

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

En el presente proyecto se investiga la reducción de la plasticidad en suelos arcillosos de media compresibilidad mediante la adición de mezclas compuestas por cal y ceniza de tallos de quinua. Especialmente en el ámbito de las obras viales, donde un suelo inestable puede comprometer la durabilidad y seguridad de la infraestructura. El objeto de la investigación busca analizar cómo estos aditivos influyen sobre el índice de plasticidad, con el fin de analizar su posible incorporación en procesos de mejoramiento vial.

Diversos estudios, como los de Mamani (2023) y Lupaca (2022), han demostrado que la combinación de cal y ceniza de tallos de quinua reduce significativamente la plasticidad de suelos arcillosos. Sin embargo, en Bolivia aún no se han desarrollado investigaciones aplicadas sobre esta mezcla, pese a que la quinua es un cultivo abundante. Esta situación plantea una oportunidad para aprovechar residuos locales y mejorar suelos problemáticos en obras viales.

Este estudio busca analizar cómo varía la plasticidad de suelos arcillosos al aplicar mezclas de cal y ceniza de tallos de quinua. Para ello, se realizará una caracterización inicial del suelo y se prepararán dosificaciones controladas con diferentes proporciones de aditivos. El propósito es observar si esta combinación permite disminuir las propiedades plásticas del suelo, mejorando su comportamiento para su uso en obras viales.

Esta investigación se vincula directamente con la Ingeniería Civil, ya que busca aportar soluciones a la problemática de suelos arcillosos de media compresibilidad, comunes en obras viales. Estos suelos, al presentar alta plasticidad, dificultan la estabilidad estructural y elevan los costos de construcción y mantenimiento. El estudio propone una alternativa basada en aditivos accesibles y sostenibles, que permiten mejorar las condiciones del terreno sin recurrir a materiales importados o de alto costo. Esta propuesta aprovecha residuos agrícolas, como los tallos de quinua, lo cual representa un aporte tanto técnico como social. Al promover el uso de recursos regionales, se fomenta la participación

comunitaria y la economía. Se espera que los resultados de esta investigación tengan un impacto significativo en la mejora de los procesos de estabilización de suelos, garantizando la calidad y eficiencia de las obras de construcción de carreteras y otras infraestructuras.

1.2 Antecedentes

Históricamente el uso de la cal como aditivo estabilizante ha sido una práctica consolidada en la Ingeniería Civil, debido a su eficacia para modificar las propiedades de los suelos, especialmente su plasticidad, rigidez y capacidad de carga. Paralelamente, diversas investigaciones han explorado el empleo de materiales puzolánicos, como ciertas cenizas vegetales, con resultados favorables en procesos de estabilización. En este contexto, la combinación de cal con ceniza de tallos de quinua se plantea como una alternativa técnica viable, aprovechando residuos agroindustriales de alta disponibilidad en la región andina.

En estudios desarrollados en el Perú, Mamani (2023) aplicó cal y ceniza de tallos de quinua en la carretera Lago Sagrado, tramo Putini-Jayujayu, obteniendo una reducción progresiva del índice de plasticidad (IP) en suelos de fundación: desde un IP inicial de 13,89 % a valores de 12,89 %, 10,40 % y 9,6 % al adicionar 5 %, 7 % y 9 % de ceniza, junto con 5 % de cal. De manera similar, Lupaca (2022) evaluó la incorporación de cenizas de tallos de quinua en la subrasante de la carretera Checca-Mazocruz, alcanzando reducciones del IP por debajo de los rangos establecidos por la norma NTP 339.129, que define valores aceptables entre 0 % y 7 % para suelos de baja plasticidad.

Hasta la fecha, no se han identificado investigaciones formales en Bolivia que aborden la estabilización de suelos arcillosos con la combinación de cal y ceniza de tallos de quinua. No obstante, Bolivia cuenta con una alta producción de quinua, especialmente en zonas del altiplano y los valles, generando residuos agrícolas sin aprovechamiento. Esta situación representa una oportunidad para implementar soluciones sostenibles, que además de mejorar las condiciones del suelo, reduzcan costos y promuevan el uso de materiales locales en obras civiles, como carreteras.

1.3 Justificación del proyecto

1.3.1 Justificación académica

Este estudio contribuye al desarrollo del conocimiento en el campo de la Ingeniería Civil, específicamente en el área de mecánica de suelos y estabilización de subrasantes. Propone un enfoque alternativo basado en el uso de residuos agrícolas como material puzolánico, lo cual permite ampliar las estrategias de tratamiento de suelos problemáticos. Además, la combinación de cal con ceniza de tallos de quinua representa una línea de investigación poco explorada, abriendo la posibilidad de futuras aplicaciones experimentales y validaciones en distintas condiciones geotécnicas.

1.3.2 Justificación de la aplicación técnico-practico

La investigación responde a una problemática concreta en el diseño y ejecución de obras viales: la presencia de suelos arcillosos con alta plasticidad, que afectan la estabilidad y durabilidad de las estructuras. Mediante la aplicación de dosificaciones controladas de cal y ceniza de quinua, se busca reducir el índice de plasticidad y mejorar las condiciones del suelo como subrasante. Este procedimiento, además de ser técnicamente viable, aprovecha materiales accesibles y de bajo costo, lo cual lo convierte en una solución adaptable a contextos rurales y zonas con recursos limitados.

1.3.3 Justificación e importancia social

Desde una perspectiva territorial, el proyecto promueve el aprovechamiento de residuos agrícolas generados localmente, favoreciendo la economía circular y reduciendo el impacto ambiental. En regiones como Tarija, donde la producción de quinua es significativa, el uso de sus tallos como insumo para estabilización representa una alternativa económica y sostenible. Asimismo, la mejora de caminos rurales a partir de soluciones accesibles puede contribuir a una mejor conectividad, facilitando el transporte, el acceso a servicios y el desarrollo de comunidades alejadas

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problémica

Los suelos arcillosos de media compresibilidad presentan alta plasticidad, lo que genera problemas en obras civiles como deformaciones, asentamientos y pérdida de estabilidad estructural. Esta condición complica la construcción de carreteras y taludes, especialmente en zonas con limitados recursos técnicos.

La presente investigación propone evaluar la aplicación de cal y ceniza de tallos de quinua como aditivos estabilizantes, con el objetivo de reducir el índice de plasticidad y mejorar el comportamiento geotécnico del suelo tratado. De no aplicarse soluciones adecuadas, se mantendrán las fallas prematuras en infraestructura, los altos costos de mantenimiento y el desaprovechamiento de materiales locales con potencial técnico.

La investigación adopta un enfoque experimental, aplicando ensayos de laboratorio para analizar, evaluar y comparar el índice de plasticidad del suelo antes y después de incorporar los aditivos propuestos.

1.4.2 Delimitación temporal y espacial

a) Delimitación temporal

Tabla 1.1 Delimitación temporal

Fecha aproximada	Evento	¿Cómo tributa este dato?
Marzo del 2024	Exploración y selección del tema	Se identifica la problemática de los suelos arcillosos y la necesidad de reducir su plasticidad mediante aditivos locales
Abril del 2024	Se inicia la planificación	En base a los diferentes aditivos estabilizantes que existen se buscó algo innovador y de bajo costo

Junio del 2024	Se da procedente el título de la propuesta	Esto es en la junta de departamento.
Julio del 2024	Se aprueba la asignatura de CIV 501.	Se define la investigación aprobada con el tema y la metodología.
20 de agosto del 2024	Tramites y solicitudes al laboratorio de suelos	Permitió el uso de los equipos y materiales del mismo.
29 de agosto del 2024	Recolección de muestras de suelo y tallos	Extracción y secado previo al ensayo
2 de septiembre del 2024	Ejecución de ensayos de laboratorio	Determinación de límites de Atterberg y dosificaciones.
25 de octubre del 2024	Análisis de resultados y redacción del informe	Interpretación de datos y estructuración del capítulo IV.
6 de noviembre del 2024	Entrega de borrador	Borrador completo para ser revisado y aprobado por el docente.
Noviembre del 2024	Pre defensa	Pre defensa con tribunales.

Fuente: Elaboración propia

b) Delimitación espacial

El área temática predominante está en la mecánica de suelos, específicamente en la caracterización y modificación del comportamiento plástico de suelos arcillosos de media compresibilidad. La base de operaciones fue el laboratorio de suelos de la UAJMS, donde se aplicaron distintas dosificaciones de cal y ceniza de tallos de quinua a muestras representativas, extraídas de la segunda circunvalación de Tarija.

1.4.3 Formulación del problema

¿De qué manera las mezclas de ceniza de tallos de quinua y cal podrán reducir la plasticidad de los suelos arcillosos de media compresibilidad?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar la reducción de la plasticidad de los suelos arcillosos de media comprensibilidad, mediante la aplicación de aditivos de ceniza de tallos de quinua y cal con la finalidad de obtener un proceso alternativo para la construcción de obras civiles.

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los suelos arcillosos de media comprensibilidad.
- Caracterizar la ceniza de tallos de quinua y la cal.
- Determinar la reducción de la plasticidad de los suelos arcillosos.
- Identificar el porcentaje óptimo de la adición de ceniza de tallos de quinua y cal.
- Analizar los resultados de manera confiable.

1.6 Planteamiento de la hipótesis y sus variables

1.6.1 Formulación de la hipótesis

La adición de mezclas de cal y ceniza de tallos de quinua en suelos arcillosos de media comprensibilidad mejora la reducción de la plasticidad.

1.6.2 Identificación y conceptualización de variables

En esta investigación se identifican dos variables principales, la variable independiente corresponde a la aplicación de mezclas de cal hidratada y ceniza de tallos de quinua, utilizadas como aditivos estabilizantes en suelos arcillosos.

La variable dependiente es la plasticidad del suelo, medida a través del índice de plasticidad (IP), que permite evaluar los cambios producidos por el tratamiento.

1.6.3 Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.2 Variable independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	DIMENSION	INDICACION	VALORACION
Porcentajes de Ceniza de tallos de quinua-cal en suelos arcillosos	Se refiere a un incremento gradual de la ceniza de tallos de quinua-cal a la masa seca de suelo arcilloso de media compresibilidad	Masa de suelo arcilloso seco	Gramos (g)	Preparación previa de la muestra según norma
		Ceniza de tallos de quinua-cal	Porcentaje (%)	Calculada respecto del peso total de la muestra seca. Se usará por lo menos 5 valores
		Mezcla de suelo arcilloso-Ceniza de tallos de quinua-cal	Gramos (g)	Realizada por separado en función a los valores determinados, por lo menos tres por valor o porcentaje.

Tabla 1.3 Variable dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	DIMENSION	INDICACION	VALORACION
Valor de la plasticidad	Es el cumplimiento de la combinación de la ceniza de tallos de quinua-cal con suelo arcilloso de media compresibilidad en los valores obtenidos de la plasticidad verificados contra parámetros de especificaciones técnicas normalizadas	Limite Liquido	Porcentaje (%)	Uso de la copa de casa grande
		Limite Plástico	Porcentaje (%)	Rajadura de los rollitos de 3 milímetros de suelo

Fuente: Elaboración propia

1.7 Alcance y tipo de la investigación

El alcance de esta investigación es explicativo, ya que busca analizar y comprender cómo la aplicación de los aditivos influye en las propiedades plásticas del suelo. A partir de los resultados experimentales, se pretende establecer una relación causa-efecto entre las dosificaciones utilizadas y la variación del índice de plasticidad.

Para ello, se buscó suelos arcillosos tomando como referencia el límite líquido entre los rangos de 30% a 50%, las muestras fueron recolectadas en la avenida “segunda circunvalación” de la ciudad de Tarija, las cuales fueron clasificadas conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), utilizando la carta de plasticidad como herramienta de referencia.

La ceniza se obtuvo mediante el proceso de incineración de los tallos de quinua a una temperatura de 800°C durante una hora, la cual fue tamizada por el tamiz N°40.

Luego se usó cal apaga tamizada por el tamiz N°40.

Posteriormente, se prepararon mezclas con porcentajes de ceniza y cal con 3% de cal y 3%, 5%, 10% y 15% de CQ y también con mezclas de 5% de cal y 3%, 5%, 10% y 15% de CQ con el objetivo de identificar el contenido óptimo que permita reducir la plasticidad.

Este estudio se limita al análisis de la plasticidad como parámetro de mejora del suelo, sin abordar otras propiedades mecánicas. Todos los procedimientos experimentales fueron desarrollados bajo condiciones controladas en el laboratorio de mecánica de suelos, asegurando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

MARCO CONCEPTUAL

2.1 Introducción general del marco teórico

La presente investigación se enmarca dentro de la problemática que enfrentan las vías de comunicación en zonas donde predominan suelos arcillosos de media compresibilidad, los cuales presentan un comportamiento mecánico desfavorable debido a su alta plasticidad. Esta condición limita su capacidad de soporte, generando deformaciones y daños prematuros en las estructuras viales. En respuesta a esta situación, se plantea el uso de estabilizantes alternativos que, además de ser económicamente viables, contribuyan a la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Es así que surge el interés por estudiar el efecto de mezclas de cal hidratada y ceniza de tallos de quinua (CQ) como aditivos para mejorar las propiedades de estos suelos. El objetivo principal es analizar cómo varía la plasticidad del suelo tratado con diferentes proporciones de estos estabilizantes, a fin de determinar su viabilidad técnica como solución de mejoramiento.

2.2 Estabilización

Llamamos estabilizaciones de Suelos al proceso, mediante el cual se somete a procesos o tratamientos, del modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniendo un nuevo material firme y está bien capaz de soportar los efectos de tránsito y las condiciones climáticas más severas. (PACHECO NUÑEZ, 2017)

2.2.1 Tipos de Estabilización

Estabilización física: Es el mejoramiento del suelo mediante procesos sin adición de productos químicos, como el secado, el drenaje, o el uso de geotextiles o mezclas granulares que modifican la textura y la compactación del suelo. Se busca reducir la humedad y mejorar la resistencia mecánica del material.

Estabilización química: Implica la adición de agentes químicos (como cal, cemento, cloruro de calcio o cenizas puzolánicas) que reaccionan con las partículas del suelo, modificando sus propiedades físico-químicas. Mejora la cohesión, reduce la plasticidad y aumenta la resistencia a largo plazo.

Estabilización mecánica: Consiste en modificar la estructura del suelo mediante mezcla con otros materiales (como grava o arena), o por medio de compactación dinámica o estática, para mejorar su densidad, resistencia al corte y capacidad de carga.

2.2.2 Método de estabilización con Cal

La estabilización de suelos con cal se logra mediante la aplicación controlada de cal viva o cal hidratada. La cal viva ayuda a reducir la humedad del suelo, ya que su proceso de hidratación absorbe el agua y genera calor, lo que facilita la evaporación del exceso de humedad. Este proceso permite que el suelo tratado se mezcle más fácilmente con otros aglutinantes si es necesario. Los porcentajes empleados varían entre 2% y 5% en peso seco para la cal viva, y entre 4% y 7% para la cal apagada o hidratada. Los principales beneficios de esta técnica incluyen:

- Aumento de la resistencia a la compresión.
- Modificación de la plasticidad (según se requiera).
- Mejora de la trabajabilidad del suelo.
- Mayor granularidad y compactación, lo que incrementa la capacidad de soporte del suelo.

Figura 2.1 Cal hidratada



Fuente: Elaboración propia

Este método es especialmente efectivo en suelos arcillosos, que suelen tener alta plasticidad y humedad natural. La reacción química entre el suelo y la cal transforma las propiedades del material, haciéndolo más estable y duradero para aplicaciones en construcción (Aldana, 2021).

Reacción química del tratamiento con cal: Cuando la cal y el agua se añaden a un suelo arcilloso, comienzan a ocurrir reacciones químicas casi inmediatamente, como el:

Secado: La cal es muy efectiva para el secado de cualquier suelo con humedad. Tras el mezclado con la tierra arcillosa la cal absorbe el agua mediante una reacción exotérmica, reduciendo drásticamente la humedad del suelo por hidratación y evaporación. La disminución de la humedad variará en función de la cal añadida y las condiciones ambientales, pero puede oscilar un 2 % y un 5 %, según. Este proceso sucede inmediatamente después de adicionar la cal.

Modificación: Al añadir la cal al suelo, el reparto de cargas en la superficie de las partículas del suelo arcilloso se modifica. Este proceso sucede también inmediatamente tras la adición de la cal. El efecto es que la tierra pierde su propiedad para retener agua. El suelo se hace friable y granular, haciéndolo más fácil para trabajar y compactar.

2.2.3 Método de estabilización con Cal más puzolanas

La estabilización con cal constituye una de las técnicas más empleadas en ingeniería geotécnica para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos, debido a su capacidad para reducir la plasticidad y el contenido de humedad, además de incrementar la trabajabilidad del material. Según el Manual de estabilización de suelo tratado con cal (2004), la cal puede reaccionar incluso en suelos con contenidos relativamente bajos de fracción arcillosa alrededor del 7 % y con índices de plasticidad cercanos a 10. Sin embargo, cuando la reactividad del suelo es limitada, resulta conveniente complementar el tratamiento con materiales de naturaleza puzolánica que aporten sílice y alúmina disponibles para la formación de productos cementantes.

Entre los aditivos más utilizados se encuentran la ceniza volante y la escoria de alto horno, los cuales reaccionan con el hidróxido de calcio liberado por la cal para originar

compuestos de tipo cementante. Esta reacción secundaria es la base de la actividad puzolánica, responsable de conformar una matriz más rígida y duradera en el suelo tratado. La norma ASTM C618-19 respalda este tipo de procesos al establecer los criterios químicos y físicos que deben cumplir los materiales puzolánicos para ser considerados aptos en aplicaciones cementicias y de estabilización. Para las puzolanas naturales (Clase N), por ejemplo, se requiere que la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sea al menos del 70 %, que la pérdida por ignición no supere el 10 %, y que los niveles de sulfatos y álcalis se mantengan dentro de rangos controlados para evitar reacciones expansivas indeseables (ASTM C618-19, 2020).

Tabla 2.1 de Requisitos químicos

Parámetro	Clase F	Clase C	Clase N
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (mín %)	50	50	70
CaO (%)	≤ 18	> 18	Solo reportar
SO ₃ (máx %)	5	5	3
Contenido de humedad (máx %)	3	3	3
Pérdida por ignición (máx %)	6	6	10

Fuente: ASTM C618-19 (2020)

La norma (ASTM C618-19, 2020) también establece que para la puzolana de clase F, C, o N tiene que cumplir con una finura de un máximo de 34% de material retenido luego de ser tamizado en húmedo en un tamiz No 325.

