

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Las arcillas son materiales geológicos que se originan a partir de la descomposición de rocas, influenciados por diversos agentes atmosféricos, este proceso de alteración química y física da lugar a minerales arcillosos caracterizados por su estructura laminar y su reducido tamaño de partículas. En particular, la superficie del valle central de Tarija está cubierta por suelos de este tipo, estos materiales son conflictivos al momento de la realización de proyectos de ingeniería civil, si hablamos de vías de comunicación, este tipo de suelo ocasiona inconvenientes en las capas subrasante al momento de construir el pavimento, destinado a resistir el tráfico de servicio, como también, después de su construcción, cuando no se tiene un adecuado mantenimiento.

El mejoramiento de los suelos es una técnica importante para el desarrollo de carreteras, debido a que proporciona condiciones óptimas para la construcción de pavimentos. Entre los métodos de estabilización de los suelos se puede nombrar los tratamientos físicos, químicos, que resultan de la adición de aditivos, brindando una mejora en sus propiedades mecánicas, permitiendo así utilizarlos en la construcción, para que cumplan con las especificaciones técnicas requeridas.

La obra "Materiales de Construcción Sostenible", Dhir, Ghataora, & Lynn (2017), analizaron los usos potenciales de cenizas de lodos residuales como material de relleno en capas de subbase, demostraron que al agregar un 15% de ceniza se mejora la densidad seca máxima a humedades de compactación estándar y en la capacidad de carga, Este efecto se atribuye a la acción de relleno que las cenizas ejercen sobre el material, siendo más notable cuando se utilizan cenizas previamente pulverizadas.

Huicaya y Vidal (2017) determinaron la influencia del biosólido de una PTAR para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los ladrillos King Kong de 18 huecos, al adicionar el biosólido en proporciones de 5%, 10%, 15%, 20% de los cuales se buscó el porcentaje óptimo. Donde el porcentaje óptimo es del 10%, dando una resistencia de los ladrillos de 115,854 kg/cm². Se concluyó que al determinar el porcentaje óptimo se mejora

la resistencia a la compresión y absorción encontrándose dentro de los parámetros de la normativa NTP E0.70.

La investigación se vincula con la estabilización de suelos limosos mediante el uso del material generado en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Blas. Los lodos residuales producidos en dicho proceso suelen ser descartados en el ambiente, lo que genera problemas de acumulación y potencial contaminación; en este marco, su posible reutilización como insumo para la mejora de suelos constituye un antecedente relevante dentro del ámbito de la ingeniería civil.

1.2. Situación problemática

En la ciudad de Tarija, uno de los principales desafíos para la construcción vial es la presencia de suelos con propiedades desfavorables, las cuales reducen la estabilidad y durabilidad de las estructuras de pavimento, generando fallas recurrentes en la subrasante

Paralelamente, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Blas produce grandes volúmenes de lodo residual, cuyo acopio y disposición final representan un problema ambiental significativo. La incineración de este material genera una ceniza con potencial reactividad puzolánica, lo que abre la posibilidad de valorizar este residuo mediante su aplicación en procesos de estabilización de suelos.

Sin embargo, no existe información local que determine cómo varían las propiedades físicas y mecánicas de un suelo limoso al incorporar diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual, ni si estos cambios pueden mejorar su desempeño como subrasante. Esta ausencia de datos genera una brecha de conocimiento que impide comprender el efecto de este material y limita la toma de decisiones informadas sobre su posible aplicación en la estabilización de suelos.

1.2.1. Problema

¿Cómo influyen diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo limoso con el propósito de mejorar su desempeño como subrasante?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

La relevancia del problema radica en que los suelos limosos presentes en diversas zonas de Tarija representan una limitación para la construcción vial, debido a sus propiedades físicas y mecánicas deficientes que afectan la estabilidad de las estructuras de pavimento. Comprender cómo pueden modificarse estas propiedades mediante la incorporación de ceniza de lodo residual aporta un valor técnico directo para la mejora de subrasantes en proyectos viales. Asimismo, el estudio adquiere importancia ambiental al considerar un residuo generado por la PTAR de San Blas, cuya gestión adecuada es un desafío para el municipio.

En cuanto a la factibilidad, la investigación es viable porque los materiales requeridos —suelo limoso y lodo residual— son accesibles, y los ensayos necesarios pueden desarrollarse en el laboratorio de Mecánica de Suelos, que cuenta con el equipamiento adecuado. Esto permite ejecutar el estudio dentro de los recursos y tiempos disponibles.

1.3. Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de generar información técnica sobre la mejora de suelos limosos mediante la incorporación de ceniza de lodo residual proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del barrio San Blas. Estos suelos presentan propiedades desfavorables que limitan su desempeño como subrasante, paralelamente el lodo residual generado en la PTAR constituye un problema ambiental recurrente debido a su acumulación y disposición final. La incineración de este lodo produce una ceniza con potencial puzolánico que podría emplearse como aditivo estabilizante; lo que convierte a la ceniza de lodo residual en una alternativa técnica viable y sostenible.

Su aprovechamiento adquiere mayor relevancia considerando que, en la región, el lodo suele utilizarse de forma informal como fertilizante, práctica que genera incertidumbre entre los productores por el riesgo de contaminación de los cultivos al no existir un proceso de estabilización térmica que garantice su inocuidad.

Los resultados permitirán valorar la viabilidad del uso de este residuo como material alternativo en la estabilización de suelos, contribuyendo tanto al desarrollo de soluciones

geotécnicas como a la valorización de desechos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar el efecto que producen diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual en la propiedades físicas y mecánicas de un suelo limoso, con el fin de determinar si su calidad mejora para su utilización como subrasante.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar la zona de extracción de las muestras de suelo.
- Caracterizar los suelos limosos.
- Recolectar el lodo residual de la PTAR del barrio San Blas.
- Realizar el incinerado y la molienda del lodo residual.
- Analizar las propiedades del suelo en estado natural y combinado con ceniza de lodo residual.
- Establecer el porcentaje óptimo de ceniza de lodo residual a utilizarse en la estabilización de suelos limosos.

1.5. Hipótesis

Si a un suelo limoso se le incorporan diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual, entonces sus propiedades físicas y mecánicas experimentarán variaciones que podrían permitir su utilización como subrasante con un desempeño adecuado.

1.6. Operacionalización de las variables

1.6.1. Variable independiente

Porcentajes de ceniza de lodo residual

1.6.2. Variable dependiente

Propiedades físicas y mecánicas del suelo limoso (límites de consistencia, densidad seca máxima, humedad óptima y CBR)

1.6.3. Conceptualización de variables

Tabla 1.1 Variable independiente

Variable Independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor / Acción
Porcentaje de ceniza de lodo residual	Cantidad de ceniza de lodo residual, que se agrega al suelo en proporción a su peso seco para modificar sus propiedades físico-mecánicas	Dosificación del aditivo	(%) de ceniza de lodo residual	Aplicación de cuatro dosificaciones del aditivo, calculadas como porcentaje en peso respecto a la masa seca del suelo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.2 Variable dependiente

Variable Dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor / Acción
Propiedades físicas y mecánicas del suelo limoso modificadas por la incorporación de ceniza de lodo residual	Conjunto de características que describen el comportamiento físico y mecánico del suelo, las cuales pueden variar al incorporar diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual.	Límites de consistencia	Limite liquido Limite plástico Índice de plasticidad	Reducción o incremento al añadir la ceniza
		Compactación	Densidad máxima y humedad óptima	Aumento o disminución de la densidad seca máxima y humedad óptima obtenida en compactación Proctor.
		Capacidad de soporte	CBR %	Incremento o disminución del valor de CBR en función de cada dosificación del aditivo.

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

La investigación se enmarca dentro del enfoque causal-explicativo, ya que busca determinar la influencia de la ceniza de lodo residual en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo limoso. Este tipo de investigación permite establecer la relación causa–efecto entre la dosificación del aditivo y las variaciones resultantes en el material.

1.8. Métodos y técnicas empleadas

La investigación adopta un enfoque causal–explicativo, en el que se analiza la influencia de la ceniza de lodo residual sobre las propiedades físicas y mecánicas de un suelo limoso. Para ello, se recurre al método experimental, que permite observar las variaciones producidas al incorporar diferentes dosificaciones del material. Como técnicas generales se consideran la observación directa y la medición de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio, los cuales proporcionan datos objetivos para interpretar el comportamiento del suelo en su estado natural y tratado.

1.9. Alcance de la investigación

La investigación se centra en analizar la influencia de diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo limoso obtenido en dos sectores urbanos de la ciudad de Tarija.

El alcance comprende la recolección y preparación de las muestras de suelo y de lodo residual incinerado, así como la evaluación del material mediante ensayos de laboratorio que permiten determinar los cambios en los límites de consistencia, la compactación y la capacidad de soporte (CBR).

La investigación se desarrolla bajo condiciones controladas de laboratorio y se restringe a las dosificaciones seleccionadas, por lo que los resultados describen el comportamiento del suelo tratado únicamente en este contexto experimental. Asimismo, la investigación se orienta a valorar el potencial de la ceniza de lodo residual como aditivo estabilizante en la conformación de subrasantes para pavimentos flexibles, sin considerar validaciones en campo.

CAPÍTULO II

**ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LIMOSOS**

CAPÍTULO II

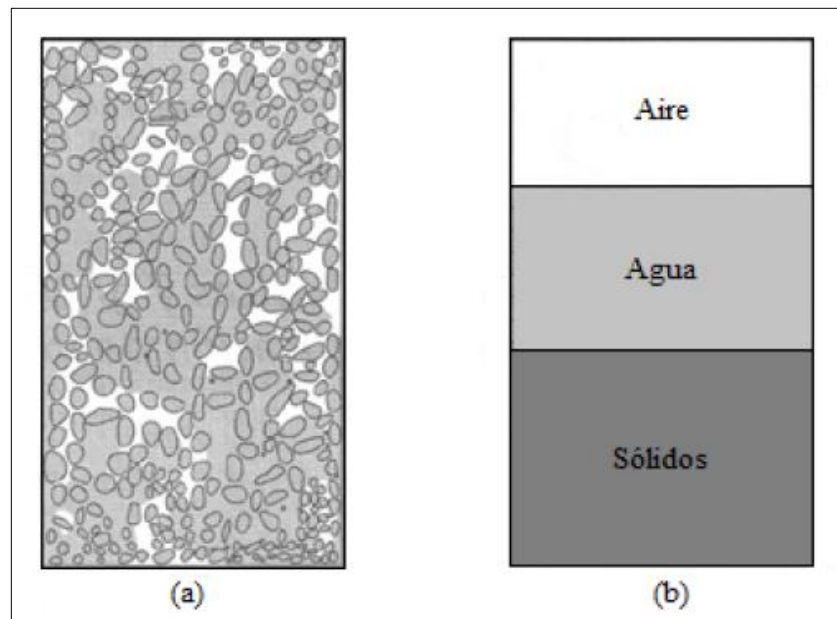
ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LIMOSOS

2.1. El suelo

El suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las activaciones de los seres vivos que sobre ella se asientan. (Crespo Villalaz , 2004)

La palabra suelos representa “todo tipo de material terroso, desde un relleno al desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas”. (Juárez & Rico, 2005).

Figura 2.1 (a) Suelo en estado natural; (b) Modelo trifásico del suelo



Fuente: Rodrigo Zapata (2018)

2.1.1. Suelo en la ingeniería civil

Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas.

El suelo es el material de construcción más abundante dentro de las prácticas de la ingeniería Civil, y constituye el soporte de las estructuras como edificaciones, vías, puentes, canales, torres, entre otros, además se utiliza como el material de terraplenes

viales, muros de tierra reforzada con geotextil, diques, rellenos de adecuación de terrenos en relieves pendientes para áreas urbanas. Los suelos conforman los taludes de corte y de terraplenes viales y son estructuras que cumplen funciones diversas en los proyectos: son los elementos a estabilizar cuando se trata de taludes, y a la vez brindan estabilidad a los demás elementos que hacen parte de un tratamiento de pendientes, como los canales, las bermas, las estructuras y la vegetación que protege el suelo.

El suelo y el agua tienen vínculos muy estrechos y tanto la ausencia de agua dentro de la estructura del suelo cuando éste se seca, o el exceso hasta la saturación ejercen control sobre su peso, alteran la resistencia de ese suelo y cambia su volumen; además de la respuesta del suelo fino saturado por la aplicación de cargas estáticas, cuando se induce el flujo del agua libre, se deforma y sufre asentamiento la estructura apoyada en él. (Escobar Potes, 2016)

Figura 2.2 Suelo en la ingeniería



Fuente: Proyectos y Construcciones P&H

2.2. Tipo de suelo

Según Crespo Villalaz (2017), los principales tipos de suelos son:

2.2.1. Gravas

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Cuando son arrastradas por las aguas sufren desgaste en sus aristas y por lo tanto son redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, márgenes de los ríos y en otros lugares donde las gravas han sido transportadas. Casi siempre se encuentra con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas varían desde 7,62 cm (3") hasta 2,0 mm.

2.2.2. Arenas

Materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0,05 mm de diámetro. El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas; las suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Los suelos arenosos están conformados por arenas medias y gruesas, teniendo una granulometría muy favorable para sustentar estructuras con cierta resistencia. Este es sumamente estable ante los cambios de la temperatura y humedad, siendo más estable que el arcilloso. Las cimentaciones en losa son bastante comunes en este tipo de suelos.

El gran problema de los suelos arenosos es que son muy propensos a la erosión, afectando en gran medida la cimentación y la estructura del lugar.

2.2.3. Limos

Son suelos de granos finos con poco o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo orgánico como el producto en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0,05 mm y 0,005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su

compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

2.2.4. Arcilla

Son partículas con diámetro menor de 0,005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclado con agua. Químicamente es un silicato de aluminio hidratado, aunque en no pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratado. La estructura de estos materiales es, generalmente cristalina y complicada, y sus átomos están dispuestos en forma laminar. Las arcillas son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprime lentamente.

Figura 2.3 Tipos de suelos



Fuente: “Geotetechtips on X”

2.3. Diferencia entre los limos y las arcillas

Tabla 2.1 Diferencias entre los limos y las arcillas

Limo	Acilla
La resistencia seca es baja, aún seca al horno.	La resistencia seca es alta a muy alta, especialmente si se seca al horno.
Desprende polvo de la superficie.	No desprende polvo de la superficie.
Es fácilmente desmenuzable con los dedos.	Difícilmente desmenuzable con los dedos.
Plasticidad. Los rollitos para el límite plástico son frágiles. Secan rápido y se agrietan fácilmente con humedad bajo el estado plástico. Tienen resistencia baja.	Plasticidad. Los rollitos del límite plástico son tenaces, secan lentamente y permanecen finos, con humedades bajo el estado plástico. Tienen resistencia alta a muy alta.
Dispersión. Se asienta entre 15 y 60 minutos.	Dispersión. Cuando está en suspensión, tarda días a semanas, en asentarse, a menos que haya floculación.
Mayor permeabilidad.	Menor permeabilidad.
No son expansivas.	Pueden ser expansivas.

Fuente: Gonzalo y Carlos Escobar (2016)

2.4. Propiedades físicas y mecánicas de los suelos

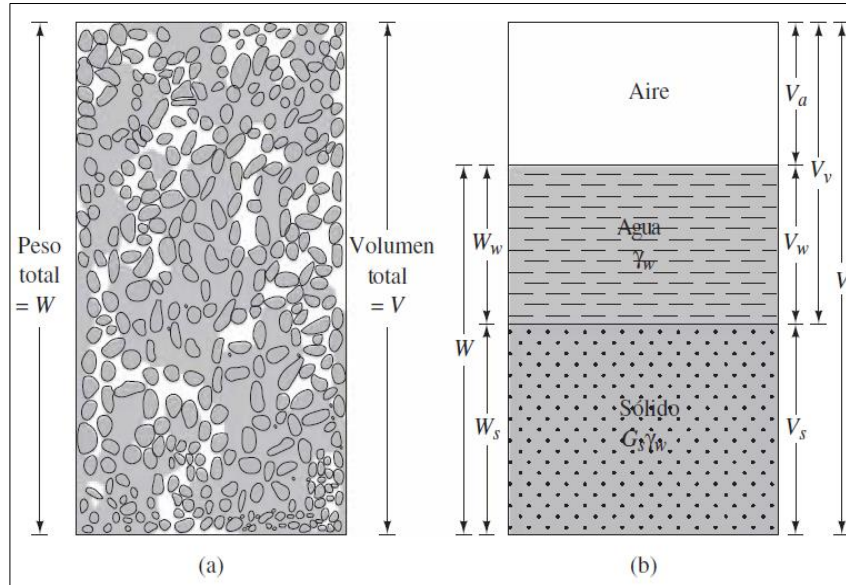
El suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físico mecánicas del suelo.

2.4.1. Relaciones de volumen

Según Braja M. Das (2012), en la naturaleza los suelos son sistemas de tres fases que consisten en partículas de suelo sólidas, agua y aire (o gas). Para desarrollar las relaciones peso-volumen para un sólido, las tres fases se pueden separar. Con base en esta separación, se pueden definir las relaciones del volumen. Las relaciones de volumen de uso común

para las tres fases en un elemento de suelo son la porosidad, relación de vacíos y el grado de saturación.

Figura 2.4 (a) Elemento de suelo natural (b) tres fases del elemento de suelo



Fuente: Braja M. Das (2012)

2.4.1.1. Porosidad

La porosidad es la relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo.

2.4.1.2. Relación de vacíos

La relación de vacíos, es la relación del volumen de vacíos al volumen de sólidos de un suelo en una masa de suelo dada.

2.4.1.3. Grado de saturación

El grado de saturación, es la relación del volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos, que en general se expresa como un porcentaje.

2.4.2. Relaciones de peso

Braja M. Das (2016), indica que las relaciones de peso comunes son el contenido de humedad y el peso unitario.

2.4.2.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad también se conoce como contenido de agua y se define como la razón del peso de agua al peso de los sólidos en un volumen dado de suelo, o como la cantidad relativa de agua que se encuentra en un suelo respecto a la masa de sólidos o al volumen del suelo analizado. Se expresa en porcentaje (%), y es la relación entre el peso del agua del espécimen, y el peso de los sólidos.

2.4.2.2. Peso unitario

El peso unitario es el peso del suelo por unidad de volumen, se puede expresar en términos del peso de sólidos del suelo, contenido de humedad y el volumen total.

2.4.3. Humedad natural

Una característica importante de los suelos es su humedad natural; puesto que la resistencia de los suelos de subrasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten. (MTC, 2014).

2.4.4. Granulometría del suelo

Se puede denominar granulometría a la división de los diferentes tamaños de las partículas que tiene el suelo.

Según Braja M. Das (2012) afirma que “En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas. Para un suelo de grano fino, la distribución granulométrica se puede obtener por medio del análisis del hidrómetro”.

La distribución granulométrica es la división de diferentes dimensiones de las partículas de los suelos, ya que estos pueden contener diversos componentes combinados, cada partícula puede ser caracterizado por sus dimensiones, y estas dimensiones están reglamentadas para definir su clasificación por medio de valores mínimos y máximos. (Hernández, rico y del Castillo. 2002).

