asegurar que la intervención sea efectiva y duradera. Estos procesos abarcan desde la evaluación inicial del suelo, la selección del método, la dosificación y mezcla del estabilizante, hasta el curado y control de calidad posterior (Petry & Little, 2002; Bell, 1996).

2.11. Proceso general de estabilización

Existen varias estrategias para mitigar los efectos de los suelos arcillosos expansivos. Laloui et al. (2006) mencionan que uno de los métodos más comunes consiste en mejorar las propiedades del suelo mediante técnicas de estabilización, como la inclusión de cal, cemento o geo sintéticos.

La estabilización mejora la capacidad portante del suelo y reduce su capacidad de hinchamiento. Otra estrategia importante es el diseño adecuado de los cimientos, utilizando técnicas como los pilotes o los cimientos profundos que pueden transferir las cargas a capas más estables del terreno. Además, se han desarrollado sistemas de drenaje para controlar el contenido de agua del suelo y evitar que los ciclos de expansión y contracción se repitan.

Figura 17. Estabilización de suelos



Fuente: Horcalsa

Un proceso de estabilización típicamente incluye las siguientes fases:

a) Caracterización del suelo

Es la etapa inicial y fundamental. Se realiza una serie de ensayos de laboratorio y pruebas de campo para conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo. Se determinan:

- Límites de Atterberg (LL, LP, IP)
- Granulometría
- Densidad y humedad natural
- Porcentaje de expansión

Figura 18, Ensayos de caracterización



Fuente; Elaboración propia

“El éxito de una estabilización depende directamente del nivel de conocimiento previo sobre el comportamiento del suelo a estabilizar.” (Holtz et al., 2011)

b) Selección del tipo de estabilización y estabilizante

Según los resultados del estudio, se elige:

Tipo de técnica (química, mecánica, física)

Tipo de estabilizante (cal, cemento, ceniza, polímero, etc.)

En casos de estabilización química, también se definen las dosis aproximadas a utilizar, que luego deben ser validadas mediante pruebas de laboratorio (Bell, 1996).

c) Diseño de mezclas (dosificación óptima)

Se elaboran muestras del suelo mezcladas con diferentes proporciones de estabilizante, y se evalúan propiedades clave como:

- Índice de plasticidad (IP)
- Compactación (Proctor modificado)
- Expansión libre

Este proceso se conoce como diseño de mezcla estabilizada.

El objetivo es encontrar la dosificación mínima que cumpla con los requisitos técnicos sin sobre dosificar (Petry & Little, 2002).

“La estabilización debe ser técnicamente efectiva y económicamente viable, por lo que la dosificación óptima es crucial para evitar excesos de material o fallas técnicas.” (Sherwood, 1993)

d) Preparación del suelo

Consiste en el aireado, roturado o escarificación del terreno natural. Si el suelo está muy húmedo, se puede permitir un periodo de secado previo. También se eliminan materiales orgánicos, piedras grandes o desechos (Bell, 1996).

e) Aplicación del estabilizante y mezclado

El estabilizante (cal, ceniza, etc.) se esparce de manera uniforme sobre el suelo y luego se procede a una mezcla homogénea, utilizando:

Palas manuales (en laboratorio)

Motoniveladoras, mezcladoras o rotovatores (en campo)

En mezclas químicas, es esencial asegurar una reacción uniforme y completa, especialmente cuando se trata de suelos arcillosos con alta capacidad de retención (Holtz et al., 2011).

f) Humedecimiento, compactación y curado

Una vez mezclado, se ajusta el contenido de agua al óptimo de compactación y se compacta en capas de 15 a 20 cm, usando compactadores adecuados.

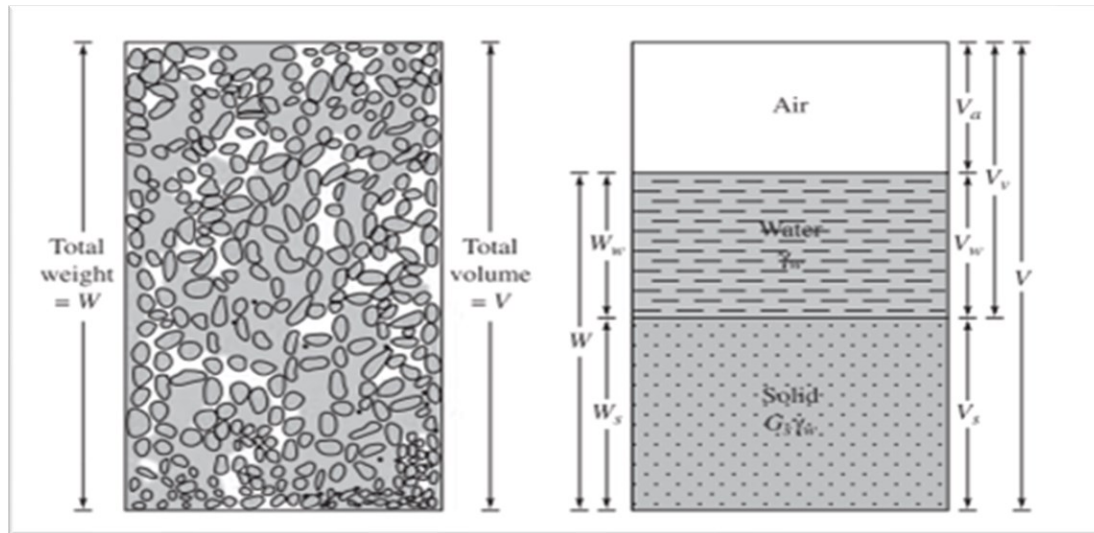
En estabilizaciones químicas (como con cal), se recomienda un tiempo de curado mínimo de 7 días para permitir el desarrollo de reacciones puzolánicas, y de hasta 28 días en proyectos estructurales exigentes (Petry & Little, 2002).

g) Controles de calidad

Durante y después de la estabilización, se realizan controles como:

- Verificación de la compactación (densidad seca in situ).
- Ensayos de resistencia (CBR, UCS).
- Control de fisuración, expansión y asentamientos.
- Ensayos de durabilidad (ciclos de humedad-sequía, erosión).

Figura 19. Fases en un suelo natural



Fuente: Mecánica de suelos

“El control de calidad no debe limitarse al laboratorio; debe extenderse al campo para garantizar que la estabilización se comporta como fue diseñada.” (Bell, 1996).

2.11.1. Métodos más utilizados en campo

Dependiendo del volumen del suelo, del proyecto y del tipo de maquinaria disponible, se pueden aplicar dos métodos principales:

- Método en sitio (in situ): El suelo es estabilizado directamente en el terreno. Es ideal para grandes volúmenes (como caminos o plataformas). Requiere maquinaria pesada.
- Método fuera de sitio (ex situ): Se extrae el suelo, se estabiliza en una planta o laboratorio, y luego se vuelve a colocar. Es más preciso, pero más costoso y lento (Sherwood, 1993).

2.12. Método de control de expansión en laboratorio

El ensayo de expansión permite determinar la capacidad de un suelo para aumentar su volumen cuando entra en contacto con el agua, lo que es común en suelos arcillosos de alta plasticidad. Esta expansión puede afectar gravemente a cimentaciones, pavimentos y estructuras livianas, por lo tanto, es fundamental cuantificarla antes y después de procesos de estabilización (Holtz et al., 2011).

2.12.1. Edómetro

Llamado también edómetro u odómetro; instrumento utilizado en el laboratorio para evaluar las características de compresibilidad, consolidación y de potencial de expansión del suelo. Consiste en un anillo de bronce en el que se coloca la muestra de suelo y un conjunto de mecanismos de aplicación y medición de carga, y de medición de las deformaciones resultantes. (Normas ASTM D2435 y D4186).

Figura 20. Edómetro



Fuente: Elaboración propia

2.12.2. Objetivo del ensayo

Evaluar el potencial de hinchamiento de un suelo al ser expuesto al agua, bajo condiciones controladas. El resultado se expresa generalmente como porcentaje de expansión vertical respecto a su altura original (ASTM D4829-11, 2011).

2.12.3. Fundamento del método

Los minerales arcillosos expansivos (como la montmorillonita o la esmectita) absorben agua y experimentan un aumento de volumen.

Este ensayo reproduce esa condición controlada en laboratorio para:

- Clasificar el suelo según su índice de expansión.
- Comparar el suelo natural con el suelo estabilizado.
- Evaluar la efectividad de agentes estabilizantes, como cal o ceniza.

“Los ensayos de expansión ayudan a predecir el comportamiento volumétrico de suelos arcillosos y son fundamentales en el diseño de soluciones de estabilización.” (Petry & Little, 2002).

2.12.4. Método Seed

Cambio volumétrico de un suelo inalterado, secado al aire, cuando se le satura bajo una presión de 7 kPa. (Holtz, 1959).

Expansión experimentada por una muestra de suelo compactado con su contenido de humedad óptima y su densidad seca máxima estándar, expresada como un porcentaje de su volumen original, cuando se le coloca en un edómetro y se anega bajo una presión vertical de 7 kPa (Seed, 1962; Normas ASTM D3877 y D4829).

Expansión experimentada por una muestra de suelo compactado con su contenido de humedad óptima y su densidad seca máxima estándar, expresada como un porcentaje de su volumen original, cuando se le coloca en un edómetro y se anega bajo una presión vertical de 7 kPa (Seed, 1962; Normas ASTM D3877 y D4829).

Tabla 6: Método Seed, Woodward and Lundgren.

Porcentaje de expansión en edómetro	Tipo	Expansión del suelo
<1	No hinchado.	Despreciable
1-5.	Mezcla entre hinchado y no hinchado.	Bajo
5-15.	Hinchado.	Medio
15-25.	Hinchado.	Alto
>25	Hinchado.	Muy alto

Fuente: Seed, 1962; Normas ASTM D3877 y D4829

2.13. Confiabilidad

La confiabilidad de los resultados obtenidos se evaluó considerando posibles errores en las mediciones y métodos de validación aplicados durante el estudio de las mezclas de suelo CH con cal y ceniza de carbón.

Errores en las mediciones: Para reducir al mínimo los errores asociados a la determinación de los límites de Atterberg y la expansión con edómetro, se aplicaron procedimientos

estandarizados conforme a las normas ASTM D4318 (para límites de Atterberg) y ASTM D4546 (para expansión en edómetro). Las mediciones se realizaron en duplicado, y los valores fuera del rango de tolerancia fueron descartados y repetidos. En condiciones controladas de laboratorio, la variación esperada en estos ensayos puede ser del $\pm 5\%$, aunque en suelos modificados con aditivos es posible observar desviaciones ligeramente mayores.

Métodos de validación: Se empleó un diseño experimental con tres grupos de mezclas que varían en proporción de cal (3 %, 4 % y 5 %) y ceniza de carbón (5 % a 25 %), lo que permitió observar tendencias comparativas. Para verificar la consistencia de los resultados, se realizaron comparaciones internas entre muestras replicadas y con valores reportados en investigaciones similares. Además, se aplicaron análisis estadísticos básicos para descartar valores atípicos y evaluar la coherencia entre ensayos

2.14. Marco referencial

- EVALUACIÓN DE LAS CENIZAS DE CARBÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ACTIVACIÓN ALCALINA Y APLICACIÓN EN CARRETERAS NO PAVIMENTADAS, Pág. (43-63). Autores: Cubas Benavides Kevin y Falen Chávez Arroyo José Carlos.
- “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS COMO CAPA DE RODADURA EN LA PROLONGACIÓN NAVARRO CAUPER, DISTRITO SAN JUAN – MAYNAS – IQUITOS, 2019”, Pág. (61,67-69). Autor (es): Angulo Roldan Mariselva y Zavaleta Papa Cintia Nicol.
- “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CAL Y CENIZAS DE CÁSCARA DE CEBADA, CENTRO POBLADO DE PALIÁN DISTRITO DE HUANCAYO 2021”, Pág. (23,28-65). Autor: Quispe Lázaro Ronaldo Yusten.
- “ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO – CAL CORRELACIONANDO EL ENSAYO TRIAXIAL (U.U.) CON EL ENSAYO C.B.R.” 2020, Pág. (62-135). Autor: Dery Armando Laime Rojas

- “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA EXPANSIÓN MEDIANTE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS” 2017, Pág. (50-96).
Autor: Patricia Lourdes Ortega Condori
- “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA DE UNA ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD VARIANDO SU PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN” La Paz-Bolivia 2021, Pág. (29-38,92-98).
Autor: Fernando Víctor Coca Pinaya.
- “ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ALTAMENTE EXPANSIVO USANDO AGREGADOS DERIVADOS DE NEUMÁTICOS DESECHADOS Y TRATAMIENTO CON CAL” 2022, Pág. (2-15).
Autor (es): Amin Soltani Abbas y Taheri Brendan C. O'Kelly.
- “COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS ”2023, TARIJA-BOLIVIA, Pág. (32-35).
Autor: Rivero Pérez Alejandra.
- CORRELACIÓN DEL LIMITE DE CONTRACCIÓN Y LA ACTIVIDAD COLOIDAL EN SUELOS ARCILLOSOS, LA VICTORIA – LAMBAYEQUE 2019, Pág. (15-115).
Autor: Torres Lora Luis Alberto
- ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL PARA EL TRATAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN LAS CALLES DE LA URBANIZACIÓN SAN LUIS DE LA CIUDAD DE ABANCAY– Perú 2018, Pág. (42-95).
Autor: José Johel LÓPEZ SUMARRIVA

2.15. Marco normativo.

- Exploración de suelos y técnicas de muestreo (ASTM D2488), (ASTM D4220).
- Granulometría de suelos (ASTM D422).
- Límites líquidos (ASTM D4318).
- Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318)
- Clasificación de suelos, Norma S.U.C.S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

- Ensayo de Expansión (Método Seed, 1962; Normas ASTM D3877 y D4829).

2.16. Posición y análisis del autor.

- “EVALUACIÓN DE LAS CENIZAS DE CARBÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ACTIVACIÓN ALCALINA Y APLICACIÓN EN CARRETERAS NO PAVIMENTADAS”

Se tomó como referencia esta investigación debido a que presenta información respaldada por otros autores que abordan el mismo tema de las cenizas de carbón. Además, se utilizaron diversas fuentes bibliográficas relevantes, lo que permitió que esta tesis se guiara y fundamentara en estudios previos debidamente validados.

- “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS COMO CAPA DE RODADURA EN LA PROLONGACIÓN NAVARRO CAUPER, DISTRITO SAN JUAN – MAYNAS – IQUITOS, 2019”.

Esta investigación fue tomada como referencia para la elaboración de la presente tesis, ya que permitió conocer el comportamiento de la cal en condiciones similares. Gracias a ello, se pudo tener una idea preliminar de cómo podrían comportarse los resultados obtenidos, sirviendo además como una herramienta de verificación para evaluar si los ensayos realizados seguían un comportamiento coherente y técnicamente válido.