Sus usos principales de estas clases de puzolanas son:

Clase N: Es empleada en concreto y estabilización de suelos arcillosos, requiriendo adiciones de cal o cemento.

Clase F: Se utiliza principalmente junto con cal en suelos y concreto para incrementar la resistencia y durabilidad.

Clase C: Uso directo como estabilizante (puede actuar sin cal), útil en caminos, terraplenes, suelos expansivos. Aporta resistencia más rápido (ASTM C618-19, 2020).

En consecuencia, la combinación de cal y materiales puzolánicos constituye un método de estabilización ampliamente documentado, que no solo mejora las condiciones iniciales

del suelo, sino que además garantiza, mediante las reacciones puzolánicas, un incremento sostenido en la resistencia y durabilidad de las capas tratadas.

2.2.4 Método de estabilización con ceniza de tallos de quinua

La quinua es una planta andina originaria en las afueras del lago Titicaca de Perú y Bolivia, es un cultivo de gran relevancia en la región andina, no solo por el valor nutricional de su grano, sino también por los subproductos que se generan en el proceso de cosecha. Entre ellos se encuentran los tallos, que tradicionalmente se consideran residuos agrícolas sin un aprovechamiento definido, pero que en los últimos años han cobrado interés en investigaciones orientadas al desarrollo de materiales alternativos para la construcción.

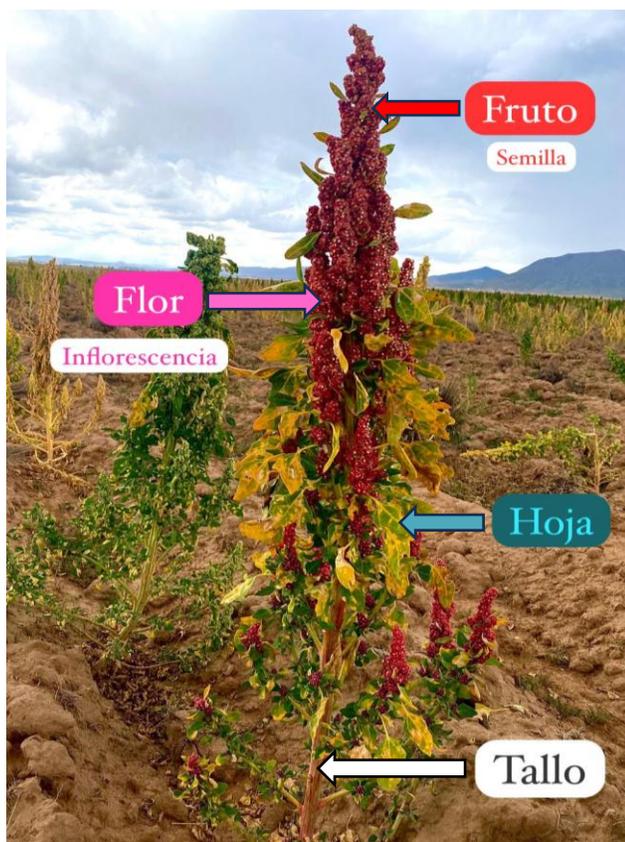
Figura 2.2 Zona del cultivo de quinua



Fuente: Elaboración propia

El tallo de la quinua presenta una estructura rica en celulosa y lignina, acompañada de minerales que, tras un adecuado proceso de calcinación, se concentran en forma de óxidos con potencial puzolánico. De este modo, un residuo agrícola abundante en la región puede transformarse en un recurso de valor agregado, alineado con criterios de sostenibilidad y economía circular.

Fuente 2.3 Planta de Quinua



Fuente: Elaboración propia

La ceniza de quinua

Se obtiene a partir de la calcinación controlada de los tallos secos. El proceso consiste en someter el material a temperaturas que oscilan entre 500 °C y 700 °C, rango en el cual se elimina la materia orgánica y se obtiene una ceniza rica en sílice y alúmina. El control de la temperatura es fundamental, ya que valores demasiado bajos no permiten la completa eliminación de componentes orgánicos, mientras que temperaturas excesivamente altas pueden cristalizar la sílice, reduciendo así su reactividad.

Posteriormente, la ceniza producida se somete a un proceso de molienda y tamizado, usualmente pasando por el tamiz N° 40, con el fin de obtener una granulometría uniforme que facilite su integración en mezclas con suelos. Esta uniformidad es esencial tanto para asegurar la homogeneidad del material durante los ensayos de laboratorio como para su futura aplicación a escala práctica (Almonacid, 2019).

Figura 2.4 Ceniza de tallos de quinua



Fuente: Elaboración propia

La ventaja de este subproducto radica no solo en su abundancia regional, dado que Bolivia y Perú se encuentran entre los principales productores de quinua a nivel mundial sino también en su bajo costo de obtención, ya que utiliza residuos agrícolas que de otra manera serían descartados o destinados a prácticas de quema no controlada con impactos ambientales negativos. En este sentido, la ceniza de quinua se presenta como un material alternativo, económico y sostenible, con potencial de aplicación en la estabilización de suelos arcillosos de media compresibilidad (FAO, 2013; Almonacid, 2019).

Composición y propiedad puzolánica de las cenizas vegetales

Los análisis químicos realizados sobre la ceniza de tallos de quinua han demostrado que este material presenta un alto contenido de óxidos de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), junto con menores proporciones de óxido de hierro (Fe_2O_3). La presencia de estos compuestos es fundamental para considerar un material como puzolánico, ya que en estado amorfo poseen la capacidad de reaccionar con la cal en presencia de humedad.

De acuerdo con la norma ASTM C618-19, para que un material sea clasificado como puzolánico debe cumplir ciertos requisitos químicos: la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ debe alcanzar al menos el 70 %, la pérdida por ignición no debe superar el 10 %, y los contenidos de álcalis y sulfatos deben mantenerse en niveles controlados. En el caso de la

ceniza de quinua, estudios recientes han confirmado que estos parámetros se encuentran dentro de los rangos establecidos, lo que respalda su clasificación como material puzolánico (ASTM C618-19, 2020).

La condición amorfa en la que se encuentra la sílice tras la calcinación es otro factor clave que explica la reactividad de la ceniza. A diferencia de la sílice cristalina, que es químicamente estable, la sílice amorfa presenta una estructura desordenada que le permite reaccionar más fácilmente con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Estas reacciones dan lugar a la formación de compuestos cementantes como el silicato de calcio hidratado (C–S–H) y el aluminato de calcio hidratado (C–A–H), responsables de la ganancia progresiva de resistencia y la mejora en la durabilidad de los suelos tratados (Ahmed et al., 2025).

En consecuencia, la composición química y la estructura mineralógica de la ceniza de quinua confirman su potencial puzolánico, lo que justifica su uso como aditivo alternativo en procesos de estabilización de suelos arcillosos de media compresibilidad.

Condiciones químicas para la puzolana según ASTM C618

La norma ASTM C618-19 establece los criterios esenciales para determinar la aptitud de los materiales puzolánicos empleados en construcción y estabilización de suelos. Según esta especificación, la suma de los óxidos de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3) debe ser como mínimo del 70 %, la pérdida por ignición no puede superar el 10 %, y los contenidos de álcalis y sulfatos deben mantenerse bajo control para evitar reacciones expansivas. Estos requisitos aseguran que las cenizas posean la cantidad suficiente de compuestos reactivos y la estabilidad química necesaria para que se desarrollen las reacciones puzolánicas responsables de mejorar las propiedades del suelo tratado (ASTM C618-19, 2020)

Aplicación de la ceniza de quinua en la estabilización de suelos arcillosos

La aplicación de ceniza de tallos de quinua en la estabilización de suelos arcillosos se fundamenta en su capacidad para modificar parámetros clave de comportamiento, principalmente los límites de Atterberg. La incorporación de este aditivo genera una reducción sistemática del índice de plasticidad (IP), lo cual es un indicador directo de la

mejora en la trabajabilidad y estabilidad volumétrica del suelo. Un menor IP implica suelos menos sensibles a los cambios de humedad, con menor tendencia a la contracción-hinchamiento y, por lo tanto, más aptos para su uso en obras de infraestructura vial y civil.

Estudios experimentales desarrollados en suelos arcillosos de media compresibilidad han mostrado que la adición de ceniza de quinua en proporciones entre 5 % y 15 % respecto al peso seco del suelo produce una disminución significativa del IP, acompañada de un ligero incremento en el límite plástico y una reducción en el límite líquido. Estos cambios reflejan un comportamiento más granular y menos cohesivo del suelo tratado, lo que facilita tanto su compactación como su desempeño bajo condiciones de carga.

Además de los efectos sobre la plasticidad, la incorporación de ceniza de quinua ha mostrado influencias positivas en parámetros de resistencia, como el CBR (California Bearing Ratio) y la resistencia a la compresión no confinada, aunque el impacto principal se concentra en la variación de los límites de Atterberg, siendo este el criterio más relevante para la presente investigación (Ahmed et al., 2025; Almonacid, 2019).

Antecedentes de uso de la ceniza de quinua

Las investigaciones recientes han comenzado a explorar el potencial de la ceniza de tallos de quinua como aditivo estabilizante en suelos arcillosos, especialmente en regiones andinas donde este residuo agrícola es abundante. Estos estudios han confirmado que, al ser empleada en combinación con cal o como sustituto parcial de ella, la ceniza de quinua puede generar mejoras significativas en parámetros de plasticidad y resistencia.

Un ejemplo relevante es el trabajo desarrollado en la región de Puno, Perú, donde se evaluó la adición de 9 % de ceniza de tallos de quinua y 5 % de cal en suelos arcillosos de baja y media plasticidad. Los resultados mostraron una disminución marcada del índice de plasticidad (IP), acompañada de un aumento en la densidad seca máxima y en la resistencia medida a través del CBR. Estos hallazgos respaldan el efecto combinado de la ceniza de quinua y la cal, demostrando que este tipo de mezclas puede ser utilizado como una alternativa eficaz y de bajo costo frente a estabilizantes convencionales (Almonacid, 2019).

De manera similar, otras investigaciones preliminares han reportado que la aplicación de ceniza de quinua en proporciones moderadas (5–15 %) permite mejorar la trabajabilidad y compactación de suelos arcillosos, reduciendo al mismo tiempo la sensibilidad a la humedad y el riesgo de deformaciones volumétricas. Estas evidencias confirman la viabilidad técnica de la ceniza de quinua como un recurso local sostenible, alineado con prácticas de economía circular y aprovechamiento de residuos agroindustriales (FAO, 2013; Ahmed et al., 2025).

2.3 Definición de suelo

El suelo puede definirse desde dos enfoques complementarios: el geológico y el ingenieril. Para el geólogo, el suelo constituye el producto de la desintegración y meteorización de las rocas, mientras que, para el ingeniero civil, el suelo se concibe como un material de construcción cuya composición y propiedades físicas influyen de manera determinante en el diseño y la ejecución de obras de infraestructura.

En ingeniería geotécnica, el comportamiento del suelo está gobernado principalmente por el tamaño de las partículas que lo conforman y por la interacción entre ellas. A diferencia de otros materiales de construcción más homogéneos, los suelos suelen ser heterogéneos, anisotrópicos y no conservativos, es decir, su estructura y propiedades varían dentro de una misma masa de material, y las deformaciones que sufren bajo cargas o cambios de humedad no siempre son recuperables (Salinas et al., 2004; Campos Rodríguez et al., 2005).

2.3.1 Caracterización de los suelos arcillosos de media compresibilidad

Los suelos arcillosos de media compresibilidad pertenecen al grupo de suelos finos, en los que la fracción predominante corresponde a partículas con diámetros menores a 0,002 mm. Su comportamiento está influenciado por la mineralogía arcillosa illita, caolinita o montmorillonita y por su elevada capacidad de retener agua.

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), este tipo de suelo puede clasificarse como CL (arcilla de baja a media plasticidad) o CI (arcilla de plasticidad intermedia), en función de sus límites de Atterberg. De manera general, se consideran dentro de este rango los siguientes valores:

Índice de plasticidad (IP): 10–20 %

Límite líquido (LL): 30–50 %

Límite plástico (LP): 15–30 %

Las principales propiedades de los suelos arcillosos de media compresibilidad son:

- Cohesión moderada: la atracción entre partículas finas y agua otorga cierta resistencia a la deformación, aunque esta puede disminuir significativamente en condiciones de saturación.
- Plasticidad intermedia: permiten ser moldeados cuando están húmedos, pero son susceptibles a deformaciones volumétricas.
- Baja permeabilidad: dificultan el drenaje del agua, aumentando el riesgo de saturación prolongada.
- Alta retención de agua: ocasiona fenómenos de contracción e hinchamiento según las condiciones de humedad.
- Compresibilidad media: presentan asentamientos moderados bajo carga, lo cual debe ser considerado en el diseño de pavimentos y obras viales (Das, 2010).

MARCO NORMATIVO

2.4 Caracterización del análisis de los suelos arcillosos

Tabla 2.2 Ensayos de caracterización y análisis

Ensayo	Norma	Descripción
Contenido de Humedad	ASTM D2216	Método estándar para determinar el contenido de humedad de los suelos.
Peso Específico	ASTM C127	Método estándar para determinar el peso específico de materiales granulares.
Análisis Granulométrico	ASTM D422	Método estándar para el análisis del tamaño de partículas de los suelos.

Análisis Hidrométrico	ASTM D422	Determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.
Límites de Atterberg	ASTM D4318	Método estándar para la determinación de los límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) de los suelos.
Clasificación de Suelos (SUCS)	ASTM D2487	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Fuente: Elaboración propia

2.5 Estadística

La estadística desempeña un papel fundamental en la realización de comparaciones, ya que proporciona herramientas y técnicas para resumir datos, realizar análisis comparativos, basar decisiones en evidencia sólida, controlar variables y generalizar resultados.

Media

La media es ampliamente utilizada en estadística debido a su simplicidad y capacidad para proporcionar una medida representativa del conjunto de datos, siendo ésta el promedio numérico de un conjunto de datos (Murray & Larry, 2009).

$$\bar{X} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

x_i = Datos

n = Número de datos

Desviación estándar

La desviación estándar es una medida estadística que cuantifica la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos con respecto a su media. Es útil para comprender la

dispersión de los valores individuales y evaluar la consistencia o variabilidad de los datos (Murray & Larry, 2009).

$$S = \sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}$$

Donde:

a = Es un promedio cualquiera además de la media aritmética

X_j = Datos.

N = Número de datos.

De todas las desviaciones estándar, la mínima es aquella en la que $a = \bar{X}$

Coefficiente de variación

Si la dispersión absoluta es la desviación estándar s y el promedio es la media \bar{X} , entonces a la dispersión relativa se le llama coeficiente de variación o coeficiente de dispersión; este coeficiente se denota por CV (Murray & Larry, 2009)

$$\text{Coeficiente de variacion (CV)} = \frac{S}{\bar{X}}$$

Siempre que $\bar{X} \neq 0$

Donde:

S = Desviación estándar.

\bar{X} = Media aritmética.

Esta medida es adimensional, por lo tanto, se convierte en un indicador efectivo para comparar dos o más variables distintas o dos o más poblaciones diferentes.

MARCO REFERENCIAL

Guillén, A. (2021). Potencial puzolánico de cenizas vegetales en la ingeniería civil. Revista Boliviana de Materiales y Construcción.

- Gutiérrez, C. (2018). Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz y cal. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Ticona, J. (2020). Estabilización de suelos arcillosos con cal y bagazo de caña de azúcar. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija.
- Almonacid Román, I. M. (2019). Estabilización de subrasante mediante cal y ceniza de quinua en suelos del CP. Universidad Peruana Los Andes.
- Lupaca, J. (2022). Incorporación de cenizas de tallos de quinua en la estabilización de la subrasante en la carretera Checca–Mazocruz, Puno. Universidad Nacional del Altiplano.
- Ahmed, A., Khan, R., & Patel, S. (2025). Use of agricultural ashes in soil stabilization: A review of plasticity and strength improvements. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Al-Kalili, Y., Martínez, P., & Rodríguez, J. (2022). Agricultural waste ashes as pozzolanic materials in clay soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 341, 127948.
- ASTM C618-19. (2020). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials.
- Das, B. M. (2012). Principios de ingeniería de cimentaciones. Cengage Learning.
- Álvarez, P. (1957). Construcción de caminos. Editorial Universitaria.
- Keller, V. P. (2004). Guía de campo para caminos rurales. FAO.
- Yurquina, L. A. (2016). Manual de procedimientos de laboratorio para mecánica de suelos. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
- ASTM D2487. (2017). Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). American Society for Testing and Materials.

2.6 Análisis del aporte teórico

El presente capítulo permitió consolidar una base teórica para comprender el comportamiento de los suelos arcillosos de media compresibilidad y los mecanismos que intervienen en su tratamiento mediante la adición de aditivos de origen natural. El estudio de normas técnicas, manuales, artículos científicos, libros especializados y antecedentes académicos posibilitó delimitar las variables de interés, el objeto de investigación y los fundamentos químicos y físicos asociados al fenómeno en estudio.

Autores como Braja Das (2012), Keller (2004) y Álvarez (1957), junto con la norma SUCS (ASTM D2487), aportaron criterios esenciales para estructurar el enfoque técnico de la investigación, en particular en lo referente a la caracterización de suelos, los límites de plasticidad y la clasificación ingenieril. De igual forma, trabajos como los de Gutiérrez (2018), Ticona (2020), Almonacid (2019) y Lupaca (2022) constituyen antecedentes relevantes sobre el uso de aditivos tales como cal, bagazo de caña y cenizas vegetales en procesos de estabilización, brindando un marco de referencia metodológico aplicable al presente estudio.

A su vez, investigaciones recientes como las de Ahmed et al. (2025) y Al-Kalili et al. (2022) complementan esta base teórica al demostrar la eficacia de cenizas agrícolas en la reducción del índice de plasticidad y en la mejora de parámetros mecánicos, lo que confirma la pertinencia de considerar la ceniza de tallos de quinua dentro de los materiales con propiedades puzolánicas, de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM C618 (2020).

De esta manera, la combinación de cal hidratada con ceniza de tallos de quinua se sustenta en fundamentos consolidados de la mecánica de suelos y en evidencias recientes sobre la aplicabilidad de residuos agrícolas. Este marco teórico no solo respalda la selección de variables y el diseño de tratamientos, sino que también otorga rigor a la hipótesis planteada y coherencia científica al desarrollo del proyecto.