Tabla 2.2 Clasificación de los suelos según cada tamaño de partículas

Tipo de material		Tamaño de las partículas
Grava		2 - 60 mm
Arenas		0,06 - 2 mm
Material fino	Limo	0,002 - 0,06 mm
	Arcilla	menor a 0,002 mm

Fuente: Braja M. Das (2012)

2.4.5. Hidrómetro

El análisis hidrométrico se basa en la Ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera.

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños.

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2,00 mm (No.10) para suelos granulares.

Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de 75 μ m (No.200) para suelos finos. (Ing. Laura Karina Soto Salgado (2015) Mecánica de suelos 1 y laboratorio)

2.4.6. Peso específico

Los valores típicos del peso específico para suelos varían según el tipo de material. Por ejemplo, los suelos predominantemente compuestos por minerales como el cuarzo suelen tener un peso específico entre 2,65 y 2,75, mientras que los suelos con un alto contenido de materia orgánica o arcillas expansivas pueden presentar valores más bajos, generalmente entre 2,5 y 2,65. Los suelos con minerales pesados, como los que contienen hierro o minerales ferromagnesianos, pueden tener valores más altos, que oscilan entre 2,75 y 3,0. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

Joseph Bowels presenta en su “Manual De Laboratorio De Suelos En Ingeniería Civil” valores típicos para algunos tipos de suelos, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2.3 Rangos de gravedad específica propuestos por Bowles

Tipo de Suelo	Rango Gravedad específica
Arena	2,65-2,67
Arena Limosa	2,67-2,70
Arcilla inorgánica	2,70-2,80
Suelos con micas o hierro	2,75-3,00
Suelos Orgánicos	Variable. Puede ser inferior a 2,00

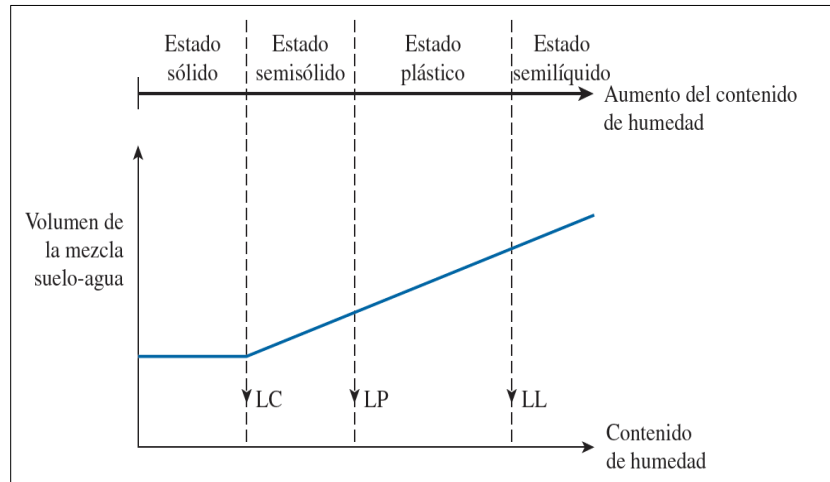
Fuente: Manual de procedimiento de ensayo de suelos UMGN

2.4.7. Plasticidad de los suelos

En mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciables y sin desmoronarse ni agrietarse. (Juárez & Rico, 2005).

El autor Crespo Villalaz (2017) indica que, “La plasticidad es la propiedad que presenta los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, quien por medio de ellos separo los cuatro estados de consistencia de los suelos coherentes. Límite líquido (L.L), límite plástico (L.P) y límite de contracción (L.C)”.

Gráfica 2.1 Límites de consistencia de suelos de grano fino



Fuente: Braja M. Das (2012)

2.4.7.1. Límite líquido

Se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, cuando el suelo pasa del estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo Villalaz, 2017).

El límite líquido es el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico. Se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba ASTM D-4318) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes. (Braja M. Das, 2012).

2.4.7.2. Límite plástico

Se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido, así también como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3,18 mm de diámetro. La prueba se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (designación de prueba ASTM D-4318). (Braja M. Das, 2012).

2.4.7.3. Límite de contracción

El Límite de Contracción se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual una reducción de agua no ocasiona la disminución en el volumen del suelo. (Crespo Villalaz, 2017).

2.4.7.4. Índice de plasticidad

Se denomina Índice de Plasticidad a la diferencia numérica entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP), e indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos. (Crespo Villalaz, 2004).

Tabla 2.4 Clasificación de suelos según índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$IP \leq 20$ $IP > 7$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No Plástica (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Ministerio de transportes y comunicaciones (2014)

2.4.8. Clasificación de suelos

Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada. En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS. (Braja M. Das, 2016).

2.4.8.1. Sistema de clasificación AASHTO

De acuerdo con la forma presente de este sistema, los suelos se pueden clasificar según ocho grupos principales, A-1 a A-8, con base en su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos listados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso, y aquellos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son materiales de grano fino. La turba, el fango y otros suelos altamente orgánicos se clasifican en el grupo A-8 y se identifican mediante una inspección visual.

Para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material de capa subrasante de un camino, también se desarrolló un número al que se le refiere como índice de grupo (IG). Entre mayor sea el valor del índice de grupo para un suelo dado, más deficiente será el desempeño del suelo como capa subrasante. Un índice de grupo de 20 o mayor indica un material muy deficiente para utilizarlo como capa subrasante. El índice de grupo para suelos que se encuentran ubicados en los grupos A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4 y A-2-5 siempre es cero. (Braja M. Das, 2012).

Tabla 2.5 Sistema de clasificación AASHTO

	Materiales granulares						
Clasificación general	(35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
Clasificación de grupo	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
% que pasa							
Malla núm. 10	50 máx.						
Malla núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.				
Malla núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Fracción que pasa							
Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx.	41 máx.	40 máx.	41 mín.
Índice plástico (IP)	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						

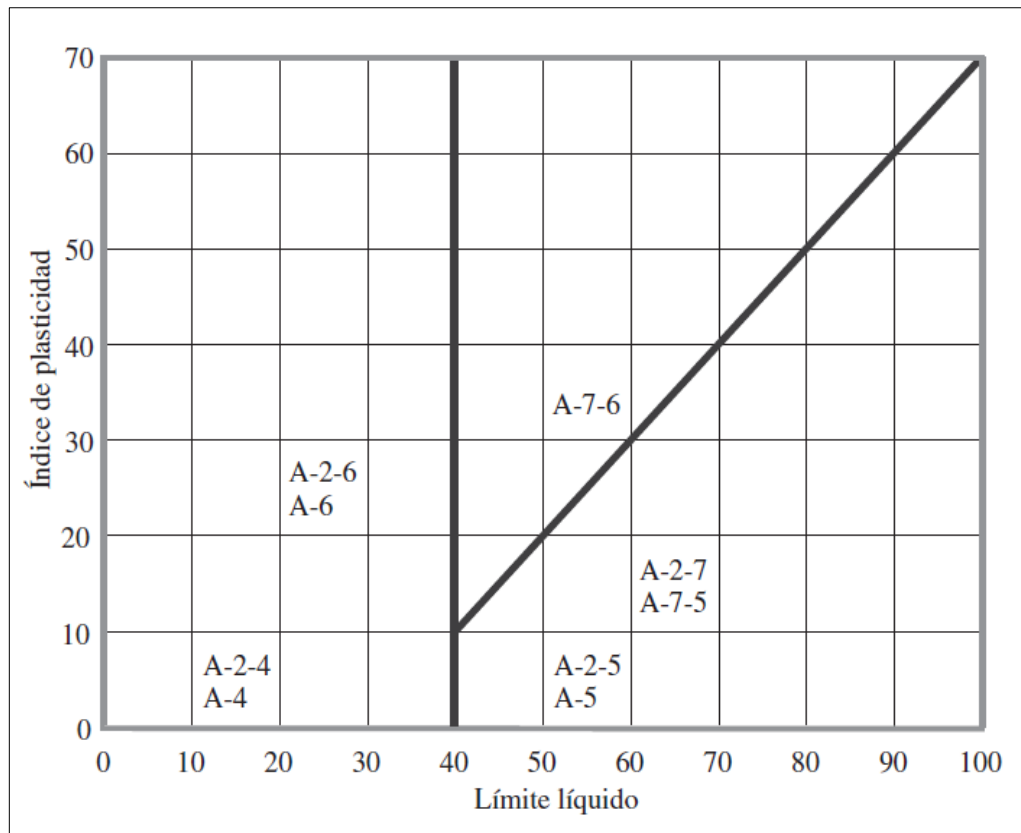
Clasificación general	Materiales de limo y arcilla
	(más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)

Clasificación de grupo	A-4	A-5	A-6	A-7
				A-7-5 ^a
				A-7-5 ^b
% que pasa				
Malla núm. 10				
Malla núm. 40				
Malla núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Fracción que pasa				
Malla núm. 40				
Límite líquido (LL)	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice plástico (IP)	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos	
Clasificación subrasante	Regular a malo			
a Si $IP \leq LL - 30$, la clasificación es A-7-5.				
b Si $IP > LL - 30$, la clasificación es A-7-6.				

Fuente: Braja M. Das (2012)

La figura 2.6 muestra un gráfico del rango del límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos que se dividen en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7. Para la evaluación de la calidad de un suelo como un material de subrasante carretera, también se incorpora un número llamado índice de grupo (IG) a los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo.

Gráfica 2.3 Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos



Fuente: Braja M. Das (2012)

2.4.8.2. Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System) fue propuesto originalmente por Casagrande en 1942 y más tarde lo revisó y adoptó el United States Bureau of Reclamation y el US Army Corps of Engineers. En la actualidad el sistema se utiliza prácticamente en todo el trabajo geotécnico. (Braja M. Das, 2012).

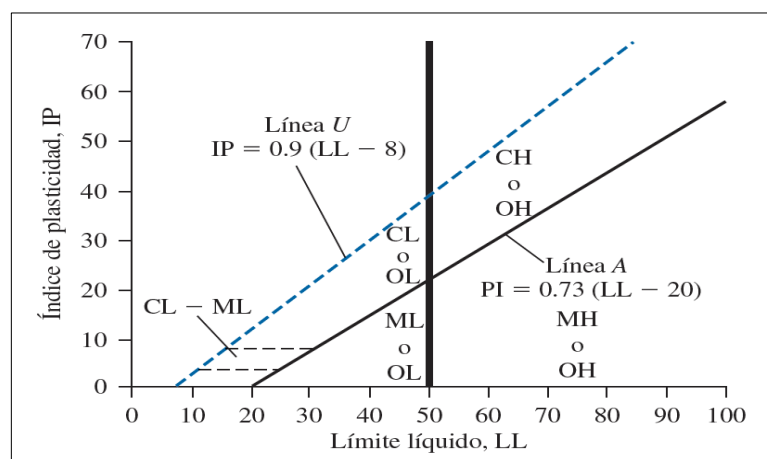
Tabla 2.6 Símbolos utilizados en la clasificación SUCS

Descripción	Símbolo
Grava	G
Arena	S
Limo	M
Arcilla	C
Limos orgánicos y arcilla	O
Turba y suelos altamente orgánicos	Pt
Bien graduado	W
Mal graduado	P
Alta plasticidad (límite líquido mayor a 50)	H
Baja plasticidad (límite líquido menor a 50)	L

Fuente: Braja M. Das (2012)

Igualmente, Casagrande propuso la carta de plasticidad la cual relaciona en una gráfica el límite líquido frente al índice de plasticidad. Dentro de la gráfica, además de la línea que separa los suelos de alta plasticidad de los de baja plasticidad, definió las líneas A y U. La primera línea separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos mediante la expresión $PI = 0,73 (LL - 20)$ y la línea U es el límite superior de la relación del índice de plasticidad con el límite líquido. Se define como $PI = 0,9 (LL - 8)$.

Gráfica 2.3 Carta de plasticidad

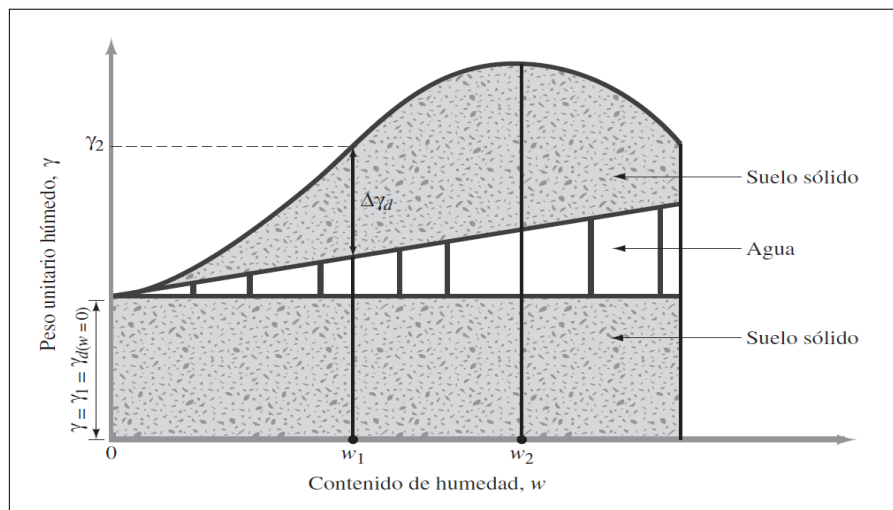


Fuente: Braja M. Das (2012)

2.4.9. Compactación de suelos

Según Braja M. Das (2016), la compactación es la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo. Éstas se deslizan una sobre la otra y se mueven en una posición densamente empaquetadas. El peso unitario seco después de la compactación primero aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad.

Gráfica 2.4 Principios de compactación



Fuente: Braja M. Das (2016)

2.4.9.1. Compactación Proctor estándar

En la prueba Proctor estándar, el suelo se compacta en un molde que tiene un volumen de $943,3 \text{ cm}^3$. El diámetro del molde es 101,6 mm. Durante la prueba de laboratorio el molde se une a una placa de base en la parte inferior y a una extensión en la parte superior. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego es compactado en tres capas iguales por un martillo que entrega 25 golpes a cada capa. El martillo pesa 24,4 N y tiene una caída de 304,8 mm.

2.4.9.2. Compactación Proctor modificado

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación en campo, la prueba Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. Esto se refiere a veces como la prueba Proctor modificada (Norma ASTM D-1557 y Norma AASHTO T 180). Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza el mismo molde, con un volumen de $943,3 \text{ cm}^3$, como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44,5 N (masa=4,536 kg) y tiene una caída de 457,2 mm. El número de golpes de martillo para cada capa se mantiene en 25, como en el caso de la prueba Proctor estándar.

Debido a que el esfuerzo de compactación aumenta, los resultados de la prueba Proctor modificada resulta en un aumento del peso unitario seco máximo de suelo. El aumento del peso unitario seco máximo se acompaña de una disminución del contenido de humedad óptimo. Las especificaciones dadas para las pruebas Proctor adoptadas por ASTM y AASHTO sobre el volumen del molde ($943,3 \text{ cm}^3$) y el número de golpes (25 golpes/capa) son generalmente las adoptadas para los suelos de grano fino que pasan el tamiz N°4. Sin embargo, en cada designación de prueba los tres diferentes métodos sugeridos reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de las partículas en un agregado de suelo usado para la prueba.

2.4.10. Relación de soporte de California CBR

El ensayo de CBR sirve de base al procedimiento comúnmente para dimensionar los espesores de los pavimentos, tratándose en realidad de una prueba de funcionamiento que se le hace al suelo saturado y compactado. (Herráez & Moreno, 2019).

Según Huang Yang (2013), el CBR es una medida de la resistencia relativa de un suelo a la penetración de una carga estática. Es un parámetro importante en el diseño de pavimentos y se utiliza para determinar la capacidad portante del suelo subyacente y su capacidad para soportar las cargas del tráfico. El valor de CBR depende del tipo de suelo, el contenido de humedad, la densidad y la compactación.

Tabla 2.7 Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Subrasante
5 - 8	Mala	Subrasante
8 - 20	Regular - Buena	Subrasante
20 - 30	Excelente	Subrasante
30 - 60	Buena	Subbase
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: Leiva et al. (2017)

2.5. Capa subrasante

La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que se construye entre el terreno natural allanado o explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito. La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización física-química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras.

El factor más importante en la determinación de los espesores de diseño del pavimento es la respuesta del suelo de subrasante ante las cargas del tránsito. De la calidad que tenga esta capa dependerán, en gran parte los espesores, sean de un pavimento rígido o flexible. Del estudio geotécnico se determinan las características físico-mecánicas de la subrasante, y se determinan la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo

cortante bajo las cargas del tránsito. La subrasante es la capa más importante para el diseño de una estructura de pavimentos, ya que es esta la que va a dar soporte a la estructura. (Crespo Villalaz , 2004)

Figura 2.5 Capa subrasante



Fuente: NPA.LTD

2.5.1. Propiedades de la subrasante

La Capacidad de Soporte de California (CBR) es un índice clave para medir la calidad de la subrasante. Un suelo con un CBR bajo puede requerir estabilización con materiales adicionales (como cemento, cal o cenizas) para alcanzar los valores óptimos de soporte.

Un buen drenaje es fundamental para evitar la saturación de la subrasante. El exceso de humedad reduce la capacidad portante del suelo y provoca problemas de asentamiento y deformación. Das, B. M., & Sobhan, K. (2018).

2.5.2. Caracterización de la subrasante

La caracterización de los suelos de subrasante comprende las siguientes etapas:

- Evaluación topográfica.
- Exploración de la subrasante.
- Definición del perfil y delimitación de áreas homogéneas.
- Ejecución de ensayos de resistencia sobre los suelos predominantes.
- Determinación del valor de resistencia o de respuesta de diseño para cada área homogénea.

2.5.3. Categoría de la subrasante

Se identificarán seis categorías de subrasante:

Tabla 2.8 Categoría de subrasante

Categorías de subrasante	C.B.R.
S0: Subrasante inadecuada	C.B.R. < 3%
S1: Subrasante pobre	De C.B.R. $\geq$ 3% a C.B.R. < 6%
S2: Subrasante regular	De C.B.R. $\geq$ 6% a C.B.R. < 10%
S3: Subrasante buena	De C.B.R. $\geq$ 10% a C.B.R. < 20%
S4: Subrasante muy buena	De C.B.R. $\geq$ 20% a C.B.R. < 30%
S5: Subrasante excelente	C.B.R. < 30%

Fuente: Diseño Estructural de Pavimentos para Caminos

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 3%. En caso de ser menor, se procederá a eliminar material inadecuado o modificar el material estabilizado a fin de que cumpla con los requerimientos y características adecuadas.

2.6. Problemas en la conformación de subrasante con suelos limosos

Los suelos limosos presentan varios desafíos en la construcción de subrasantes debido a sus características geotécnicas. Uno de los problemas más significativos es su baja capacidad de soporte (CBR), lo que los hace inadecuados para soportar cargas pesadas sin deformarse o asentarse excesivamente. Además, los suelos limosos tienen una alta susceptibilidad a la humedad, lo que significa que retienen agua sin volverse plásticos,

pero experimentan cambios significativos en su volumen y resistencia cuando se saturan. Esta condición puede llevar a una pérdida de estabilidad y a la reducción de su capacidad portante, generando problemas de consolidación y asentamiento diferencial bajo cargas estáticas. En proyectos de infraestructura vial, el uso de suelos limosos como subrasante sin un adecuado tratamiento o estabilización puede provocar fallos prematuros en las capas superiores del pavimento, así como un deterioro acelerado de la vía. (Coduto, Yeung, & Kitch, 2011).