- “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CAL Y CENIZAS DE CÁSCARA DE CEBADA, CENTRO POBLADO DE PALIÁN DISTRITO DE HUANCAYO 2021”, “ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO – CAL CORRELACIONANDO EL ENSAYO TRIAXIAL (U.U.) CON EL ENSAYO C.B.R.”, “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA EXPANSIÓN MEDIANTE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS”

Estas tesis fueron utilizadas como referencia y guía, ya que abordaron la estabilización de suelos mediante cal y ceniza de carbón, permitiendo analizar el comportamiento de los resultados y sus respectivos análisis.

Gracias a esta información, fue posible comprender mejor el comportamiento de estos materiales y rescatar aspectos importantes de cada estudio, los cuales

sirvieron como ejemplo y medio de verificación para orientar el desarrollo de la presente investigación.

- “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA DE UNA ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD VARIANDO SU PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN”.

Esta tesis contiene citas bibliográficas de referencia relacionadas con el comportamiento y las características de las arcillas de alta plasticidad. Por ello, fue citada como una referencia guía, ya que resultó útil para comprender tanto el comportamiento mecánico como el físico de este tipo de suelos, proporcionando una base teórica sólida para el desarrollo de la presente investigación.

- “ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ALTAMENTE EXPANSIVO USANDO AGREGADOS DERIVADOS DE NEUMÁTICOS DESECHADOS Y TRATAMIENTO CON CAL” y “COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS”.

Estas dos investigaciones resultan útiles al momento de realizar la medición de la expansión mediante el edómetro, ya que permiten conocer el comportamiento expansivo del suelo.

Al haber aplicado este ensayo en sus estudios, sirven como guía técnica y metodológica para el desarrollo de la presente investigación.

- CORRELACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN Y LA ACTIVIDAD COLOIDAL EN SUELOS ARCILLOSOS, LA VICTORIA – LAMBAYEQUE y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL PARA EL TRATAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN LAS CALLES DE LA URBANIZACIÓN SAN LUIS DE LA CIUDAD DE ABANCAY.

Estas dos investigaciones resultan útiles al haber aplicado este ensayo en sus estudios, sirven como guía técnica y metodológica para la dosificación de la presente investigación.

CAPÍTULO III

ETAPA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS

CAPÍTULO III

ETAPA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS

3. Localización

El presente proyecto en investigación se encuentra en el departamento de Tarija, ubicado en el sur de Bolivia. limita al oeste con el departamento de Potosí y al sur con la república de Argentina, al norte con el departamento de Chuquisaca y al este con la república de Paraguay. Su capital se encuentra en la ciudad de Tarija, provincia Cercado.

Figura 21. Mapa de localización de la ciudad de Tarija

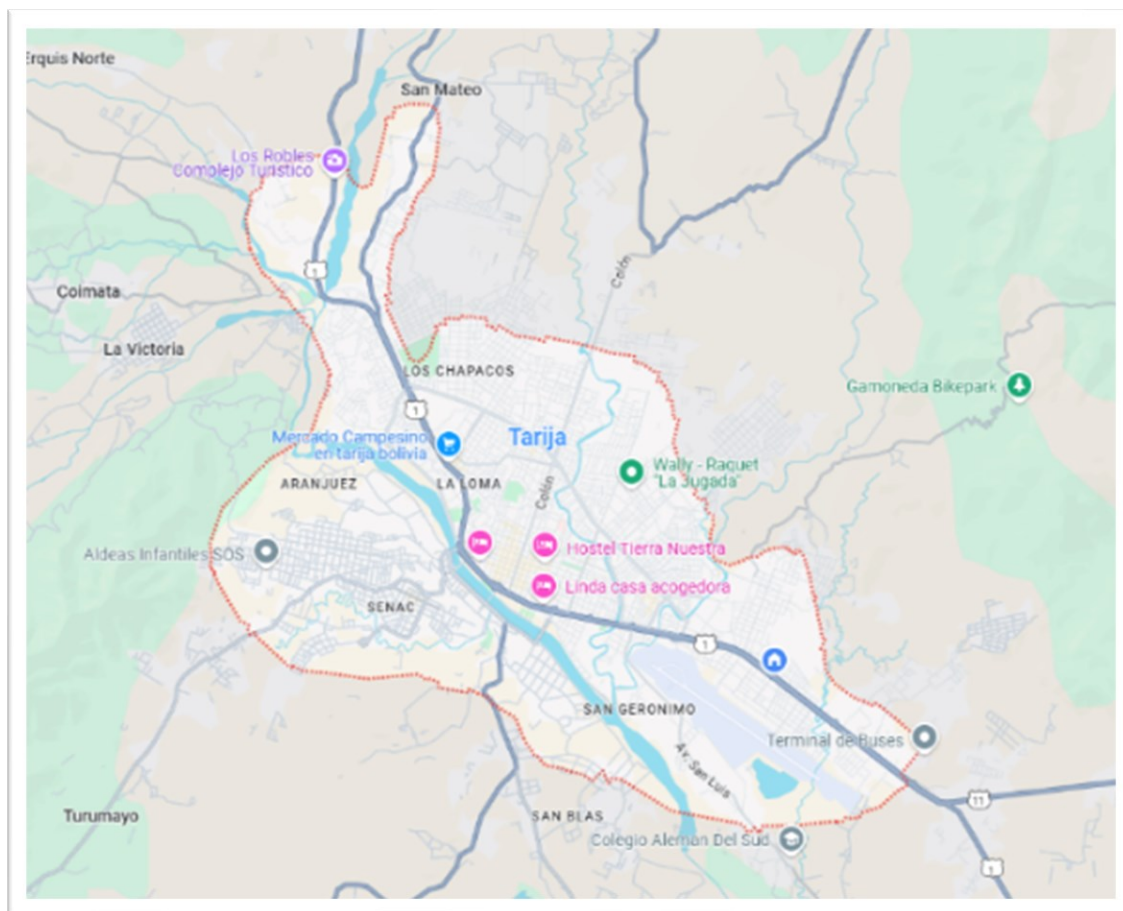


Fuente. Untitled

3.1. Zona de estudio

La zona de estudio de esta investigación, se encuentra ubicado en la capital del departamento de Tarija, provincia Cercado y en el municipio de Tarija.

Figura 22. Mapa de la provincia de Cercado-Tarija



Fuente. Google maps

3.2. Selección del punto de estudio

El material de suelo es extraído del barrio “El Rosal”, se ubica en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud: 21°29'43.27" Sur y Longitud: 64°44'37.00" Oeste, perteneciente a un suelo de tipo arcilloso clasificado preliminarmente como CH.

La selección del sitio se basó en criterios de representatividad, accesibilidad y homogeneidad del material.

Figura 23. Ubicación del punto en el barrio



Fuente. Google Earth

3.3 Criterios metodológicos

3.3.1. Unidades de estudio y decisión muestral

3.3.1.1. Unidad de muestra

Ensayos de laboratorio de suelos

3.3.1.2. Población

Suelos arcillosos Barrio “El Rosal”, municipio de Tarija, en la provincia Cercado del departamento de Tarija.

3.3.1.3. Muestra

- Exploración
- Granulometría
- Limite líquido
- Limite plástico
- Contenido de humedad
- Clasificación de suelos
- Compactación
- Edómetro (Método Seed, Woodward and Lundgren)

3.3.1.4. Tamaño de muestra.

Se realiza de acuerdo a lo seleccionado en la unidad de muestra, asignando de manera directa el nivel de confianza del 95% considerando una población infinita, sin embargo, mediante la metodología estratificada se puede asignar números lógicos para hacer el correspondiente ajuste.

Tabla 7: Nivel de confianza

Nivel de confianza (NC%)	Variable z
90	1,64
95	1,96
97	2,17
98	2,33
99	2,58

Fuente: Montgomery, DC, y Runger, GC (2010)

$$NC = 95\% \rightarrow Z = 1,96$$

El error correspondiente está en ($e=5\%$).

Se adoptará una varianza de ($\sigma^2=0.12$) debido a que el tiempo asignado para la realización de trabajos está entre 4 a 6 meses.

$$n = \frac{\sum Ni * \sigma^2}{Ni * \left(\frac{e}{z}\right) + \frac{\sum Ni * \sigma^2}{N}}$$

Tabla 8: Elaboración de técnica de muestreo

Etapas	Ensayos	Ni	σ^2	$Ni * \sigma^2$	fi	n	
Muestreo	Contenido de humedad	3	0,10	0,3	0,023	1,60	2
Caracterización	Granulometría	3	0,10	0,3	0,023	1,60	2
	Límite líquido	3	0,10	0,3	0,023	1,60	2
	Límite plástico	3	0,10	0,3	0,023	1,60	2
	Ensayo de compactación	3	0,10	0,3	0,023	1,60	1
Ensayo de la muestra pura	Compactación	3	0,10	0,3	0,023	1,60	2
	Expansión	3	0,10	0,3	0,023	1,60	2
Ensayo con aditivos	Límite Líquido	28	0,10	2,8	0,211	14,95	15
	Límite Plástico	28	0,10	2,8	0,211	14,95	15

	Compactación	28	0,10	2,8	0,211	14,95	15
	Expansión	28	0,10	2,8	0,211	14,95	15
		133		13,3			73

Fuente: Elaboración propia

El total de ensayos cubierto por la investigación en el periodo entre cuatro a seis meses corresponde a 73 ensayos bien definidos en cada categoría, cabe resaltar que los ensayos se están tomando en cuenta en un numero general contando para cinco porcentajes viendo el tiempo de saturación de 2 días que tiene que realizarse para el edómetro.

3.3.1.5 Muestreo probabilístico (estratificado y experimental)

Se utiliza un diseño experimental controlado. Inicialmente se realizó un muestreo probabilístico de tipo estratificado, recolectando muestras de suelo en diferentes puntos del área de estudio.

Estas muestras fueron seleccionadas en función de su ubicación y características geotécnicas generales, con el objetivo de identificar el suelo con mayores condiciones de plasticidad y expansividad.

Posteriormente, se seleccionó la muestra más representativa del comportamiento crítico, sobre la cual se aplicaron combinaciones específicas de Cal y Ceniza de Carbón en distintos porcentajes. Este enfoque permitió analizar de forma sistemática la respuesta del suelo tratado bajo condiciones controladas de laboratorio.

3.3.1.6. Justificación del tipo de muestreo

Las muestras iniciales fueron seleccionadas de manera representativa en distintas zonas del área de estudio, cumpliendo criterios de un muestreo probabilístico estratificado.

La elección final del suelo más desfavorable se basó en resultados técnicos previos, para garantizar un análisis profundo del comportamiento de estabilización.

Las combinaciones de aditivos (cal y ceniza) forman parte de un diseño experimental controlado, orientado a evaluar su efecto en las propiedades del suelo.

3.4. Desarrollo del trabajo

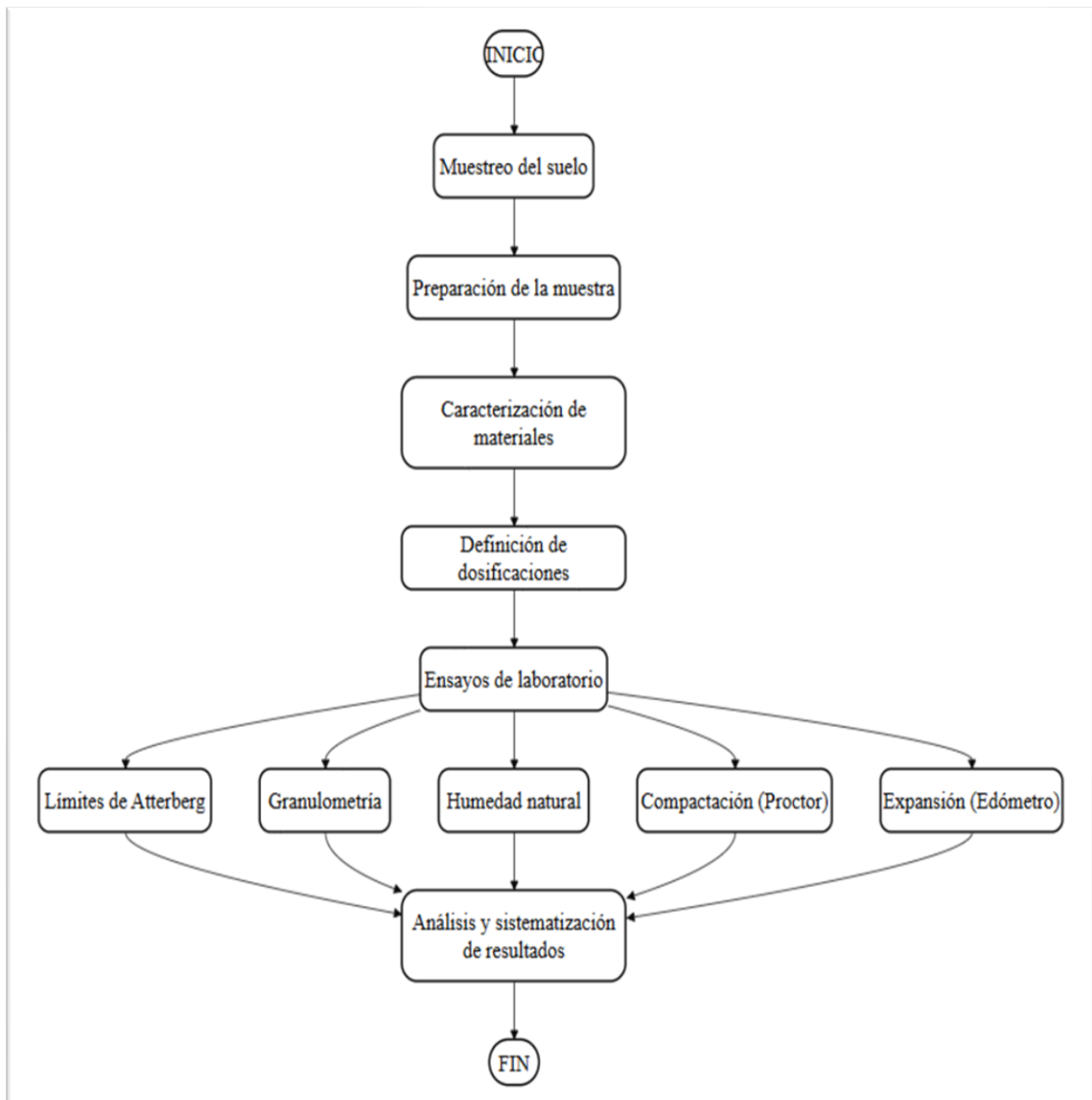
El desarrollo de la investigación se describe de manera detallada los procedimientos en la "tabla 7", con la finalidad de asegurar la reproducibilidad del trabajo y garantizar la validez de los resultados obtenidos.

Tabla 9. Desarrollo del trabajo de investigación.