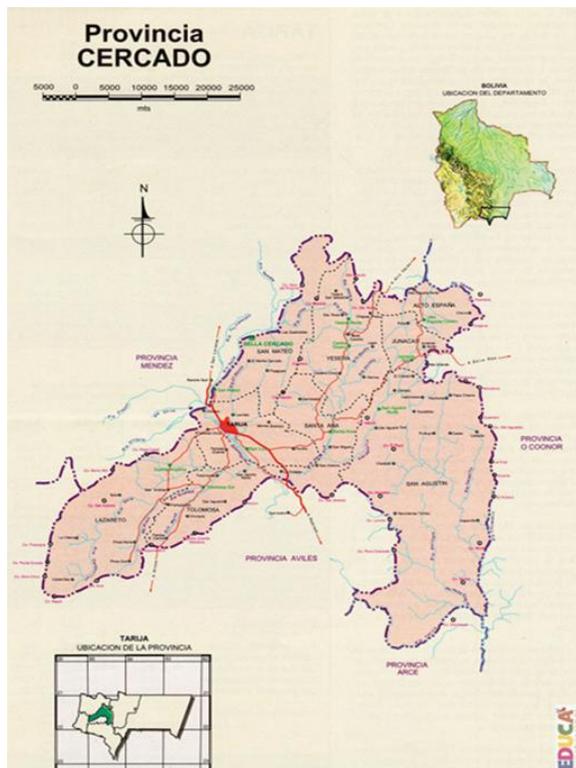
CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Ubicación de la zona de estudio

La investigación se desarrolló en la provincia Cercado del departamento de Tarija, al sur de Bolivia. Este departamento limita al norte con Chuquisaca, al sur con la República Argentina, al este con Paraguay y al oeste con Chuquisaca y Potosí. Posee una extensión territorial de 37.623 km² y una población estimada de 534.346 habitantes, de acuerdo con el Censo Nacional del INE (2024). La recolección de muestras se efectuó en distintos puntos de la Segunda Circunvalación, abarcando sectores con suelos arcillosos de variada plasticidad. Esta diversidad permitió contar con un conjunto de muestras representativas, adecuadas para la realización de los ensayos de laboratorio. A partir de ellas, fue posible analizar de manera práctica cómo influye el tratamiento estabilizante en las propiedades del suelo.

Figura 3.1 Ubicación Geográfica provincia Cercado-Tarija



Fuente: Elaboración propia

3.2 Ubicación de las muestras

A continuación, se presentan las coordenadas geográficas de las muestras.

Figura 3.2 Ubicación de las zonas de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.1 Ubicación de las muestras

Zonas de estudio	Ubicación UTM	
	Latitud	Longitud:
M1	-21.498842°	-64.738405°
M2	-21.505548°	-64.725176°
M3	-21.504969°	-64.729332°
M4	-21.505428°	-64.726307°
M5	-21.501747°	-64.734683°
M6	-21.502975°	-64.732917°
M7	-21.499333°	-64.737293°
M8	-21.505370°	-64.727490°
M9	-21.500743°	-64.736303°
M10	-21.504145°	-64.731004°
M11	-21.497129°	-64.741329°
M12	-21.496343°	-64.742667°
M13	-21.498163°	-64.739490°
M14	-21.494595°	-64.744316°
M15	-21.493416°	-64.745370°

Fuente: Elaboración propia

3.3 Unidad de estudio y decisión muestral

3.3.1 Unidad de muestra

En esta investigación, la unidad de muestra corresponde a cada ensayo de laboratorio realizado sobre los suelos arcillosos naturales y tratados con mezclas de ceniza de tallos de quinua y cal.

3.3.2 Población

N = La población tomada en cuenta es de modo infinito, es decir que para la presente investigación se toma en cuenta todos los ensayos de laboratorio de suelos.

3.3.3 Muestra

n = para calcular

Tabla 3.2 Muestra

ETAPA	MUESTRAS	ENSAYOS	Nº de ensayos	Ni
Muestreo y caracterización	M1 – M15	Contenido de humedad	45	45
		Peso específico	45	45
		Granulometría	45	45
		Hidrometría	45	45
		Límites de Atterberg	90	90
Caracterización de la ceniza	Ceniza de quinua (CQ)	Peso específico	3	3
		Granulometría	3	3
		Hidrometría	3	3
Caracterización del suelo modificado	3% Cal + 3% CQ	Límites de Atterberg	3	3
	3% Cal + 5% CQ		3	3
	3% Cal + 10% CQ		3	3
	3% Cal + 15% CQ		3	3
	5% Cal + 3% CQ	Límites de Atterberg	3	3
	5% Cal + 5% CQ		3	3
	5% Cal + 10% CQ		3	3
	5% Cal + 15% CQ		3	3
Total			303	

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra se tomará en cuenta la ecuación de muestreo estratificado:

Desarrollo

Unidad de muestra: Ensayo de laboratorio.

Población: $N = 303$ ensayos.

Muestra: “n”, desconocido

Variable a medir: La plasticidad y estabilidad del suelo al incorporar ceniza de quinua y cal en ensayos de laboratorio.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * s^2}{\left(N * \left(\frac{e}{Z} \right)^2 \right) + \frac{\sum_{i=1}^n Ni * s^2}{N}}$$

donde:

N_i = número de elementos en cada estrato (ensayos por etapa).

$s^2 = 0,1$

$e = 0,05$ (error).

$Z = 1,96$ (95%).

Determinación del número de ensayos

Tabla 3.3 Determinación del número de ensayos

ETAPA	MUESTRAS	ENSAYOS	Ni	σ	Ni σ	fi	Fi	ni
Muestreo y caracterización	M1 – M15	Contenido de humedad	45	0,1	4,5	0,149	14,85	15,00
		Peso específico	45	0,1	4,5	0,149	14,85	15,00
		Granulometría	45	0,1	4,5	0,149	14,85	15,00
		Hidrometría	45	0,1	4,5	0,149	14,85	15,00
		Límites de Atterberg	90	0,1	9	0,297	29,70	30,00
Caracterización de la ceniza	Ceniza de quinua (CQ)	Peso específico	3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
		Granulometría	3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
		Hidrometría	3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00

Caracterización del suelo modificado	3% Cal + 3% CQ	Límites de Atterberg	3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	3% Cal + 5% CQ		3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	3% Cal + 10% CQ		3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	3% Cal + 15% CQ		3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	5% Cal + 3% CQ	Límites de Atterberg	3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	5% Cal + 5% CQ		3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	5% Cal + 10% CQ		3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
	5% Cal + 15% CQ		3	0,1	0,3	0,010	0,99	1,00
			303		30,3			101

1Fuente: Elaboración propia

Donde se tomará en cuenta un nivel de confianza de 95% y de acuerdo a la variable estandarizada es $Z = 1.96$, con un margen de error $e = 0,05$ que es deducido del nivel de confianza, y por el corto tiempo establecido se asume una varianza de $= 0,10$.

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{30.3}{\left(303 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2\right) + \frac{30,3}{30,3}}$$

Tamaño de la muestra (n):

$$n = 102$$

De acuerdo con el análisis inicial, de los 303 ensayos inicialmente previstos, el cálculo del tamaño de muestra determinó que con 102 ensayos es posible mantener un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %. Esto permite optimizar los recursos disponibles y reducir la carga experimental sin comprometer la validez estadística del estudio.

Procesamiento de la información

Los datos obtenidos en los ensayos fueron organizados y tabulados en hojas de cálculo y analizados mediante estadística descriptiva (media, mediana, dispersión) y la prueba t de Student con un 95 % de confianza, para validar la significancia de los resultados entre tratamientos.

3.3.4 Selección de las técnicas de muestreo

La selección de la muestra será intencional, comienza por buscar suelos arcillosos con límite líquido entre 30% a 50% que corresponden a arcillas de media comprensibilidad, por consiguiente, se elijaran rangos de LL de 30% a 35%; 35% a 40%; 40% a 45%; 45% a 50% obtenido así 15 suelos de media comprensibilidad que serán analizados.

3.4 Muestreo de materiales

3.4.1 Muestreo zona de estudio

Antes de realizar el muestreo del material se llevó a cabo una inspección en la zona, donde se observó la presencia de material arcilloso, se tomó una muestra de cada zona para realizar el ensayo de límites de Atterberg con el fin de determinar su índice de plasticidad.

Tras los cálculos correspondientes, se determinó que las muestras obtenidas presentan índices de plasticidad adecuados para el análisis, del cual se seleccionaron cuatro puntos en distintos barrios.

Figura 3.3 Muestreo de la zona



Recolección de muestras de la Segunda Circunvalación

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Selección de los aditivos

3.4.2.1 Selección de la ceniza de los tallos de quinua

Para esta investigación se identificó primeramente áreas agrícolas donde se cultiva quinua, donde se seleccionó el municipio de Patacamaya es la quinta sección de la provincia de Aroma del departamento de La Paz, se sitúa a una distancia de 101km de la Sede de Gobierno, por la carretera interdepartamental de La Paz – Oruro, al sudeste del departamento de La Paz caracterizada por la agropecuaria y pecuaria. ubicada en las coordenadas $17^{\circ} 05'$ - $17^{\circ} 20'$ de latitud sur, $67^{\circ} 07'$ - $68^{\circ} 07'$ de longitud oeste, donde se obtuvo los tallos necesarios.

Figura 3.4 Áreas agrícolas



Fuente: Elaboración propia

Al llegar al lugar se coordinó con los agricultores para recolección de los tallos al finalizar la cosecha de quinua, asegurando que el proceso se realice de manera eficiente.

Figura 3.5 Recoleccion de los tallos de quinua



Fuente: Elaboración propia

Luego se los dejó secar en un lugar ventilado y protegido de la humedad hasta que perdieron gran parte de su contenido de agua, por consiguiente, los tallos frescos y picados fueron transportados al laboratorio de Ingeniería Química de la universidad autónoma Juan Misael Saracho para su secado total por 24 horas, garantizando que estuvieran en condiciones óptimas para los siguientes procesos de investigación.

Figura 3.6 Proceso del secado de los tallos de quinua



Fuente: Elaboración propia

Para el proceso de incineración, se inició con el triturado de los tallos secos de quinua por medio de una maquina moledora para reducir su tamaño y así facilitar su incineración.

Figura 3.7 Triturado de los tallos de quinua



Fuente: Elaboración propia

Luego se colocó los tallos triturados en platillos de barro previamente pesados, los cuales se introdujeron a la mufla del laboratorio de Ingeniería Química a una temperatura constante de 800°C por un periodo de una hora. Una vez pasado el periodo de incinerado se dejó enfriar la muestra en un desecador y se volvió a pesar para calcular la reducción de peso por calcinación, este proceso se realizó varias veces para lograr la cantidad de muestra necesaria, se tamizo las cenizas para eliminar impurezas y tener una muestra uniforme de la ceniza, por último, se la almaceno en bolsas herméticas para evitar la absorción de humedad del ambiente.

Figura 3.8 Proceso de la incineración



Fuente: Elaboración propia

3.4.2.1.1 Especificación técnica de la ceniza de quinua

Concepto

La ceniza de tallos de quinua es un subproducto agrícola obtenido a partir de la calcinación

controlada de los residuos vegetales de la planta de quinua. Presenta un alto contenido de óxidos de sílice y alúmina que le confieren propiedades puzolánicas, lo que la convierte en un material alternativo de interés para la industria de la construcción y aplicaciones de estabilización. Su uso aporta sostenibilidad, ya que permite el aprovechamiento de un residuo agrícola de bajo costo y abundante en zonas productoras.

Materiales

Materia prima: tallos secos de quinua obtenidos después de la cosecha del grano.

Ceniza resultante: obtenida tras la calcinación de los tallos a 800°C, de color azul y textura fina.

Granulometría: posterior al proceso de calcinación, la ceniza se tamiza con malla N°40 para asegurar una uniformidad en el tamaño de partícula.

Comparación de resultados del análisis químico de la ceniza de tallos de quinua con los requisitos de la norma ASTM C618:

Parámetro	Valor obtenido (%)	Requisito ASTM C618 (%)	Cumple
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	87,56	≥ 70	Si cumple
Pérdida por ignición (LOI)	5,05	≤ 10	Si cumple
SO ₃	0,34	≤ 5	Si cumple
Óxidos alcalinos (Na ₂ O + K ₂ O)	3,12	≤ 10 (controlado)	Si cumple

Muestras

La ceniza puede obtenerse en proporciones variables según la cantidad de tallos disponibles. Con base en la experiencia de campo, se considera que 1 kg de tallos secos produce aproximadamente 0,28 kg de ceniza tras el proceso de calcinación.

El porcentaje de ceniza se evaluó en proporciones de 3 %, 5 %, 10 % y 15 % respecto al peso seco del suelo.

Procedimiento

1. Recolección de tallos de quinua secos tras la cosecha.
2. Corte, agrupamiento y triturado de los tallos con tractor.

3. Calcinación controlada en horno o a cielo abierto hasta lograr ceniza homogénea.
4. Enfriado del material calcinado.
5. Tamizado de la ceniza con malla N°40 para garantizar granulometría uniforme.
6. Almacenamiento en envases secos y herméticos hasta su utilización.

Cuantificación

De acuerdo con el rendimiento promedio, 40 quintales de tallos (≈ 1.840 kg) generan aproximadamente 515,2 kg de ceniza (28 %). Este valor puede variar según la eficiencia de la calcinación.

Costos

- Venta de los tallos de quinua: 0 bs debido a que es un desecho sin uso alguno.
- Transporte: 50 Bs la volquetada de 2 m³ que pesa aproximadamente de 50kg
Entonces a razón de 1bs/kg de tallos de quinua
- Calcinación en mufla: 2h de uso de la mufla gasta 2 kW de electricidad que según SETAR estar a razón de 0,70 Bs/kWh por lo tanto 2,8 Bs/kg.

Por lo tanto $2,8+1 = 3,8$ bs/kg.

3.4.2.2 Selección de la cal hidratada

Se empleó cal hidratada, previamente tamizada con el tamiz N°40, con el fin de asegurar una granulometría uniforme que facilitara su adecuada integración con el suelo durante el proceso de mezclado. La dosificación utilizada se estableció en 3% y 5% respecto al peso seco del suelo, tomando como referencia la tesis de Almonacid Román Iván Max (2019), donde se reporta la eficacia de dichos porcentajes en la mejora de suelos arcillosos. Esta base documental permitió justificar tanto la selección de la cal como los rangos de dosificación empleados esta investigación.

3.4.2.2.1 Especificación técnica de la cal hidratada

Concepto

La cal hidratada es un producto obtenido mediante la hidratación controlada de la cal viva (CaO), dando como resultado hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]. Se caracteriza por su elevada alcalinidad y su capacidad de reaccionar con minerales arcillosos, lo que la convierte en un material idóneo para procesos de estabilización de suelos.

Propiedades técnicas relevantes

De acuerdo con la normativa boliviana NB 213 y la bibliografía especializada, la cal hidratada debe cumplir con las siguientes propiedades:

- Contenido de CaO disponible: mínimo 85%.
- Finura: al menos el 90% del material debe pasar el tamiz N°200.
- pH en disolución: superior a 12.
- Alta reactividad en presencia de agua y arcillas.

Usos en estabilización de suelos

En el ámbito de la ingeniería civil, la cal hidratada se emplea principalmente para:

- Reducir el límite líquido y el índice de plasticidad de suelos arcillosos.
- Incrementar la resistencia mecánica del suelo tratado.
- Mejorar la capacidad de soporte y durabilidad de subrasantes y rellenos.
- Facilitar la trabajabilidad del suelo durante procesos constructivos.

Condiciones de almacenamiento y manipulación

- El material debe almacenarse en sacos cerrados de 20 kg, en ambientes secos y ventilados, evitando su exposición a la humedad.
- Se recomienda el uso de guantes, gafas y mascarilla durante la manipulación para prevenir irritaciones en piel, ojos o vías respiratorias.

Dosificación aplicada en la investigación

En esta investigación se emplearon proporciones de 3% y 5% de cal hidratada respecto al peso seco del suelo, combinadas con diferentes porcentajes de ceniza de tallos de quinua. Estas proporciones fueron seleccionadas en base a la literatura y a ensayos preliminares, con el fin de evaluar su efecto en la reducción de la plasticidad de suelos arcillosos de media compresibilidad.

Costos

En el mercado local, la cal hidratada se comercializa en sacos de 20 kg a un costo aproximado de 30 Bs, lo que representa una alternativa económica y accesible para procesos de estabilización de suelos en obras civiles.

3.5 Caracterización de los materiales

Para la caracterización de los suelos arcillosos de media compresibilidad y de la ceniza de tallos de quinua, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

3.5.1 Ensayos de caracterización de los suelos arcillosos

3.5.1.1 Contenido de humedad

Para realizar la medición del contenido de humedad, se realizó por el método del horno.

Se selecciono una muestra representativa de cada suelo, haciendo un total de 4 muestras las cuales se pesaron inicialmente con su humedad natural.

Posteriormente, se colocaron en el horno a una temperatura constante de 110 °C durante 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo, las muestras fueron retiradas y pesadas nuevamente para obtener el peso seco, valor que se utiliza para calcular el contenido de humedad.

Figura: 3.9 procedimiento del contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Contenido de humedad del suelo “M2”

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de Cápsula (g)	19,1	13,18	14,02
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	139,1	123,18	116,02
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	120,81	107,18	101,03
Peso de suelo seco (g)	101,71	94	87,01
Peso del agua (g)	18,29	16	14,99
Contenido de humedad (%)	17,98	17,02	17,23
Promedio (%)	17,41		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Resultados del contenido de humedad

Muestras	Contenido de humedad (%)
M1	16,25
M2	17,41
M3	16,80
M4	17,05
M5	19,31
M6	18,20
M7	18,84
M8	18,03
M9	18,98
M10	19,45
M11	15,70
M12	17,05
M13	19,76
M14	20,37
M15	20,39

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.2 Peso específico (ASTM D854 - AASHTO T100)

Los frascos volumétricos de vidrio, cuando son expuestos a diferentes temperaturas, sufren ligeros cambios en su volumen es decir si se aumenta la temperatura el vidrio tiende

a la dilatación incrementando ligeramente su volumen y cuando se disminuye la temperatura su volumen también disminuye.

El agua sufre un incremento en su peso cuando se aumenta su temperatura o viceversa. Estos cambios si bien no son considerables, pueden corregirse a través de la realización de una curva de calibración para cada frasco volumétrico. La calibración del frasco será de utilidad para realizar los cálculos del peso específico del suelo.