2.7. Estabilización de suelos

La estabilización tiene como finalidad procurar por medio de los agentes estabilizantes, mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos y lograr que este sea apto para el proceso constructivo. (Fajardo & Vásquez, 2014).

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subbase o base granular tratada (con cemento o con cal o con asfalto, etc.). (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

El objeto de la estabilización es variar sus condiciones elasto-resistentes y de durabilidad para mejorar su respuesta frente a la acción deformante y destructora de las cargas del tránsito, y de los factores climáticos. En palabras más simples es modificar algunas propiedades naturales del suelo, para poder utilizarlo en reemplazo de otros materiales escasos o demasiado costosos. El campo de la aplicación de la estabilización de suelos es muy amplio y depende entre otras cosas, de la clasificación del camino (subrasante, subbase y base). (S/Rev, 2004).

2.7.1. Criterios para establecer la estabilización de suelos

El diseño de estabilizaciones con agentes estabilizantes, consiste en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con la cual se determina el tipo y cantidad de agente

estabilizante, así como el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño obviamente depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. (Garnica, Pérez, Gómez, & Obil, 2002).

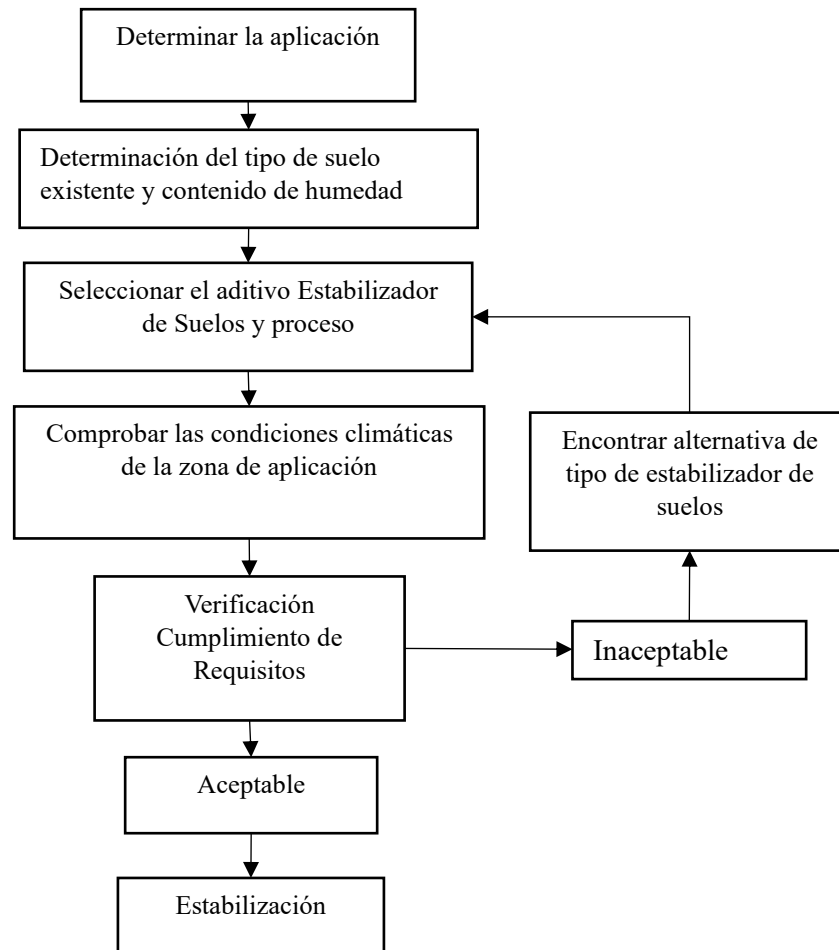
Para establecer un tipo de estabilizante de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, las arenas limosas o arcillosas. (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014).

Los factores que se consideran al seleccionar el método más conveniente de estabilización son:

- Tipo de suelo a estabilizar.
- Uso propuesto del suelo estabilizado.
- Tipo de aditivo estabilizador de suelos.
- Experiencia en el tipo de estabilización que se aplicará.
- Disponibilidad del tipo de aditivo estabilizador.
- Disponibilidad del equipo adecuado.
- Costos comparativos.

La estabilización de suelos es una técnica geotécnica utilizada para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, haciéndolo más apto para soportar cargas estructurales. Los criterios para establecer la necesidad de estabilización de un suelo dependen de una serie de factores técnicos y económicos que se deben evaluar para garantizar la eficiencia y durabilidad de la infraestructura.

Gráfica 2.6 Criterios para estabilización de suelos



2.7.2. Métodos de estabilización de suelos

El método de estabilización a utilizar depende directamente del tipo de suelo y de la propiedad que se pretenda modificar para que cumpla con las condiciones necesarias.

2.7.3. Estabilización mecánica

Con este tipo de estabilización se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia, es decir obtener una buena compactación y densificación del material portante. (Fajardo & Vásquez, 2014).

Braja M. Das (2016) indica que, la estabilización mecánica implica metodologías que mejoran las propiedades de ingeniería de los suelos seleccionados sin la adición de agentes u otras energías de unión de partículas. En otras palabras, no hay efectos químicos o de unión incluidos en esta metodología.

2.7.4. Estabilización física

La estabilización física busca en un suelo aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material o ajustes a la banda granulométrica del mismo, genera en el material resultante mayor fricción entre partículas y cohesión de la masa del suelo.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las gravas y arenas tienen una alta fricción interna lo que hacen soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser firme de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

2.7.5. Estabilización química

Es la aplicación de un agente estabilizador químico que tiene como objetivo estabilizar el suelo al mezclarse con este. Estabilización química, que se refiere al cambio de las propiedades del suelo por efectos físico-químicos de superficie mediante la adición de cal, cemento, asfalto, cloruro de sodio, impermeabilizantes entre otros. (Fajardo & Vásquez, 2014).

La estabilización química implica la aplicación de aditivos químicos para mejorar el comportamiento de los suelos. Se utiliza para mejorar la manejabilidad del suelo, haciendo el material más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión-contracción. (Braja M. Das, 2016).

Las sustancias químicas usadas como agentes estabilizadores deben de tener características tales como:

- **Cal:** Ayuda a los suelos arcillosos a reducir su plasticidad.
- **Cemento portland:** La firmeza de los suelos aumenta y se emplea arenas o gravas finas.
- **Productos asfálticos:** Material triturado sin cohesión.
- **Cloruro de sodio:** Impermeabilizan y reducen los polvos.
- **Cloruro de calcio:** Impermeabilizan y reducen los polvos.
- **Escorias de fundición:** La carpeta asfáltica para darle mayor dureza, impermeabilizarla y aumenta su vida útil. Para la estabilización de un suelo se espera lograr una estabilidad volumétrica, resistencia mecánica.
- **Polímeros:** La carpeta asfáltica para darle mayor dureza, impermeabilizarla y aumenta su vida útil. Para la estabilización de un suelo se espera lograr una estabilidad volumétrica, resistencia mecánica.
- **Hule de neumáticos:** La carpeta asfáltica para darle mayor dureza, impermeabilizarla y aumenta su vida útil. Para la estabilización de un suelo se espera lograr una estabilidad volumétrica, resistencia mecánica.

2.8. Ventajas de los suelos estabilizados

Entre las ventajas pueden citarse. IECA et al. (2012)

2.8.1. Ventajas técnicas

- Permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características hasta el grado deseado.
- Proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanada, con lo que aumenta la vida de servicio del firme.
- Aseguran la estabilidad de la explanada, tanto por su insensibilidad al agua y a la helada, evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión.
- Disminuyen las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello su vida útil.
- Pueden permitir el paso inmediato del tráfico de obra.

2.8.2. Ventajas económicas y ambientales

- Un mayor empleo de suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas. Esto es particularmente interesante por las restricciones actuales para el uso de préstamos y vertederos. En ocasiones incluso no existen suelos aprovechables a una distancia aceptable.
- Un ahorro en el transporte de materiales.
- Un acortamiento de los plazos de ejecución, dado que el proceso de incorporación del conglomerante y de mezcla del suelo con el mismo se realiza con equipos específicos de alto rendimiento.

Aunque las ventajas ambientales están ligadas a las económicas, las primeras van cobrando preponderancia y tienen que ser atendidas con prioridad.

2.9. Estabilización del suelo con cenizas

La estabilización de suelos con cenizas se refiere a la mejora de las propiedades geotécnicas del suelo mediante la adición de cenizas volantes, cenizas de lodo residual, u otros subproductos industriales que contienen óxidos de sílice, aluminio y calcio. Las cenizas actúan como agentes estabilizantes al reaccionar con el agua y las partículas del suelo, formando compuestos cementantes que aumentan la rigidez y la capacidad de soporte del suelo. Este proceso es especialmente efectivo en suelos finos, como los limosos y arcillosos, que tienden a tener una baja capacidad portante y alta susceptibilidad a la humedad. Das, B. M., & Sobhan, K. (2018)

2.10. Planta de tratamiento de aguas residuales

PTAR: (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) denominada así porque dentro de su infraestructura se realiza proceso de depuración de las aguas residuales, que al completar el proceso del tratamiento estas puedan ser vertidas a los cuerpos de agua y serán aptas para el uso agrícola y otros usos, lo cual es una parte importante en la sostenibilidad del desarrollo de esta área, porque no solo se hace uso del agua ya tratada sino que también de sus derivados como son los lodos que al ser tratados y estabilizados nos proporcionan biosólidos, el cual es una materia rica en nutrientes para el suelo, cabe mencionar que

también durante el proceso se produce el gas metano el cual puede ser ampliamente aprovechado. (Collivignarelli, 2019)

Figura 2.6 Planta de tratamiento de aguas residuales (Tarija)



Fuente: Elaboración propia

2.11. Tratamiento de lodos residuales

El tratamiento de los lodos residuales es un proceso clave en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), cuyo objetivo principal es gestionar y reducir los sólidos suspendidos y contaminantes extraídos del agua durante el proceso de depuración. Los lodos residuales son una mezcla de materia orgánica, inorgánica, microorganismos, y contaminantes que, si no se tratan adecuadamente, pueden representar un problema ambiental. A continuación, se describen las principales fases y métodos empleados en el tratamiento de lodos residuales. Metcalf, L., & Eddy, H. P. (2014).

2.11.1. Espesamiento

El espesamiento es la primera etapa del tratamiento de los lodos y se realiza para reducir su volumen. Este proceso implica la eliminación parcial del agua contenida en los lodos, utilizando equipos como tanques de gravedad, espesadores o centrífugas. El objetivo es

aumentar la concentración de sólidos en los lodos, lo que facilita las etapas posteriores del tratamiento.

2.11.2. Estabilización

La estabilización tiene como finalidad reducir el contenido de materia orgánica y eliminar patógenos presentes en los lodos. Hay dos métodos principales de estabilización:

- Estabilización Aeróbica: Los lodos se airean para favorecer la degradación biológica de la materia orgánica mediante microorganismos que requieren oxígeno. Este método es más rápido, pero consume más energía.
- Estabilización Anaeróbica: Se realiza en ausencia de oxígeno, donde microorganismos anaeróbicos descomponen la materia orgánica, generando biogás como subproducto, que puede ser utilizado como fuente de energía renovable.

2.11.3. Deshidratación

La deshidratación reduce aún más el contenido de agua en los lodos mediante equipos especializados como filtros de prensa, centrifugas, o lechos de secado. Este proceso es crucial para hacer los lodos más manejables y para reducir los costos de transporte y disposición final.

2.11.4. Incineración

En muchos casos, los lodos deshidratados se someten a incineración para reducir significativamente su volumen y eliminar la materia orgánica restante. La incineración convierte los lodos en cenizas, que pueden ser reutilizadas en aplicaciones como la estabilización de suelos. Este proceso también permite la generación de energía a partir del calor producido.

2.11.5. Disposición

Los lodos tratados pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios o reutilizados en diversas aplicaciones. Entre las opciones de reutilización se incluyen la aplicación en suelos agrícolas, debido a su contenido en nutrientes, y el uso de cenizas de lodos como material

de construcción o estabilizante de suelos en proyectos de infraestructura. Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003).

Figura 2.7 Lodo residual



Fuente: Elaboración propia

2.12. Composición química de la ceniza de lodos residuales

La composición química de la ceniza de lodos residuales puede variar en función de los procesos de tratamiento aplicados y las características del agua que se ha tratado en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, la ceniza de lodos residuales suele contener los siguientes componentes típicos: Das, B. M., & Sobhan, K. (2018)

Óxido de calcio (CaO): Este componente es responsable de las propiedades cementantes de la ceniza. Contribuye a la estabilización de suelos al reaccionar con el agua y otros compuestos del suelo, formando productos que mejoran la rigidez y resistencia del suelo.

Óxido de silicio (SiO₂): Es uno de los principales componentes de la ceniza y actúa como un aglutinante que ayuda a mejorar la cohesión y la resistencia a la compresión del suelo. El óxido de silicio también participa en la formación de compuestos cementantes cuando se mezcla con otros estabilizantes.

Óxido de aluminio (Al_2O_3): Este compuesto refuerza la durabilidad y resistencia del suelo estabilizado, incrementando su capacidad de carga y su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos.

Óxidos de hierro (Fe_2O_3): Los óxidos de hierro aportan estabilidad adicional y resistencia a las mezclas de suelo, mejorando la integridad estructural. Además, tienen una influencia positiva en las propiedades térmicas del suelo.

Óxido de magnesio (MgO): Contribuye a la reactividad de la ceniza en los procesos de estabilización y mejora la resistencia del suelo. Al igual que el óxido de calcio, puede reaccionar con el agua y otros componentes minerales del suelo para mejorar sus propiedades mecánicas.

2.13. Comparación de la ceniza de lodo residual con estabilizantes convencionales

En el mejoramiento de suelos finos se emplean diversos estabilizantes químicos, entre los cuales destacan la cal, el cemento y las cenizas volantes, ampliamente utilizados por su capacidad para reducir la plasticidad, mejorar la compactación y aumentar la resistencia mecánica del suelo. La cal es uno de los aditivos más usados debido a su efectividad en suelos arcillo-limosos; sin embargo, su producción requiere un elevado consumo energético y genera emisiones de CO_2 . El cemento, aunque ofrece mayores incrementos en resistencia, implica también un costo económico considerable y una huella ambiental alta. Las cenizas volantes, por su parte, poseen propiedades puzolánicas valiosas, pero su disponibilidad local suele ser limitada.

En contraste, la ceniza de lodo residual proveniente de una PTAR constituye un subproducto de fácil disposición. Su contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y CaO le otorga actividad puzolánica comparable a la de otros aditivos convencionales, permitiendo mejorar propiedades del suelo que favorecen su estabilización. Esta característica técnica se suma a un beneficio ambiental directo: el uso de la ceniza evita la acumulación del lodo residual, reduciendo el impacto asociado a su disposición final.

2.14. Ventajas del uso de la ceniza de lodo residual frente a estabilizantes químicos tradicionales

La incorporación de ceniza de lodo residual presenta ventajas significativas frente a estabilizantes tradicionales como la cal y el cemento. Al tratarse de un subproducto generado localmente en la PTAR del barrio San Blas, su disponibilidad es inmediata y su requerimiento económico es menor, puesto que no involucra procesos industriales adicionales. En contraste, la cal y el cemento requieren producción, transporte y adquisición, lo que incrementa su demanda económica.

Desde una perspectiva ambiental, la ceniza de lodo residual contribuye a reducir los impactos asociados a la acumulación y disposición final del lodo, al aprovechar un material que de otro modo requeriría gestión adicional. La cal y el cemento, pese a su eficacia técnica, poseen una elevada huella de carbono debido a los procesos de calcinación y manufactura involucrados en su elaboración.

En términos técnicos, la ceniza contiene óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 y CaO que permiten desarrollar reacciones puzolánicas capaces de mejorar la capacidad de soporte del suelo, alcanzando resultados comparables a los obtenidos con la cal y el cemento, pero mediante el aprovechamiento de un recurso residual con menor demanda energética.

En conjunto, estas características posicionan a la ceniza de lodo residual como una alternativa técnica, económica y ambientalmente sostenible frente a los estabilizantes convencionales utilizados en la región.

A continuación, se expone la comparación de las ventajas asociadas al uso de ceniza de lodo residual frente a estabilizantes como la cal y el cemento, con el propósito de evidenciar sus diferencias en términos de desempeño, disponibilidad y requerimientos ambientales.

Tabla 2.9 Ventajas de la ceniza frente a otros estabilizantes

Criterio	Ceniza de lodo residual	Cal	Cemento
Costo del material	Muy bajo (subproducto local, bajo costo de fabricación)	Medio (requiere extracción y calcinación)	Alto (proceso industrial costoso)
Disponibilidad local	Alta (proviene de la PTAR San Blas)	Media (debe adquirirse a proveedores)	Media-baja (mayor dependencia externa)
Impacto ambiental	Muy bajo: valoriza un residuo y reduce su disposición final	Medio-alto: proceso de calcinación libera CO ₂	Alto: alta huella de carbono por fabricación
Reactividad puzolánica	Sí (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO)	Sí (reacciones de hidratación y floculación)	Sí, vía formación de geles cementantes
Mejora del Índice de Plasticidad	Buena reducción	Muy buena reducción	Buena reducción
Incremento del CBR	Moderado (según dosificación)	Moderado	Alto
Beneficio en gestión de residuos	Excelente (reduce acumulación de lodo y su mal uso como fertilizante)	No aporta	No aporta
Valorización de residuos	Muy alto (transforma un residuo en recurso útil)	Bajo	Muy bajo
Ventaja general	Alternativa sostenible, económica, segura y técnicamente viable	Efectiva, pero con mayor impacto ambiental y costo	Muy eficaz, pero costosa y con alta huella ambiental

Fuente: Elaboración propia

2.15. Antecedentes internacionales del uso de ceniza de lodo residual

En Estados Unidos, Cosentino, Kalajian y Amini evaluaron la incorporación de ceniza de lodo residual en suelos finos utilizados como subrasante, demostrando mejoras en la resistencia y en la reducción de la plasticidad. De manera similar, Beeghly reportó resultados favorables en aplicaciones geotécnicas de biosólidos tratados térmicamente en proyectos viales. (Cosentino, 1994) (Beeghly, 2003) En Europa, investigaciones

desarrolladas en el Reino Unido, han analizado la viabilidad de la ceniza de biosólidos como material puzolánico para capas de soporte en carreteras, destacándose los trabajos de Babatunde y Zhao quienes evaluaron el comportamiento mecánico y ambiental del material en aplicaciones constructivas. (Akintunde Babatunde, 2007)

En la región del Mediterráneo oriental, particularmente en Turquía, se han desarrollado investigaciones recientes orientadas a optimizar el uso de lodos de depuradora y ceniza de lodos de depuradora en la estabilización de suelos arcillosos con cemento. Estos estudios evalúan parámetros de durabilidad, resistencia mecánica y microestructura, demostrando que la incorporación controlada de estos subproductos de plantas de tratamiento de aguas residuales puede mejorar de manera significativa el desempeño geotécnico del suelo tratado.