Etapas	Actividad realizada	Norma/Referencia	Resultado esperado
Muestreo	Extracción del suelo	ASTM D420	Muestra representativa
Preparación de la muestra	Secado, lavado y clasificación	ASTM D421, ASTM D422	Material homogéneo y fracciones separadas
Caracterización de aditivos	Análisis de cal y ceniza de carbón	Ensayos químicos de referencia	Determinar composición y propiedades
Dosificaciones	Elaboración de mezclas con distintos porcentajes de aditivos	Diseño experimental propio	Definir grupos de estudio
Límite líquido y plástico	Ensayos de Atterberg	ASTM D4318	Índices de plasticidad
Granulometría	Método del lavado	ASTM D422	Distribución de tamaños de partículas
Humedad natural	Secado en horno a 105 ± 5 °C	ASTM D2216	% Humedad natural del suelo
Compactación	Ensayo Proctor Modificado	ASTM D698	Densidad máxima seca y humedad óptima
Expansión (edómetro)	Preparación y medición	ASTM D4546	Potencial de expansión

Fuente: Elaboración propia

Diagrama de flujo del proceso experimental



Fuente: Elaboración propia

3.5. Procedimiento de extracción de la muestra

Para la extracción de la muestra, inicialmente se procede a la limpieza de la superficie del área seleccionada, con el fin de eliminar cualquier material ajeno que pueda alterar la composición del suelo. A continuación, se emplean herramientas manuales, como pala y pico, para excavar hasta una profundidad aproximada de 30 cm, obteniendo así una porción representativa del estrato analizado.

Finalmente, el material recolectado se deposita en bolsas plásticas, con el propósito de preservar su humedad natural y garantizar la fiabilidad de los ensayos posteriores.

Figura 24. Bolsas de yute con suelo



Fuente: Elaboración propia

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio en condiciones controladas, evitando exposición directa al sol o a fuentes de calor.

Una vez en el laboratorio, se almacenaron en un ambiente seco y ventilado hasta su preparación.

3.6 Preparación de la muestra

3.6.1 Secado de la muestra

El secado de la muestra, inicialmente se desagrega el suelo, eliminando los terrones presentes para evitar que al secarse se endurezcan y dificulten su manipulación.

A continuación, el material se fragmenta hasta lograr una consistencia suelta y uniforme. Una vez desmenuzado, se coloca la cantidad requerida de suelo en una bandeja, según el tipo de ensayo que se vaya a realizar, y se introduce en el horno.

Figura 25. Preparación de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Este procedimiento permite controlar adecuadamente el secado, garantizando que la muestra quede completamente seca y lista para los ensayos posteriores.

3.6.2. Determinación de la muestra crítica según los límites de Atterberg

Para la presente investigación se extraen muestras de suelo representativas de diferentes zonas.

Estas muestras son sometidas en laboratorio a los ensayos de límites de Atterberg, que comprenden el límite líquido, el límite plástico y, en consecuencia, el índice de plasticidad.

La finalidad de este análisis es identificar el comportamiento plástico de cada suelo y establecer comparaciones entre ellos.

A partir de dichos resultados, se determina el suelo más crítico, entendido como aquel que presenta el índice de plasticidad más alto y, por tanto, las condiciones menos favorables para su uso en estado natural.

Tabla 10. Resultado de Límites de Atterberg

Zona	Límite líquido %	Límite plástico %	Índice plástico %
Miraflores	47,152	22,426	24,727
Simón Bolívar	43,721	21,491	22,229
San Salvador	36,608	24,123	12,484
Torrecillas	48,598	23,580	25,019
Torrecillas	44,787	23,463	21,324
Rodeo Chapaco	39,843	18,703	21,140
San Blas	36,887	25,618	11,269
San Blas	48,679	23,178	23,178
San Luis	47,436	18,371	29,065
Aranjuez	49,342	20,000	29,342
Tarijeños en Progreso	31,652	14,462	14,462
Constructor	32,103	15,736	15,736
El Rosal	51,257	25,516	25,516

Fuente: Elaboración propia.

Con base en este criterio, se selecciona el suelo más desfavorable como muestra de estudio principal para el desarrollo de la investigación.

3.6.3. Caracterización del suelo

El suelo es caracterizado mediante ensayos de humedad natural, límites de Atterberg, granulometría, compactación y expansión.

Figura 26. Cápsula en balanza



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Ensayo con el equipo de “casa grande”



Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Ensayo de límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Método del lavado para una arcilla



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Suelo saturando



Fuente: Elaboración propia

Estos parámetros permitieron confirmar su clasificación como arcilla de alta plasticidad (CH).

Tabla 11. Resultados de la caracterización de la muestra crítica

Clasificación	% que pasa total	Nº40	99,75	%
		Nº200	98,32	%
	Lím. de Atterberg	LL	51,26	%
		LP	25,52	%
		IP	25,74	%
	Clasificación	S.U.C.S.	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
Contenido de humedad	10,09			%
Compactación T-180	Densidad Máxima	1,65		g/cm3
	Humedad Óptima	20,06		%
Lectura del edómetro	Expansión	21,72		%

Fuente: Elaboración propia

3.7. Caracterización de la cal hidratada

La cal empleada corresponde a una cal hidratada, suministrada por comercial Quispe & F. Se determinó su composición química básica y sus propiedades principales, con el fin de evaluar su capacidad de reacción con el suelo (Anexo II).

Tabla 12. Composición química de la cal hidratada

COMPOSICIÓN QUÍMICA	
Residuo insoluble en HCl: R. I	2,50 g/100 g
Cationes precipitables por amoníaco : (NH_3) (R203)	0,50 g/100 g
Óxido de Calcio : (CaO)	90,00 g/100 g
Óxido de Magnesio : (MgO)	1,00 g/100 g
Pérdida a 600 C°	1,00 g/100 g
Pérdida por calcinación a 1000 C°	5,00 g/100 g
Óxido de Calcio activo : (CaO)	80,00 g/100 g

Fuente: Elaboración propia

La composición química obtenida (Tabla 12), muestra un contenido elevado de óxido de calcio (CaO), componente principal de la cal hidratada y responsable de su alta reactividad frente a los minerales del suelo. Este óxido, al combinarse con la sílice (SiO_2) presente en el material arcilloso, favorece la formación de compuestos cementantes que mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo tratado.

3.8. Caracterización de la ceniza de carbón

El análisis de la ceniza de carbón utilizada proviene del laboratorio químico de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).

Se determinó su composición química del contenido de óxido principal (SiO_2), con el fin de analizar su potencial como material estabilizante (Anexo II).

La ceniza de carbón empleada como aditivo estabilizante fue caracterizada mediante análisis químico, obteniéndose un contenido de dióxido de silicio (SiO_2) del 43 %.

Este porcentaje evidencia una concentración significativa de compuestos silíceos, que son esenciales en los procesos puzolánicos cuando reaccionan con cal en presencia de humedad.

Tabla 13. Análisis químico de la ceniza de carbón

Análisis Químico		
Parámetros	Unidades	Resultados
SiO ₂	%	42,68

Fuente: Elaboración propia

Dicha reacción química conduce a la formación de silicatos de calcio hidratados (CSH), los cuales mejoran la cohesión y reducen la plasticidad del suelo tratado, favoreciendo su comportamiento mecánico para aplicaciones en ingeniería civil.

De acuerdo con la normativa vigente, como la norma ASTM C618 para materiales puzolánicos, el contenido de SiO₂ es un parámetro relevante que contribuye a la clasificación del material como aditivo estabilizante. Por lo tanto, la ceniza de carbón a utilizar presenta propiedades químicas adecuadas para ser empleada en la mejora y estabilización de suelos arcillosos en proyectos de construcción civil.

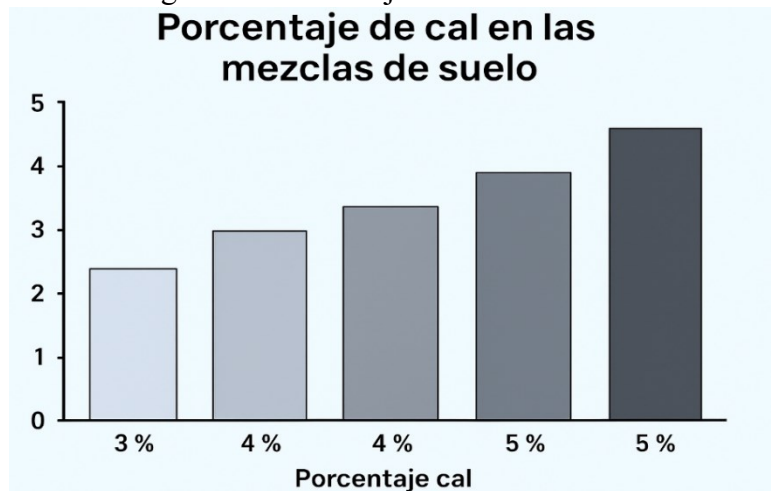
3.9. Criterios de dosificación

3.9.1. Mezclas con diferentes porcentajes de cal

Se prepararon mezclas de suelo con adiciones de cal en porcentajes de: 3 %, 4 %, 5 %, en función del peso seco del suelo mediante las siguientes investigaciones como guía:

Torres Luis y José López nos mencionan en su tesis la estabilización con cal los suelos arcillosos, que en dicho lugar, el problema se presenta por el suelo arcilloso de baja y alta plasticidad que no cumplen las requerimientos de las criterios técnicas para ser apoyo de estructuras, la cual el autor tuvo como objetivo evaluar el efecto de la cal como estabilizante, también sus propiedades mecánicas y físicas del suelo arcillosos, la cual tuvo como conclusión que con el aumento de cal en porcentajes de 3% a 6% la investigación propone mejorar la calidad de suelos arcillosos con cal hidratada, siendo así un aporte bueno para mejorar sus propiedades.

Figura 31. Porcentajes de cal hidratada



Fuente: Elaboración propia.

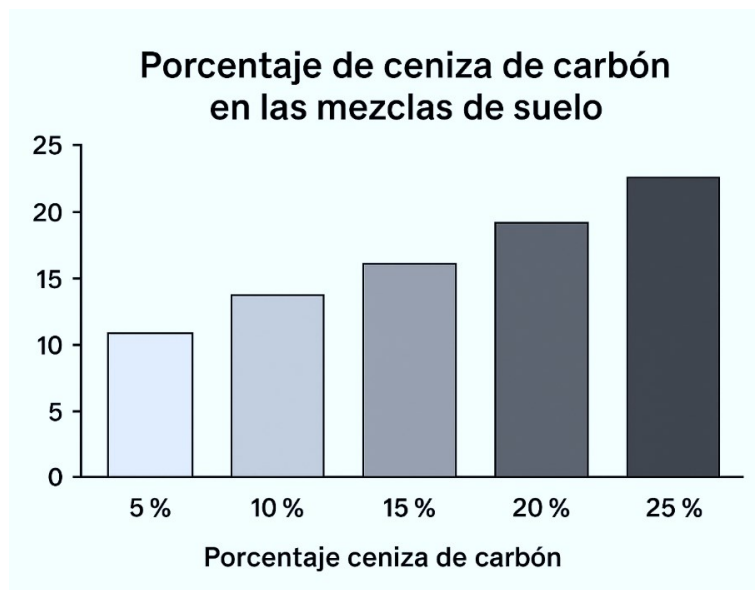
3.9.2. Mezclas con diferentes porcentajes de ceniza de carbón

De igual manera, se realizaron mezclas con diferentes porcentajes de ceniza de carbón:

5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, con el objetivo de analizar su efecto combinado con la cal en las propiedades del suelo teniendo en cuenta como guía la investigación de:

Se optan estos porcentajes mediante la conclusión de la investigación de Cubas Benavides y Falen Chávez y otras, donde presentan cambios positivos con la adición de la ceniza de Carbón y muestran un aumento en resistencia y mejoramiento en las propiedades de suelos arcillosos.

Figura 32. Porcentajes de ceniza de carbón

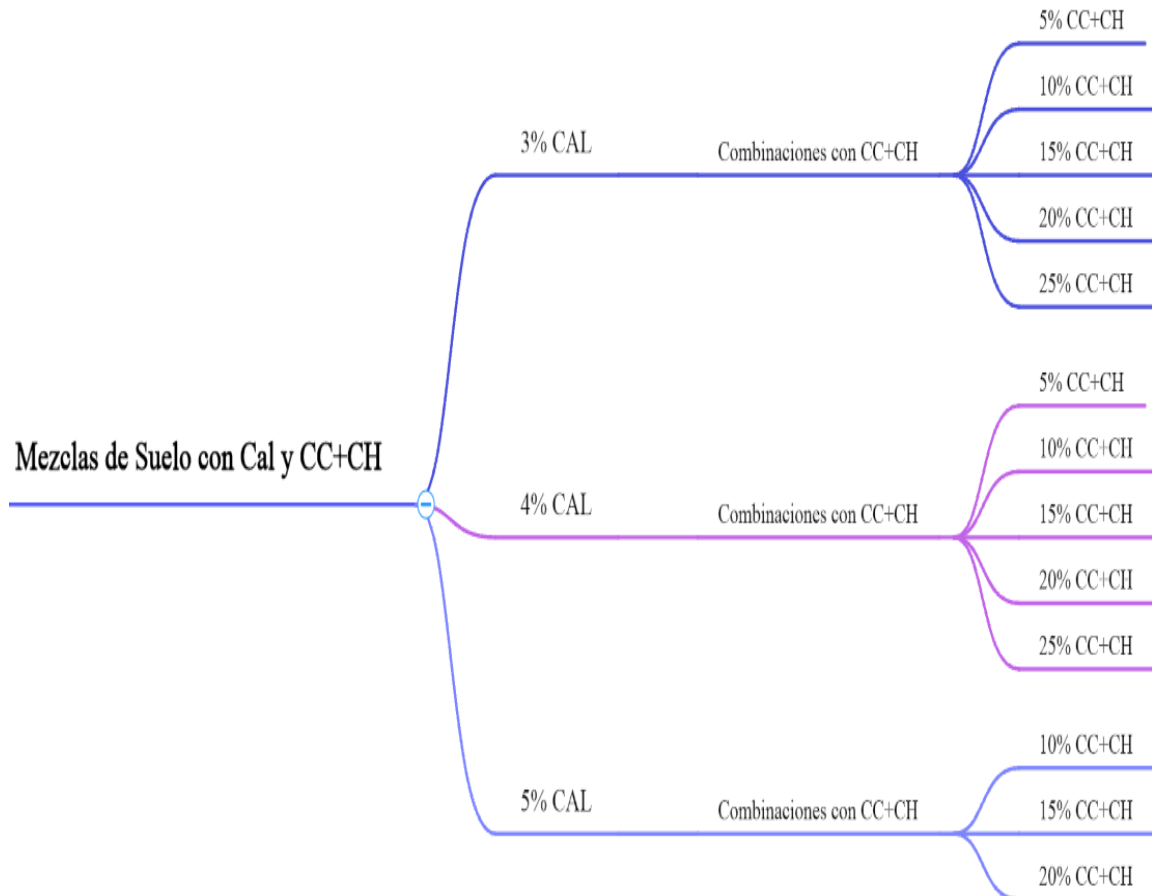


Fuente: Elaboración propia

3.9.3. Esquema de los grupos de ensayo

Las combinaciones de cal y ceniza se organizaron en tres grupos experimentales, cada uno con cinco dosificaciones distintas como se puede observar en el siguiente esquema de grupos de ensayos a realizar:

Esquema de grupos de ensayo



Fuente: Elaboración propia

Esta distribución permitió comparar el comportamiento del suelo bajo distintas proporciones de aditivos.