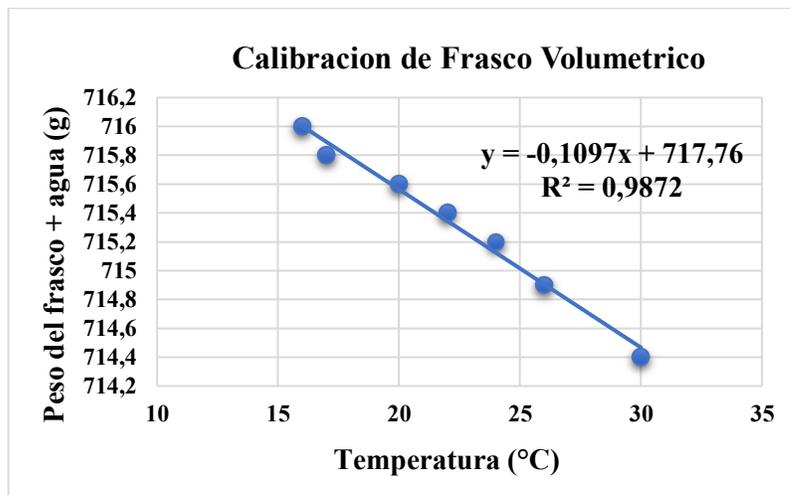
Tabla 3.5 Calibración del frasco volumétrico

Peso del frasco limpio (vacío-seco) (g) =	224,6
Peso del frasco + agua: Wfw (g) =	712,8

Numero de ensayo	Temp. (°C)	Wfw (g)
1	30	714,4
2	26	714,9
3	24	715,2
4	22	715,4
5	20	715,6
6	17	715,8
7	16	716

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Calibración del frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Una vez concluido el ensayo de calibración de frasco, se procedió a utilizar los datos obtenidos para el siguiente ensayo de peso específico del suelo.

Peso específico de los suelos naturales

Para la determinación del peso específico del suelo, primeramente, se pesó 80 gramos de suelo y se colocó en un plato, posteriormente se añadió agua para mezclarlo hasta formar una pasta suave, luego se introdujo la pasta con mucho cuidado en el frasco previamente calibrado. Se llenó con agua destilada hasta alcanzar los 250ml, luego se realizó movimientos con mucho cuidado para poder extraer el aire atrapado dentro del suelo. Inmediatamente se colocó el frasco a baño maría caliente, hasta que alcanzó una temperatura de 60°C.

Por último, se llenó el frasco a 500ml hasta que la parte inferior del menisco coincidió con la marca de enrase y se colocó a baño maría frío hasta reducir a 30°C, donde se empezó a realizar 5 mediciones de temperaturas en el rango de 30°C a 15°C con sus pesos respectivos, tratando de limpiar bien la base del frasco al pesar y enrasar al 100% del volumen con la pipeta en cada medición.

Figura 3.11 Procedimiento del Peso específico



Introducción del suelo al frasco volumétrico



Llenado hasta los 250ml a una temperatura de 60°C



Reducción de la temperatura a baño maría frío y mediciones

Fuente: Elaboración propia

Una vez acabado el ensayo se hizo secar la muestra en horno para sacar el peso seco de la muestra.

Tabla 3.5 Peso específico del suelo “M2”

PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO						
Ensayo	1	2	3	4	5	Prom.
Temperatura ensayada: "T" (°C)	18	21	24	27	30	
Peso del suelo seco: "Ws" (g)	77,50	77,50	77,50	77,50	77,50	
Peso del frasco más agua: "Wfw" (g)	715,78	715,45	715,12	714,80	714,47	
Peso del frasco+agua+suelo: "Wfws" (g)	764,80	764,50	764,30	764,00	763,70	
Peso específico: " γ_s " (g/cm ³)	2,7209	2,7237	2,7361	2,7389	2,7417	
Factor de corrección "K"	1,0004	0,9998	0,9991	0,9983	0,9974	
Peso específico corregido: " γ_{sc} " (g/cm ³)	2,7220	2,7232	2,7337	2,7343	2,7346	2,7295

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Resumen del peso específico de las muestras

Muestras	Peso específico γ_s (g/cm ³)
M1	2,72
M2	2,73

M3	2,73
M4	2,73
M5	2,73
M6	2,73
M7	2,74
M8	2,74
M9	2,74
M10	2,74
M11	2,74
M12	2,74
M13	2,74
M14	2,75
M15	2,75

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3 Análisis granulométrico por tamizado

Dado que se trata de suelos finos, se llevó a cabo el proceso de lavado por el tamiz N°200. Para realizar el método de lavado, primeramente, se usó una muestra de 1500g de material que se dejó saturando con agua por 24 horas, pasado ese tiempo sin perder material se introdujo la muestra en el tamiz N°200 y con ayuda del agua procedemos a lavarlo hasta que el suelo tome aspectos claros sin sedimentación.

Figura 3.12 Lavado por el tamiz N°200



Muestra de 1500g

Saturación del suelo por 24 horas



Lavado del suelo por el tamiz N°200

Secado y pesado para el análisis

Fuente: Elaboración propia

Luego el material retenido en el tamiz se lo colocó a secar en el horno por 24 horas, una vez ya secado se realizó el análisis granulométrico empleando los tamices correspondientes N°4, N°10, N°40 y N°200, ya que son usados para suelos finos.

Figura 3.13 Tamizado por los tamices N°10, N°40, N°100 y N°200



Peso de la muestra seca



Tamizado de la muestra



Peso de la muestra retenida en el tamiz

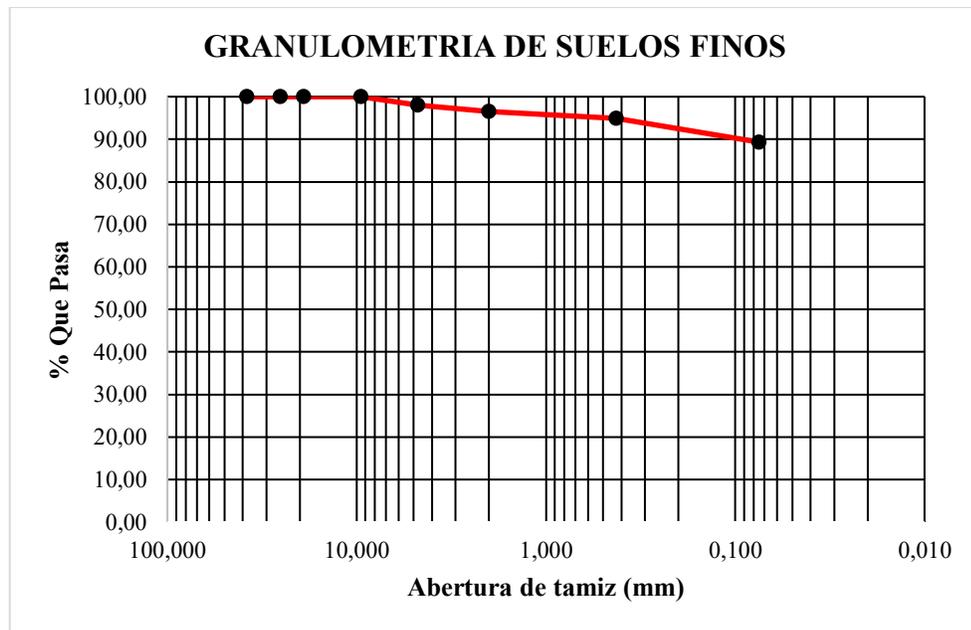
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Granulometría del suelo “M2”

Peso inicial Seco		1500	g		
Peso fracción agregado fino		160,05	g		
Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido	% Retenido	%Retenido Acumulado	% Que pasa
1 1/2	38,100	0	0,00	0,00	100,00
1	25,400	0	0,00	0,00	100,00
3/4	19,050	0	0,00	0,00	100,00
3/8	9,500	0	0,00	0,00	100,00
N°4	4,750	28,98	1,93	1,93	98,07
N°10	2,000	23,31	1,55	3,49	96,51
N°40	0,425	23,27	1,55	5,04	94,96
N°200	0,075	84,49	5,63	10,67	89,33
Base		1339,95	89,33	100,00	0,00
		1500	100		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14 Curva granulometrica del suelo “M2”



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Resultados granulométricos de las muestras

Muestras	% Pasa N°200
M1	88,95
M2	89,33
M3	90,47
M4	93,75
M5	99,47
M6	97,51
M7	98,28
M8	97,86
M9	98,00
M10	99,13
M11	99,64
M12	99,27
M13	99,60
M14	99,71
M15	99,75

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.4 Análisis granulométrico por hidrómetro

Para el ensayo del hidrómetro, se preparó 125 ml de solución de agua con defloculante (hexametáfosfato de sodio) en vasos plásticos, luego se añadió 60g de suelo que se mezcló y se dejó reposar durante 24 horas. Transcurrido el tiempo, la muestra se batió durante 5 minutos y se introdujo a la probeta, completando con agua hasta los 100ml. Nuevamente se agitó la probeta durante un minuto, se colocó en la piscina y se introdujo el hidrómetro tomando lecturas de 1, 2, 4, 8, 10, 15, 30 minutos y luego en intervalos de 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72 horas hasta que las lecturas del hidrómetro fueran estables, también se registró la temperatura en cada intervalo. Al finalizar el ensayo, la muestra se colocó al horno durante 24 horas para obtener el peso seco.

Figura 3.15 Procedimiento del metodo del hirdometro



Preparación de la muestra con defloculante y agua destilada



Registro de tiempos y temperaturas en distintos intervalos

Fuente: Elaboración propia

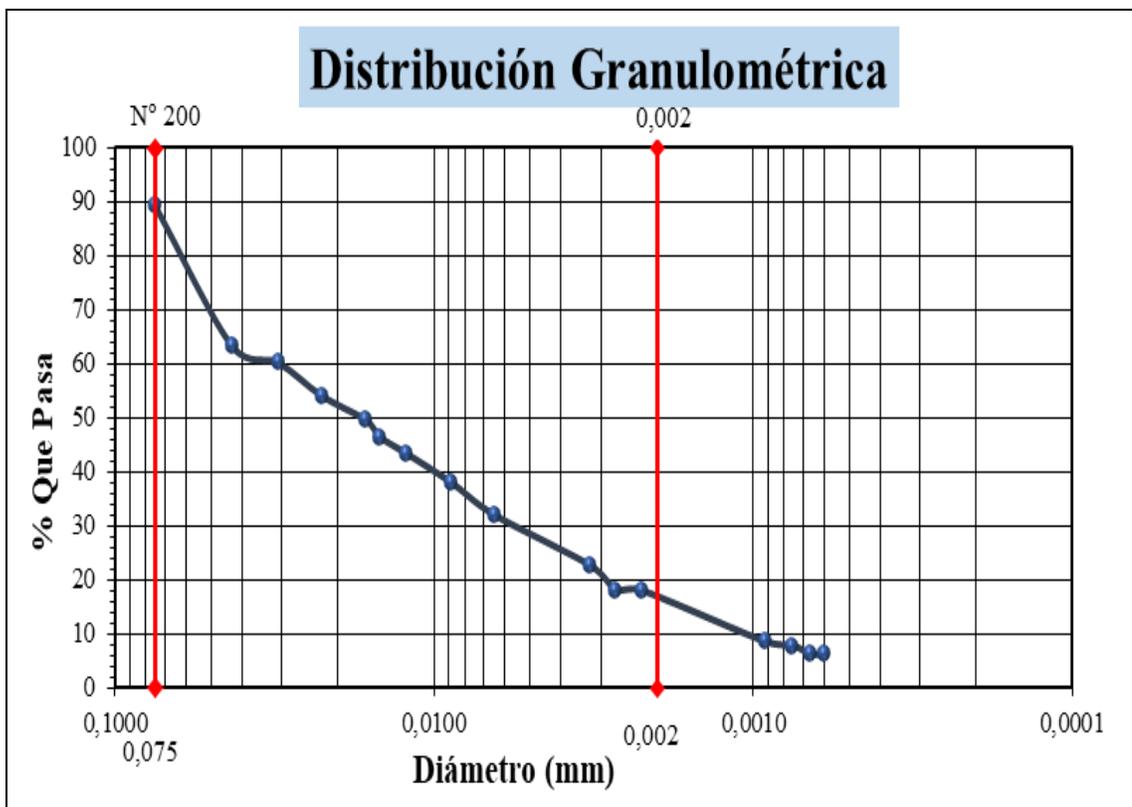
Tabla 3.9 Hidrometría con 152 H para “M2”

Modelo Hidrómetro:		152 H		Temperatura (°C):		24					
Peso suelo seco:		57,5 G		Registro Hidrómetro (g/cm³):		3					
Peso específico:		2,73 g/cm³		Ct (g/cm³):		1					
Agente Dispersante:				Cm (g/cm³):		1					
Hexametafosfato de sodio (NaPO3)6				RCd (g/cm³):		5					
"a"	0,984			Cd (g/cm³):		-5,0000					
Tiempo (min)	T °C	Lect. Real Rh (g/cm³)	Lect. Corr. Menis. Rr (g/cm³)	Ct (g/cm³)	Const. K Tabla	Lect. Corr. Rc (g/cm³)	Prof. Efec. L (cm)	L/t (cm/min)	Diam. Part. (mm)	% Mas Fino Parc.	% Mas Fino Tot.
									0,075		89,33
1	17	46	47	-0,70000	0,01388	41,3	9,54	9,540	0,0429	70,68	63,14
2	17	44	45	-0,70000	0,01388	39,3	9,84	4,920	0,0308	67,25	60,08

4	17	40	41	-0,70000	0,01388	35,3	10,54	2,635	0,0225	60,41	53,96
8	17	37	38	-0,70000	0,01388	32,3	11,04	1,380	0,0163	55,28	49,38
10	17	35	36	-0,70000	0,01388	30,3	11,34	1,134	0,0148	51,85	46,32
15	17	33	34	-0,70000	0,01388	28,3	11,64	0,776	0,0122	48,43	43,26
30	17	29,5	30,5	-0,70000	0,01388	24,8	12,24	0,408	0,0089	42,44	37,91
60	17	25,5	26,5	-0,70000	0,01388	20,8	12,92	0,215	0,0064	35,60	31,80
240	19	19	20	-0,30000	0,01348	14,7	13,86	0,058	0,0032	25,16	22,47
360	19	16	17	-0,30000	0,01348	11,7	14,36	0,040	0,0027	20,02	17,89
520	19	16	17	-0,30000	0,01348	11,7	14,36	0,028	0,0022	20,02	17,89
3238	20	9,5	10,5	0,00000	0,01334	5,5	15,40	0,005	0,0009	9,41	8,41
4868	20	9	10	0,00000	0,01334	5	15,50	0,003	0,0008	8,56	7,64
6314	20	8	9	0,00000	0,01334	4	15,60	0,002	0,0007	6,85	6,11
7798	20	8	9	0,00000	0,01334	4	15,60	0,002	0,0006	6,85	6,11
9228	20	8	9	0,00000	0,01334	4	15,60	0,002	0,0005	6,85	6,11

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Hidrometría para “M2”



Fuente: Elaboración propia

Para hidrómetros 152 H		
Porcentaje más fino que:	0,002 mm = 16,68 %	Arcilla
Porcentaje de limo	$\% (0,075 \text{ mm}) - \%(0,002\text{mm}) = 89,33 - 16,68 = 72,65 \%$	Limo

Tabla 3.10 Resumen de los hidrómetros de las muestras

Muestras	Barrios	
	% de arcilla	% de limo
M1	15,76	73,19
M2	16,68	72,65
M3	17,36	73,11
M4	18,40	75,35
M5	22,76	76,71
M6	22,16	75,35
M7	19,03	79,25
M8	23,45	74,41
M9	23,47	74,53
M10	24,63	74,50
M11	24,18	75,46
M12	25,56	73,71
M13	26,19	73,41
M14	35,83	63,88
M15	35,88	63,87

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.5 Ensayo para determinar la consistencia del suelo

La obtención de la consistencia que tiene un suelo se lo realiza por el método de los límites de Atterberg, que comprende el límite líquido, límite plástico y límite de contracción. Para la clasificación de los suelos arcillosos de media compresibilidad solo se usa el límite líquido y límite plástico.

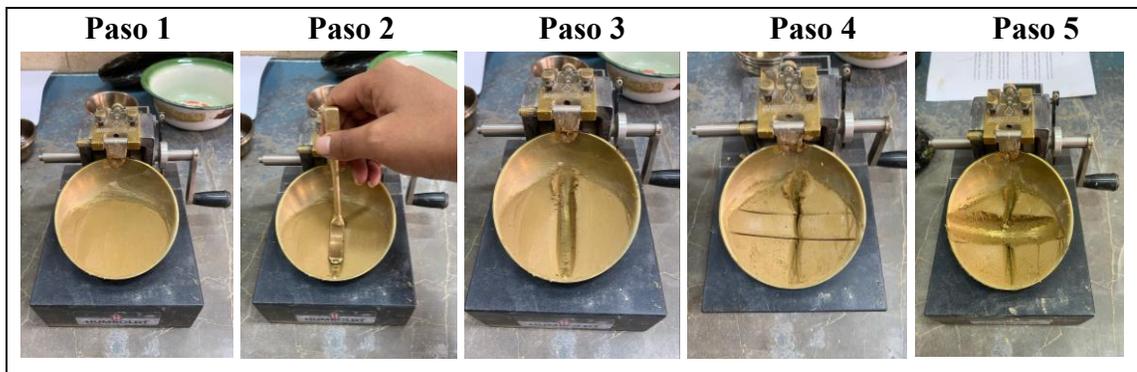
3.5.1.5.1 Límite líquido ASTM D4318

Este ensayo se realizó por el método de Casagrande, donde primeramente las muestras deben estar en un estado seco. Luego se usó 100g de muestra que pasara el tamiz N°40, se agregó agua y se mezcló con la espátula hasta logra una pasta homogénea.

Luego se colocó el equipo Casagrande en un lugar firme y plano para proceder a nivelarlo con una altura de caída igual a 1cm. Posteriormente se pesó 4 capsulas, después con la ayuda espátula se colocó la muestra de manera horizontal en la copa de Casagrande presionando un poco para eliminar el aire de la muestra.

Después con el ranurador se procedió a hacer ranura a lo largo de la copa de manera, una vez realizada se empezó con de golpes, a un ritmo de dos golpes por segundo hasta que en la ranura se produzca una unión de 1.27 cm. Anotar los golpes y con la espátula en forma perpendicular a la ranura, realizar dos cortes a la muestra extrayendo toda la unión y depositando en una capsula. Se realiza este procedimiento 4 veces, para una cantidad de golpes que va de 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35 golpes cada uno se pesa y se anota en una planilla de datos. Realizado los 4 ensayos para un mismo suelo se coloca en el horno durante 24hrs para posteriormente proceder a pesarlo.