Estos antecedentes muestran que el uso de ceniza de biosólidos en carreteras es una línea de investigación activa y extendida en distintos continentes, lo que respalda la pertinencia y relevancia de la presente investigación aplicada a condiciones locales.

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3. Inspección visual del sitio de levantamiento de muestras

Antes de la extracción de las muestras de suelo se realizó una inspección visual en la zona correspondiente a los barrios Cañadas II y Las Flores, con el objetivo de definir los puntos de muestreo.

Esta inspección permitió identificar los sitios más adecuados para la obtención de muestras, garantizando que los puntos seleccionados presentaran características limosas acordes con los criterios geotécnicos. Este procedimiento resulta fundamental, dado que la investigación se orienta al análisis y estabilización de suelos limosos conforme a los objetivos establecidos.

3.1. Criterios metodológicos

3.1.1. Métodos

La investigación emplea el método experimental, el cual consiste en manipular deliberadamente la variable independiente, con el propósito de observar y medir los efectos que esta produce en las propiedades físicas y mecánicas del suelo limoso. Este método permite establecer relaciones causa–efecto mediante la preparación de mezclas controladas y la aplicación sistemática de ensayos de laboratorio que cuantifican parámetros como los límites de consistencia, la compactación y la capacidad de soporte (CBR).

3.1.2. Técnicas

Para la obtención y registro de datos se emplean técnicas de observación científica directa durante la identificación y extracción de las muestras de suelo, garantizando su representatividad. Complementariamente, se aplican técnicas de ensayo de laboratorio bajo normas estandarizadas para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural y de las mezclas con diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual. Los ensayos realizados permiten analizar la influencia del aditivo en el comportamiento del suelo.

3.1.3. Unidad de estudio

La unidad de estudio está constituida por las mezclas de suelo limoso y ceniza de lodo residual preparadas en diferentes porcentajes de dosificación. Estas mezclas se analizan en laboratorio con el propósito de evaluar las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

3.1.4. Población

La población está constituida por los suelos limosos presentes en los barrios Cañadas II y Las Flores, ubicados en la ciudad de Tarija. Estos suelos representan materiales con características físico-mecánicas desfavorables, sobre los cuales se plantea evaluar la influencia de la ceniza de lodo residual en procesos de estabilización.

3.1.5. Muestra

La muestra está conformada por dos suelos limosos de baja plasticidad seleccionados a partir de los puntos de extracción previamente identificados. Estas muestras fueron recolectadas, preparadas y analizadas en su estado natural, y posteriormente combinadas con cuatro dosificaciones de ceniza de lodo residual para su análisis en laboratorio.

3.1.6. Selección de la técnica de muestreo

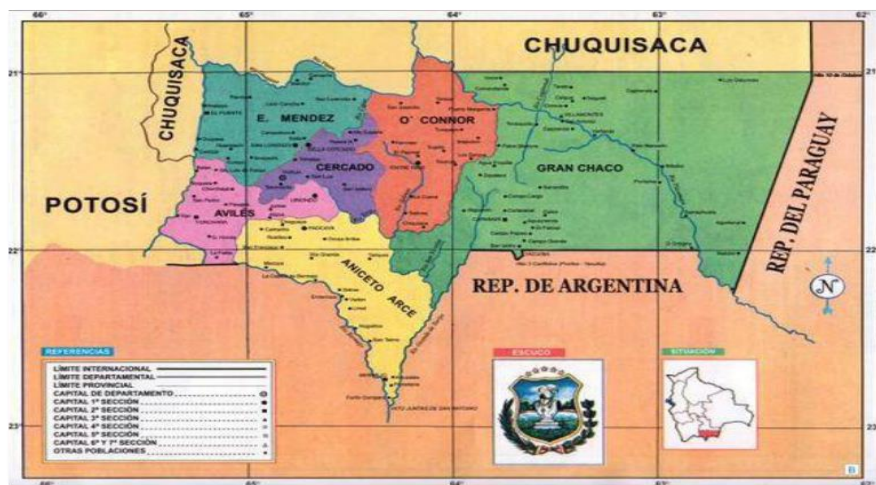
El muestreo empleado en la presente investigación es de carácter no probabilístico, dado que la selección de los puntos de extracción no se realizó mediante procedimientos aleatorios, sino en función de criterios geotécnicos y del número de ensayos requeridos para cumplir los objetivos de la investigación. La elección de los sitios de muestreo respondió a la necesidad de obtener materiales representativos del suelo limoso presente en el área seleccionada, asegurando que las muestras recolectadas permitieran analizar adecuadamente su comportamiento natural y estabilizado.

3.2. Ubicación del proyecto

El proyecto se desarrolla en la ciudad de Tarija, capital de la provincia Cercado, ubicada al sur de Bolivia, situada a una altitud aproximada de 1834 msnm.

Está ubicado al extremo sur-sureste del país, limitando al este con la República del Paraguay al sur con la República Argentina, limita al norte y noroeste con el Departamento de Chuquisaca, al suroeste con el Departamento de Potosí.

Figura 3.1 Departamento de Tarija-Geografía



Fuente Google imágenes

3.2.1. Características de la zona de seleccionada

El área considerada en esta investigación se encuentra ubicada en el departamento de Tarija, ubicada al sur del país de Bolivia, en la capital del departamento, provincia Cercado, el muestreo se llevó a cabo en dos barrios de la ciudad en mención, los cuales son: Cañadas II y Las flores.

3.2.2. Ubicación de la zona de muestreo

Tabla 3.1 Coordenadas de los puntos de extracción de muestras

Coordenadas UTM			
Muestras	Zona	Coordenadas este	Coordenadas norte
P-01	20 K	319105,00 m E	7622357,00 m S
P-02	20 K	319251,00 m E	7622279,00 m S
P-03	20 K	319567,00 m E	7621879,00 m S
P-04	20 K	319928,00 m E	7621844,00 m S
P-05	20 K	320102,00 m E	7621832,00 m S

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2 Ubicación de los puntos de extracción de muestras



Fuente: Google Earth

Figura 3.3 Ubicación de los puntos de extracción de muestras



Fuente: Google Earth

3.2.3. Ubicación de la planta generadora del lodo residual

La muestra de lodo residual se obtuvo de la planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en el barrio de San Blas.

Tabla 3.2 Coordenadas de la planta de tratamiento

Coordenadas UTM			
Muestra	Zona	Coordenadas este	Coordenadas norte
Única	20 K	323014,47 m E	7613726,36 m S

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4 Ubicación de PTAR



Fuente: Google Earth

3.2.4 Realización del muestreo

La obtención de las muestras de suelo se realizó mediante excavaciones controladas en cada uno de los puntos previamente definidos dentro del área de muestreo, alcanzando una profundidad aproximada de 50 cm, lo que permitió obtener muestras representativas y libres de contaminación superficial, como materia orgánica o basura. Las excavaciones se realizaron con herramientas manuales (picota y pala), garantizando una extracción cuidadosa del material y evitando la alteración de sus características naturales.

La cantidad de suelo recolectado en cada punto se definió en función de los ensayos requeridos para la caracterización del material natural y para su posterior análisis con diferentes dosificaciones de ceniza de lodo residual, asegurando un volumen suficiente para el desarrollo completo de la investigación.

Una vez clasificados los suelos provenientes de los distintos puntos de muestreo, se seleccionaron dos muestras representativas, correspondientes a índices de plasticidad distintos ($IP = 10$ e $IP = 7$), con el fin de analizar el comportamiento del suelo limoso frente al proceso de estabilización considerando diferentes niveles de plasticidad dentro del mismo tipo de suelo.

Las muestras extraídas fueron almacenadas en bolsas de nylon herméticas, conservando su humedad natural durante el traslado al Laboratorio de Mecánica de suelos de la Universidad, donde se realizó los ensayos correspondientes.

3.3. Descripción y preparación del material estabilizante

3.3.1. Lodo residual

El lodo residual empleado en la investigación proviene de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicada en el barrio San Blas. Para la obtención del material se presentó una solicitud formal a la institución COSAALT RL, la cual fue debidamente aprobada.

Posteriormente, se realizó la extracción del lodo. Este fue recolectado durante el proceso de evacuación de los digestores de la planta, garantizando la ausencia de impurezas externas. El lodo residual fue colocado de inmediato en recipientes herméticos, asegurando condiciones adecuadas para su traslado y posterior disposición.

Figura 3.5 Lodo residual



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Pretratamiento de los lodos residuales

Antes de proceder con la incineración de los lodos residuales, se llevó a cabo un pretratamiento de deshidratación con el fin de optimizar el proceso. La deshidratación se realizó mediante secado solar, aprovechando la radiación solar y la circulación del aire para evaporar el agua contenida en los lodos, lo que contribuyó a la reducción de su volumen. Para ello, los lodos fueron distribuidos en una capa delgada sobre una superficie, facilitando la evaporación de la humedad mediante la exposición al calor y al viento.

Figura 3.6 Deshidratación de lodos



Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Proceso de incineración de lodo residual

Para la obtención de la ceniza a partir de los lodos residuales, se empleó un horno mufla, un equipo utilizado en laboratorios y plantas de tratamiento de residuos. Este dispositivo permite realizar la incineración de los lodos a temperaturas controladas (500°C), asegurando un proceso eficiente. La mufla es fundamental para mantener una temperatura constante, lo cual es crucial para la completa eliminación de la materia orgánica y la reducción significativa del volumen de los lodos.

Figura 3.7 Incineración en la mufla



Fuente: Elaboración propia

Para evaluar sus propiedades y determinar su idoneidad como estabilizante de suelos, se llevó a cabo un análisis físico-químico detallado de esta ceniza en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), según se detalla en el ANEXO VIII. Este análisis permitió identificar las características específicas de la ceniza que pueden influir en su comportamiento al combinarse con suelos limosos y aportar a la mejora de sus propiedades.

Tabla 3.3 Composición química de la ceniza de lodo residual

Información de la muestra			
Parámetro	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Calcio total	Espectrometría de AA	mg/100g	371
Hierro total	Espectrometría de AA	mg/100g	1229
pH	Potenciometría	-----	7,14
Sodio	Espectrometría de AA	mg/100g	52,5
Magnesio total	Espectrometría de AA	mg/100g	346

Fuente: Laboratorio CEANID

3.4. Caracterización de los materiales

Los ensayos de caracterización son fundamentales para determinar las condiciones y propiedades iniciales del material a tratar y, de igual manera, conocer las propiedades del material que será incorporado. En este sentido, se recurre a pruebas de laboratorio destinadas a establecer las características del suelo natural y de la ceniza de lodo residual, insumos que conforman la base de la investigación y permiten contar con criterios adecuados sobre el comportamiento del suelo estabilizado. Para la caracterización se requieren los ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizado, determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, compactación y capacidad portante mediante el ensayo CBR.

3.5. Ensayo de caracterización de suelos naturales

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos para la caracterización del suelo sin tratar, es decir, el suelo sin el agente estabilizador (ceniza de lodo residual). Se realizará los siguientes ensayos:

Tabla 3.4 Ensayos para caracterizar el suelo

Caracterización	Ensayo	Normativa
Física	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 - AASHTO T88
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Mecánica	Ensayo de compactación (método Proctor Modificado)	ASTM D1557 AASHTO T180
	Determinación de la relación del valor de soporte del suelo (CBR)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia

3.5.1. Contenido de humedad de la muestra (ASTM D2216)

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas.

Figura 3.8 Determinación del contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5 Resumen de resultados del contenido de humedad

Muestra		Contenido de humedad %
Cañadas II	P-01	5,07
	P-02	4,67
	P-03	4,27
Las flores	P-04	5,84
	P-05	6,76

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Análisis granulométrico (ASTM D422- AASHTO T88)

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en un suelo. El ensayo de análisis granulométrico por tamizado se realizó mediante el método del lavado en el cual se pesa entre 500-1000 gr como peso total, se procede a realizar el lavado por la malla número 200 de acuerdo a la norma AASHTO-T88. Después que el suelo está seco se pesa y se procede al tamizado por la malla N°4, N°10, N° 40 y 200.

Figura 3.9 Proceso del ensayo granulométrico



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la granulometría pueden expresarse en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz, obtenidos de acuerdo a lo calculado en porcentaje del retenido en cada tamiz.

Tabla 3.6 Resumen de resultados del análisis granulométrico

Resultado granulométrico					
Tamices	% Que pasa del total				
	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05
3"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº 10	100,00	99,90	100,00	100,00	100,00
Nº 40	99,18	99,88	99,41	98,82	99,79
Nº 200	89,21	86,56	87,89	93,95	94,29

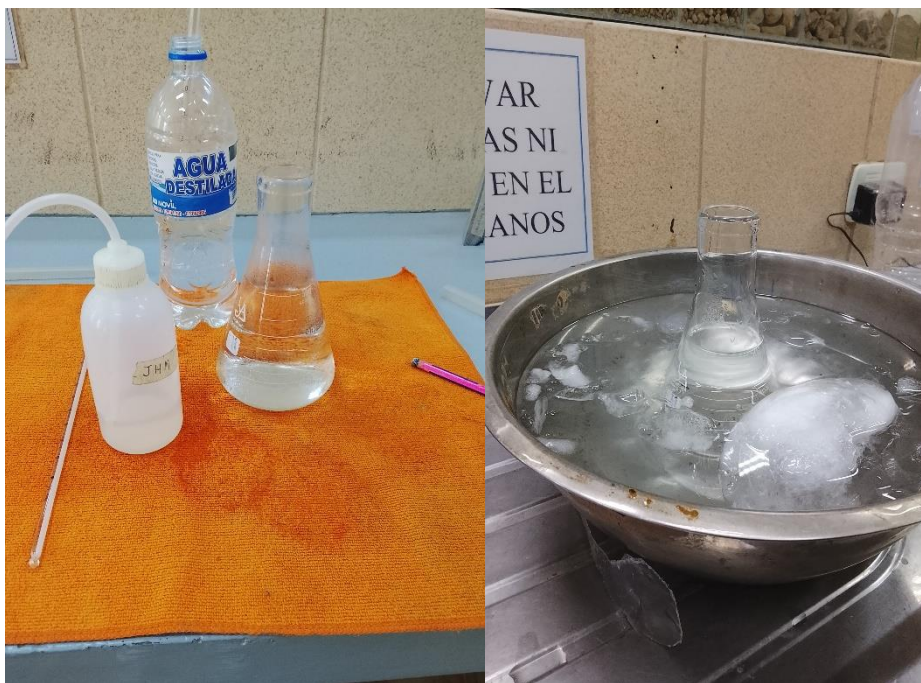
Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Calibración de frasco volumétrico

Los frascos volumétricos de vidrio, cuando son expuestos a diferentes temperaturas, sufren ligeros cambios en su volumen, 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. La calibración del frasco será de utilidad para realizar los cálculos del peso específico relativo del suelo.

Figura 3.10 Calibración del frasco



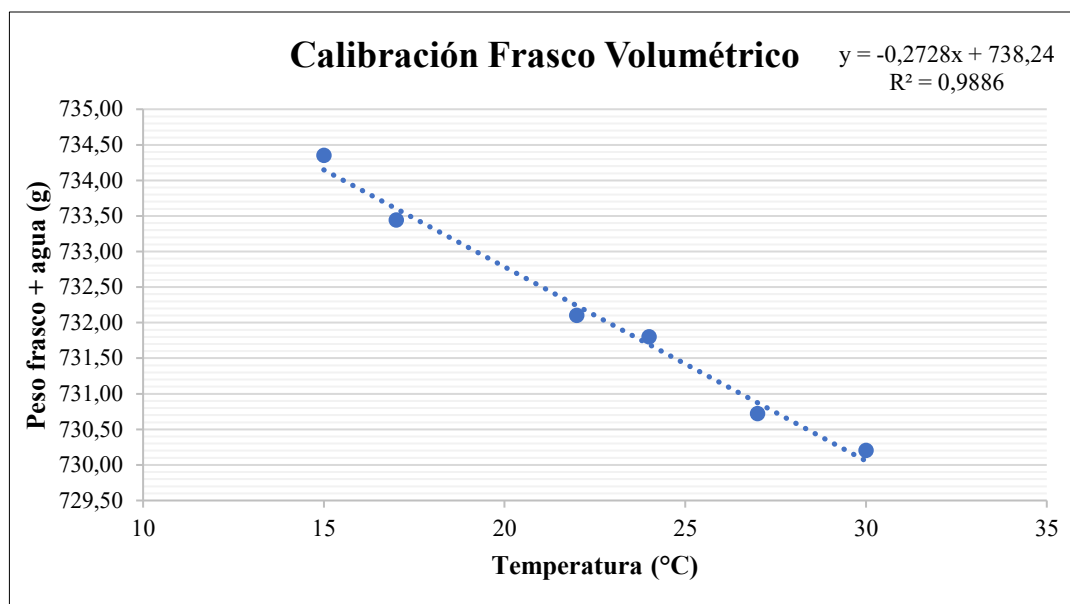
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Resultado de la calibración del frasco volumétrico

N°	Muestra 1	
	Temp °C	Peso (g)
1	30	730,20
2	27	731,72
3	24	731,80
4	22	732,10
5	17	733,40
6	15	734,35

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1 Curva de calibración del frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Peso específico (ASTM D854-AASHTO T100)

El peso específico se define como la relación entre el peso de un volumen determinado de partículas sólidas de un material y el peso de un volumen equivalente de agua a una temperatura específica, normalmente a 20 °C.

Para la ejecución del ensayo, se tomaron 80 gramos de material, previamente tamizado a través del tamiz N°10.

La muestra se colocó en un plato y se le agregó la cantidad de agua necesaria para diluir completamente el material, asegurando la eliminación de todo el aire atrapado entre las partículas. Posteriormente, se agitó la mezcla durante 4 minutos, logrando una pasta homogénea.

Posteriormente se procedió con el ensayo como indica la respectiva norma.

Es importante resaltar que, para los ensayos, se utilizó el mismo frasco volumétrico.

Figura 3.11 Determinación del peso específico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Resultados del ensayo de peso específico

N°	Muestra M-01		Muestra M-02	
	Temp °C	Peso (g)	Temp °C	Peso (g)
1	30,00	2,83	29,00	2,74
2	24,00	2,72	26,00	2,67
3	19,00	2,63	21,00	2,56
4	16,00	2,54	16,00	2,46
Promedio		2,68	Promedio	2,61

Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D422)

Mediante este ensayo de laboratorio determinamos el porcentaje de arcillas y limos contenidos en una determinada muestra.

Para este ensayo, se utilizaron muestras de 50-60 gramos de ambos suelos, consistiendo en material que ha pasado por el tamiz N°200. Antes de proceder con el análisis, estas muestras se saturaron con defloculante durante 24 horas para asegurar una completa separación de las partículas.