3.10 Ensayos de laboratorio con aditivos

3.10.1 Límite líquido y límite plástico

Los límites de Atterberg se determinaron conforme a la norma ASTM D4318, tanto para el suelo natural como para las mezclas con cal y ceniza de carbón.

Con ello se evaluó el efecto de los aditivos en la plasticidad del suelo.

Tabla 14. Resultados de límites de Atterberg

Mezcla	Límite líquido %	Límite plástico %	Índice plástico %
PURO	51,26	25,52	25,74
3% DE Cal y 5% de Ceniza	49,71	25,44	24,27
3% DE Cal y 10% de Ceniza	49,35	25,85	23,49
3% DE Cal y 15% de Ceniza	47,86	26,28	21,58
3% DE Cal y 20% de Ceniza	47,34	26,70	20,63
3% DE Cal y 25% de Ceniza	47,01	27,42	19,60
4% DE Cal y 5% de Ceniza	45,61	25,40	20,22
4% DE Cal y 10% de Ceniza	46,03	26,71	19,32
4% DE Cal y 15% de Ceniza	48,84	30,72	18,12
4% DE Cal y 20% de Ceniza	49,24	31,00	18,24
4% DE Cal y 25% de Ceniza	50,42	31,48	18,95
5% DE Cal y 5% de Ceniza	51,67	31,79	19,88
5% DE Cal y 10% de Ceniza	51,77	31,31	20,45
5% DE Cal y 15% de Ceniza	52,44	30,66	21,78
5% DE Cal y 20% de Ceniza	53,09	29,34	23,75
5% DE Cal y 25% de Ceniza	53,85	28,74	25,11

Fuente: Elaboración propia

3.10.2 Ensayo de compactación

Dentro de la estrategia experimental, se incorpora el ensayo de compactación Proctor Modificado (AASHTO T 272), con el propósito de establecer la relación existente entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo.

Este procedimiento resulta fundamental, ya que permite determinar la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo, parámetros que sirven como referencia en el control y evaluación del comportamiento del suelo estabilizado.

Figura 33. Eliminando pequeños terrones



Fuente: Elaboración propia

El proceso de compactación se desarrolla en un molde cilíndrico estandarizado, empleando un martillo con energía definida que reproduce condiciones de carga similares a las que se presentan en obras de infraestructura.

El suelo se dispone en capas sucesivas, garantizando una distribución homogénea de la energía de compactación.

Figura 34. Compactación



Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizada la compactación, se determina la densidad seca correspondiente y se obtiene el contenido de humedad mediante el secado de porciones representativas de la muestra. Con estos valores se construye la curva de compactación, la cual permite identificar el punto de mayor interés: el contenido de humedad en el que el suelo alcanza su densidad máxima seca.

Figura 35. Registro de molde compactado



Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se logra analizar no solo el comportamiento del material natural, sino también la mejora que presentan las mezclas propuestas frente a las exigencias de proyectos de ingeniería civil.

Tabla 15. Resultado de los ensayos de compactación

Suelo puro	Densidad máxima g/cm ³	Humedad optima %
	1,65	20,06
3%cal+5%Ceniza+suelo	1,64	19,45
3%cal+10%Ceniza+suelo	1,62	19,21
3%cal+15%Ceniza+suelo	1,59	18,74
3%cal+20%Ceniza+suelo	1,57	18,26
3%cal+25%Ceniza+suelo	1,56	16,98

4%cal+5%Ceniza+suelo	1,62	19,95
4%cal+10%Ceniza+suelo	1,60	20,38
4%cal+15%Ceniza+suelo	1,58	20,42
4%cal+20%Ceniza+suelo	1,54	23,31
4%cal+25%Ceniza+suelo	1,51	23,39
5%cal+5%Ceniza+suelo	1,61	25,42
5%cal+10%Ceniza+suelo	1,53	25,12
5%cal+15%Ceniza+suelo	1,49	25,14
5%cal+20%Ceniza+suelo	1,49	25,40
5%cal+25%Ceniza+suelo	1,49	27,65

Fuente: Elaboración propia

La incorporación de este ensayo en la metodología de investigación responde a la necesidad de evaluar cómo la adición de cal y ceniza de carbón influye en las condiciones óptimas de compactación del suelo.

3.10.3. Ensayo de expansión con edómetro

3.10.3.1 Preparación de la muestra para el edómetro

Las probetas fueron moldeadas a partir de suelo natural y mezclas estabilizadas, compactadas a su humedad óptima y densidad máxima seca previamente determinadas.

Como la muestra es alterada no se puede preparar una galleta de un terrón de suelo, sino que se podemos ayudar con la siguiente ecuación:

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$$

Para la preparación de la muestra en el anillo del edómetro se utiliza el dato de la densidad de la compactación y el volumen de anillo del edómetro.

Sobre una base se va colocando de manera uniforme la muestra preparada dentro del anillo y con martillos pequeños de consolidación se va compactando hasta llegar a su peso correspondiente a cada mezcla de la hipótesis como se visualiza en la figura 47.

La muestra de suelo se mezcla con la Cal y Ceniza de carbón como se ve en la gráfica 43, se homogeniza hasta lograr una distribución uniforme de cada mezcla de diferentes porcentajes.

Figura 36. Arcilla con cal y ceniza de carbón



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Anillo del edómetro con mezcla preparada



Fuente: Elaboración propia

Una vez preparada la muestra se coloca el anillo cubierto con una tapa de piedra porosa en la parte superior e inferior del anillo (figura 38), para luego llenarlo de agua al equipo de edómetro.

Figura 38. Anillo de edómetro con piedras porosas



Fuente: Elaboración propia.

3.10.3.2 Procedimiento de medición de expansión con el edómetro (Método Seed, Woodward and Lundgren)

El ensayo de expansión se realizó en un edómetro, colocando las probetas bajo carga y posterior inmersión en agua.

Se registraron los cambios de deformación durante el tiempo de ensayo.

Por tanto, para la medición de la expansión se utilizaron los tres equipos de edómetros del laboratorio de suelos de manera de optimizar el tiempo, se realizó tomando en cuenta las siguientes características de cada edómetro:

El edómetro que se puede observar en la siguiente figura 39, tiene una deformación de 0,002 mm en su dial, se usó con una relación de brazo de palanca de 1:10, y su anillo de 6,3 cm de diámetro interno y una altura de 2 cm.

Figura 39. Edómetro



Fuente: Elaboración propia

El edómetro azul de la figura 40, tiene un deformímetro con una escala de deformación de 0,01 mm, es de carga directa, tiene un anillo de 6,4 cm de diámetro interno y una altura de 2,9 cm.

Figura 40. Edómetro azul



Fuente: Elaboración propia

El edómetro negro se usa con una relación de brazo de palanca de 1:10 que tiene una caja cuadrada hecha de acero inoxidable, con aditamentos que permiten el drenado a través de la parte superior e inferior.

La caja está dividida verticalmente por un plano horizontal en dos mitades con el mismo espesor unido con unos tornillos de seguridad.

La caja de corte es ajustada con los tornillos de seguridad.

Figura 41. Equipo de corte



Fuente: Elaboración propia

El ensayo se realizó bajo una carga de 7 kpa, para los equipos con brazo 1:10 de 0,250 kg como lo indica la tabla, mientras que para el edómetro azul se aplicó la carga directa de 2,5 kg.

Tabla 16. Expansión en la muestra 3%CAL+5%CC+CH

Tiempo min	DEF V x 0,002 mm
0,1	0
0,3	1
0,5	10
1,0	16
2,0	19
4,0	28
8,0	38
15	47
30	60

60	80
120	150
480	320
600	870
1440	1000
2880	1550

Fuente: Elaboración propia

Se controló el comportamiento de la muestra durante 48 horas para obtener los datos necesarios para el trabajo de gabinete.

3.10.3.3 Registro y análisis de resultados

Los datos obtenidos se tabularon en función del tiempo, permitiendo analizar el comportamiento expansivo de cada combinación de mezclas.

Tabla 17. Expansión en las muestras

Mezcla	Lectura de expansión %	Expansión asumida %
3%CAL y 5%CC+CH	15,5	15,5
3%CAL y 10%CC+CH	12,8	12,8
3%CAL y 15%CC+CH	8,8	8,8
3%CAL y 20%CC+CH	5,9	5,9
3%CAL y 25%CC+CH	-2,0	0
4%CAL y 5%CC+CH	3,3	3,3
4%CAL y 10%CC+CH	1,1	1,1
4%CAL y 15%CC+CH	0,5	0,5
4%CAL y 20%CC+CH	-0,9	0
4%CAL y 25%CC+CH	-4,8	0
5%CAL y 10%CC+CH	6,1	6,1
5%CAL y 15%CC+CH	0,8	0,8
5%CAL y 20%CC+CH	-5,3	0
5%CAL y 25%CC+CH	-7,2	0

Fuente: Elaboración propia

3.11. Resumen del procedimiento experimental

La metodología seguida consistió en la recolección de la muestra de suelo, su preparación en laboratorio, la caracterización de los aditivos empleados y la ejecución de ensayos de plasticidad, granulometría, humedad, compactación y expansión.

Esta secuencia permitió obtener información integral para evaluar la influencia de la cal y la ceniza de carbón en las propiedades del suelo arcilloso estudiado

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS DATOS OBSERVADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS DATOS OBSERVADOS

4. Ensayos con aditivos

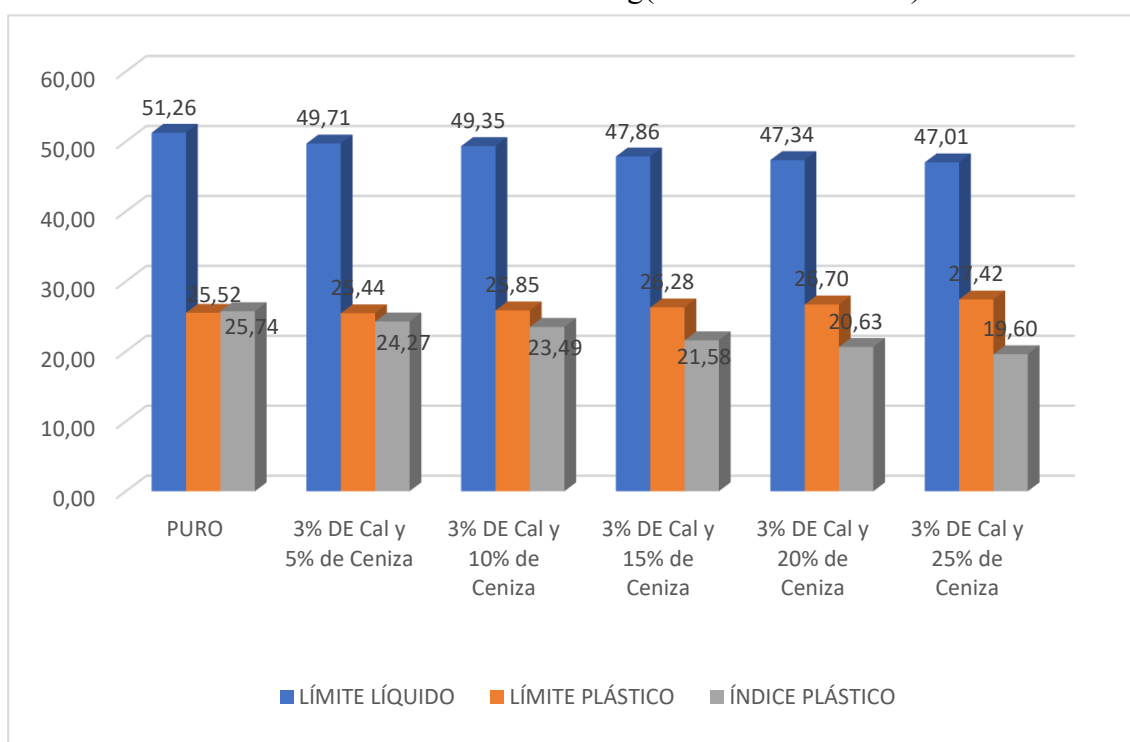
Se evalúa mezclas con cal y ceniza de carbón en porcentajes de 3%, 4% y 5% de cal, variando la ceniza de 5% a 25%.

Se midieron límites de Atterberg y expansión mediante edómetro.

4.1. Límites de Atterberg

4.1.1. Límites de Atterberg(3%CAL+%CC+CH)

Gráfica 1. Límites de Atterberg(3%CAL+%CC+CH)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Límites de Atterberg (3%CAL+%CC+CH)

Mezcla	LÍMITE LÍQUIDO %	LÍMITE PLÁSTICO %	ÍNDICE PLÁSTICO %
PURO	51,26	25,52	25,74
3% DE Cal y 5% de Ceniza	49,67	25,43	24,23
3% DE Cal y 10% de Ceniza	49,37	25,85	23,52
3% DE Cal y 15% de Ceniza	47,98	26,21	21,78

3% DE Cal y 20% de Ceniza	47,36	26,72	20,65
3% DE Cal y 25% de Ceniza	47,04	27,45	19,59