Figura 3.17 Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.5.2 Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 - AASHTO T90)

Terminado el ensayo del límite líquido se recogió la muestra sobrante y se amasó hasta que pueda ser manipulado plásticamente. Se dispone a colocar la base de vidrio en una superficie plana y limpia, se hace una pequeña pelotita con el material y se la lleva sobre la base de vidrio para rodarla con la palma de la mano hasta que tenga un diámetro de 3mm aproximadamente, cuando el rollito forma grietas a ese diámetro se procede a córtalo con la espátula en trocitos donde estén las grietas y ponerlos en la capsula para pesar.

Este proceso se realice 3 veces para el mismo suelo, luego se coloca al horno por 24 horas y se vuelve a pesar para así calcular el peso seco y el contenido de humedad.

Figura 3.18 Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

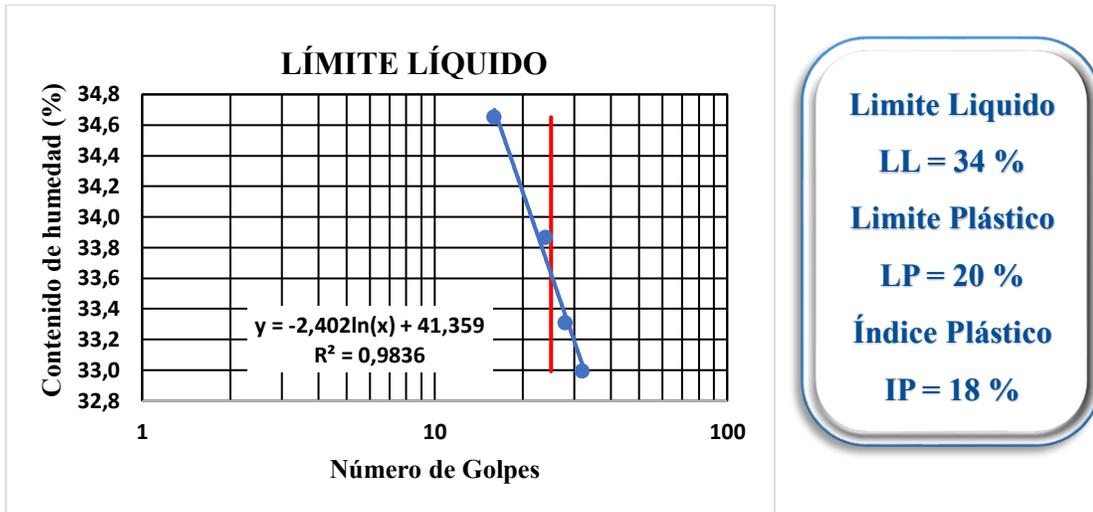
Una vez realizado el límite líquido y el límite plástico se calculó el índice de plasticidad el cual es la resta del límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$).

Tabla 3.11 Límite líquido y el límite plástico de “M2”

DESCRIPCION	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLASTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (g)	14,51	14,29	17,69	18,91	20,53	14,33	14,6
Peso de suelo húmedo + capsula (g)	30,52	30,22	34,58	35,8	23,83	16,84	17,76
Peso de suelo seco + capsula (g)	26,4	26,19	30,36	31,61	23,29	16,42	17,21
Peso de Agua (g)	4,12	4,03	4,22	4,19	0,54	0,42	0,55
Peso de suelo seco (g)	11,89	11,9	12,67	12,7	2,76	2,09	2,61
Contenido de Humedad (%)	34,7	33,9	33,3	33,0	19,6	20,1	21,1
N° de Golpes	16	24	28	32			
Promedio de C de humedad (%)					20,2		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19 Límite líquido del suelo "M2"

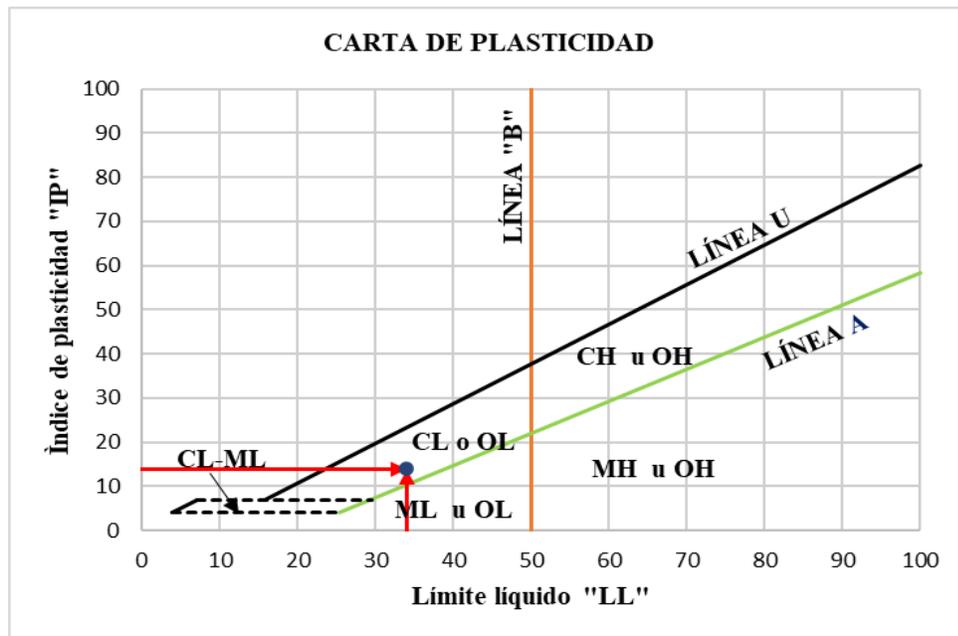


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.6 Clasificación de suelos finos

Se realizó el sistema de clasificación S.U.C.S. para suelos finos utilizando la carta de plasticidad.

Figura 3.20 Clasificación con la carta de plasticidad de "M2"



Fuente: Elaboración propia

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
SUCS:	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad

Tabla 3.12 Resultados de los límites de consistencia

Suelos naturales					
Barrios	Suelos	LL	LP	IP	Clasificación Sucs
24 de Junio	M1	32	22	10	CL
24 de Junio	M2	34	20	14	CL
24 de Junio	M3	34	23	11	CL
3 de Mayo	M4	35	22	13	CL
3 de Mayo	M5	36	24	12	CL
3 de Mayo	M6	37	24	13	CL
Fray Quebracho	M7	38	22	16	CL
Fray Quebracho	M8	39	21	18	CL
Fray Quebracho	M9	41	23	18	CL
Flores	M10	41	26	15	CL
Flores	M11	43	26	17	CL
Flores	M12	45	25	20	CL
Cañadas II	M13	48	27	21	CL
Cañadas II	M14	49	27	22	CL
Cañadas II	M15	50	28	22	CL

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Caracterización de la ceniza de tallos de quinua (CQ)

3.5.2.1 Calcinación de los tallos de quinua

Figura 3.21 Proceso de calcinación de los tallos de quinua



Muestra sometida a 800°C en la mufla de laboratorio de Ing. química

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13 Cálculo de calcinación

DESCRIPCION	VALOR	UNIDAD
Peso del plato	162,864	g
Plato + Muestra	177,078	g
Plato + Muestra calcinada	175,71	g
Muestra	14,214	g
Ceniza	1,368	g
% de Ceniza	9,624	%
% de Reducción	90,376	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 Resumen del cálculo de calcinación

DESCRIPCION	MUESTRA			PROMEDIO
	1	2	3	
Muestra (g)	34,836	73,418	79,810	
Ceniza (g)	9,708	20,780	22,280	
% de Ceniza	27,868	28,304	27,916	28,03
% de Reducción	72,132	71,696	72,084	71,97

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2 Peso específico de la ceniza

Figura 3.22 Peso específico de la ceniza



Fuente: Elaboración propia

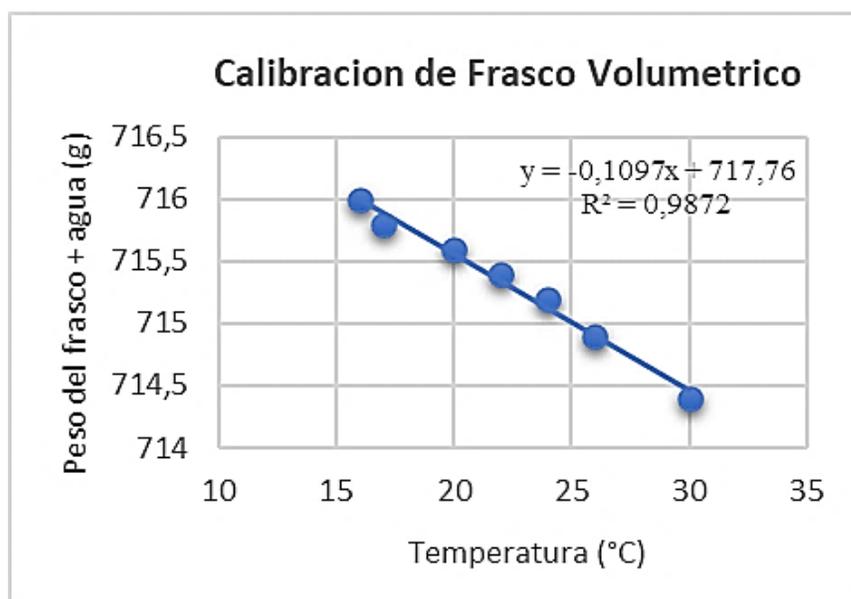
Tabla 3.15 Calibración del frasco volumétrico

Peso del frasco limpio (vacío-seco) (g) =	224,6
Peso del frasco + agua: Wfw (g) =	712,8

Numero de ensayo	Temp.	Wfw
	(°C)	(g)
1	30	714,4
2	26	714,9
3	24	715,2
4	22	715,4
5	20	715,6
6	17	715,8
7	16	716

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23 Calibración del frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16 Peso específico de la ceniza

PESO ESPECÍFICO DE LA CENIZA						
Ensayo	1	2	3	4	5	Prom.
Temperatura ensayada: "T" (°C)	16	18	20	25	29	
Peso del suelo seco: "Ws" (g)	79,80	79,80	79,80	79,80	79,80	
Peso del frasco más agua: "Wfw" (g)	716,00	715,78	715,56	715,02	714,58	
Peso del frasco+agua+suelo: "Wfws" (g)	767,3	767	766,7	766,1	765,8	
Peso específico: " γ_s " (g/cm ³)	2,7998	2,7919	2,7840	2,7790	2,7925	
Factor de corrección "K"	1,0009	1,0004	1,0000	0,9989	0,9977	
Peso específico corregido: " γ_{sc} " (g/cm ³)	2,8023	2,7930	2,7840	2,7760	2,7861	2,7883

Fuente: Elaboración propia

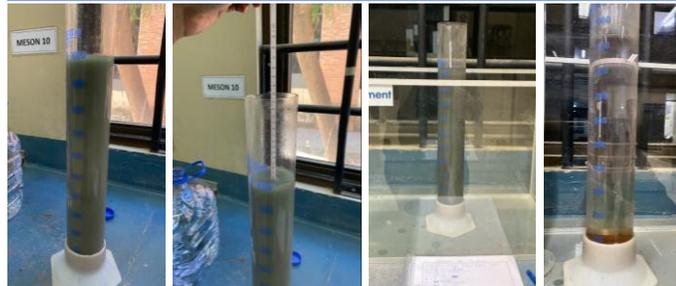
3.2.2.3 Granulometría de la ceniza

Se procedió a tamizar la muestra de ceniza de tallos de quinua, utilizando el tamiz N°200 para obtener partículas finas adecuadas para el análisis. Luego se realizó la granulometría mediante el método del hidrómetro, dejando que el aditivo se saturara con defloculante durante 24 horas antes de iniciar el ensayo.

Figura 3.24 Hidrometría con 152 H para la ceniza



Preparación de la ceniza con defloculante



Registro de tiempos y temperaturas en distintos intervalos

Fuente: Elaboración propia

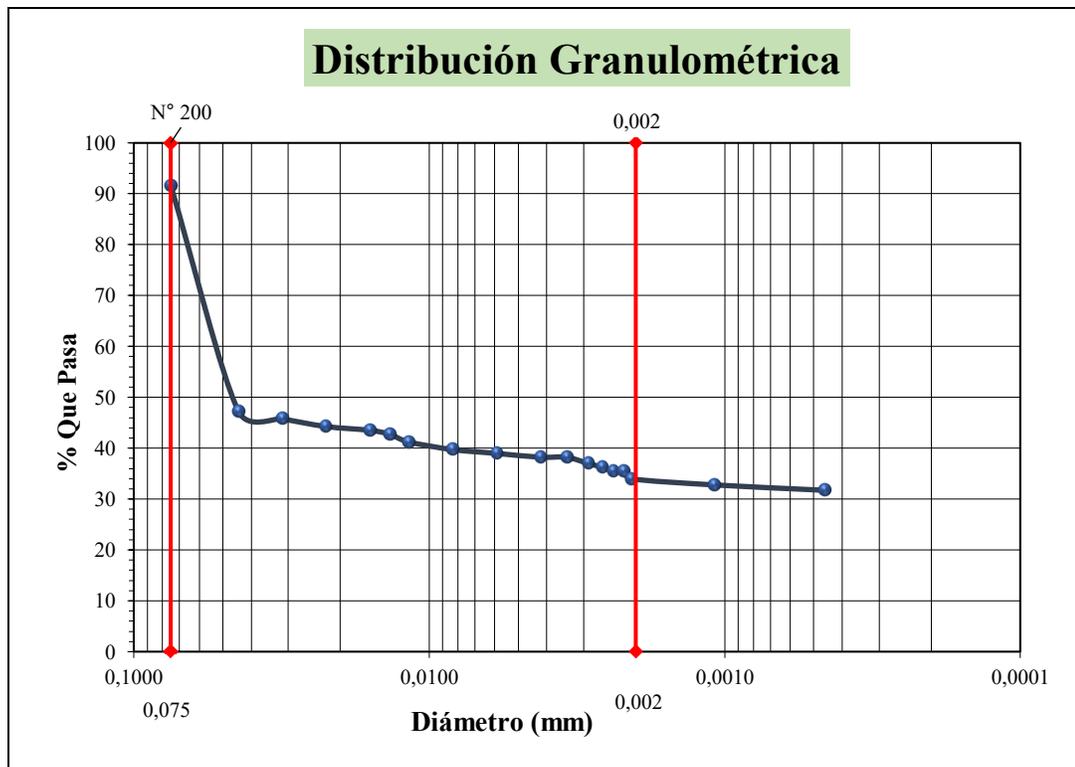
Tabla 3.17 Hidrometría con 152 H de la ceniza

Modelo Hidrómetro:		152 H				Temperatura (°C):			24		
Peso suelo seco:		58,99 G				Registro Hidrómetro (g/cm³):			3		
Peso específico:		2,79 g/cm³				Ct (g/cm³):			1		
Agente Dispersante: Hexametáfosfato de sodio (NaPO3)6						Cm (g/cm³):			1		
						RCd (g/cm³):			5		
"a"	0,972					Cd (g/cm³):			-5,0000		
Tiempo (min)	T °C	Lect. Real Rh (g/cm³)	Lect. Corr. Menis. Rr (g/cm³)	Ct (g/cm³)	Const. K Tabla	Lect. Corr. Rc (g/cm³)	Prof. Efec. L (cm)	L/t (cm/mi)	Diam. Part. (mm)	% Mas Fino Parc.	% Mas Fino Tot.
									0,075		91,68
1	17	36	37	-0,7	0,01324	31,3	11,17	11,17	0,0443	51,57	47,28
2	17	35	36	-0,7	0,01324	30,3	11,34	5,670	0,0315	49,93	45,77
4	17	34	35	-0,7	0,01324	29,3	11,47	2,868	0,0224	48,28	44,26
8	17	33,5	34,5	-0,7	0,01324	28,8	11,54	1,443	0,0159	47,45	43,51

11	17	33	34	-0,7	0,01324	28,3	11,64	1,058	0,0136	46,63	42,75
15	17	32	33	-0,7	0,01324	27,3	11,84	0,789	0,0118	44,98	41,24
30	17	31	32	-0,7	0,01324	26,3	11,97	0,399	0,0084	43,34	39,73
60	17	30,5	31,5	-0,7	0,01324	25,8	12,04	0,201	0,0059	42,51	38,97
120	17	30	31	-0,7	0,01324	25,3	12,14	0,101	0,0042	41,69	38,22
180	17	30	31	-0,7	0,01324	25,3	12,14	0,067	0,0034	41,69	38,22
240	18	29	30	-0,5	0,01282	24,5	12,30	0,051	0,0029	40,37	37,01
300	18	28,5	29,5	-0,5	0,01282	24	12,40	0,041	0,0026	39,55	36,26
360	18	28	29	-0,5	0,01282	23,5	12,45	0,035	0,0024	38,72	35,50
420	18	28	29	-0,5	0,01282	23,5	12,45	0,030	0,0022	38,72	35,50
480	18	27	28	-0,5	0,01282	22,5	12,60	0,026	0,0021	37,07	33,99
1890	19	26	27	-0,3	0,01324	21,7	12,76	0,007	0,0011	35,76	32,78
10560	20	25	26	0,0	0,01314	21	12,90	0,001	0,0005	34,60	31,72

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25 Hidrómetro de la ceniza



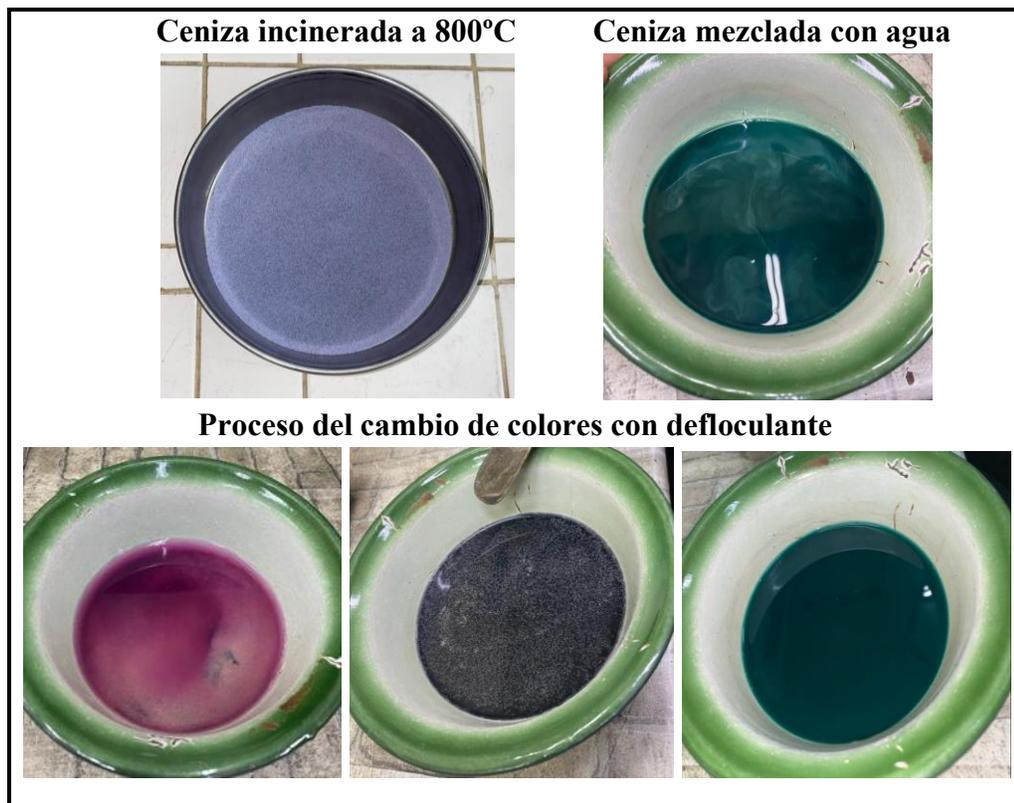
Fuente: Elaboración propia

Para hidrómetros 152 H		
Porcentaje más fino que:	0,002 mm = 33,92 %	Arcilla
Porcentaje de limo	$\% (0,075 \text{ mm}) - \%(0,002\text{mm}) = 91,68 - 33,92 = 57,76 \%$	Limo

3.2.2.4 Clasificación de colores de la ceniza

La ceniza de tallos de quinua presenta distintos cambios de color a lo largo de su proceso de preparación y uso. Estas variaciones se deben a la presencia de óxidos y trazas metálicas que reaccionan de forma diferente según las condiciones a las que se expone el material. Así, durante la calcinación, la mezcla con agua o la incorporación de defloculantes, es posible observar modificaciones visibles en el color, que reflejan los procesos químicos que ocurren en cada etapa.