Posteriormente, las muestras saturadas se vertieron en una probeta, que se llenó con agua destilada. Luego se siguieron los pasos especificados por la norma.

Figura 3.12 Granulometría – hidrómetro



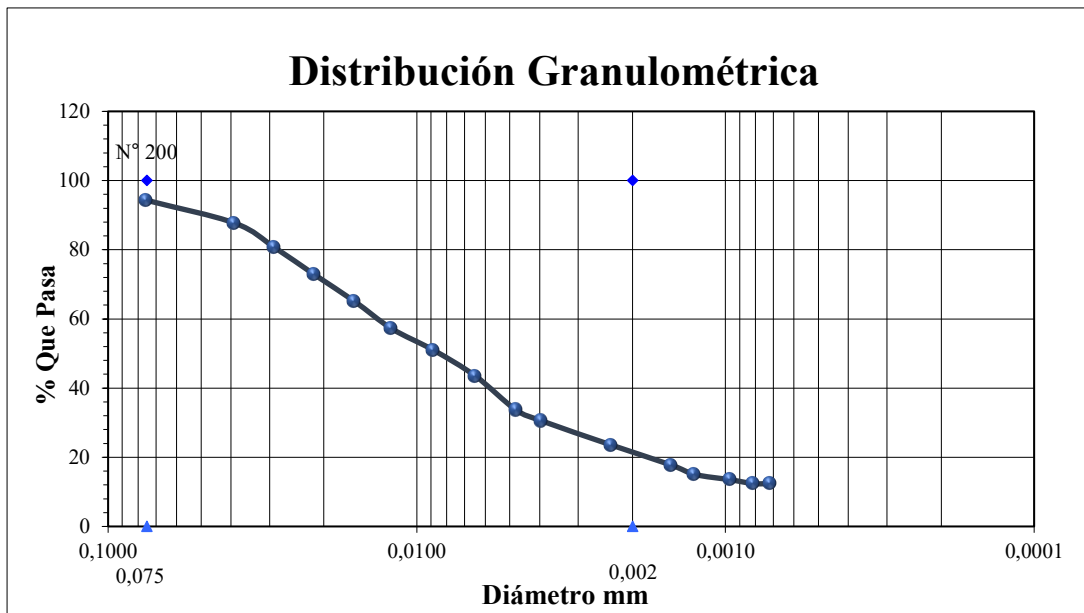
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Resultado granulométrico M-01 y M-02

M-01		M-02	
Diam. Partícula mm	% Mas Fino	Diam. Partícula mm	% Mas Fino
0,075	94,29	0,075	87,89
0,0389	87,69	0,039	82,29
0,0289	80,66	0,029	75,65
0,0215	72,85	0,0218	66,05
0,0159	65,04	0,0164	56,45
0,0121	57,22	0,0149	52,02
0,0088	50,98	0,0126	46,12
0,0065	43,48	0,0092	38,74
0,0048	33,64	0,0068	31,35
0,0039	30,51	0,0049	25,45
0,0023	23,48	0,0019	16,44
0,0015	17,70	0,0017	14,82
0,0013	15,05	0,0016	13,34
0,001	13,49	0,0013	8,17
0,0008	12,39	0,0006	8,17
0,0007	12,39	0,0004	8,17

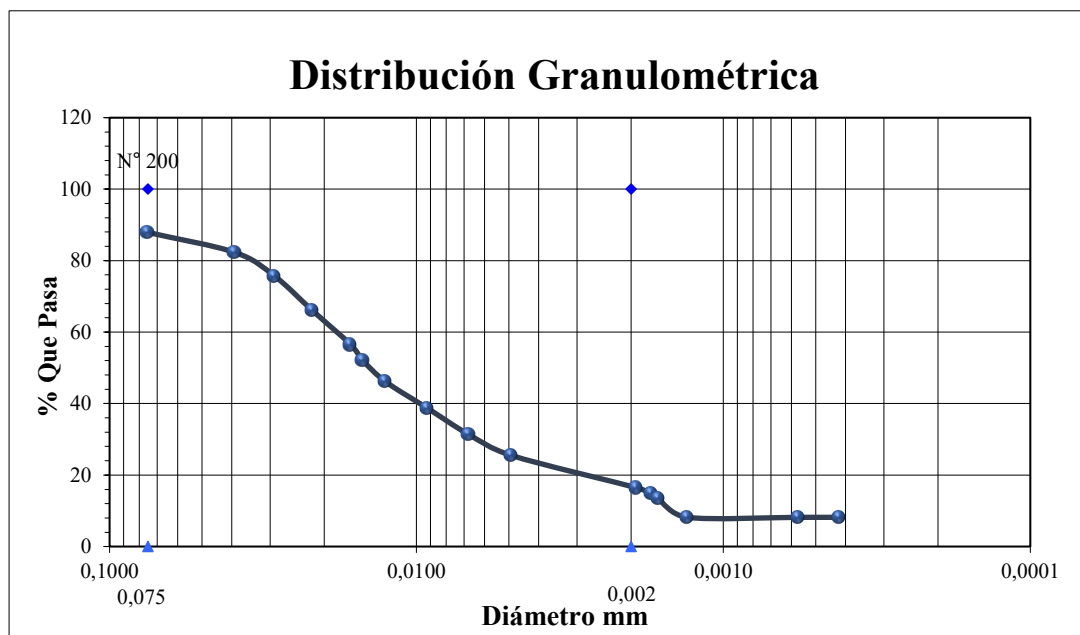
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2 Distribución granulométrica M-01



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3 Distribución granulométrica M-02



Fuente: Elaboración propia

3.5.6. Determinación del límite líquido (ASTM D4318 - AASHTO T89)

Se determina mediante el método de la cuchara de casa grande. El ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que se puede contener en una pasta formado de más o menos 150 g de suelo seco que haya pasado el tamiz N°40. Para ello, se coloca sobre el mencionado artefacto y se acciona el mecanismo de este, contándose el número de golpes necesario para cerrar un surco (realizado previamente con un ranurador normalizado) en una longitud alrededor de 12 mm. El ensayo se dará por válido cuando se obtengan determinaciones entre 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 golpes. La humedad correspondiente al límite líquido será la correspondiente a 25 golpes, y se determinará interpolando en una gráfica normalizada las cuatro determinaciones obtenidas experimentalmente.

Figura 3.13 Proceso para determinar el límite líquido del suelo



Fuente: Elaboración propia

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

Porcentaje de contenido de humedad con que un suelo cambia al disminuir su humedad de la consistencia plástica a la semisólida, o, al aumentar su humedad, de la consistencia semisólida a la plástica. El límite plástico es el límite inferior del estado plástico. El índice de plasticidad es la diferencia del porcentaje de humedad del límite líquido y el límite plástico del mismo material analizado.

Figura 3.14 Proceso para determinar el límite plástico del suelo



Fuente: Elaboración propia

Resumen de resultados:

Tabla 3.10 Resumen de resultados para los límites de consistencia

Cañadas II y Las Flores					
Descripción	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05
Límite líquido (%)	30	27	28	29	31
Límite plástico (%)	22	19	21	20	21
Índice de plasticidad (%)	8	7	7	9	10

Fuente: Elaboración propia

3.5.8. Clasificación del suelo

En función a la granulometría, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se determina la clasificación del suelo en base a la normativa sistema de clasificación AASHTO.

Resultados:

Tabla 3.11 Resultados de la clasificación de las muestras analizadas

Muestra	AASTHO	SUCS	Descripción
P-01	A-4(8)	CL	Suelo limoso poco o nada plásticos
P-02	A-4(8)	CL-ML	Suelo limoso poco o nada plásticos
P-03	A-4(8)	CL-ML	Suelo limoso poco o nada plásticos
P-04	A-4(8)	CL	Suelo limoso poco o nada plásticos
P-05	A-4(8)	CL	Suelo limoso poco o nada plásticos

Fuente: Elaboración propia

3.6. Selección de muestras a estabilizar

A continuación, se presenta la selección de muestras de cada barrio:

Tabla 3.12 Resultados de la caracterización de las muestras de suelo

Muestra		Granulometría % que pasa del total		Límites			Clasificación	
		Nº40	Nº200	LL	LP	IP	AASTHO	SUCS
Cañadas II	P-01	99,18	89,21	30	22	8	A-4(8)	CL
	P-02	99,88	86,56	28	19	8	A-4(8)	CL
	P-03	99,41	87,89	28	21	7	A-4(8)	CL-ML
La Flores	P-04	98,82	93,95	29	20	9	A-4(8)	CL
	P-05	99,79	94,29	31	21	10	A-4(8)	CL

Fuente: Elaboración propia

Se observa de la tabla 3.8 el tipo de suelo que se repite es el suelo A-4 (AASHTO), basándose en los criterios propuestos se elegirá las muestras que presenten los índices de plasticidad mayor y menor. En tal sentido la muestra P-05 y la P-03 con IP de 10 y IP de 7 respectivamente serán las seleccionadas.

Resumen de los suelos a ser tratados:

Tabla 3.13 Muestras de suelo seleccionadas

Muestra		Granulometría % que pasa del total		Límites			Clasificación	
		Nº40	Nº200	LL	LP	IP	ASSTHO	SUCS
La Flores	P-05 (M-01)	99,79	94,29	31	21	10	A-4(8)	CL
Cañadas II	P-03 (M-02)	99,41	87,89	28	21	7	A-4(8)	CL-ML

Fuente: Elaboración propia

Una vez elegidas las muestras a tratar, se procede a realizar los ensayos (Compactación y CBR) a estas dos muestras para posteriormente comparar la influencia de la ceniza de lodo residual en sus propiedades físicas y mecánicas de estos suelos.

3.7. Caracterización mecánica

3.7.1. Ensayo de compactación (Proctor modificado) (AASHTO T180)

La compactación consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es conseguir una densidad específica para una relación óptima de agua, al fin de garantizar las características mecánicas necesarias del suelo.

El ensayo consiste en modificar la humedad del suelo por medio de adición de agua y finalmente, se le transmite energía de compactación por el medio de golpes. Las determinaciones de los puntos sencillos se efectúan compactando el suelo dentro de un molde de un tamaño dado, con un martillo de 4,5 kg (10 lb) que se deja caer desde una altura de 457,2 mm (18").

Figura 3.15 Proceso del ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 3.14 Resultados de la compactación para los suelos en análisis

Muestra	Número	Compactación	
		D.max g/cm ³	CHO %
Las Flores	M-01	1,84	12,21
		1,85	12,88
		1,84	12,85
Cañadas II	M-02	1,93	11,59
		1,93	11,72
		1,92	11,81

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Relación de soporte del suelo (CBR) (ASTM D1883 – AASHTO T193)

El ensayo C.B.R, se realizó de acuerdo a la norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa de subrasante.

Para la obtención de los diferentes C.B.R. se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación; la primera con 12 golpes, la segunda con 25 golpes y la tercera, con 56 golpes por cada ensayo de C.B.R.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los C.B.R de los suelos bajo las condiciones más críticas ; esto durante un período mínimo de 96 horas donde se colocan pesas sobre las mismas, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares, como de la estructura de pavimento y por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas empleando un extensómetro debidamente calibrado.

El ensayo de penetración se basa en la aplicación de una presión a una velocidad normalizada creciente efectuado mediante la prensa a la que va acopiada un pistón de sección anular sobre la muestra de suelo compactado con la humedad óptima. Luego de realizar el ensayo de penetración se procede a sacar humedades de cada molde del fondo, superficie y 2” de superficie para determinar sus densidades.

Figura 3.16 Proceso para realizar el ensayo de CBR



Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 3.15 Resultados del ensayo de CBR para el suelo en análisis

Muestra	CBR	
	CBR 100% de D. max. (%)	CBR 95% de D. max. (%)
M-01	3	2
	3	2
	3	2
M-02	5	4
	5	4
	5	3

Fuente: Elaboración propia

3.8. Caracterización de la ceniza de lodo residual

Posteriormente al calcinado se trituro la ceniza de lodo residual para su realizar los ensayos correspondientes.

3.8.1. Contenido de humedad (Ceniza)

La ceniza de lodo residual proveniente de la PTAR de San Blas Tarija, se expuso a la temperatura ambiente. Antes de ser usada como material estabilizante de un suelo presento una humedad de 1,23%.

El procedimiento se llevó a cabo por el método estandarizado, secado en el horno durante 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C.

Tabla 3.16 Contenido de humedad de la ceniza

Muestra	Contenido de humedad %
Ceniza	1,23

Fuente: Elaboración propia

3.8.2. Peso específico (Ceniza)

El ensayo del peso específico relativo se realizó bajo los procedimientos de la norma ASTM D854, cabe recalcar que se usó el mismo frasco volumétrico ensayado en los suelos analizados.

Figura 3.17 Peso específico de la ceniza



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17 Resultados del ensayo de peso específico

N°	Muestra-Ceniza	
	Temp °C	Peso (g)
1	30,00	2,54
2	24,00	2,44
3	18,00	2,58
4	15,00	2,53
Promedio		2,53

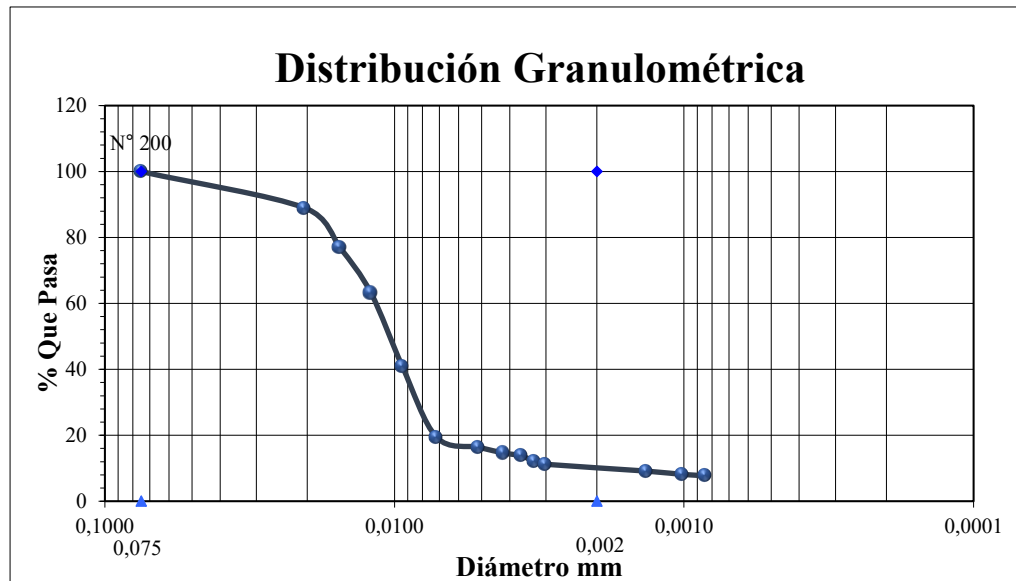
Fuente: Elaboración propia

3.8.3. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (Ceniza)

El ensayo se llevó a cabo como indica la norma ASTM D422, se tamizó una muestra de ceniza equivalente a 60 gramos. Se repite los pasos mencionados en la caracterización del suelo natural.

La gráfica de la distribución de partículas de la ceniza de lodo residual es la siguiente:

Gráfica 3.4 Distribución granulométrica de ceniza



Fuente: Elaboración propia

3.9. Mejoramiento de suelo con ceniza de lodo residual

Una vez determinadas todas las características de los suelos naturales, se procede al análisis de las muestras mejoradas con ceniza de lodo residual, evaluadas mediante los ensayos de límites de consistencia, compactación y Razón Soporte de California (CBR).

Lo que se busca es mejorar las propiedades del suelo, logrando niveles de compactación que alcancen los valores exigidos por la normativa técnica, reduciendo la expansividad mediante la retención de finos a largo plazo, lo que disminuye la aparición de grietas y baches. Asimismo, cuando se emplean dosificaciones adecuadas, es posible obtener un incremento en los valores de CBR, evidenciando una mayor capacidad de soporte del suelo estabilizado.

Para ello, las muestras seleccionadas serán sometidas a cuatro diferentes dosificaciones del aditivo, con el propósito de analizar la variación de sus propiedades entre cada ensayo y, a partir de los resultados obtenidos en todas las mezclas, determinar la dosificación óptima.

3.9.1. Dosificación

La dosificación tiene por finalidad determinar la cantidad de ceniza de lodo residual capaz de mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo. Para ello, se planteó una dosificación experimental con distintos contenidos de aditivo, cuyas mezclas fueron sometidas a ensayos de límites de consistencia, compactación y CBR. Dado el comportamiento puzolánico de la ceniza, se tomaron como referencia los porcentajes usados en estabilización con cemento y cal (3 %–7 %), definiéndose así cuatro dosificaciones que se aplicaron a cada una de las muestras seleccionadas.

Tabla 3.18 Porcentajes de ceniza

% Ceniza de Lodo residual	2	4	8	12
---------------------------	---	---	---	----

Fuente: Elaboración propia

3.10. Evaluación del suelo con ceniza de lodo residual

Tabla 3.19 Ensayos para evaluar el suelo con adición del aditivo en análisis

Ensayo	Normativa
Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Ensayo de compactación (método Proctor Modificado)	ASTM D1557 AASHTO T180
Determinación de la relación del valor de soporte del suelo (CBR)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia

3.11. Resultados del suelo estabilizado con el aditivo (ceniza de lodo residual)

3.11.1. Ensayo de límites de consistencia (suelo + ceniza de lodo residual)

Para determinar los ensayos de límites de consistencia se sigue el mismo procedimiento que se utilizó en la caracterización de las muestras de suelos naturales, con la única diferencia de que se añade los aditivos a diferentes dosificaciones.

Tabla 3.20 Resultados para los límites de consistencia

Muestras	Dosificación %	Límites de consistencia		
		LL	LP	IP
M-01	0	31	21	10
	2	32	22	10
	4	33	25	8
	8	35	26	9
	12	38	26	11
M-02	0	28	21	7
	2	29	23	6
	4	30	24	6
	8	31	26	5
	12	33	24	9

Fuente: Elaboración propia

3.11.2. Ensayo de compactación (suelo + ceniza de lodo residual)

Resultados:

Tabla 3.21 Resultados de compactación

Muestras	Dosificación %	Compactación	
		D.max. g/cm ³	CH0 %
M-01	2	1,81	13,79
	4	1,78	14,35
	8	1,76	14,77
	12	1,68	17,03
M-02	2	1,89	13,09
	4	1,85	14,13
	8	1,83	14,33
	12	1,76	16,46

Fuente: Elaboración propia

3.11.3. Resultado del ensayo CBR (suelo + ceniza de lodo residual)

Tabla 3.22 Resultados de CBR para distintos porcentajes de aditivo

Muestras	Dosificación %	CBR M95% de D. max. (%)			CBR 100% de D. max. (%)		
		1	2	3	1	2	3
M-01	2	3	3	3	4	4	4
	4	8	8	8	12	13	13
	8	9	9	9	11	12	11
	12	7	7	8	9	9	10
M-02	2	6	7	6	8	9	8
	4	12	13	13	19	20	20
	8	14	14	14	19	18	19
	12	11	12	11	15	16	15

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de la muestra de suelo con la adición de ceniza de lodo residual presentados en las tablas, son analizados en el próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El presente capítulo tiene como objetivo analizar e interpretar los resultados obtenidos de la caracterización de los suelos limosos de baja plasticidad (A4) en su estado natural, así como los resultados obtenidos después de aplicar la estabilización utilizando ceniza de lodo residual.