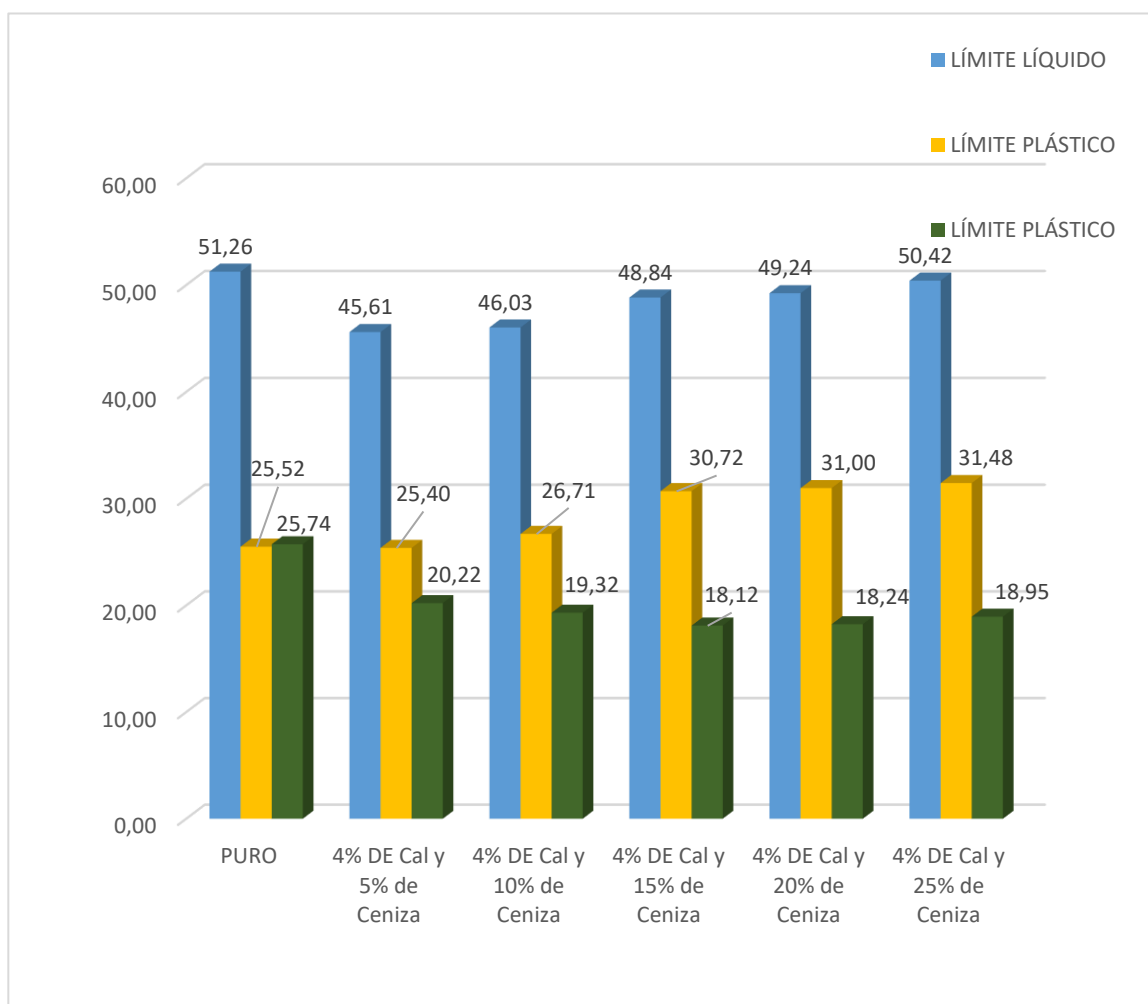
Fuente. Elaboración propia

Análisis descriptivo:

- El límite líquido y el índice plástico disminuyen al incrementar la ceniza, indicando una mejora en la estabilidad del suelo.
- En la tabla 18, se observa una disminución progresiva del índice plástico (25,74 % a 19,60 %), indicando que la adición de ceniza y cal reduce la plasticidad del suelo y mejora su comportamiento mecánico.

4.1.2. Límites de Atterberg (4%CAL+%CC+CH)

Gráfica 2. Límites de Atterberg(4%CAL+%CC+CH)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Límites de Atterberg (4%CAL+%CC+CH)

Mezcla	LÍMITE LÍQUIDO %	LÍMITE PLÁSTICO %	ÍNDICE PLÁSTICO %
PURO	51,26	25,52	25,74
4% DE Cal y 5% de Ceniza	45,60	25,42	20,18
4% DE Cal y 10% de Ceniza	46,01	26,72	19,29
4% DE Cal y 15% de Ceniza	48,84	30,72	18,12
4% DE Cal y 20% de Ceniza	49,25	31,03	18,22
4% DE Cal y 25% de Ceniza	50,41	31,47	18,94

Fuente. Elaboración propia

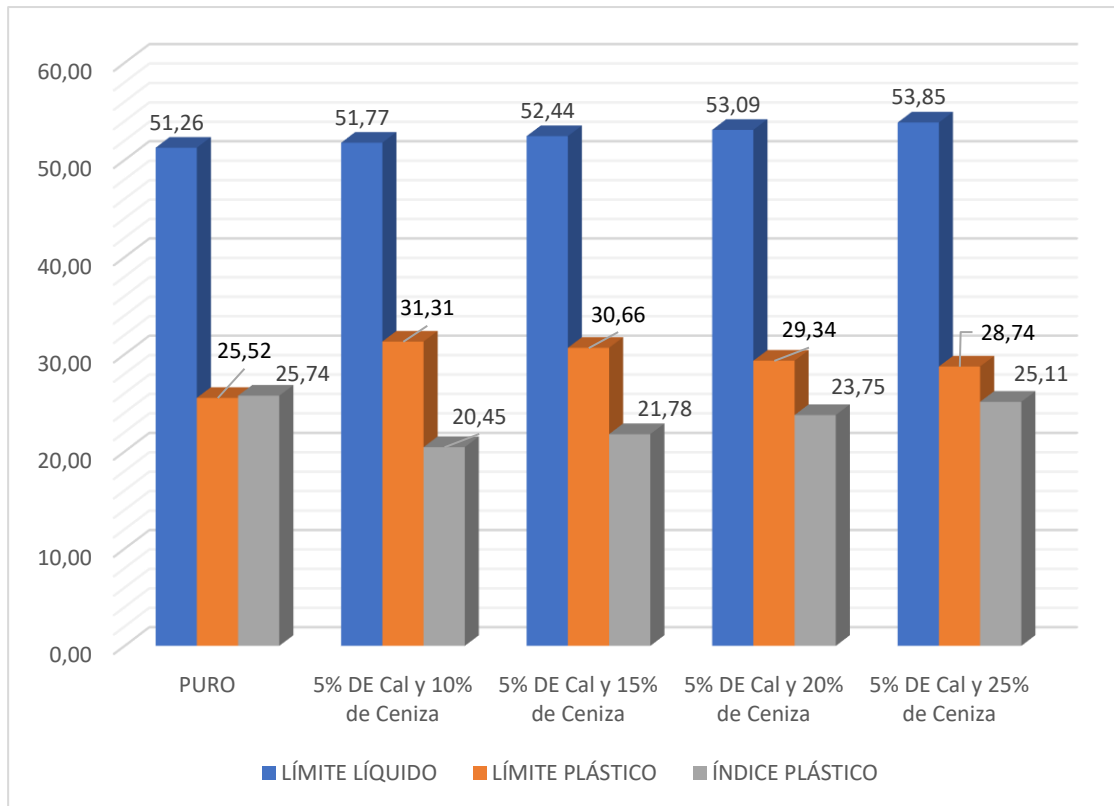
Análisis descriptivo:

- En la tabla 19 el límite líquido para la mezcla con 4 % de cal muestra una disminución inicialmente con la adición de cal y ceniza (comienza en 51,26% en el suelo puro y baja a 45,61%). Sin embargo, a medida que aumentan las proporciones de ceniza, el límite líquido aumenta ligeramente alcanzando el 50,42%.
- Este comportamiento podría sugerir que la cal y la ceniza de carbón inicialmente ayudan a reducir la cantidad de agua requerida para cambiar de estado plástico a líquido, pero en concentraciones más altas, podrían verse afectadas la estructura del suelo de manera diferente, lo que aumenta el límite líquido nuevamente.
- El límite plástico muestra una tendencia generalmente creciente con el aumento de la proporción de cal y la ceniza (Comienza en 25,52% y aumenta a 31,48%). El aumento en el límite plástico podría indicar que la mezcla de cal y ceniza de carbón está haciendo que el suelo se vuelva más rígido y menos susceptible a la deformación plástica, posiblemente debido a una mejor estabilización o cambios en la estructura del suelo.
- El índice plástico muestra una clara disminución con la mezcla de cal y ceniza (comienza en 25,74 y disminuye a 18,95). Este descenso en el índice plástico indica que el suelo se está volviendo menos plástico (más rígido), lo que es una

tendencia positiva en muchos casos de estabilización, ya que hace que el suelo sea más manejable y resistente a la deformación.

4.1.3. Límites de Atterberg (5%CAL+%CC+CH)

Grafica 3. Límites de Atterberg(5%CAL+%CC+CH)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Límites de Atterberg (5%CAL+%CC+CH)

Mezcla	LÍMITE LÍQUIDO %	LÍMITE PLÁSTICO %	ÍNDICE PLÁSTICO %
PURO	51,26	25,52	25,74
5% DE Cal y 5% de Ceniza	51,67	31,79	19,88
5% DE Cal y 10% de Ceniza	51,74	31,28	20,46
5% DE Cal y 15% de Ceniza	52,45	30,64	21,82
5% DE Cal y 20% de Ceniza	53,09	29,33	23,76
5% DE Cal y 25% de Ceniza	53,92	28,75	25,17

Fuente. Elaboración propia

Análisis descriptivo:

- En la tabla 20 se puede observar que el límite líquido muestra una tendencia ligeramente creciente donde comienza en 51,26% y aumenta a 53,85%.
- El ligero aumento en el límite líquido en todas las mezclas con cal y ceniza podría indicar que el suelo con estos aditivos retiene más agua, lo que puede afectar su trabajabilidad y comportamiento en condiciones de alta humedad.
- Todos los valores del límite líquido se encuentran por encima del 50%, incluso después de agregar cal y ceniza, lo que indica que el suelo sigue teniendo características propias de una arcilla de alta plasticidad.
- El suelo puro tiene un Límite Líquido de 51,26%, lo que lo clasifica como una arcilla de alta plasticidad, con la adición de cal y ceniza se puede observar que sigue subiendo.
- El límite plástico también sigue siendo relativamente alto, con valores cercanos a 30% en las mezclas con cal y ceniza, hay una ligera disminución, pero sigue siendo significativo y refleja que el suelo no ha perdido su carácter de alta plasticidad.
- El índice más bajo en la última tabla es 20,45, que todavía califica como un suelo con alta plasticidad, pero a pesar de que el índice plástico ha disminuido con las mezclas, sigue por encima del umbral de 20%, lo cual indica que el suelo sigue siendo considerado de alta plasticidad.

4.2. Datos del ensayo de la medición con el edómetro

4.2.1. Resultados del edómetro (CH+3CAL+CC)

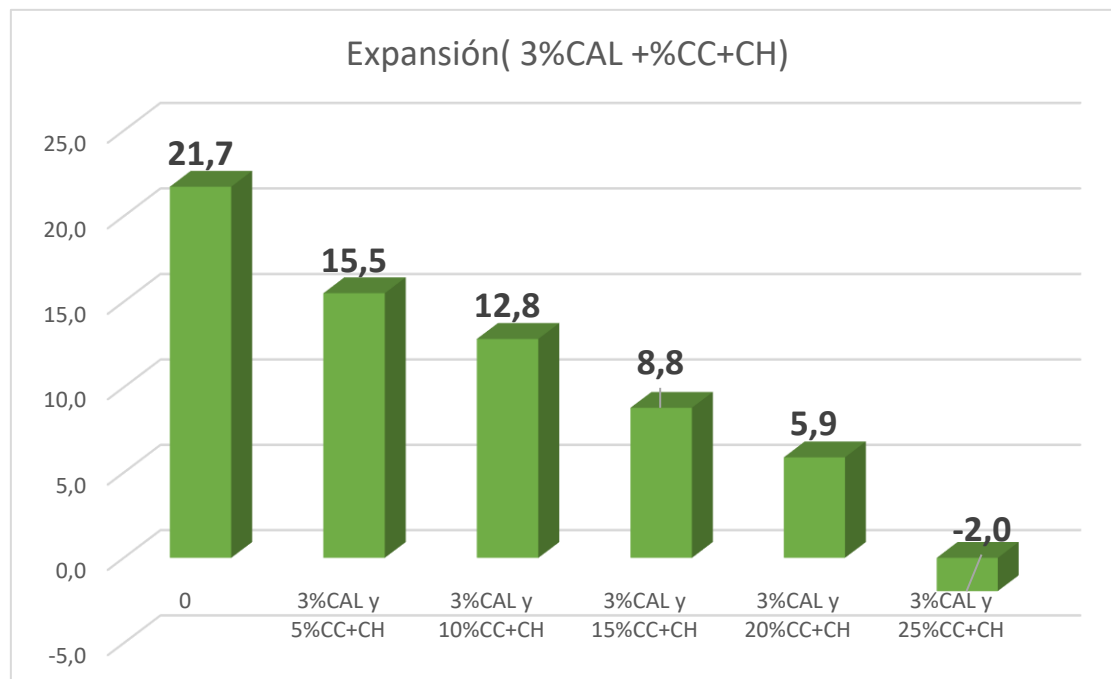
Tabla 21. Resultados de la expansión (CH+3CAL+CC)

PURO	Lectura de expansión %	Expansión asumida %
	21,7	21,7
3%Cal y 5%CC	15,5	15,5
3%Cal y 10%CC	12,8	12,8
3%Cal y 15%CC	8,8	8,8

3%Cal y 20%CC	5,9	5,9
3%Cal y 25%CC	-2,0	0

Fuente. Elaboración propia

Gráfica 4. Expansión (CH+CAL+CC)



Fuente: Elaboración propia

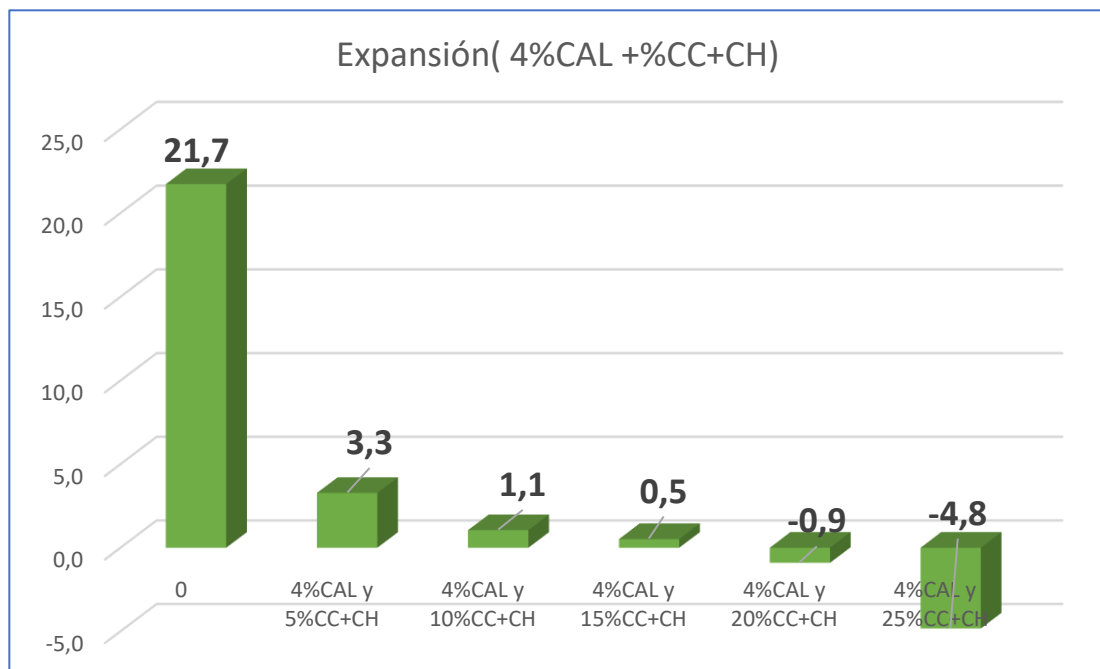
Análisis descriptivo:

- En los resultados tabla 21, se observa que el suelo puro tiene una expansión significativa de 21,7 %, lo que indica que es un suelo altamente expansivo, parcialmente asociado con arcillas de alta plasticidad.
Esto puede ser un problema en proyectos de construcción, ya que la expansión del suelo puede dañar estructuras, caminos y cimientos.
- Cuando se añade 3% de cal y 5% de ceniza, la expansión se reduce un 15,5%. A pesar de que sigue siendo una expansión (tabla 6), ya se observa una mejora significativa con respecto al suelo puro más la ceniza y la cal, éstas comienzan a mejorar el suelo y reducir su plasticidad.
- En la mezcla de 3%Cal y 10% de ceniza, la expansión disminuye aún más a 12,8%, lo que indica que se sigue logrando la estabilización del suelo con ceniza y cal.
Este es un paso positivo hacia la reducción de la expansión a grado medio (tabla 6) y mejora del comportamiento del suelo.