Figura 3.26 Clasificación de colores de la ceniza



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.5 Análisis químico de la ceniza

Tabla 3.18: Análisis químico de la ceniza de tallos de quinua

Composición química	Norma/ Referencia	Resultados	Evaluación
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	ASTM C618 $\geq 70 \%$	85,29 %	Cumple
SO_3	ASTM C618 $\leq 5 \%$	0,71 %	Muy bajo
LOI	ASTM C618 $\leq 10 \%$	5,05 %	Aceptable
Álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)	$\leq 1,5 \%$	0,83 %	Dentro del limite
CaO	Referencial (alto en cementantes, bajo en puras puzolanas)	2,96 %	Bajo, pero esperado para ceniza agrícola

Fuente: Elaboración propia

Resultados de los componentes de la ceniza

- **SiO₂ (Silice): 76,57 %** altísimo, lo que es muy bueno porque indica fuerte potencial puzolánico.
- **Al₂O₃ (Alúmina): 6,41 %** y **Fe₂O₃ (Óxido de hierro): 2,31 %**. Sumatoria ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) = **85,29 %** supera con creces el 70 % que pide la norma ASTM C618 para puzolanas.
- **CaO (Óxido de calcio): 2,96 %** bajo, lo cual es lógico porque la ceniza de quinua no es un material cementante como la cal, sino puzolánico.
- **MgO: 0,69 %**, **Na₂O: 0,83 %**, **K₂O: 0,31 %** valores bajos, lo que significa poca presencia de álcalis (positivo porque no hay riesgo de expansividad).
- **Pérdida por ignición (LOI): 5,05 %**, aceptable (<10 % es un buen rango, indica ceniza bien calcinada con baja materia orgánica).

Conclusión técnica

De acuerdo con el análisis químico realizado en laboratorio, la ceniza de tallos de quinua cumple con los criterios establecidos por la norma ASTM C618 para materiales puzolánicos, al presentar un elevado contenido de sílice es 76,57 %, lo cual favorece su

capacidad de reacción con la cal y la formación de compuestos cementantes. Asimismo, la pérdida por ignición obtenida es 5,05 % refleja un proceso de calcinación adecuado, mientras que los bajos valores de álcalis y trióxido de azufre (SO₃) evidencian la ausencia de riesgos de expansividad o reacciones indeseables, consolidando así su viabilidad como aditivo alternativo en la estabilización de suelos.

3.5.3 Caracterización de los suelos con la adición de CQ + Cal

Una vez finalizados los ensayos de caracterización del suelo, se procedió a analizar su comportamiento al incorporar mezclas de ceniza de tallos de quinua y cal.

Para los valores de referencia para la cal, que fueron definidos en 3% y 5%, se obtuvieron de la tesis de Almonacid Román Iván Max (2019). Esta información fue clave para justificar tanto la selección como la dosificación.

Se realizaron los ensayos de límite líquido por el método de Casagrande y límite plástico por el método de los rollitos, ambos ensayos con suelos arcillosos de media compresibilidad, adicionando distintas mezclas de porcentajes de ceniza de tallos de quinua y cal, para poder determinar el índice de plasticidad y su comportamiento.

Tabla 3.19 Porcentajes de las mezclas

CAL	CENIZA	CAL	CENIZA
3	3	5	3
3	5	5	5
3	10	5	10
3	15	5	15

Fuente: Elaboración propia

3.5.3.1 Límites de Atterberg y clasificación de las muestras elegidas

El procedimiento consistió en pesar 100 gramos de arcilla de media compresibilidad luego agregar el porcentaje de ceniza y mezclar hasta perder los grumos que se genera, una la muestra este uniforme, se agrega agua hasta lograr una pasta homogénea luego se empieza a realizar el límite líquido. Con el restante de material se realiza el límite plástico. Este procedimiento se realizó para las 15 muestras con adiciones de 3%, 5%, 10% y 15% de ceniza de tallos de quinua y 3% y 5% de cal.

Figura 3.27 Ensayo del límite líquido y límite plástico



Fuente: Elaboración propia

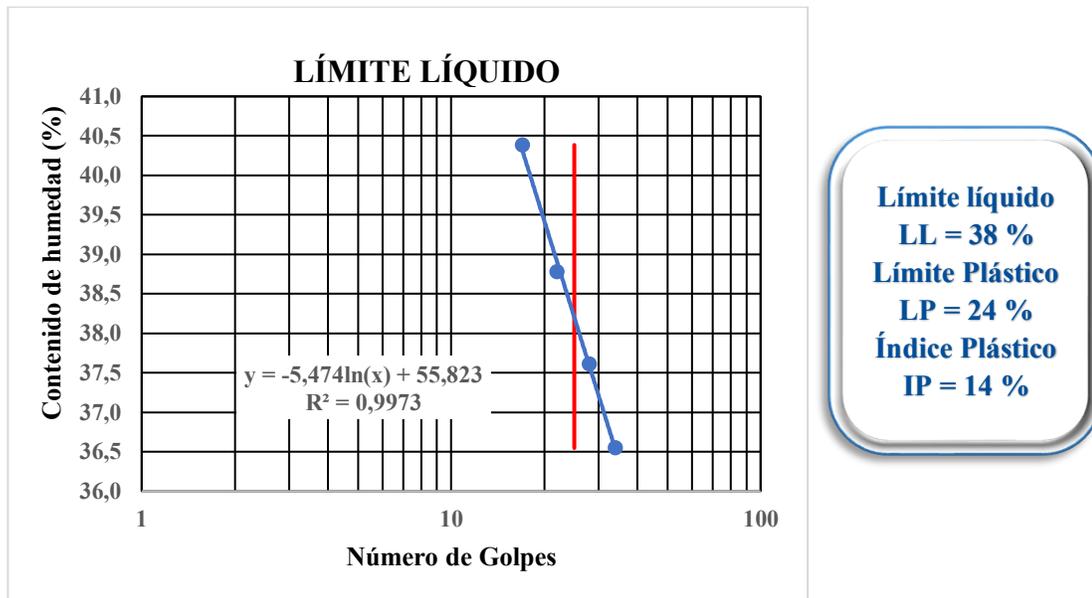
Límites de Atterberg de “M2 + 3% CAL + 3 % CQ”

Tabla 3.20: Límites de Atterberg de “M2+ 3% CAL + 3 % CQ”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (g)	18,11	15,2	19,71	16,38	20,11	13,31	15,94
Peso de suelo humedo+capsula(g)	32,71	29,73	34,09	31,96	23,67	16,95	19,44
Peso de suelo seco + capsula (g)	28,51	25,67	30,16	27,79	22,97	16,22	18,78
Peso de Agua (g)	4,2	4,06	3,93	4,17	0,7	0,73	0,66
Peso de suelo seco (g)	10,4	10,47	10,45	11,41	2,86	2,91	2,84
Contenido de Humedad (%)	40,4	38,8	37,6	36,5	24,5	25,1	23,2
N° de Golpes	17	22	28	34			
Promedio de C de humedad (%)					24,3		

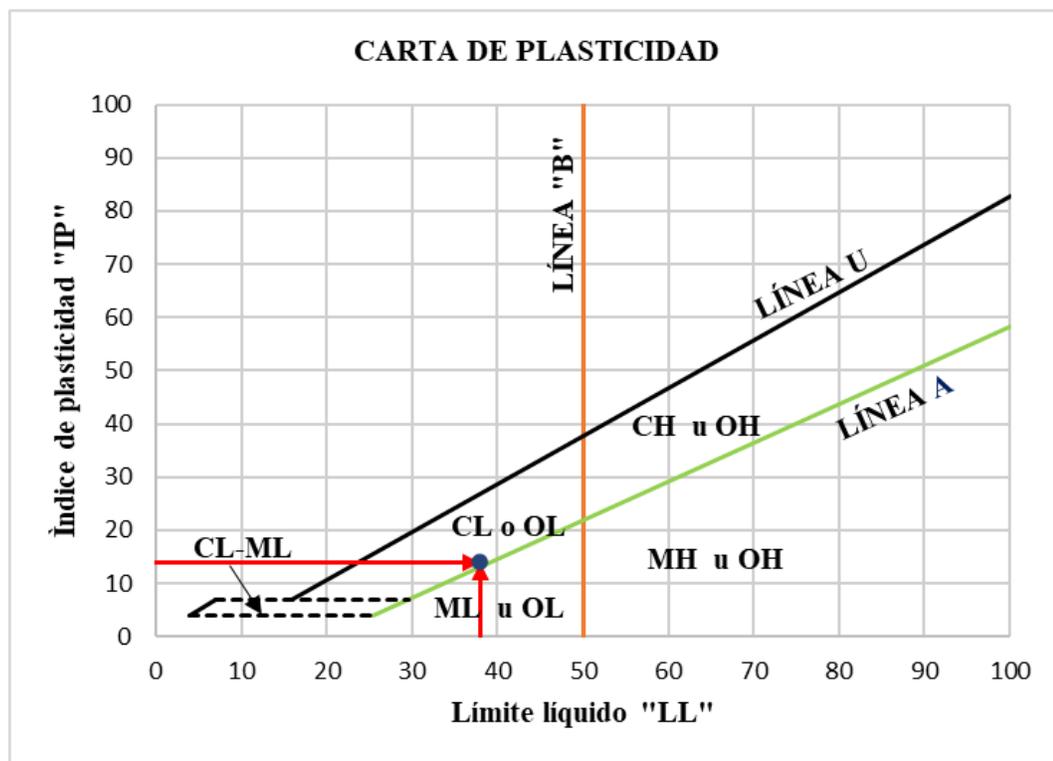
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.28 Límite líquido de "M2 + 3% CAL + 3 % CQ"



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.29 Clasificación de "M2 + 3% CAL + 3% CQ"



Fuente: Elaboración propia

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
SUCS:	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad

Tabla 3.21 Resultados de los límites de Atterberg de “M2”

MUESTRA 2 M2 + 3% CAL + % CQ				
CAL	CENIZA	LL	LP	IP
0	0	34,00	20,00	14,00
3	3	38,00	24,00	14,00
3	5	38,00	25,00	13,00
3	10	31,00	22,00	9,00
3	15	30,00	19,00	11,00

Fuente: Elaboración propia

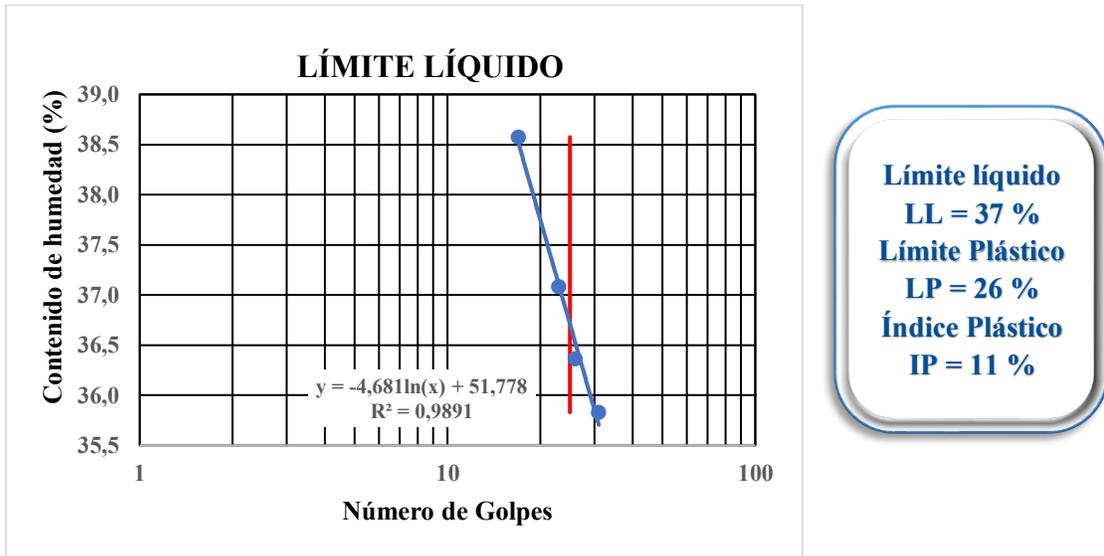
Límites de Atterberg de “M2 + 5% CAL + 3% CQ”

Tabla 3.22 Límites de Atterberg de “M2 + 5% CAL + 3% CQ”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (g)	13,89	14,8	17,84	15,8	18,51	17,16	18,11
Peso de suelo humedo + capsula (g)	30,02	27,11	27,74	29,22	21,31	20,71	21,67
Peso de suelo seco + capsula (g)	25,53	23,78	25,1	25,68	20,73	19,98	20,93
Peso de Agua (g)	4,49	3,33	2,64	3,54	0,58	0,73	0,74
Peso de suelo seco (g)	11,64	8,98	7,26	9,88	2,22	2,82	2,82
Contenido de Humedad (%)	38,6	37,1	36,4	35,8	26,1	25,9	26,2
N° de Golpes	17	23	26	31			
Promedio de C de humedad (%)					26,1		

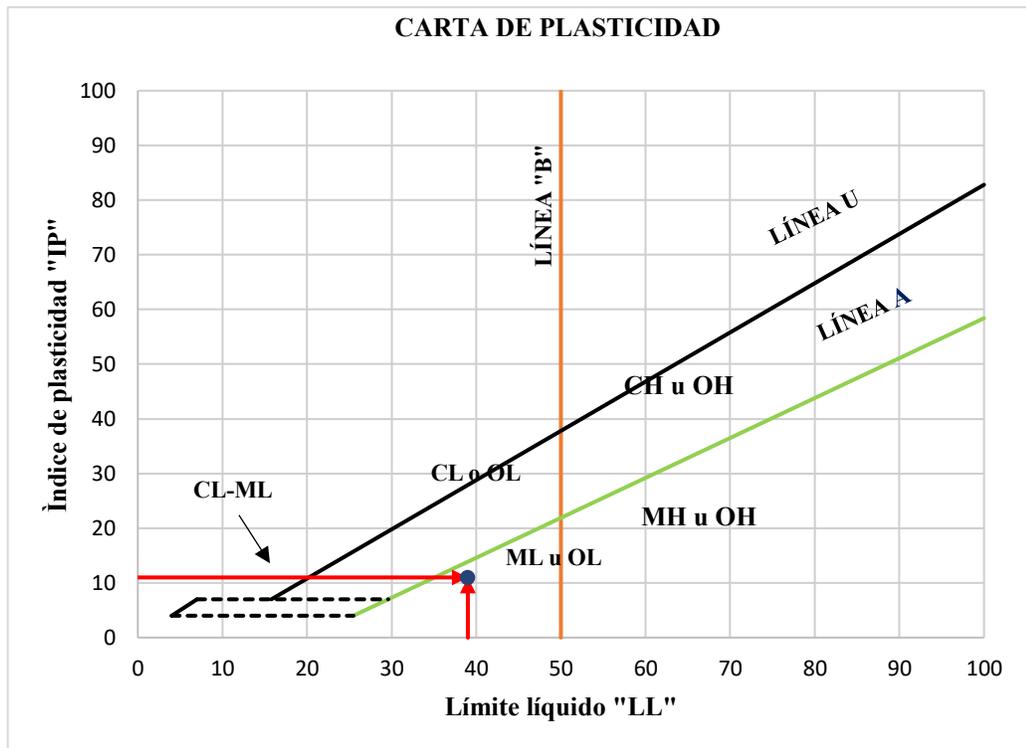
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.30 LL de "M2 + 5% CAL + 3% CQ"



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31 Clasificación con la carta de plasticidad de "M2 + 5% CAL + 3% CQ"



Fuente: elaboración propia

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
SUCS:	ML	Limo inorgánico de baja plasticidad

Tabla 3.23 Resultados de los límites de Atterberg de “M2”

MUESTRA 2 M2 + 5% CAL + % CQ				
CAL	CENIZA	LL	LP	IP
0	0	34,00	20,00	14,00
5	3	37,00	26,00	11,00
5	5	39,00	28,00	11,00
5	10	40,00	22,00	18,00
5	15	44,00	29,00	15,00

Fuente: Elaboración propia

Resultados de los límites de Atterberg con las mezclas de CQ y cal

Tabla 3.24 Límites de Atterberg con mezclas de 3% CAL + % CQ

SUELOS MODIFICADOS CON 3% CAL + 10% CQ			
SUELOS	LL	LP	IP
M1	29	23	6
M2	31	22	9
M3	32	26	6
M4	31	24	7
M5	33	26	7
M6	34	26	8
M7	34	24	10
M8	36	22	14
M9	40	26	14
M10	38	28	10
M11	40	27	13

M12	42	28	14
M13	45	28	17
M14	47	29	18
M15	49	31	18

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25 Límites de Atterberg con mezclas de 5% CAL + % CQ

SUELOS MODIFICADOS CON 5% CAL + 5% CQ			
SUELOS	LL	LP	IP
M1	36	30	6
M2	38	29	9
M3	40	32	8
M4	39	30	9
M5	40	31	9
M6	40	31	9
M7	41	30	11
M8	43	29	14
M9	45	31	14
M10	44	34	10
M11	47	34	13
M12	50	33	17
M13	52	35	17
M14	54	35	19
M15	54	36	18

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis resultados

El presente capítulo tiene como objetivo analizar e interpretar los resultados obtenidos de la caracterización de los suelos arcillosos de media compresibilidad en su estado natural, así como los resultados obtenidos después de aplicar la estabilización mediante mezclas de cal y ceniza de tallos de quinua en diferentes proporciones. Este análisis se centra en la variación del índice de plasticidad (IP) y se apoya en la aplicación de la prueba t de Student para muestras apareadas, con el fin de determinar si las reducciones observadas son estadísticamente significativas y si respaldan la hipótesis planteada.