Tabla 4.1 Resultados de la caracterización de los suelos a estabilizar

Muestra	% Que pasa tamiz N°200	LL	LP	IP	Clasificación AASHTO	Hum. óptima (%)	Dens. máx. (g/cm ³)	CBR al 95 (%)	CBR al 100 (%)	Exp. (%)
M-01	94,29	31	21	10	A4 ₍₈₎	12,85	1,84	2	3	3,91
M-02	87,89	28	21	7	A4 ₍₈₎	11,81	1,92	4	5	3,39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2 Resultados de la estabilización mediante ceniza de lodo residual

Muestra	Dosificación	LL	LP	IP	Hum. óptima (%)	Dens. máx. (g/cm ³)	CBR al 95 (%)	CBR al 100 (%)	Exp. (%)
M-01	2%	32	22	10	13,79	1,81	3	4	3,26
	4%	33	25	8	14,35	1,78	8	13	2,29
	8%	35	26	8	14,77	1,76	9	11	2,10
	12%	38	26	11	17,03	1,68	7	9	2,15
M-02	2%	29	23	6	13,09	1,89	6	8	2,96
	4%	30	24	6	14,13	1,85	13	20	1,95
	8%	31	26	5	14,33	1,83	14	19	1,38
	12%	33	24	9	16,76	1,77	11	15	1,90

Fuente: Elaboración propia

4.1. Análisis de los suelos en estado natural

La caracterización de las muestras se realizó a través de la ejecución de una serie de ensayos que permitieron determinar sus propiedades físico mecánicas.

En la Tabla 4.1 se puede observar que la muestra M-01 presenta un contenido de finos del 94,29%, un 87,89% de la muestra M-02, ambas son muestras de suelos limosos poco plásticos.

Se puede observar en la Tabla 4.1, que las muestras de suelos limosos presentan un límite líquido de 31% y 28%, límite plástico de 21% y 21% y un índice de plasticidad igual a 10% y 7%.

Los datos observados en la Tabla 4.1, revelan que las muestras analizadas en la presente investigación, se clasificaron como suelos CL y CL-ML en el sistema SUCS, en el sistema AASHTO son clasificados como suelos pertenecientes al grupo A4₍₈₎, tratándose de suelos limosos de baja plasticidad, basándose en la clasificación de la Asociación estadounidense de funcionarios de carreteras y transporte.

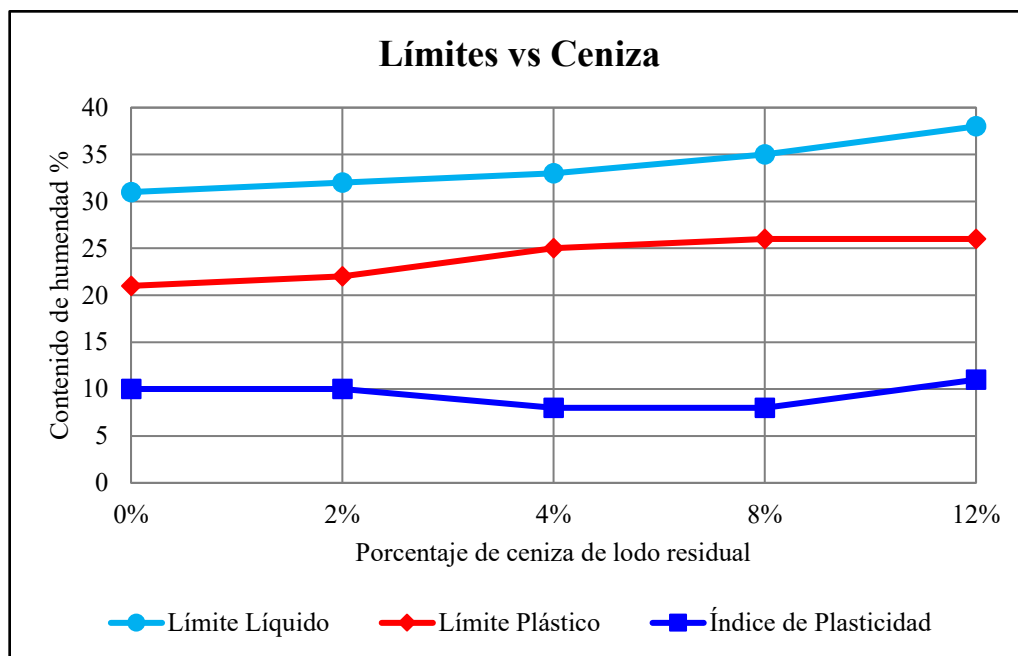
Según los valores registrados en la Tabla 4.1, las muestras analizadas presentan densidades máximas secas de 1,84 g/cm³ y 1,92 g/cm³, junto con humedades óptimas de 12,85% y 11,81% respectivamente.

Los resultados expuestos en la Tabla 4.1, indican que el valor del CBR de las muestras analizadas son del 2% y 4% respectivamente al 95%. Además, se observa que estas muestras presentan una expansión del 3,91 % y 3,39%. Estos datos indican que las muestras presentan una capacidad portante baja y se clasifica como una subrasante mala.

4.2. Análisis de la estabilización suelo con ceniza de lodo residual

4.2.1. Influencia de la ceniza de lodo residual en la plasticidad de los suelos

Gráfica 4.1 Influencia de la ceniza en los límites de Atterberg M-01



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.1 se puede observar que los valores de la muestra M-01, los límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad varían según el porcentaje de ceniza de lodo residual de 2%, 4%, 8% y 12%.

El límite líquido (LL) aumenta de 31% hasta 38% con 12% de ceniza de lodo residual, aumentando un 7%, se observa también que el límite plástico (LP) tiene una modificación, incrementándose de 21% a 26% con una adición de 12% de ceniza de lodo residual.

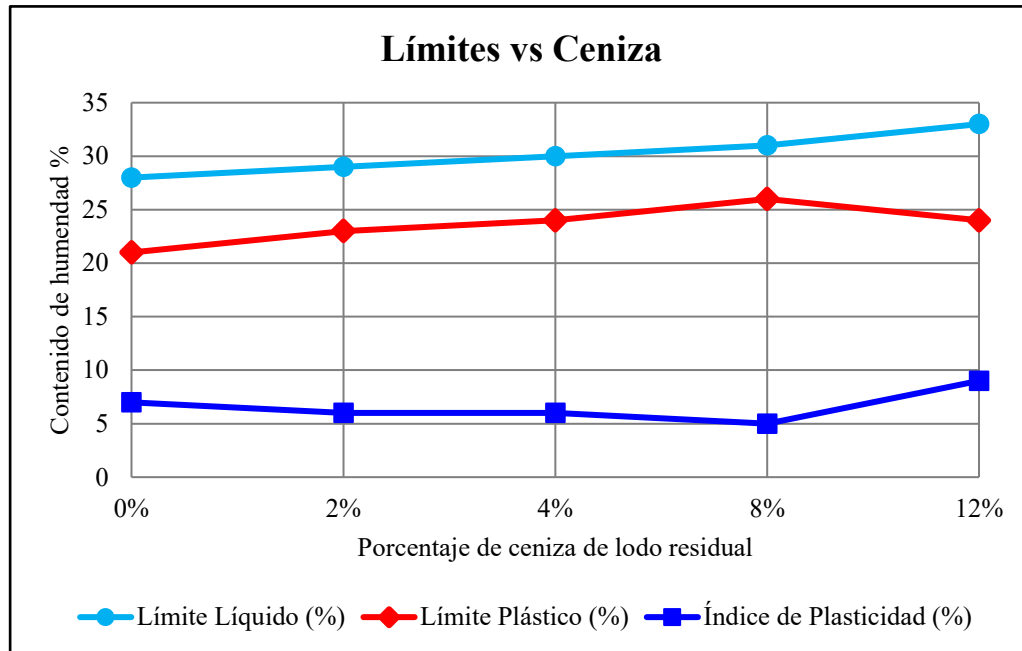
Al realizar la incorporación de 8% de ceniza de lodo residual, el índice de plasticidad (IP) reduce de 10% a un 8%.

De la figura 4.1 se observa que al mezclar la muestra (M-01) con los distintos porcentajes de ceniza de lodo residual, tanto el límite líquido como también su límite plástico experimentan un incremento.

Con los porcentajes de 2%, 4% y 8% se observa una reducción de su índice plástico, con el 12% de ceniza de lodo residual el índice de plasticidad vuela a incrementarse.

La adición de 12% de ceniza de lodo residual se observa el incremento en el LL, LP e IP, este porcentaje provoca que el suelo adquiriera características más plásticas y menos estables, el exceso de ceniza aumenta la capacidad del suelo para retener agua.

Gráfica 4.2 Influencia de la ceniza en los límites de Atterberg M-02



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.2 se presentan los valores obtenidos para la muestra M-02, donde los límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad varían según los porcentajes de ceniza de lodo residual adicionados: 2%, 4%, 8% y 12%.

Se observa que el Límite Líquido (LL) aumenta progresivamente desde 28% hasta 33% con la incorporación de 12% de ceniza de lodo residual, lo que representa un incremento del 5%.

En cuanto al Límite Plástico (LP), se registra un cambio más moderado, incrementando de 21% a 24% con la misma dosificación, lo que indica que la ceniza no altera de forma significativa la plasticidad intrínseca del suelo.

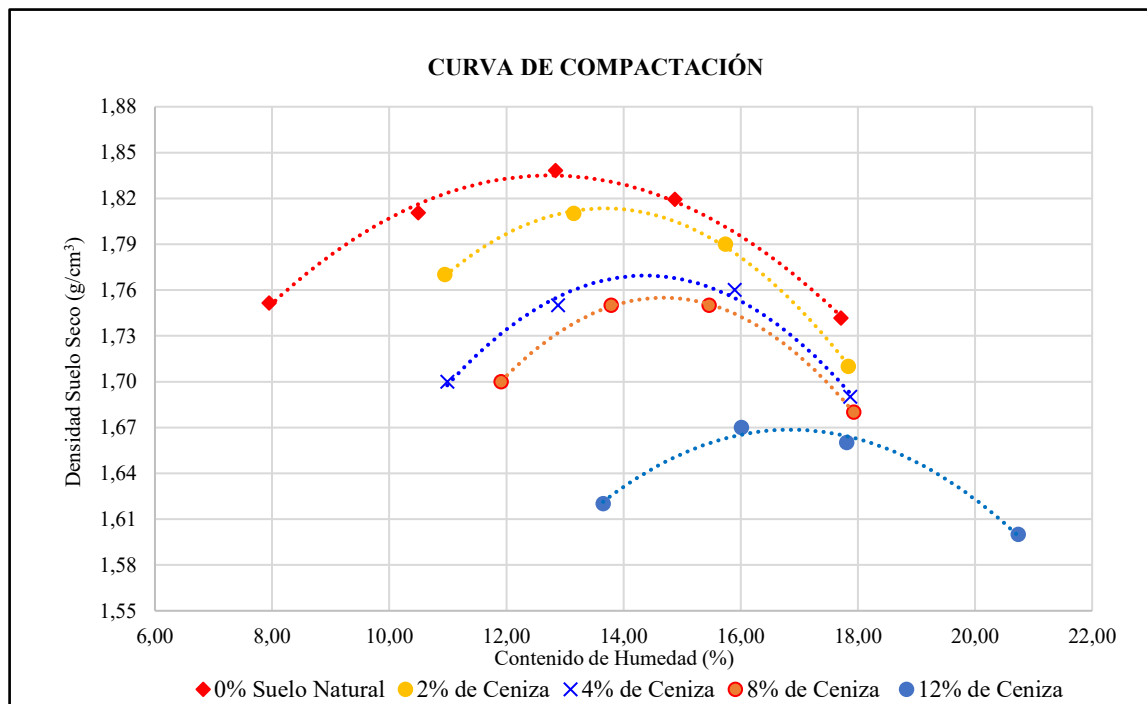
Por otro lado, el Índice de Plasticidad (IP) disminuye, al combinar el suelo con el 8% de ceniza de lodo residual se produce una reducción del IP del 2%, pasando del 7% a 5%, lo cual contribuye a una menor deformación del suelo frente a variaciones de humedad.

De la figura 4.2 se observa que al mezclar la muestra (M-02) con un porcentaje de 12%, se produce un comportamiento inverso, el índice de plasticidad experimentan un aumento de 7% a un 9%

En general, se observa que la incorporación de 2%, 4% y 8% de ceniza de lodo residual resulta favorable para la estabilización de los suelos (M-01 y M-02), ya que reduce el límite plástico, contribuyendo a que el suelo sea menos sensible al agua y más estable. No obstante, la adición de 12% de ceniza genera un incremento en todos los parámetros analizados (LL, LP e IP), lo que indica que este porcentaje excede el nivel óptimo, aumentando la plasticidad y disminuyendo la estabilidad del suelo. Este comportamiento puede deberse a la saturación del suelo con material fino, que incrementa su capacidad de retención de agua y afecta su desempeño estructural.

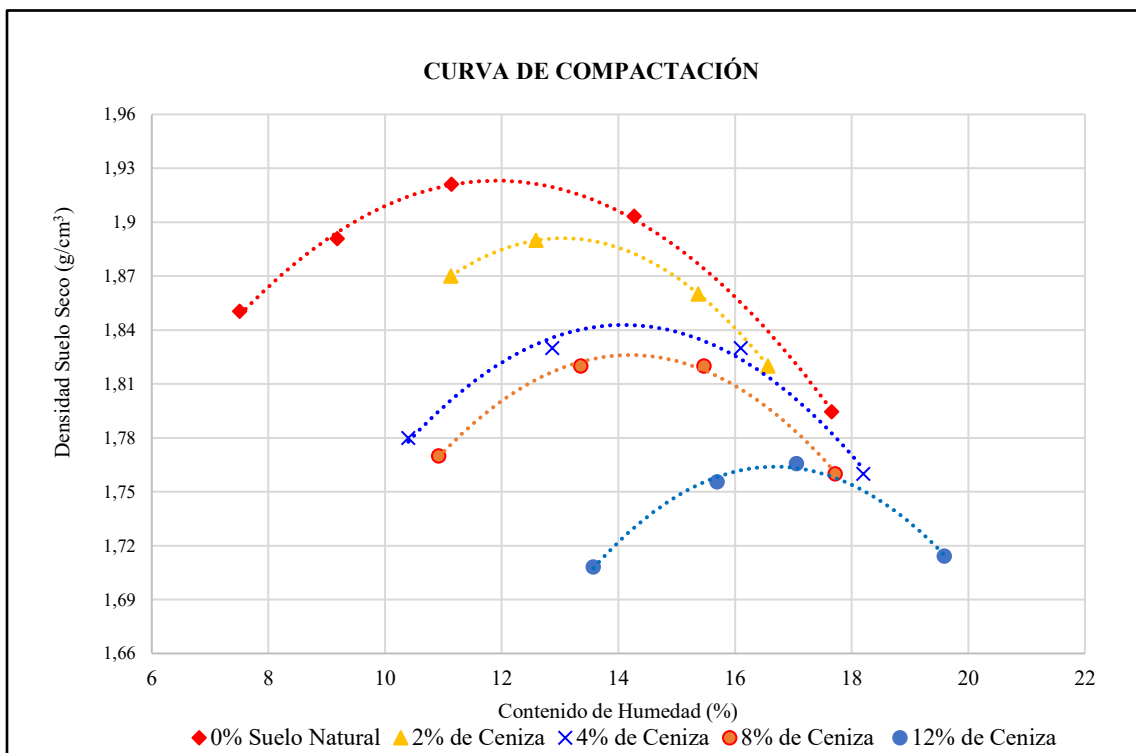
4.2.2. Influencia de la ceniza de lodo residual en la curva de compactación

Gráfica 4.3 Influencia de la Ceniza en la compactación (M-01)



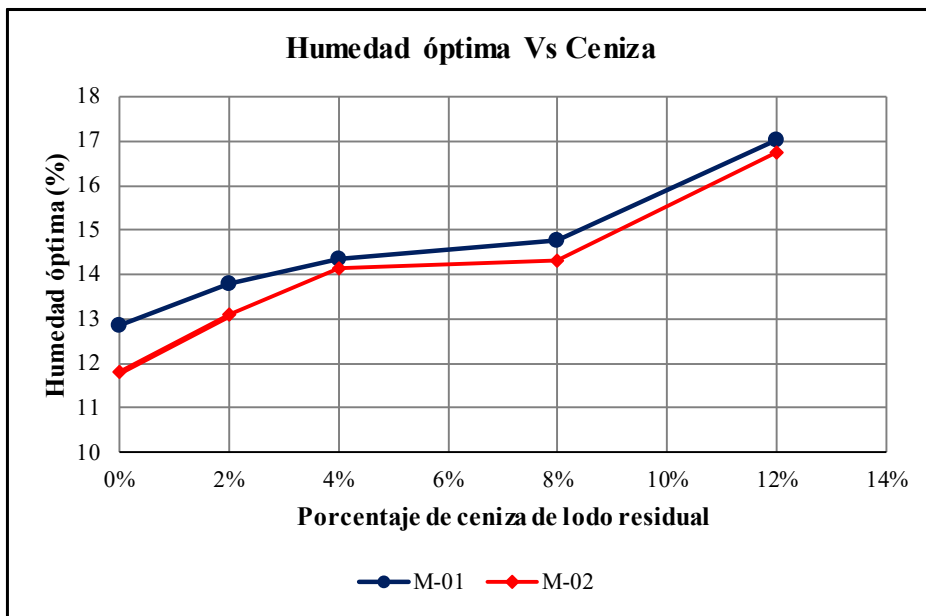
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.4 Influencia de la Ceniza en la compactación (M-02)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.5 Influencia de la Ceniza en la Humedad óptima



Fuente: Elaboración propia

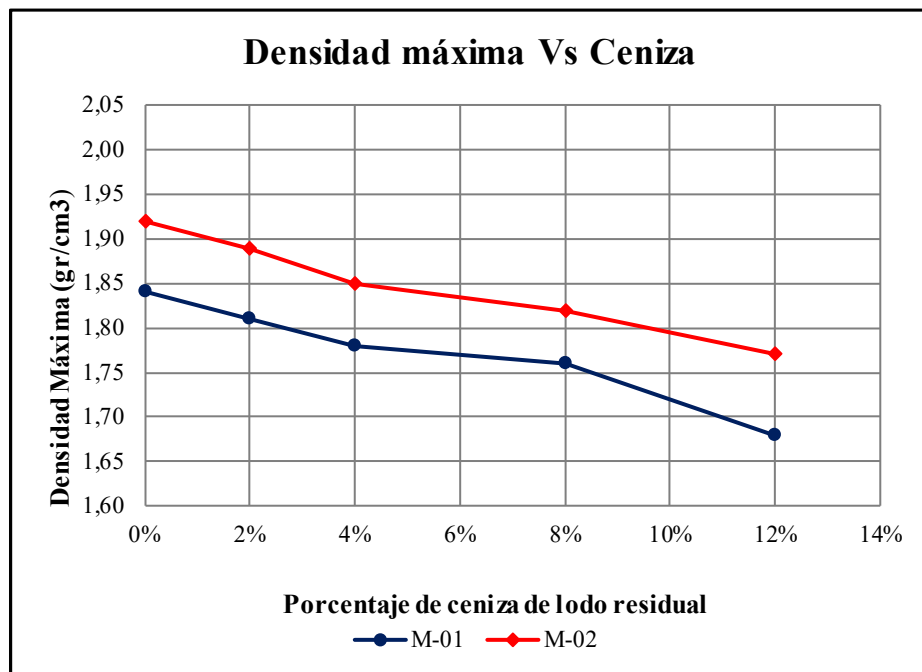
En la Figura 4.5 se observa cómo el contenido de humedad óptima (CHO) de compactación de los suelos se ve afectado por la incorporación de diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual. Este parámetro experimenta un incremento significativo a medida que se aumenta la proporción de ceniza.