- Al aumentar la cantidad de ceniza a un 15%, la expansión se reduce a un 8,8% de grado medio (tabla 6). Esto sugiere que más ceniza sigue ayudando a reducir la plasticidad del suelo, y el suelo está tomando mejores características.
- Con un 20% de ceniza, la expansión sigue disminuyendo a 5,9%.
Este es un avance importante, ya que muestra que el suelo ya tiene una expansión mucho menor pero aun perteneciendo a grado medio(tabla6).
- Con 25% de ceniza, el suelo experimenta una contracción de -2,0%.
Esto indica que el suelo ya no se expande, sino que se reduce en volumen.

4.2.2. Resultados del edómetro (4CH+CAL+CC)

Gráfica 5. Expansión (CH+CAL+CC)



Fuente. Elaboración propia

Tabla 22. Resultados de la expansión (4CH+CAL+CC)

PURO	Lectura de expansión %	Expansión asumida %
	21,7	21,7
4%y5%	3,3	3,3
4%y10%	1,1	1,1
4%y15%	0,5	0,5
4%y20%	-0,9	0

4%y25%	-4,8	0
--------	------	---

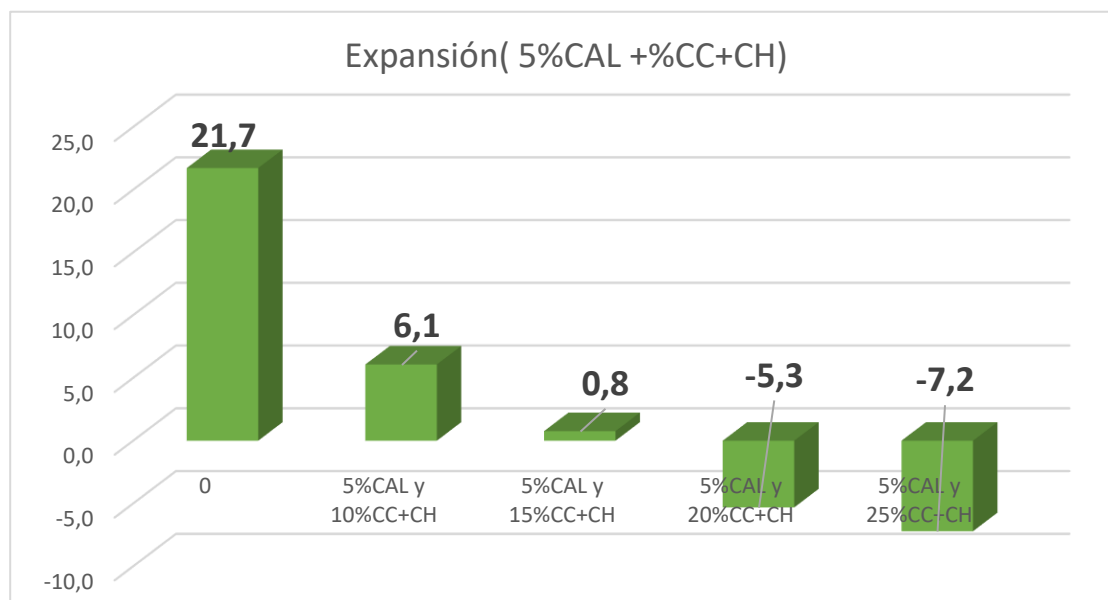
Fuente. Elaboración propia

Análisis descriptivo:

- En la tabla 22 se obtuvieron resultados altamente efectivos para reducir la expansión de suelos con alta plasticidad; sin embargo, no solo deja de expandirse, sino que se contrae.
- La mezcla con 4% de cal y 5% de ceniza muestra una gran mejora, reduciendo la expansión a 3,3%. Aunque aún presenta cierta expansión, considerado de grado bajo (tabla 6),
- Al aumentar el porcentaje de ceniza al 10% reduce la expansión aún más a 1,1% considerado de grado bajo (tabla 6), lo que es muy beneficioso para proyectos de construcción.
- Con un 15% de ceniza, la expansión se reduce un 0,5%, indica que el suelo esta con un grado de expansión despreciable (tabla 6), lo que es un resultado positivo de igual manera para proyectos civiles.
- Con 20% y 25 % de ceniza, la expansión se convierte en negativa, lo que indica que el suelo ha pasado de ser expansivo a asentarse.

4.2.3. Resultados del edómetro (5CH+CAL+CC)

Gráfica 6. Expansión (CH+CAL+CC)



Fuente. Elaboración propia

Tabla 23. Resultados de la expansión (5CH+CAL+CC)

PURO	Lectura de expansión %	Expansión asumida %
	21,7	21,7
5%y10%	6,1	6,1
5%y15%	0,8	0,8
5%y20%	-5,3	-5,3
5%y25%	-7,2	-7,2

Fuente. Elaboración propia

Análisis descriptivo:

- Con el 10 %,15 % de Ceniza la expansión se reduce.
Esto significa que las mezclas ayudan a disminuir la capacidad expansiva del suelo, lo que es un mejoramiento. considerable en comparación con el suelo puro, ya que reduce el riesgo de desplazamientos debido a la expansión.
- Con un 20 %, 25 % de Ceniza la expansión se vuelve negativa, por lo cual el suelo se contrae en lugar de expandirse.
Esta contracción indica que la mezcla de cal y ceniza ha mejorado significativamente la estructura del suelo, pero también puede implicar que el suelo ha perdido parte de su capacidad de expansión y presentar problemas de asentamiento. Por tanto, ya se va mostrando que un exceso de estabilizantes puede llevar a un comportamiento más frágil del suelo, lo que, a su vez, puede ocasionar asentamientos bajo cargas que antes no habrían causado tales efectos en un suelo sin estabilizar.

4.3. Análisis estadístico general

4.3.1. Estadística descriptiva (Límite Líquido)

Comportamiento del límite líquido del suelo frente a mezclas con cal y ceniza de carbón se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. Datos del límite líquido de la muestra

Mezcla al suelo	Límite líquido (%)
Mezcla 1	49,67
mezcla 2	49,37
Mezcla 3	47,98
Mezcla 4	47,36
Mezcla 5	47,04
Mezcla 6	45,60
Mezcla 7	46,01
Mezcla 8	48,84
Mezcla 9	49,25
Mezcla 10	50,41
Mezcla 11	51,67
Mezcla 12	51,74
Mezcla 13	52,45
Mezcla 14	53,09
Mezcla 15	53,92

Fuente: Elaboración propia

Distribución de frecuencias

Rango de datos = Dato mayor - Dato menor

Rango de datos = 53,92 – 45,60= 8,32 %

Distribución de clases o categoría

n = 15

No de clases = $1+3,322*\log(n)$

No de clases = $1+3,322*\log(15) = 4,91 \cong 5$ Clases

Intervalo de clase, límite de clase, ancho y marca de clase

$$\text{Ancho de clase} = \frac{\text{Lím.superior} - \text{Lím.inferior}}{\text{numero de clase}}$$

$$\text{Ancho de clase} = \frac{53,92 - 45,60}{5} = 1,66$$

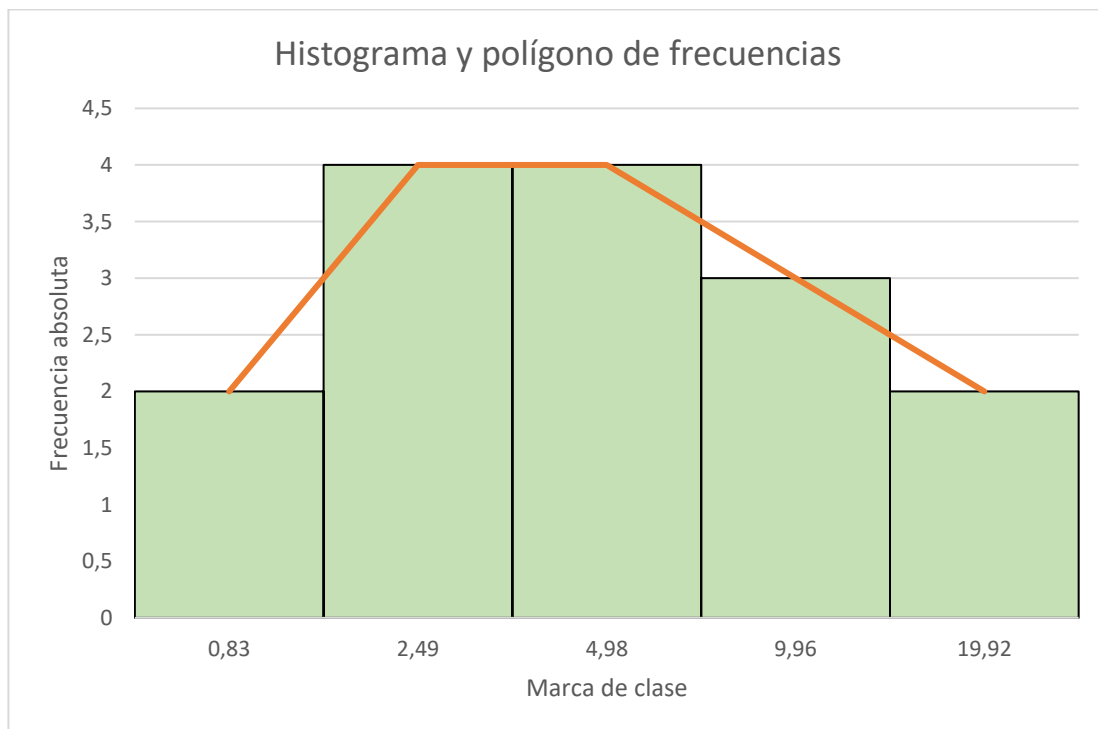
Tendencias y comportamiento de los datos (Frecuencia Absoluta y Relativa)

Tabla 25. Distribución de frecuencias

NC	Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
1	0	1,66	0,83	2	2	13,33	13,33
2	1,66	3,32	2,49	4	6	26,67	40,00
3	3,32	6,64	4,98	4	10	26,67	66,67
4	6,64	13,28	9,96	3	13	20,00	86,67
5	13,28	26,56	19,92	2	15	13,33	100,00
Σ=				15	100,000		

Fuente: Elaboración propia

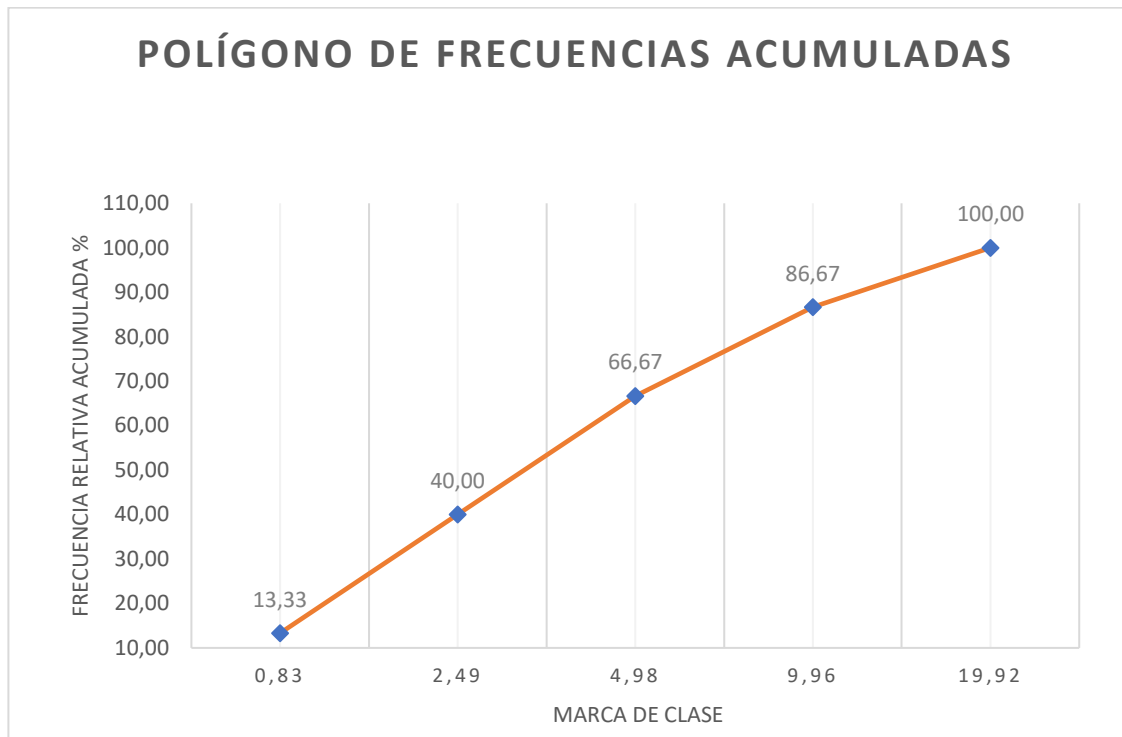
Gráfica 7: Histograma y polígono de frecuencias (Límite líquido)



Fuente: Elaboración propia

Se calcularon las frecuencias absoluta, acumulada y relativa, obteniendo una asimetría positiva.

Gráfica 8: Polígono de frecuencias acumuladas (Límite líquido)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Medidas de tendencia y dispersión

Medidas de Tendencia		Medidas de Dispersión	
Media	Mediana	Desviación estándar	Varianza
49,63	49,37	2,57	6,59

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones descriptivas

- Los valores analizados presentan una ligera asimetría positiva, tal como se observa en el histograma (Gráfica 7), donde la cola de la distribución se extiende hacia los valores más altos.
- La mayoría de los datos se concentran en las clases intermedias, especialmente alrededor de la media (49,63), mientras que son menos frecuentes los valores extremos.

- Esta asimetría se refleja en las medidas de tendencia central, donde la media (49,63) supera levemente a la mediana (49,37), indicando una distribución inclinada hacia la derecha.
- La desviación estándar (2,57) y la varianza (6,59) muestran una dispersión moderada, evidenciando que los valores se encuentran relativamente próximos al promedio, con variaciones controladas dentro del conjunto de datos.