4.1 Análisis resultados

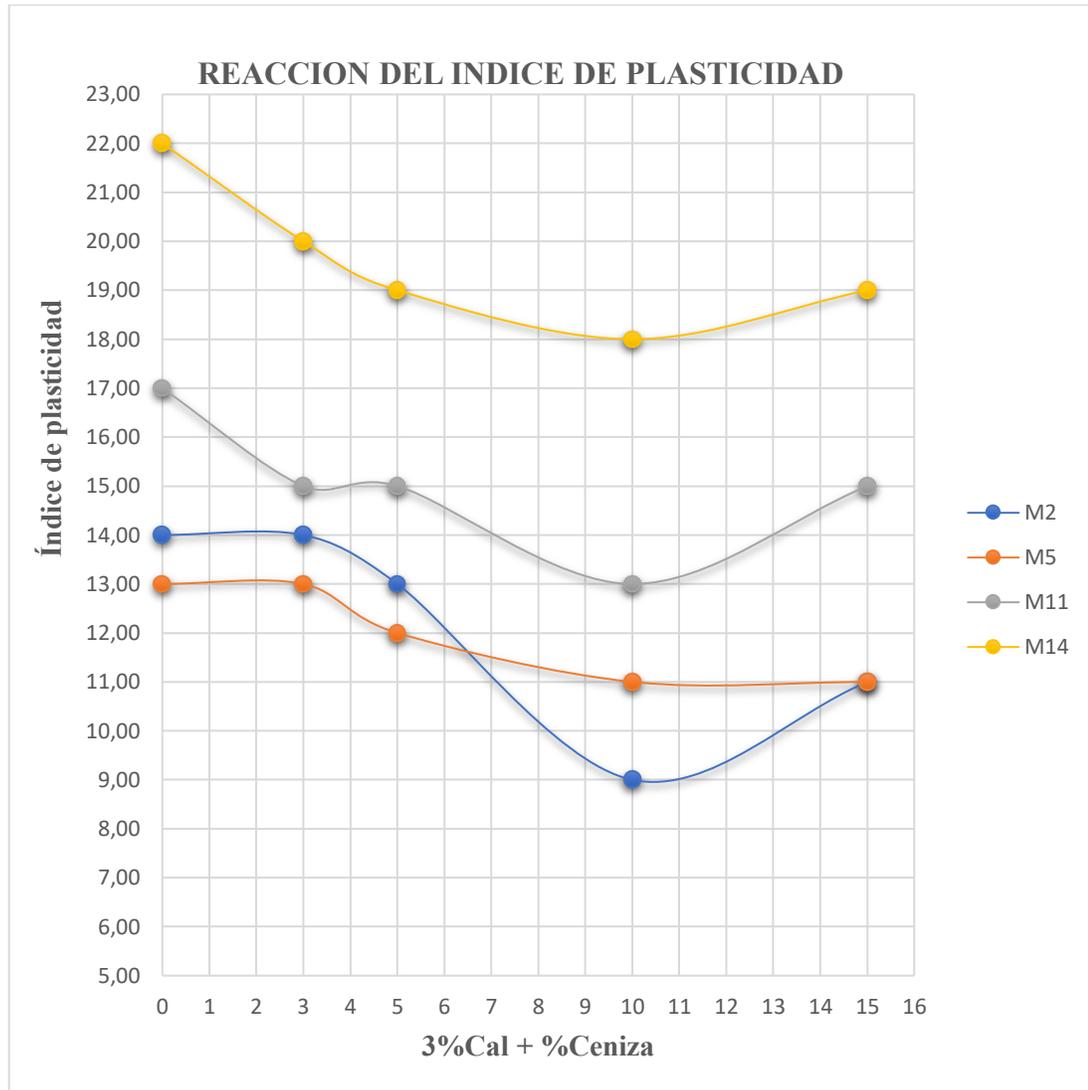
4.2.1 Determinación del índice de plasticidad optimo

Con el objetivo de identificar las combinaciones más efectivas para reducir el índice de plasticidad (IP), se ensayaron distintas mezclas de cal y ceniza de tallos de quinua. En total se aplicaron dos proporciones de cal (3 % y 5 %), cada una combinada con cuatro variaciones de ceniza (3 %, 5 %, 10 % y 15 %).

Las pruebas se realizaron sobre cuatro suelos arcillosos de media compresibilidad, clasificados de acuerdo con su límite líquido (LL) entre: 30–35 %, 35–40 %, 40–45 % y 45–50 %. De esta manera, se buscó abarcar un rango representativo dentro de la categoría de arcillas de media plasticidad.

En la siguiente figura/tablas se presentan los resultados obtenidos para los índices de plasticidad correspondientes a cada una de las combinaciones evaluadas.

Figura 4.1 Reacción de los IP de los suelos arcillosos con 3%Cal + %Ceniza

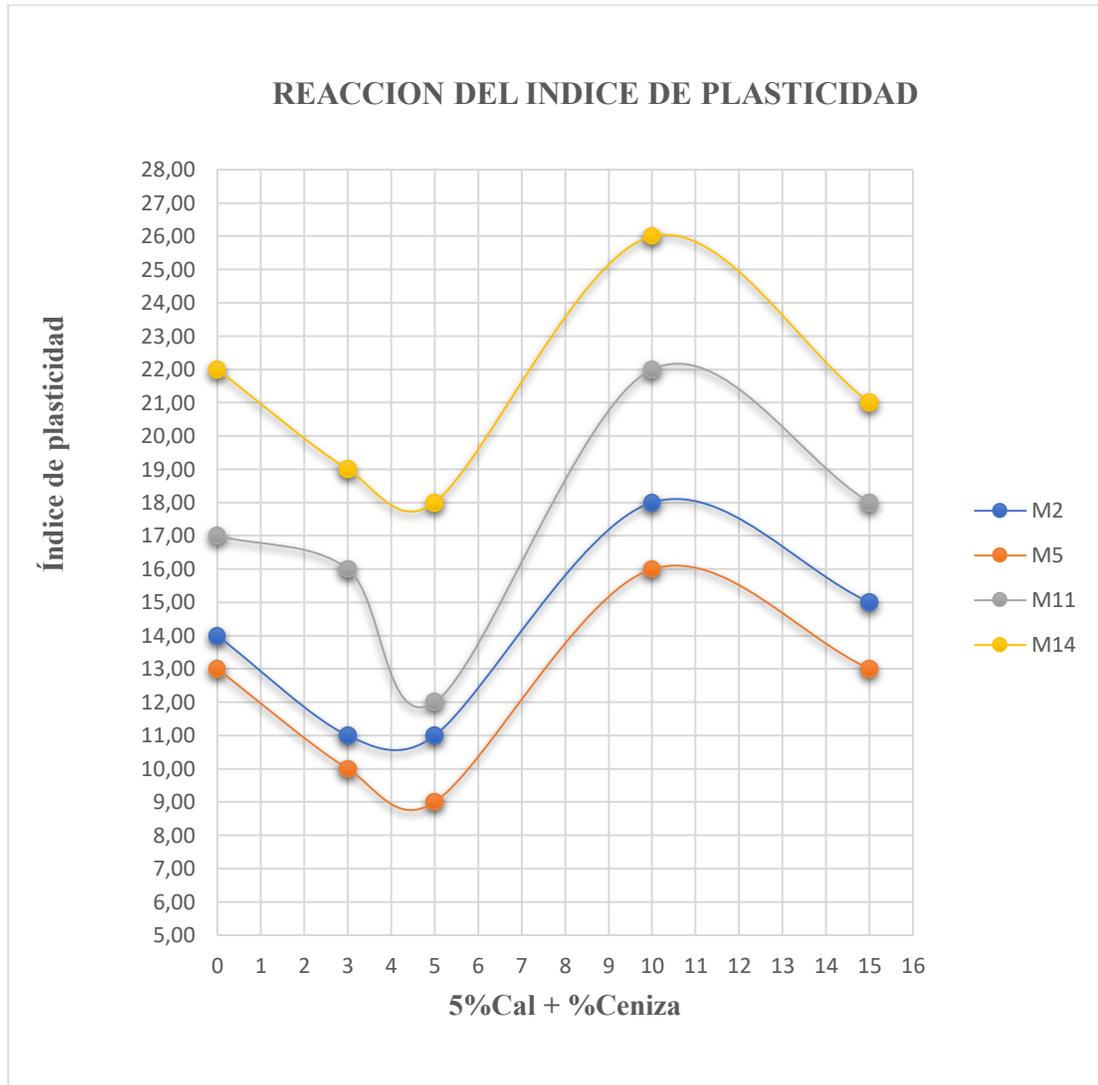


Fuente: Elaboración propia

Al evaluar las mezclas, se evidenció que el índice de plasticidad (IP) disminuye conforme aumenta la proporción de ceniza de quinua, alcanzando su valor más bajo con 3 % de cal y 10 % de ceniza. Con 15 % de ceniza el IP sube ligeramente, aunque se mantiene menor que en el suelo natural.

En conclusión, la mezcla 3 % cal + 10 % ceniza resulta la más adecuada para reducir la plasticidad, ya que hace que el suelo sea menos deformable y más estable frente a la humedad y las cargas, lo cual es favorable para su uso en infraestructura vial.

Figura 4.2 Reacción de los IP de los suelos arcillosos con 5%Cal + %Ceniza



Fuente: Elaboración propia

En el análisis de las mezclas con 5 % de cal, se observó que el índice de plasticidad (IP) disminuye de forma marcada en los primeros porcentajes de ceniza, siendo 5 % la proporción más favorable, ya que alcanza la mayor reducción y mantiene valores bajos. Esto es ideal para suelos arcillosos de media compresibilidad, pues los hace menos susceptibles a deformaciones bajo carga.

Al aumentar la ceniza a 10 % y 15 %, el IP vuelve a incrementarse, lo que indica que después del punto óptimo, añadir más aditivo no mejora el comportamiento del suelo.

En conclusión, la combinación 5 % de cal + 5 % de ceniza es la más adecuada, ya que reduce al máximo la plasticidad y brinda mayor estabilidad al suelo, condición esencial en proyectos viales.

4.2 Análisis de la reducción de la plasticidad con ceniza de tallos de quinua y cal

A partir de los resultados obtenidos se puede observar que la adición de mezclas de cal y ceniza de tallos de quinua en los suelos arcillosos de media compresibilidad logró disminuir el índice de plasticidad en todos los casos evaluados. Este comportamiento confirma que la estabilización con estos materiales provoca cambios en la estructura del suelo, favoreciendo la unión de partículas y reduciendo la capacidad de deformación cuando el material absorbe agua.

Al comparar los tratamientos, el que contenía mayor proporción de ceniza (3% Cal + 10% CQ) presentó una reducción más notoria que el tratamiento con proporciones (5% Cal + 5% CQ). Esto puede deberse a que la ceniza de quinua aporta compuestos puzolánicos que reaccionan con la cal, formando productos cementantes que mejoran la cohesión del suelo.

En general, los resultados muestran que ambos tratamientos son efectivos para disminuir la plasticidad, aunque el tratamiento con mayor contenido de ceniza ofrece un mejor desempeño. Estos resultados coinciden con lo planteado en la hipótesis inicial y respaldan el uso de la mezcla como una alternativa viable para estabilizar suelos arcillosos en obras viales.

4.3 Análisis estadístico

Para esta etapa se trabajó únicamente con las mezclas óptimas de cal y ceniza, aplicadas a un total de 15 suelos arcillosos de media compresibilidad. Con estas muestras se realizó el análisis estadístico correspondiente, con el fin de evaluar de manera rigurosa la reducción absoluta del índice de plasticidad (IP).

El estudio incluyó tanto la estadística descriptiva, mediante medidas de tendencia central, dispersión y distribuciones de frecuencia, como la estadística inferencial, a través de la prueba t de Student. De esta manera fue posible valorar la efectividad de cada tratamiento y establecer comparaciones entre las proporciones seleccionadas

4.3.1 Estadística descriptiva

En esta sección se presenta el análisis estadístico descriptivo de la reducción absoluta del índice de plasticidad obtenida en los tratamientos con cal y ceniza de tallos de quinua. Se incluyen medidas como el valor mínimo y máximo, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación, que permiten conocer el comportamiento general de los datos antes de aplicar la estadística inferencial.

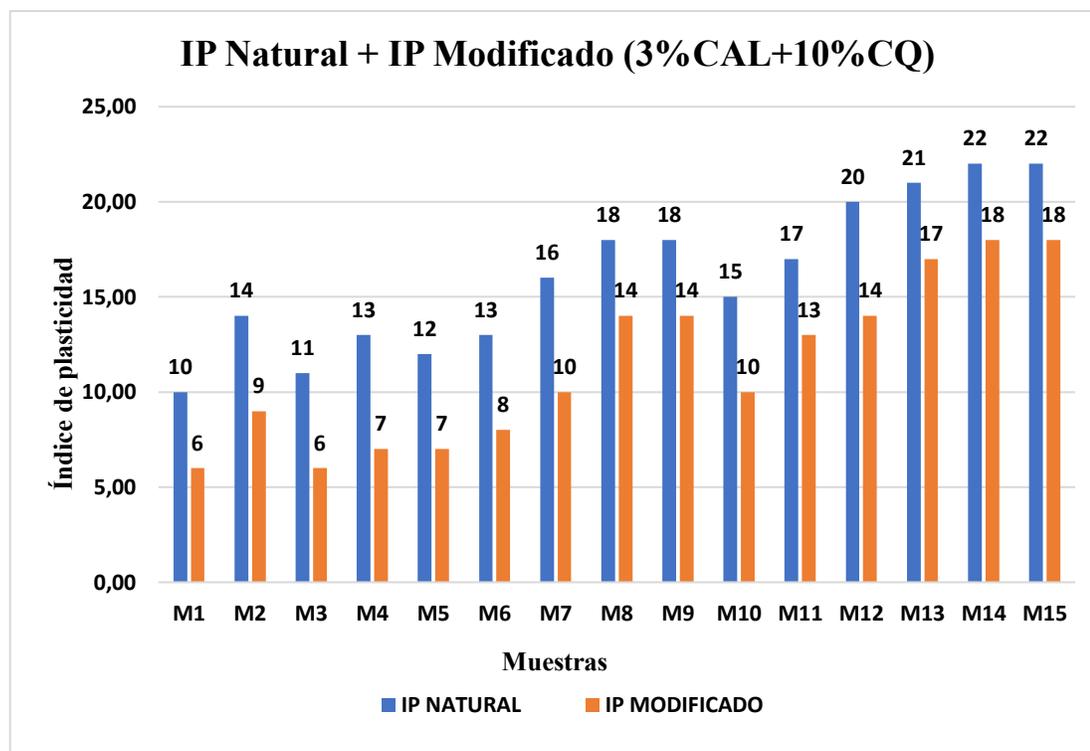
Tabla 4.1 Resumen de los índices plásticos óptimos

SUELO NATURAL		SUELO MODIFICADO	REDUCCION ABSOLUTA
SUELO	IP	IP+3%CAL+10%CQ	
M1	10,00	6,00	4,00
M2	14,00	9,00	5,00
M3	11,00	6,00	5,00
M4	13,00	7,00	6,00
M5	12,00	7,00	5,00
M6	13,00	8,00	5,00
M7	16,00	10,00	6,00
M8	18,00	14,00	4,00
M9	18,00	14,00	4,00
M10	15,00	10,00	5,00
M11	17,00	13,00	4,00
M12	20,00	14,00	6,00
M13	21,00	17,00	4,00
M14	22,00	18,00	4,00
M15	22,00	18,00	4,00
Media		11,40	4,73
Máxima		18,00	6,00
Mínima		6,00	4,00
Rango		12,00	2,00

Desviación estándar	4,31	0,80
Varianza	18,54	0,64
Coefficiente de variación	37,68	18,88

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3 Comparacion del IP Natural con IP Modificado



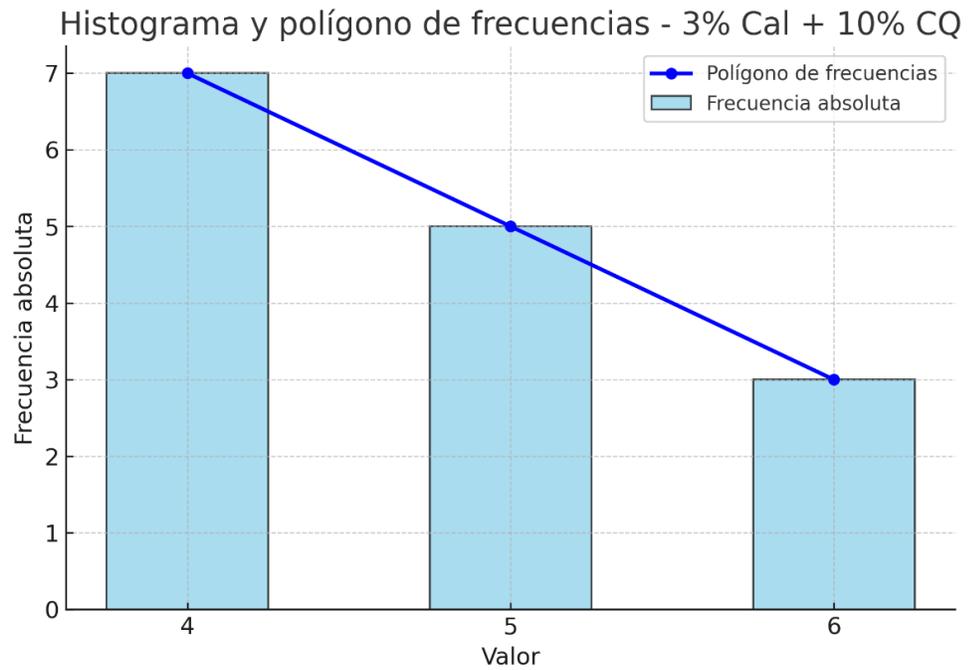
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2 Distribución de frecuencias