En la muestra M-01, el CHO aumenta desde 12,85% en el suelo natural hasta 17,03% al incorporar un 12% de ceniza de lodo residual, lo que representa un incremento total de 4,18%. Este comportamiento sugiere que la adición de ceniza incrementa la demanda de agua necesaria para alcanzar la compactación óptima.

De manera similar, en la muestra M-02, el contenido de humedad óptimo pasa de 11,81% en el estado natural del suelo a 16,76% con la incorporación del 12% de ceniza, lo que equivale a un incremento de 4,92%.

Estos resultados indican que la presencia de ceniza de lodo residual aumenta la capacidad del suelo para absorber y retener agua, posiblemente debido a la interacción de las partículas finas de la ceniza con el suelo, lo que modifica la estructura y distribución de los vacíos.

Gráfica 4.6 Influencia de la Ceniza en la densidad máxima



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.6 se aprecia cómo la incorporación de ceniza de lodo residual provoca una disminución en la densidad seca de las muestras analizadas. Este comportamiento es evidente tanto en la muestra 1 como en la muestra 2.

Para la muestra 1 (M-01), la densidad seca se reduce de 1,84 g/cm³ en el suelo sin estabilizar a 1,68 g/cm³ al agregar un 12% de ceniza de lodo residual, lo que representa una disminución significativa. De manera similar, en la muestra 2 (M-02), la densidad seca disminuye de 1,93 g/cm³ a 1,76 g/cm³ con la misma proporción de ceniza.

Esta reducción en la densidad seca puede atribuirse a la menor densidad relativa de la ceniza de lodo residual en comparación con los minerales presentes en el suelo natural. La incorporación de partículas más ligeras y de menor cohesión disminuye la capacidad del suelo para alcanzar una compactación máxima. Además, la ceniza puede introducir una mayor cantidad de vacíos en la mezcla, lo que también contribuye a la disminución de la densidad seca.

4.2.3. Influencia de la ceniza de lodo residual en la capacidad de soporte (CBR)

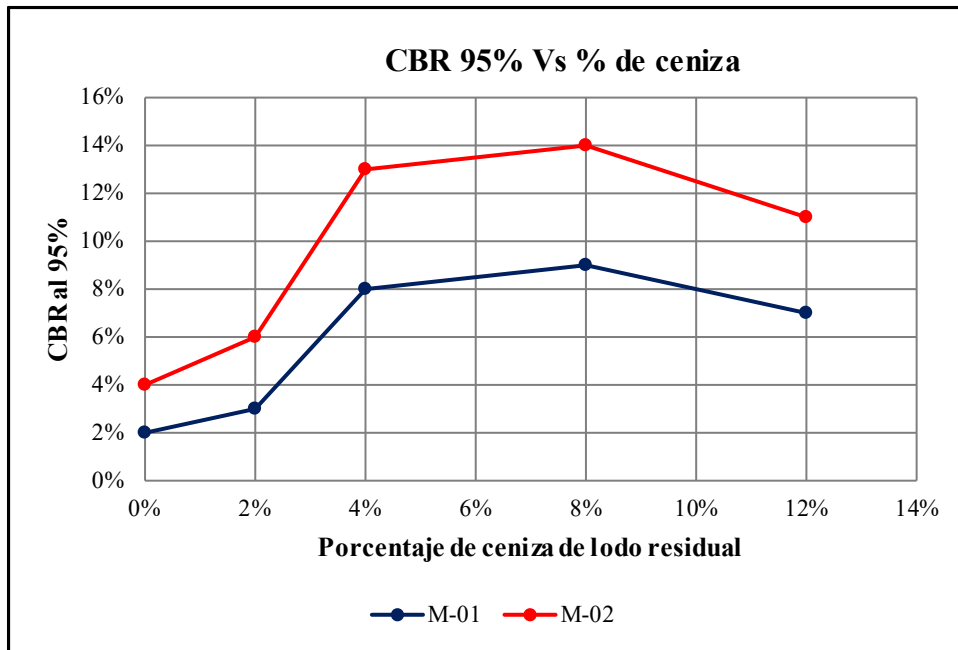
Tabla 4.3 Resumen de CBR con diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual

Muestra	Dosificación	CBR al 95 (%)	CBR al 100 (%)	Exp. (%)
M-01	2%	3	4	3,26
	4%	8	13	2,29
	8%	9	11	2,10
	12%	7	9	2,15
M-02	2%	6	8	2,96
	4%	13	20	1,95
	8%	14	19	1,38
	12%	11	15	1,90

Fuente: Elaboración propia

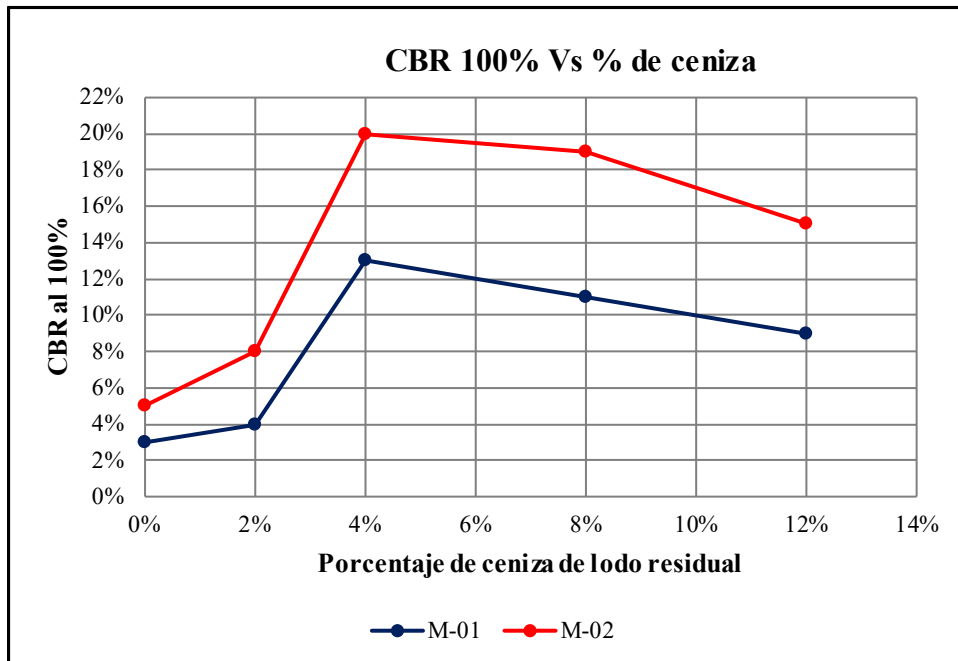
Las pruebas de CBR realizadas incorporando los porcentajes como se muestra en la tabla 4.3, a continuación, se realizará un análisis de los datos obtenidos para ambos suelos.

Gráfica 4.7 Influencia de la ceniza de lodo residual en el CBR 95%



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.8 Influencia de la ceniza de lodo residual en el CBR 100%



Fuente: Elaboración propia

En las figuras 4.6 y 4.7 se analiza el comportamiento del CBR de las dos muestras (M-01 y M-02), en función del porcentaje de ceniza de lodo residual incorporado (2%, 4%, 8% y 12%). Los resultados muestran tendencias claras en el impacto de la ceniza sobre la capacidad de soporte de los suelos limosos.

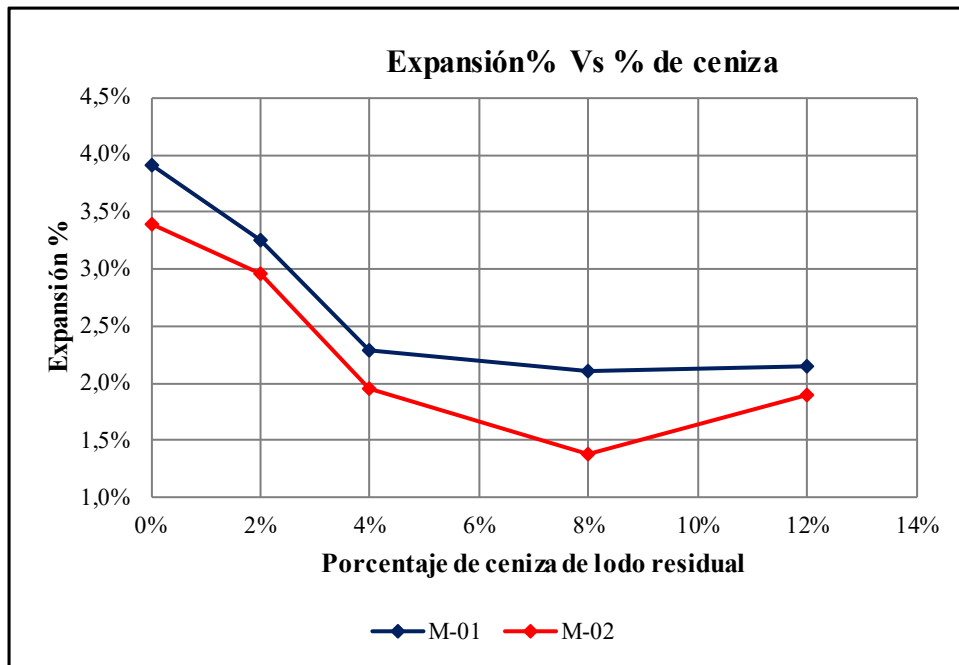
Para ambas muestras (M-01 y M-02), el CBR aumenta de manera significativa al incorporar hasta un 8% de ceniza de lodo residual. En la M-01, el CBR al 95% incrementa de un valor inicial de 2% a un máximo de 9%, mientras que en la M-02 el CBR inicial de 4% asciende hasta 14% con la misma dosificación, evidenciando una mejora notable en la capacidad de soporte del suelo.

Este incremento refleja una mejora en la capacidad de soporte del suelo, atribuible a la mejor cohesión y a la reacción entre los minerales del suelo y los componentes reactivos de la ceniza, como el óxido de calcio y sílice.

Al incrementar la ceniza en 12%, se evidencia una reducción en el CBR al 95% en ambas muestras, en la M-01 el CBR desciende de 9% a un 7%. En la muestra M-02 el CBR desciende de 14% a un 11%. Esta reducción puede atribuirse al exceso de ceniza en la mezcla, lo que incrementa la proporción de partículas finas y provoca una reducción de la densidad seca máxima, afectando negativamente la resistencia mecánica del suelo en análisis.

El 8% de ceniza de lodo residual es el punto donde se alcanza la mayor capacidad de soporte (máximo CBR) en ambas muestras, lo que lo posiciona como el porcentaje más eficiente para estabilización.

Gráfica 4.9 Influencia de la ceniza de lodo residual en la expansión



Fuente: Elaboración propia

La figura 4.8 indica una reducción de la expansión de los suelos analizados a medida que se agrega más ceniza, en la muestra (M-01), la expansión disminuye de 3,91% sin ceniza, hasta 2,10% adicionando 8% de ceniza. De igual manera para la muestra (M-02), la expansión reduce de 3,39% a un 1,38% con el 8% de ceniza de lodo residual.

Se observa que al incorporar el 12% de ceniza de lodo residual, la expansión se incrementa, pasando de 2,10% de la muestra 1 a un 2,15%, la muestra 2 también experimenta un crecimiento en la expansión pasando de 1,38% a un porcentaje de 1,90%.

La reducción de la expansión puede atribuirse a la interacción química entre los compuestos de la ceniza (CaO y SiO_2) y los minerales del suelo, lo que reduce la capacidad del suelo de absorber agua y por ende su expansión.

Al aumentar el contenido de ceniza al 12%, se observa un incremento en la expansión de ambas muestras, este comportamiento puede deberse al exceso de partículas finas en la mezcla, que incrementa la capacidad de retención de agua del suelo generando una mayor expansión bajo condiciones de humedad.

La composición química de la ceniza de lodo residual tiene un impacto positivo en la estabilización de las muestras analizadas, el calcio y el magnesio mejoran la cohesión y la capacidad de soporte, el hierro contribuye a densificar el suelo estabilizado, un pH ligeramente alcalino facilita las reacciones puzolánicas, reduciendo la plasticidad y mejorando la estabilidad. El sodio, en concentraciones bajas, no genera efectos adversos y puede favorecer la compactación.

Se observa que al incorporar el contenido de ceniza de lodo residual superior al 8% genera una sobresaturación de las partículas y afecta negativamente la compactación y resistencia del suelo.

La siguiente tabla presenta un resumen comparativo de los resultados obtenidos para el suelo natural y el suelo estabilizado con 8 % de ceniza de lodo residual en ambas muestras analizadas. Su objetivo es sintetizar el efecto del estabilizante sobre las principales propiedades físicas y mecánicas del suelo.

Tabla 4.4 Resumen comparativo de resultados con 8 % de ceniza de lodo residual

Parámetro evaluado	Unidad	Suelo natural M-01	Suelo estabilizado (8 % ceniza)	Suelo natural M-02	Suelo estabilizado (8 % ceniza)	Variación / comportamiento observado
Índice de plasticidad (IP)	%	10	8	7	5	Reducción del IP
Densidad seca máxima	g/cm ³	1,84	1,76	1,92	1,83	Disminución de densidad seca máxima
Humedad óptima	%	12,85	14,77	11,81	14,33	Incremento de la humedad optima
CBR	%	2	9	4	14	Incremento del valor CBR
Clasificación AASHTO	-	A4(8)	A4(8)	A4(8)	A4(8)	Sin variación en el grupo

Fuente: Elaboración propia

4.3. Análisis estadístico

En las tablas se puede observar el tratamiento estadístico para las mezclas de ceniza de lodo residual con las muestras de suelo seleccionadas.

4.3.1. Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “CBR”

La elección del método t de Student para la prueba de hipótesis se basó en su idoneidad para tamaños de muestra inferiores a 30. Esta selección asegura la obtención de resultados sólidos desde un punto de vista estadístico y de fácil interpretación. Para lograr la validación de la hipótesis, se planteó la hipótesis nula (H0) y la hipótesis alternativa (H1).

Tabla 4.5 Datos de CBR para ser sometidos a la prueba

Muestras	Dosificación %	CBR M95% de D. max. (%)		
		1	2	3
M-01	0	2	2	2
	2	3	3	3
	4	8	8	8
	8	9	9	9
	12	7	7	8
M-02	0	4	4	3
	2	6	7	6
	4	12	13	13
	8	14	14	14
	12	11	12	11

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis nula (H0): La media de la resistencia cortante (CBR) del suelo limoso de baja plasticidad estabilizado con ceniza de lodo residual es menor a la media de la resistencia cortante (CBR) del suelo natural.

$$H0: 8,96\% < \mu$$

Hipótesis alternativa (H1): La media de la resistencia cortante (CBR) del suelo limoso de baja plasticidad estabilizado con ceniza de lodo residual es mayor a la media de la resistencia cortante (CBR) del suelo natural.

$$H1: 8,96\% > \mu$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Prueba de hipótesis

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

$\bar{x} = 8,96$	Media muestral tomada
$\mu = 4,67$	Media considerada por la hipótesis nula
$S_x = 3,46$	Desviación estándar de la muestra
$n = 24$	Número de muestra

$$t = \frac{8,96 - 4,67}{\frac{3,46}{\sqrt{24}}} = 6,07$$

Grados de libertad

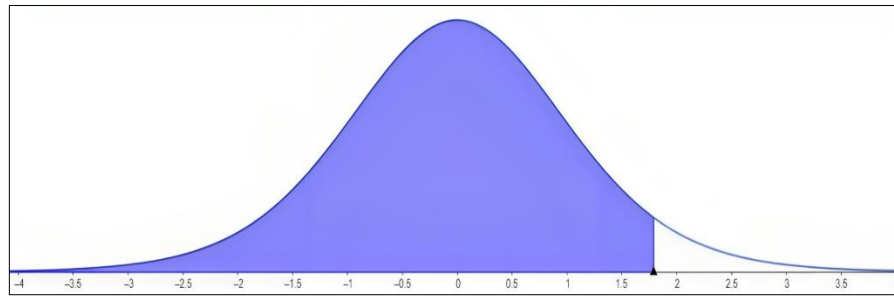
$$df = n - 1 = 24 - 1 = 23$$

Determinación del valor crítico t

Para determinar el valor crítico t, ir a la tabla “Puntos porcentuales de la distribución t de Student” (ANEXOS), con el grado de libertad = 23 y nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (5%).

$$\text{Valor crítico } t = 1,7139$$

Gráfica 4.10 Prueba de hipótesis C.B.R.



Fuente: Elaboración propia

Como $t > t_{\text{crítico}}$

$$6,07 > 1,71$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias entre las medias analizadas. Dando por conclusión que la media de la resistencia cortante (CBR) del suelo limoso estabilizado con ceniza de lodo residual es mayor a la media de la resistencia cortante del suelo en estado natural.

4.3.2. Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “Compactación”

Tabla 4.6 Datos de humedad óptima

Muestras	Dosificación %	Humedad óptima %
M-01	0	12,85
	2	13,79
	4	14,35
	8	14,77
	12	17,03
M-02	0	11,81
	2	13,09
	4	14,13
	8	14,33
	12	16,76

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis nula (H0): La media del valor de la humedad óptima de las muestras tratadas con ceniza de lodo residual es menor al valor de la media de la humedad óptima de las muestras de suelo natural.

$$H_0: 14,78\% < \mu$$

Hipótesis alternativa (H1): La media del valor de la humedad óptima de las muestras tratadas con ceniza de lodo residual es mayor al valor de la media de la humedad óptima de las muestras de suelo natural.

$$H_1: 14,78\% > \mu$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Prueba de hipótesis

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

$\bar{x} = 14,78$	Media muestral tomada
$\mu = 12,33$	Media considerada por la hipótesis nula
$S_x = 1,40$	Desviación estándar de la muestra
$n = 8$	Número de muestra

$$t = \frac{14,78 - 12,33}{\frac{1,40}{\sqrt{8}}} = 4,95$$

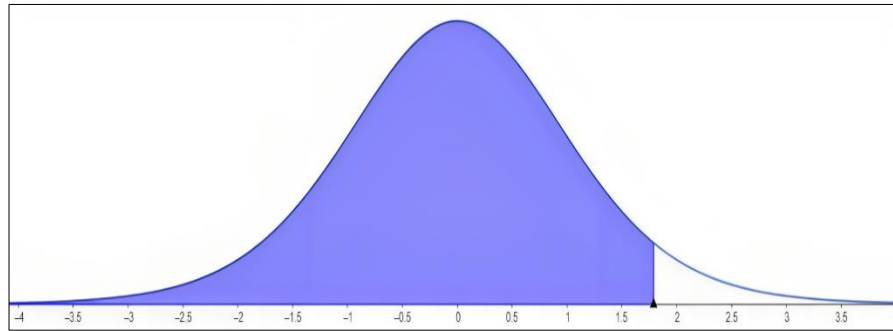
Grados de libertad

$$df = n - 1 = 8 - 1 = 7$$

Determinación del valor crítico t

Para determinar el valor crítico t, ir a la tabla “Puntos porcentuales de la distribución t de Student” (ANEXOS), con el grado de libertad =8 y nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (5%).