4.3.1.1. Estadística inferencial

4.3.1.1.1. Intervalo de confianza

Media = 49,63

Desviación = 2,57

NC = 95%  1,96

n = 15

Límites del intervalo

límite superior $\mu = 52,16$

Límite inferior $\mu = 47,10$

Intervalo de confianza

$$47,10 \leq 49,63 \leq 52,16$$

Interpretación:

Con un nivel de confianza del 95%, se afirma que el valor medio real de la variable analizada (límite líquido del suelo) se encuentra entre 47,10% y 52,16%.

Este rango relativamente estrecho indica que las variaciones registradas no son aleatorias, sino que reflejan un comportamiento consistente del suelo tratado.

En otras palabras, las mezclas con cal y ceniza presentan una reducción efectiva y estadísticamente confiable de la expansión respecto al suelo natural (CH).

4.3.1.2. Prueba de hipótesis (T-Student)

La hipótesis de investigación, que establece que “las mediciones con el equipo de Casa Grande en mezclas al suelo CH son de alta eficiencia”:

- Hipótesis nula (H_0): Las mediciones con él con el equipo de Casa Grande en mezclas al suelo CH no presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_0: \mu = \mu_0$$

- Hipótesis alternativa (H_1): Las mediciones con él con el equipo de Casa Grande en mezclas al suelo CH presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_1: \mu < \mu_o$$

Parámetros utilizados:

Nivel de confianza y nivel de significancia

NC = 95% = 0,95

Significancia para una sola cola = α = 5% = 0,05

Media $\mu = 1,63$

Desviación estándar $Sd = 2,57$

Tabla 27. Media aritmética

n	Expansión		Diferencia D	$(dr - \mu d)^2$
	Antes	Después		
	%	%	%	
1	51,26	49,67	1,59	0,00
2	51,26	49,37	1,89	0,07
3	51,26	47,98	3,27	2,70
4	51,26	47,36	3,89	5,13
5	51,26	47,04	4,22	6,70
6	51,26	45,60	5,65	16,20
7	51,26	46,01	5,24	13,06
8	51,26	48,84	2,42	0,62
9	51,26	49,25	2,01	0,15
10	51,26	50,41	0,84	0,62
11	51,26	51,67	-0,41	4,18
12	51,26	51,74	-0,48	4,45
13	51,26	52,45	-1,20	7,99
14	51,26	53,09	-1,83	12,00
15	51,26	53,92	-2,66	18,42
SUMA				92,29

Fuente: Elaboración propia

El estadístico t se calcula:

$$t = \frac{\mu}{Sd/\sqrt{n}}$$

$$t = \frac{1,63}{2,57/\sqrt{15}} = 2,46$$

Numero de grados de libertad

$$v = n-1 = 15-1 = 14$$

El valor crítico para una cola, con 14 grados de libertad y nivel de significancia del 5%, es:

$$t_{\text{crítico}}=1,76$$

$$t_{\text{calculado}}=2,46 > t_{\text{crítico}}=1,76$$

Interpretación de resultados

- Dado que $t_{\text{calculado}}=2,46 > t_{\text{crítico}}=1,76$, se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Esto indica que, considerando todas las mezclas analizadas, la reducción promedio de la expansión del suelo no es estadísticamente significativa al 95 % de confianza.
- La presencia de diferencias negativas en algunas mezclas muestra que no todas las combinaciones de cal y ceniza lograron disminuir la expansión, y la eficiencia varía según la composición específica de cada mezcla.

4.3.2. Estadística descriptiva (Índice de plasticidad)

La distribución de la expansión del suelo frente a mezclas con cal y ceniza de carbón se presenta en la Tabla 21.

Tabla 28. Datos del índice de plasticidad de la muestra

Mezcla al suelo	Índice de plasticidad (%)
Mezcla 1	24,23
mezcla 2	23,52
Mezcla 3	21,78
Mezcla 4	20,65
Mezcla 5	19,59
Mezcla 6	20,18
Mezcla 7	19,29
Mezcla 8	18,12
Mezcla 9	18,22
Mezcla 10	18,94

Mezcla 11	19,88
Mezcla 12	20,46
Mezcla 13	21,82
Mezcla 14	23,76
Mezcla 15	25,17

Fuente: Elaboración propia

Distribución de frecuencias

Rango de datos = Dato mayor - Dato menor

Rango de datos = 25,17 – 18,12= 9,05 %

Distribución de clases o categoría

n = 15

No de clases = $1+3,322*\log(n)$

No de clases = $1+3,322*\log(15) = 4,91 \cong 5$ Clases

Intervalo de clase, límite de clase, ancho y marca de clase

$$\text{Ancho de clase} = \frac{\text{Lím.superior} - \text{Lím.inferior}}{\text{numero de clase}}$$

$$\text{Ancho de clase} = \frac{25,17 - 18,12}{5} = 1,41$$

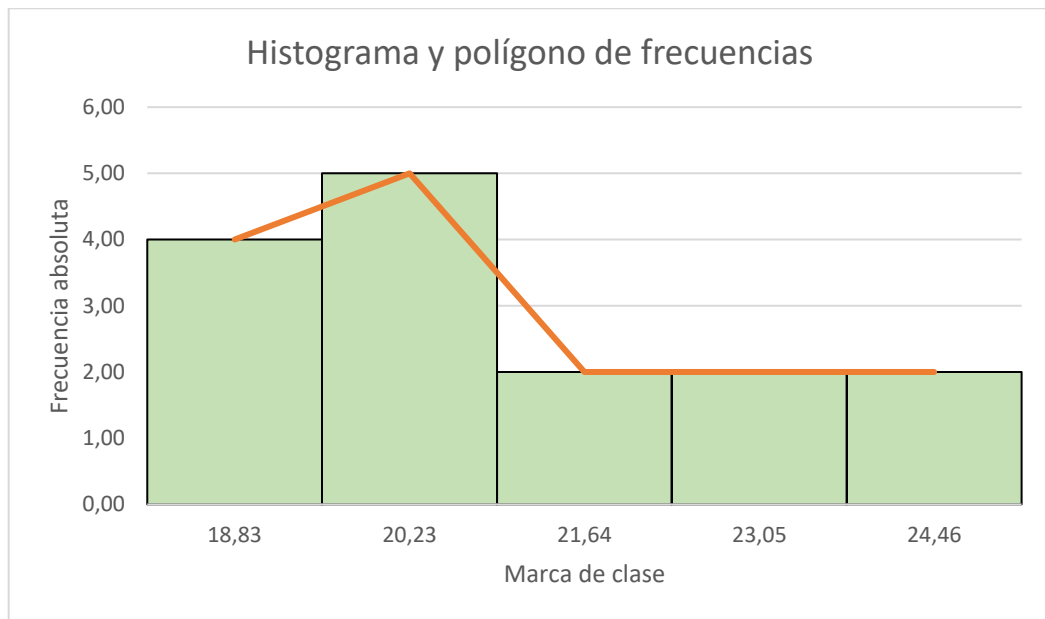
Tendencias y comportamiento de los datos (Frecuencia Absoluta y Relativa)

Tabla 29. Distribución de frecuencias

NC	Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
1	18,12	19,53	18,83	4,00	4,00	26,67	26,67
2	19,53	20,94	20,23	5,00	9,00	33,33	60,00
3	20,94	22,35	21,64	2,00	11,00	13,33	73,33
4	22,35	23,76	23,05	2,00	13,00	13,33	86,67
5	23,76	25,17	24,46	2,00	15,00	13,33	100,00
Σ=	15			100,000			

Fuente: Elaboración propia

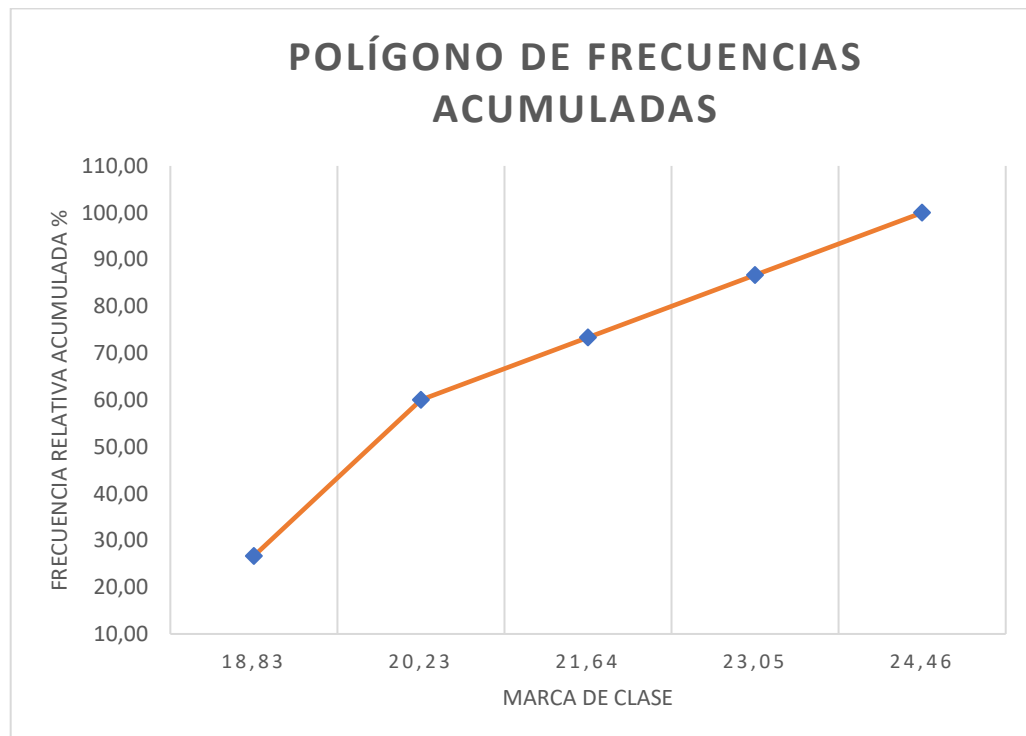
Gráfica 9: Histograma y polígono de frecuencias (Índice de plasticidad)



Fuente: Elaboración propia

Se calcularon las frecuencias absoluta, acumulada y relativa, obteniendo una asimetría positiva.

Gráfica 10: Polígono de frecuencias acumuladas (Índice de plasticidad)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Medidas de tendencia y dispersión

Medidas de Tendencia		Medidas de Dispersión	
Media	Mediana	Desviación estándar	Varianza
21,04	20,46	2,25	5,04

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones descriptivas

- La mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo 19.5 – 21.0, con 5 de 15 observaciones (33.33%).
- La marca de clase promedio más frecuente está alrededor de 20.25, lo que indica que los valores tienden a centrarse en torno a 20.
- Los datos se distribuyen desde 18.12 hasta 25.17, dando un rango de 7.05, lo que indica cierta dispersión moderada.
- La distribución es ligeramente asimétrica hacia la derecha, ya que los intervalos superiores (22.5 – 25.5) tienen menos frecuencia (2 observaciones cada uno) que los intervalos inferiores.
- Más de la mitad de los datos (60%) están por debajo de 21.0, lo que refuerza la concentración de valores en la parte baja del rango.

4.3.2.1. Estadística inferencial

4.3.2.1.1. Intervalo de confianza

Media = 21,04

Desviación = 2,25

NC = 95%  1,96

n = 15

Límites del intervalo

límite superior $\mu = 23,57$

Límite inferior $\mu = 18,51$

Intervalo de confianza

$$18,51 \leq 21,04 \leq 23,57$$

Interpretación:

La media de los datos es 21,04, y el intervalo de confianza al 95% es $18,51 \leq \mu \leq 23,57$.

Esto significa que podemos estar 95% seguros de que la media verdadera de la población se encuentra entre 18,51 y 23,57.

4.3.2.1.2. Prueba de hipótesis (T-Student)

La hipótesis de investigación, que establece que “las mediciones para el índice de plasticidad en mezclas al suelo CH son de alta eficiencia”, se transforma en hipótesis nula con el fin de ser sometida a una prueba estadística.

- Hipótesis nula (H_0): Las mediciones del índice plástico en mezclas al suelo CH no presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_0: \mu = \mu_0$$

- Hipótesis alternativa (H_1): Las mediciones del índice plástico en mezclas al suelo CH presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_1: \mu < \mu_0$$

Parámetros utilizados:

Nivel de confianza y nivel de significancia

$$NC = 95\% = 0,95$$

$$\text{Significancia para una sola cola} = \alpha = 5\% = 0,05$$

$$\text{Media} \quad \mu = 4,70$$

$$\text{Desviación estándar} \quad Sd = 2,25$$

Tabla 31. Media aritmética

n	Expansión		Diferencia (d)	$(dr - \mu d)^2$
	Antes	Después		
	%	%	%	
1	25,74	24,23	1,51	10,19
2	25,74	23,52	2,22	6,14
3	25,74	21,78	3,96	0,55
4	25,74	20,65	5,09	0,16
5	25,74	19,59	6,15	2,10
6	25,74	20,18	5,56	0,74
7	25,74	19,29	6,45	3,06

8	25,74	18,12	7,62	8,52
9	25,74	18,22	7,52	7,97
10	25,74	18,94	6,80	4,41
11	25,74	19,88	5,86	1,34
12	25,74	20,46	5,28	0,34
13	25,74	21,82	3,92	0,60
14	25,74	23,76	1,98	7,42
15	25,74	25,17	0,57	17,03
SUMA				70,57

Fuente: Elaboración propia

El estadístico t se calcula:

$$t = \frac{\mu}{Sd/\sqrt{n}}$$

$$t = \frac{4,70}{2,25/\sqrt{15}} = 8,09$$

Número de grados de libertad

$$v = n-1 = 15-1 = 14$$

El valor crítico para una cola, con 14 grados de libertad y nivel de significancia del 5%, es:

t crítico=1,761

$$t \text{ calculado} = 8,09 > t \text{ crítico} = 1,761$$

Interpretación de resultados

- Luego de realizar la prueba de hipótesis mediante el método t de Student se obtuvo un valor de t calculado > t crítico, por tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

4.3.3. Estadística descriptiva del Edómetro

La distribución de la expansión del suelo frente a mezclas con cal y ceniza de carbón se presenta en la Tabla 21.

Tabla 32. Datos de expansión de la muestra

Mezcla al suelo	Grado de expansión asumida (%)
Mezcla 1	15,5
mezcla 2	12,8
Mezcla 3	8,8
Mezcla 4	5,9
Mezcla 5	0
Mezcla 6	3,3
Mezcla 7	1,1
Mezcla 8	0,5
Mezcla 9	0
Mezcla 10	0
Mezcla 11	7,4
Mezcla 12	6,1
Mezcla 13	0,8
Mezcla 14	0
Mezcla 15	0

Fuente: Elaboración propia

El rango de los datos es 15,5% y se determina un total de 5 clases para análisis.