Valor	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada (%)
4	7,00	46,67	7,00	46,67
5	5,00	33,33	12,00	80,00
6	3,00	20,00	15,00	100,00
Total	15,00	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Histograma y polígono de frecuencias



Fuente: Elaboración propia

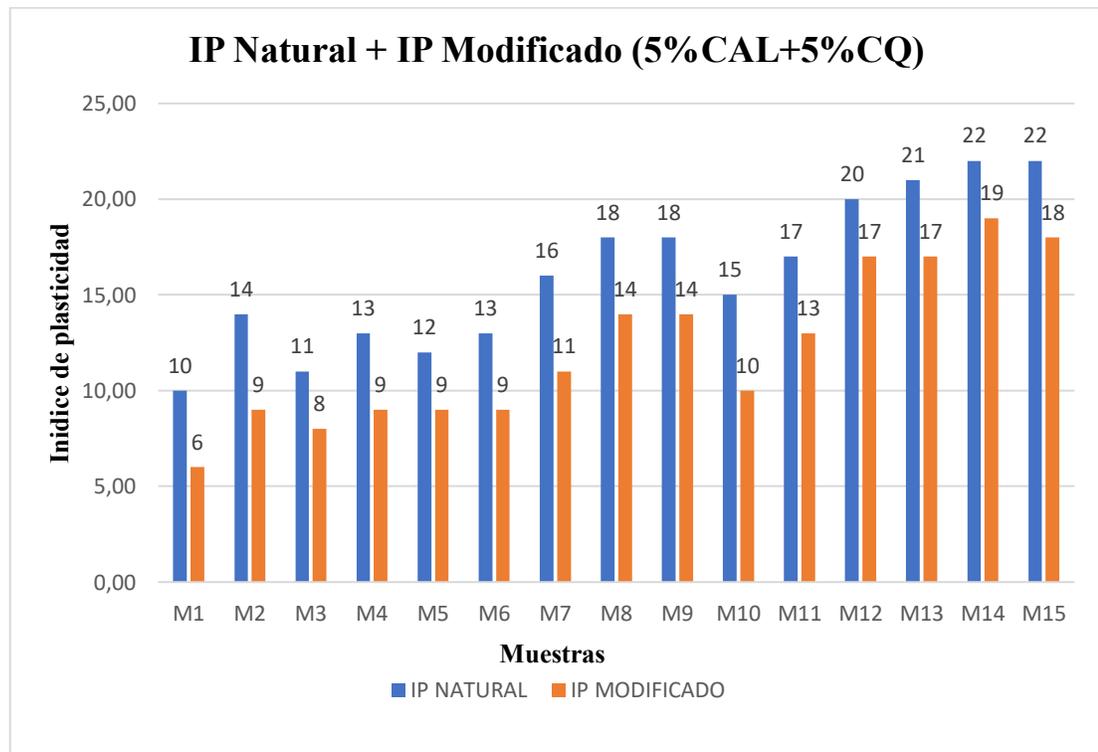
Tabla 4.3 Resumen de los índices plásticos óptimos

SUELO NATURAL		SUELO MODIFICADO	DIFERENCIA
SUELO	IP	IP+5%CAL+5%CQ	
M1	10,00	6,00	4,00
M2	14,00	9,00	5,00
M3	11,00	8,00	3,00
M4	13,00	9,00	4,00
M5	12,00	9,00	3,00
M6	13,00	9,00	4,00
M7	16,00	11,00	5,00
M8	18,00	14,00	4,00
M9	18,00	14,00	4,00
M10	15,00	10,00	5,00

M11	17,00	13,00	4,00
M12	20,00	17,00	3,00
M13	21,00	17,00	4,00
M14	22,00	19,00	3,00
M15	22,00	18,00	4,00
Media		12,20	3,93
Máxima		19,00	5,00
Mínima		6,00	3,00
Rango		13,00	2,00
Desviación estándar		4,11	0.70
Varianza		16,88	0.50
Coefficiente de variación		33,68	17,89

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Comparacion del IP Natural con IP Modificado



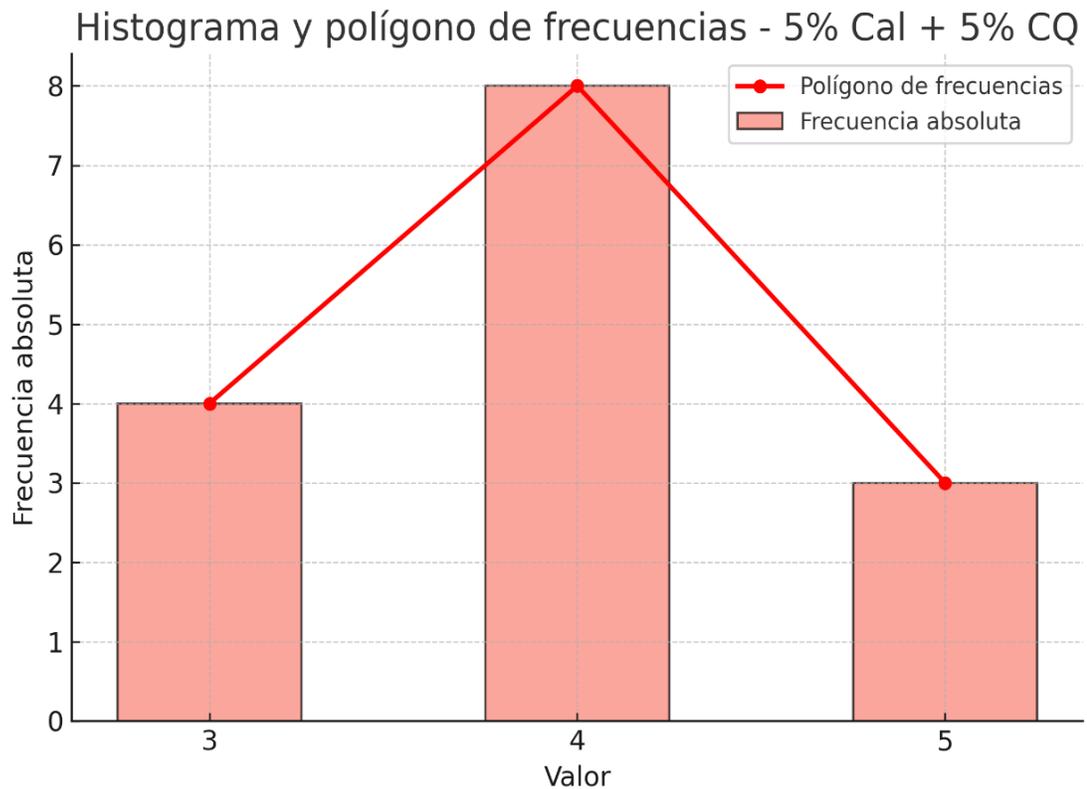
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4 Distribución de frecuencias

Valor	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada (%)
3	4,00	26,67	4,00	26,67
4	8,00	53,33	12,00	80,00
5	3,00	20,00	15,00	100,00
Total	15,00	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Reaccion de los limites liquidos de las muestras



Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico descriptivo permitió identificar cómo varió la reducción absoluta del índice de plasticidad (IP) en los suelos arcillosos de media compresibilidad tratados con diferentes proporciones de cal y ceniza de tallos de quinua. En el tratamiento con 3%

Cal + 10% CQ, los valores se ubicaron entre 4 y 6, siendo el valor 4 el más frecuente (46,67%). Para el tratamiento con 5% Cal + 5% CQ, las reducciones oscilaron entre 3 y 5, con predominio del valor 4 (53,33%). Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, como media, mediana, valores extremos, rango, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación, complementadas con tablas de distribución de frecuencias e ilustraciones mediante histogramas y polígonos de frecuencia. En conjunto, estos resultados ofrecen una visión general del comportamiento de las muestras y sirven como base para la aplicación de la estadística inferencial, que permitirá determinar la significancia de las diferencias observadas.

4.3.2 Estadística inferencial

En esta parte se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas con el fin de evaluar si las reducciones absolutas del índice de plasticidad obtenidas en los tratamientos con cal y ceniza de tallos de quinua son estadísticamente significativas. El análisis se realizó de manera independiente para cada tratamiento y, posteriormente, se compararon los resultados entre ellos, lo que permitió establecer cuál de las mezclas presentó un mejor desempeño en la disminución de la plasticidad.

4.3.2.1 Para 3% Cal + 10% CQ

Planteamiento de hipótesis

$H_0 : \mu_{Red} \geq 0$ (la reducción no es significativa)

$H_1 : \mu_{Red} < 0$ (la reducción es significativa)

Significancia

Nivel de confianza de la investigación: NC = 95%

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

Tamaño de muestra: $n = 15$

Grados de libertad: $v = n - 1 = 14$.

Cálculo estadístico

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Media (\bar{x}) = 4,73

Desviación estándar (s) = 0.799

n = 15 → gl = 14

$$t_c = \frac{4,73}{\frac{0,799}{\sqrt{15}}} \approx 22,95 \quad \Rightarrow \quad t_c = 22,95$$

Valor crítico ($\alpha = 0,05$; gl = 14, cola derecha): $t_t \approx 1,761$

Decisión e interpretación

Como $22,95 > 1,761 \Rightarrow$ se rechaza H_0

Conclusión: El tratamiento 3%Cal + 10%CQ produce una reducción significativa del IP.

4.3.2.2 Para 5% Cal + 5% CQ

Planteamiento de hipótesis

$H_0 : \mu_{Red} \geq 0$ (la reducción no es significativa)

$H_1 : \mu_{Red} < 0$ (la reducción es significativa)

Significancia

Nivel de confianza de la investigación: NC = 95%

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Tamaño de muestra: n = 15

Grados de libertad: $v = n - 1 = 14$.

Cálculo estadístico

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Media (\bar{x}) = 3.93

Desviación estándar (s) = 0.704

n = 15 → gl = 14

$$t_c = \frac{3,93}{\frac{0,704}{\sqrt{15}}} \approx 21,65 \quad \Rightarrow \quad t_c = 21,65$$

Valor crítico ($\alpha = 0,05$; gl = 14, cola derecha): $t_t \approx 1,761$

Decisión e interpretación

Como $21,65 > 1,761 \Rightarrow$ se rechaza H_0

Conclusión: El tratamiento 5% Cal + 5% CQ produce una reducción significativa del IP.

4.4 Especificación técnica

Análisis de la reducción de la plasticidad de suelos arcillosos de media compresibilidad adicionando mezclas de ceniza de tallos de quinua y cal.

Concepto

La presente especificación técnica define los criterios y el procedimiento a seguir para la estabilización de suelos arcillosos de media compresibilidad mediante la adición de mezclas de ceniza de tallos de quinua y cal. El objetivo es reducir la plasticidad del suelo, mejorando sus propiedades mecánicas y su aptitud para la construcción de obras civiles.

Materiales

- Suelo arcilloso de media compresibilidad.
- Ceniza de tallos de quinua: obtenida por calcinación controlada de tallos secos a 800°C.
- Cal hidratada de grado de construcción ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Agua destilada y defloculante para ensayos de laboratorio.

Muestras

- Suelos arcillosos de media compresibilidad entre el rango de LL de 30% a 50% recolectados en la Segunda Circunvalación de Tarija, con un total de 15 muestras.

- Ceniza de tallos de quinua: Con 3%, 5%, 10% y 15%.
- Cal hidratada: Con 3% y 5%.
- Cada ensayo se realizó sobre 100 g de suelo seco, incorporando las proporciones de ceniza y cal según el diseño experimental.

Procedimiento

- a) Recepción y secado del suelo a temperatura ambiente.
- b) Tamizado del material por malla N°40 para homogeneizar la fracción fina.
- c) Pesaje del suelo seco y cálculo de la proporción de aditivos, ceniza y cal.
- d) Mezclado en seco de los tres componentes hasta lograr homogeneidad.
- e) Adición progresiva de agua para facilitar la manipulación.
- f) Confección de probetas para ensayos de límites de Atterberg.
- g) Determinación del Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad según la norma ASTM D4318.
- h) Registro, tabulación y comparación de resultados entre el suelo natural y las mezclas tratadas.

Cuantificación

La cuantificación se realizó en función del volumen total de suelo procesado y las proporciones de aditivos aplicados. Cada mezcla se elaboró a partir de 100 g de suelo seco como base de ensayo, con la siguiente relación:

Suelo M1	
Mezcla 1	100 g suelo + 3 % CQ + 3 % Cal.
Mezcla 2	100 g suelo + 5 % CQ + 3 % Cal.
Mezcla 3	100 g suelo + 10 % CQ + 3 % Cal.
Mezcla 4	100 g suelo + 15 % CQ + 3 % Cal.
Suelo M1	
Mezcla 5	100 g suelo + 3 % CQ + 5 % Cal.
Mezcla 6	100 g suelo + 5 % CQ + 5 % Cal.
Mezcla 7	100 g suelo + 10 % CQ + 5 % Cal.
Mezcla 8	100 g suelo + 15 % CQ + 5 % Cal.

Costos

En esta investigación, los principales costos corresponden a los aditivos empleados (cal y ceniza de tallos de quinua), ya que el suelo fue recolectado en campo sin costo y el uso de laboratorio y equipos fue facilitado por la universidad.

a) Cal:

- Bolsa de 20 kg: 30 Bs.
- Por lo tanto, el costo por kg es de 1,50 Bs/kg.

b) Ceniza de tallos de quinua:

- Venta de los tallos de quinua: 0 bs debido a que es un desecho sin uso alguno.
- Transporte: 50 Bs la volquetada de 2 m³ que pesa aproximadamente de 50kg
Entonces a razón de 1bs/kg de tallos de quinua
- Calcinación en mufla: 2h de uso de la mufla gasta 2 kW de electricidad que según SETAR estar a razón de 0,70 Bs/kWh por lo tanto 2,8 Bs/kg.
Por lo tanto $2,8+1=3,8$ bs/kg.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Después del análisis realizado sobre suelos arcillosos de media compresibilidad de la Segunda Circunvalación en la ciudad de Tarija, se pudo concluir satisfactoriamente con el objetivo general y los objetivos específicos planteados.

Con los resultados obtenidos con la aplicación de los estabilizantes, se concluye lo siguiente:

- Se cumplió con el objetivo de analizar la reducción de la plasticidad de suelos arcillosos de media compresibilidad mediante la adición de cal y ceniza de tallos de quinua. Los resultados confirmaron que las mezclas evaluadas disminuyen de manera significativa el índice de plasticidad (IP), mejorando la estabilidad y trabajabilidad de los suelos. De esta forma, se comprobó que la combinación de estos aditivos constituye una alternativa técnica viable y sostenible para la construcción de obras civiles, al aprovechar un residuo agrícola local.
- Se seleccionaron y caracterizaron los suelos arcillosos de media compresibilidad, siguiendo la carta de plasticidad con el Límite Líquido (LL) entre 30 % y 50. Estos resultados confirmaron que las muestras analizadas pertenecen a la categoría CL del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y cumplen con las condiciones necesarias para su estabilización.
- Se caracterizó la ceniza y la cal con ensayos de laboratorio siguiendo la norma ASTM, donde la ceniza de tallos de quinua de acuerdo con los análisis químicos realizados, mostró un elevado contenido de sílice (≈ 76 %) y baja pérdida por ignición (≈ 5 %), cumpliendo los parámetros de la norma ASTM C618 y clasificándose como una ceniza de clase N, apta para materiales puzolánicos. Mientras que la cal mostró propiedades estabilizantes reconocidas en la literatura, lo que justifica su selección como aditivos para la mejora del suelo.
- La aplicación de mezclas de cal y ceniza de quinua redujo de manera consistente el índice de plasticidad de los suelos analizados. La disminución del IP se reflejó

en un suelo menos susceptible a deformaciones volumétricas por cambios de humedad, lo que constituye un avance importante en su trabajabilidad y estabilidad para aplicaciones viales.

- Entre las combinaciones ensayadas, las más efectivas fueron 3 % de cal + 10 % de ceniza y 5 % de cal + 5 % de ceniza. La primera presentó la mayor reducción absoluta del índice de plasticidad, mientras que la segunda mostró un comportamiento estable y balanceado. Estos resultados permiten establecer que ambas proporciones son técnicamente viables, siendo la mezcla 3 % cal + 10 % ceniza la más recomendable al presentar una reducción más consistente frente a proporciones muy bajas o muy elevadas.
- El análisis estadístico confirmó que las reducciones obtenidas son significativas al 95 %, lo que garantiza la confiabilidad de los resultados y respalda la efectividad de la metodología aplicada para evaluar la influencia de los aditivos en la estabilización de suelos arcillosos.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar el ensayo de límite plástico con especial cuidado y precisión, dado que pequeñas variaciones en la humedad o en la manipulación del material pueden alterar significativamente los resultados del índice de plasticidad.
- Se sugiere ampliar el estudio a suelos arcillosos de alta compresibilidad, considerando que presentan propiedades más extremas y variables. De esta manera, podrá evaluarse si las proporciones óptimas de cal y ceniza de quinua se mantienen o requieren ajustes en función del tipo de suelo.
- Se recomienda incorporar ensayos complementarios de resistencia mecánica y durabilidad a largo plazo, con el fin de analizar el desempeño estructural del suelo estabilizado bajo condiciones reales de obra y diferentes estados de carga y humedad.
- Se sugiere fomentar el aprovechamiento de residuos agrícolas, como la ceniza de tallos de quinua, en la estabilización de suelos para caminos y otras construcciones, ya que representan una alternativa sostenible, de bajo costo y con beneficios ambientales y sociales para las comunidades productoras.