Distribución de frecuencias

Rango de datos = Dato mayor - Dato menor

Rango de datos = $15,5 - 0 = 15,5 \%$

Distribución de clases o categoría

$n = 15$

No de clases = $1 + 3,322 \cdot \log(n)$

No de clases = $1 + 3,322 \cdot \log(15) = 4,91 \cong 5$ Clases

Intervalo de clase, límite de clase, ancho y marca de clase

$$\text{Ancho de clase} = \frac{\text{Lim.superior} - \text{Lim.inferior}}{\text{numero de clase}}$$

$$\text{Ancho de clase} = \frac{15,5 - 0}{5} = 3,1$$

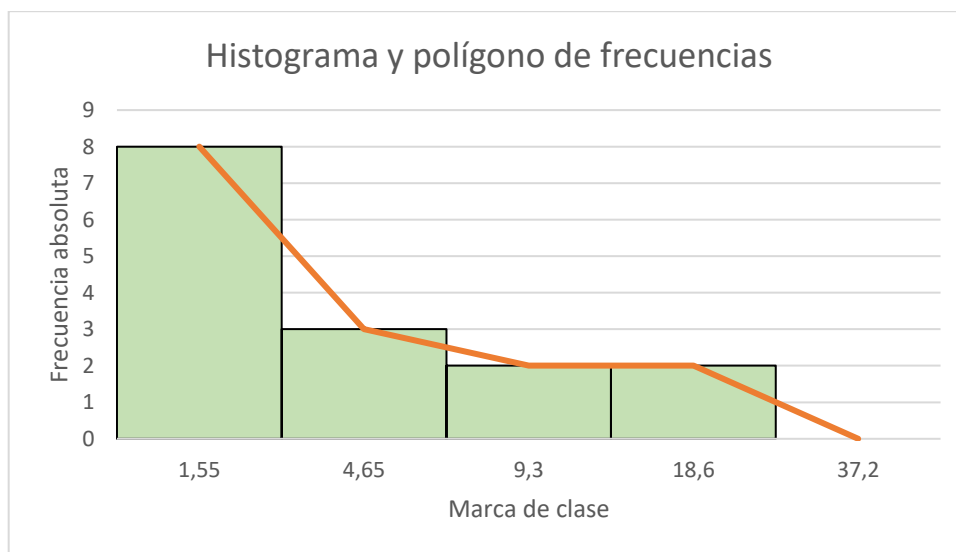
Tendencias y Comportamiento de los Datos (Frecuencia Absoluta y Relativa)

Tabla 33. Distribución de frecuencias

NC	Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
1	0	3,1	1,55	8	8	53,333	53,333
2	3,1	6,2	4,65	3	11	20,000	73,333
3	6,2	12,4	9,3	2	13	13,333	86,667
4	12,4	24,8	18,6	2	15	13,333	100,000
5	24,8	49,6	37,2	0	15	0,000	100,000
Σ=				15	100,000		

Fuente: Elaboración propia

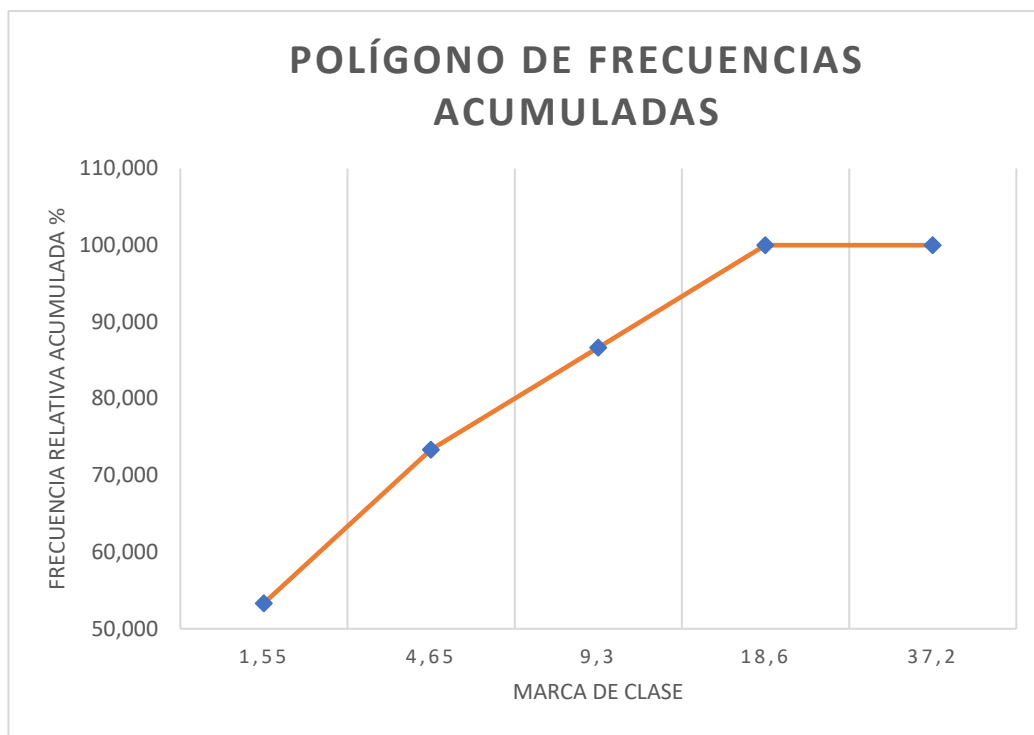
Gráfica 11: Histograma y polígono de frecuencias (Edómetro)



Fuente: Elaboración propia

Se calcularon las frecuencias absoluta, acumulada y relativa, obteniendo una asimetría positiva.

Gráfica 12: Polígono de frecuencias acumuladas (Edómetro)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 34: Medidas de tendencia y dispersión

Medidas de Tendencia		Medidas de Dispersión	
Media	Mediana	Desviación estándar	Varianza
4,147	1,1	5,095	25,956

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones descriptivas

- Las tasas de infiltración en el área estudiada presentan una marcada asimetría positiva, como puede observarse en el histograma (Gráfica 11).
- La mayoría de los valores se concentran en las clases más bajas (especialmente alrededor de 1,55 %), mientras que existen pocos valores muy altos, que llegan hasta 37,2 %, lo cual extiende la cola de la distribución hacia la derecha.

- Esta asimetría se refleja también en las medidas estadísticas: la mediana es de 1,1 %, mientras que la desviación estándar es alta (5,095 %), indicando una gran dispersión de los datos.

4.3.3.1. Estadística Inferencial

4.3.3.1.1 Intervalo de confianza

Media = 4,147

Desviación = 5,095

NC = 95%  1,96

n = 15

Límites del intervalo

límite superior $\mu = 6,677$

Límite inferior $\mu = 1,616$

Intervalo de confianza

$$1,616 \leq 4,147 \leq 6,677$$

Interpretación:

- Con un nivel de confianza del 95%, se afirma que el valor medio real de la variable analizada (expansión del suelo) se encuentra entre 1,616% y 6,677%.
- Este rango relativamente estrecho indica que las variaciones registradas no son aleatorias, sino que reflejan un comportamiento consistente del suelo tratado.
- En otras palabras, las mezclas con cal y ceniza presentan una reducción efectiva y estadísticamente confiable de la expansión respecto al suelo natural (CH).

4.3.3.1.2. Prueba de hipótesis (T-Student)

La hipótesis de investigación, que establece que “las mediciones con el Edómetro en mezclas al suelo CH son de alta eficiencia”, se transforma en hipótesis nula con el fin de ser sometida a una prueba estadística.

- Hipótesis nula (H_0): Las mediciones con el Edómetro en mezclas al suelo CH no presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_0: \mu = \mu_0$$

- Hipótesis alternativa (H_1): Las mediciones con el Edómetro en mezclas al suelo CH presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_1: \mu < \mu_0$$

Parámetros utilizados:

Nivel de confianza y nivel de significancia

NC = 95% = 0,95

Significancia para una sola cola = $\alpha = 5\% = 0,05$

Media $\mu = 17,55$

Desviación estándar Sd = 5,09

Tabla 35. Media aritmética

N	Expansión		Diferencia (d)	$(dr - \mu d)^2$
	Antes	Después		
	%	%	%	
1	21,7	15,5	6,2	128,90
2	21,7	12,8	8,9	74,88
3	21,7	8,8	12,9	21,65
4	21,7	5,9	15,8	3,07
5	21,7	0	21,7	17,19
6	21,7	3,3	18,4	0,72
7	21,7	1,1	20,6	9,28
8	21,7	0,5	21,2	13,30
9	21,7	0	21,7	17,19
10	21,7	0	21,7	17,19
11	21,7	7,4	14,3	10,58
12	21,7	6,1	15,6	3,82
13	21,7	0,8	20,9	11,20
14	21,7	0	21,7	17,19
15	21,7	0	21,7	17,19
SUMA				363,38

Fuente: Elaboración propia

El estadístico t se calcula:

$$t = \frac{\mu}{Sd/\sqrt{n}}$$
$$t = \frac{17,55}{5,09/\sqrt{15}} = 13,46$$

Número de grados de libertad

$$v = n-1 = 15-1 = 14$$

El valor crítico para una cola, con 14 grados de libertad y nivel de significancia del 5%, es:

t crítico=1,761

$$t \text{ calculado}=13.46 > t \text{ crítico}=1,761$$

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Interpretación de resultados

- Se observa un valor de t calculado mayor que el valor crítico con 14 grados de libertad y un nivel de significancia del 5%, lo cual indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los datos comparados.
- Este resultado respalda la eficacia del tratamiento propuesto, evidenciando que la modificación del suelo mediante la aplicación de aditivos como ser la Cal y Ceniza de Carbón muestra una reducción estadísticamente comprobada de la plasticidad, lo cual es relevante para la mejora de sus propiedades del suelo como ser al cambio del volumen.

4.4. Especificaciones técnicas puntuales del proceso

Para la ejecución de la presente investigación sobre la eficiencia de las mezclas de cal y ceniza de carbón, se establecen las siguientes especificaciones técnicas del procedimiento.

4.4.1 Proceso técnico

El procedimiento experimental se desarrolló en el laboratorio de suelos, empleando los siguientes ensayos:

- Límites de Atterberg
- Contenido de humedad
- Granulometría,
- Compactación

- Expansión de suelo

El cual permite medir el comportamiento del suelo.

Esta investigación fue ejecutada conforme a la norma; ASTM D4318 AASHTO T89, ASTM D422 y ASTM D3877 y D4829.

Las etapas del proceso fueron las siguientes:

- ✓ **Selección del sitio de ensayo:** Se identifica sitios con suelo en estado natural, sin alteraciones visibles, sin mucha vegetación y con visualización de suelo arcilloso.
- ✓ **Extracción de la muestra:** Se limpia el área del sitio elegido retirando material orgánico superficial,

Se extrae el suelo a una profundidad de aproximadamente 30 Cm desde la superficie natural del terreno, donde se concentran las características geotécnicas más influyentes. Además, extraer el suelo desde esta profundidad evita la presencia de materia orgánica superficial, residuos y alteraciones extras como humedad temporal, raíces o estructuras compactadas por tráfico. Así se asegura una muestra más homogénea, representativa y técnicamente confiable para los ensayos de laboratorio.

- ✓ **Preparación de la muestra:** Se trabaja con un suelo secado en horno, donde se procedió a realizar las mezclas con cal y ceniza de carbón, los cuales son previamente combinados entre sí para formar un solo aditivo.

La mezcla de aditivos es incorporada al suelo seco de manera homogénea, con fin de obtener una distribución uniforme de los materiales en cada muestra preparada.

- ✓ **Registro de datos:** Se realiza un control basado en el ensayo de Límites de Atterberg, con el objetivo de analizar el comportamiento de la plasticidad del suelo frente a la incorporación de los aditivos. Además, las muestras fueron sometidas a un proceso de saturación durante 48 horas utilizando un edómetro, con el fin de registrar el cambio de volumen del suelo provocado por la variación en su plasticidad.

Esta etapa fue fundamental para evaluar su comportamiento.

- ✓ **Finalización del proyecto:** Se analiza los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de la investigación, con el propósito de evaluar el cumplimiento del

objetivo principal de analizar el efecto de la adición de cal y ceniza de carbón en la plasticidad de un suelo arcilloso.

Con base en los ensayos realizados, se identifica variaciones significativas en los parámetros de plasticidad, lo que permite comprobar que los aditivos empleados mejoran las propiedades geotécnicas del suelo.

Esta etapa culminó con la interpretación de los datos, la validación estadística y la formulación de conclusiones técnicas que respaldan la aplicabilidad del tratamiento propuesto. Así, se consolidó el trabajo experimental y se generaron aportes relevantes para el campo de la estabilización de suelos, finalizando la investigación con resultados concluyentes y técnicamente fundamentados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones

- El análisis del suelo CH de alta plasticidad tratado con mezclas de cal y ceniza de carbón ha permitido identificar las ventajas y desventajas de estas mezclas en el comportamiento de las propiedades mecánicas y geotécnicas de los suelos.
- Los cambios observados en los límites líquidos y índice plásticos, son influenciados por los aditivos en su comportamiento.
- En el límite líquido se observa inicialmente una reducción progresiva hasta alcanzar una mezcla de 4% de cal y 20% de ceniza de carbón y luego empieza a elevarse superando al valor inicial del suelo puro. Por lo tanto, para elegir el porcentaje más óptimo de mezcla se descartan mezclas de 4% cal y 25% de ceniza por parte del límite líquido a comparación del suelo puro no existiría veneficios por lo que un suelo con límite arriba de 50% o cercano tiende a expandir mucho cuando se hinchan, se contraen cuando se secan.
- A partir del análisis de las mezclas de cal y ceniza de carbón en relación con su influencia sobre la expansión de un suelo de alta plasticidad, se llegó a la conclusión de que el porcentaje más óptimo para mejorar las características del suelo es la mezcla de 4% de cal y 5% de ceniza de carbón que presenta un comportamiento de expansión considerado como una expansión baja (tabla 6).
- Se logra modificar de una arcilla de alta plasticidad a una arcilla de baja plasticidad, esta dosificación al suelo arcilloso CH de alta plasticidad con una mezcla de 4% de Cal y 5% de ceniza de carbón viene a ser el más favorable y óptimo de las mezclas transformando un suelo con elevada plasticidad a un suelo con baja plasticidad, siendo aplicable solo a un suelo CH de alta plasticidad.

5.1. Recomendaciones

- No es recomendable a proyectos donde se necesiten compactaciones grandes, que requieran altas capacidades de carga como ser rascacielos o estructuras muy pesadas y si recomendables en proyectos de carreteras o caminos,
- Antes de realizar las mezclas con cal y ceniza de carbón se recomienda caracterizar al suelo primero para verificar si es el suelo ideal (CH).
- Para obtener buenos resultados es recomendable eliminar todos los terroncitos pequeños para una buena dosificación.
- Se recomienda limpiar los equipos con jabón luego del uso del suelo con los aditivos para evitar que sigan reaccionando.
- Se recomienda no trabajar demasiado tiempo con los aditivos como la cal por lo que se carcomen el material.
- Es recomendable el uso de guantes de agua para el manejo de la cal
- Para conseguir resultados favorables es recomendable seguir todos los procedimientos de cálculo tal y como indican las normas para obtener respuestas buenas y mejorar el criterio de evaluación.
- Los resultados obtenidos son válidos para suelos CH de elevada plasticidad.