Gráfica 4.11 Prueba de hipótesis humedad óptima



Fuente:

Elaboración propia

Como $t > t_{\text{crítico}}$

$$4,95 > 1,90$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias entre las medias analizadas.

Tabla 4.7 Datos de densidad seca máxima

Muestras	Dosificación %	Densidad máxima (g/cm³)
M-01	0	1,84
	2	1,81
	4	1,78
	8	1,76
	12	1,68
M-02	0	1,92
	2	1,89
	4	1,85
	8	1,83
	12	1,77

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis nula (H0): La media del valor de la densidad seca máxima de las muestras tratadas con ceniza de lodo residual es mayor al valor de la media de la densidad seca máxima de las muestras de suelo natural.

$$H1: 1,80 \text{ g/cm}^3 > \mu$$

Hipótesis alternativa (H1): La media del valor de la densidad seca máxima de las muestras tratadas con ceniza de lodo residual es mayor al valor de la media de la densidad seca máxima de las muestras de suelo natural.

$$1,80 \text{ g/cm}^3 < \mu$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Prueba de hipótesis

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

$\bar{x} = 1,80$	Media muestral tomada
$\mu = 1,88$	Media considerada por la hipótesis nula
$S_x = 0,064$	Desviación estándar de la muestra
$n = 10$	Número de muestra

$$t = \frac{1,79 - 1,88}{\frac{0,064}{\sqrt{8}}} = -3,97$$

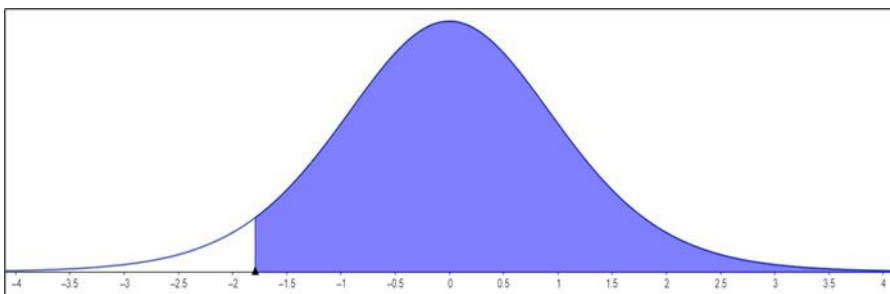
Grados de libertad

$$df = 8 - 1 = 7$$

Determinación del valor crítico t

Para determinar el valor crítico t, ir a la tabla “Puntos porcentuales de la distribución t de Student” (ANEXOS), con el grado de libertad = 9 y nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (5%).

Gráfica 4.12 Prueba de hipótesis densidad seca máxima



Fuente: Elaboración propia

Como $t < t_{\text{crítico}}$

$$-3,97 < -1,90$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias significativas entre las medias analizadas.

4.3.3. Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “IP”

Tabla 4.8 Datos de Índice de plasticidad

Muestras	Dosificación %	Índice de plasticidad (IP)
M-01	0	10
	2	10
	4	8
	8	8
	12	11
M-02	0	7
	2	6
	4	6
	8	5
	12	9

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis nula (H0): La media del valor del índice de plasticidad de las muestras tratadas con ceniza de lodo residual es mayor al valor de la media del índice de plasticidad de las muestras de suelo natural.

$$H_0: 7,88 > \mu$$

Hipótesis alternativa (H1): La media del valor del índice de plasticidad de las muestras tratadas con ceniza de lodo residual es menor al valor de la media del índice de plasticidad de las muestras de suelo natural.

$$H_1: 7,88 < \mu$$

Prueba de hipótesis

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

$\bar{x} = 7,88$	Media muestral tomada
$\mu = 8,5$	Media considerada por la hipótesis nula
$S_x = 2,10$	Desviación estándar de la muestra
$n = 8$	Número de muestra

$$t = \frac{7,88 - 8,5}{\frac{2,10}{\sqrt{8}}} = -0,84$$

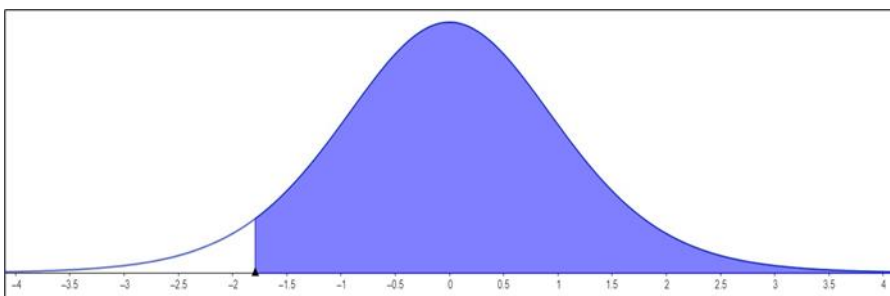
Grados de libertad

$$df = n - 1 = 8 - 1 = 7$$

Determinación del valor crítico t

Para determinar el valor crítico t, ir a la tabla “Puntos porcentuales de la distribución t de Student” (ANEXOS), con el grado de libertad = 9 y nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (5%).

Gráfica 4.13 Prueba de hipótesis índice plástico



Fuente: Elaboración propia

Como $t < t_{\text{crítico}}$

$$0,84 < 1,90$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias significativas entre las medias analizadas. La incorporación de ceniza de lodo residual, reduce el índice de plasticidad del suelo limoso

4.4. Comparación de aditivo (ceniza de lodo residual) con otro producto estabilizante (cal)

A continuación, se presenta información recaudada de investigaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho; en las cuales se trabajó con cal con el fin de mejorar ciertas propiedades mecánicas de los suelos, esta información nos permitirá comparar resultados de uno con respecto a otro.

Dery Laime: Análisis de estabilización de suelo – cal correlacionando el ensayo triaxial (U.U.) con el ensayo C.B.R.

Tabla 4.9 Comparativa de estabilización suelo-cal y suelo ceniza de lodo residual

Propiedades evaluadas	Aditivo					
	Cal 5%		Cnz de lodo residual 8%			
	Natural	Mejorada (5%)	Natural	Mejorada (8%)	Natural	Mejorada (8%)
Densidad seca máxima (g/cm ³)	1,77	1,8	1,84	1,76	1,92	1,81
Humedad óptima (%)	12,03	11,95	12,85	14,77	11,81	14,33
CBR (%)	7	17	2	9	4	14
Expansión (%)	2,82	1,4	3,91	2,10	3,39	1,38

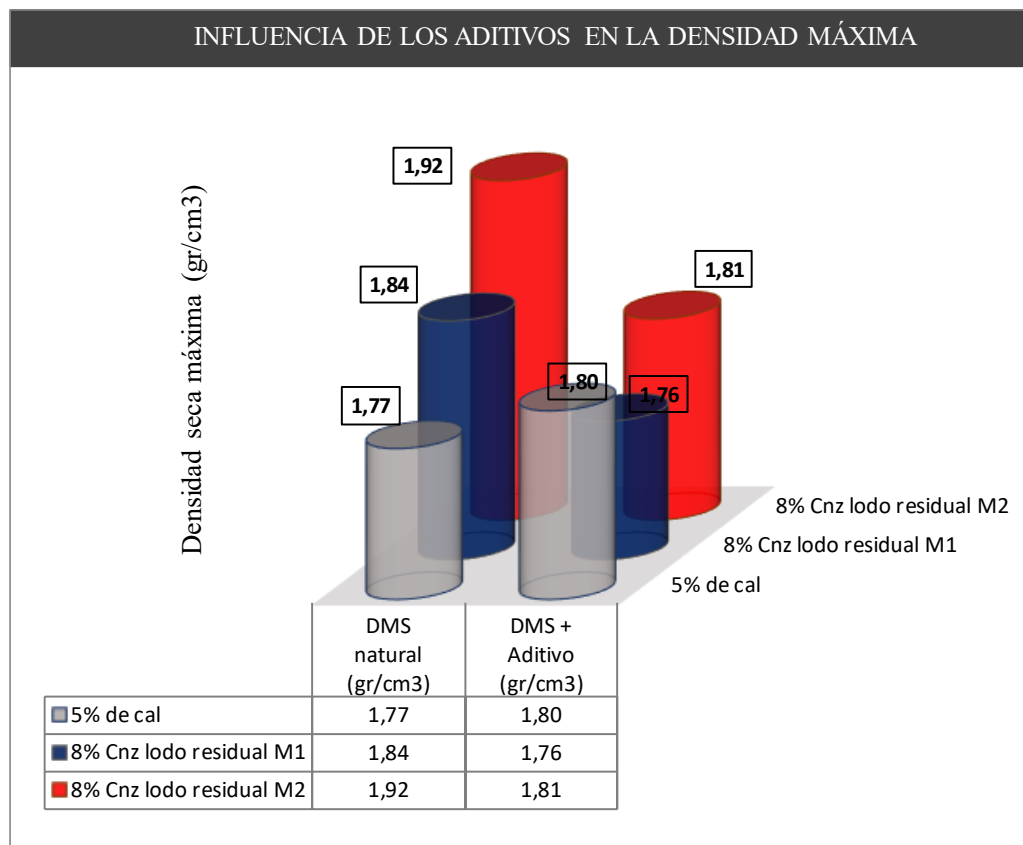
Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Comparación de gráficas de los resultados suelo-cal y suelo-ceniza

En la tabla 4.7 se observa los cambios que producen los aditivos en un suelo natural, tanto en su humedad óptima, densidad seca máxima, CBR y expansión. Para el suelo natural estabilizado con cal, se determinó que el porcentaje óptimo para la cal es de 5% y para la ceniza de lodo residual es de 8%.

A continuación, se analizará de manera más detallada la influencia de los aditivos mencionados:

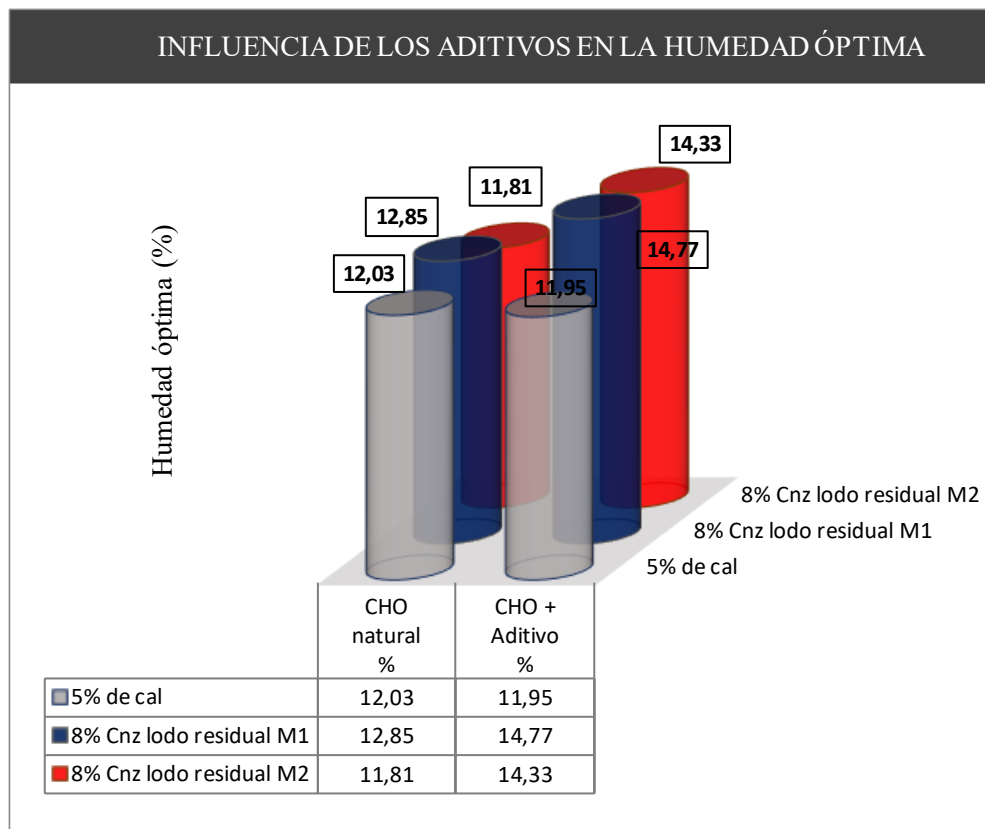
Gráfica 4.14 Influencia de los aditivos en la densidad seca máxima del suelo



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.10 se observa que la densidad aumenta en términos porcentuales un 1,69% (1,77-1,80) g/cm³, cuando el suelo es combinado con la cal. Mientras que con el uso de la ceniza de lodo residual la densidad del suelo disminuye, para la muestra (M-01) disminuye un 4,35% (1,84-1,76) g/cm³ y para la muestra (M-02) la reducción es de un 5,73% (1,92-1,81) g/cm³ respecto al valor de su densidad seca máxima en su estado natural.

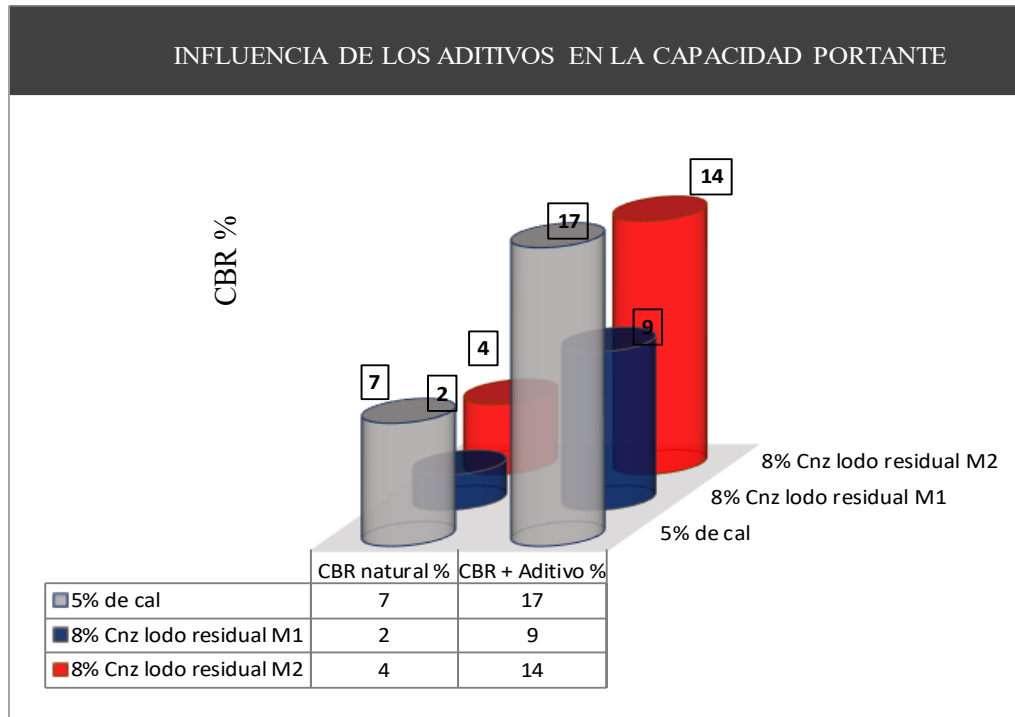
Gráfica 4.15 Influencia de los aditivos en la humedad óptima del suelo



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.11 se puede contemplar que al incorporar un 5% de cal en el suelo, la humedad disminuye ligeramente un 0,08% (12,03-11,95) %, con la ceniza de lodo residual, la humedad aumenta en ambas muestras, en la muestra (M-01) el incremento es de un 1,92% (12,85-14,77) % y para la muestra (M-02) el aumento es de 2,52% (11,81-14,33) % respecto al valor de la humedad óptima del suelo en su estado natural.

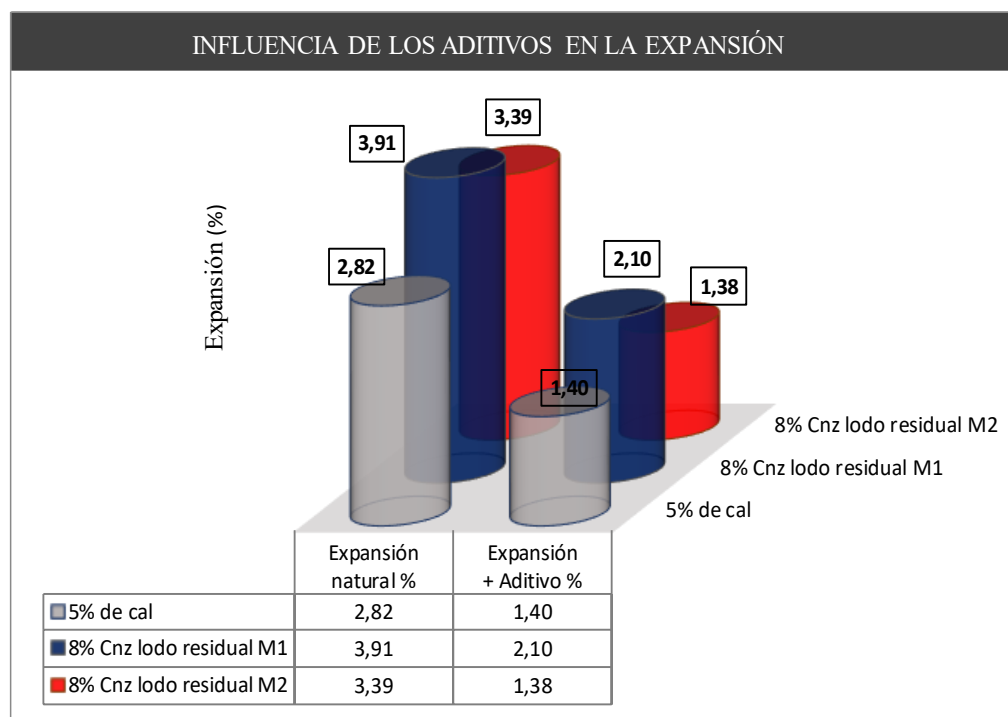
Gráfica 4.16 Influencia de los aditivos en el CBR de un suelo



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.12 se observa que los suelos A-4 usados en la investigación de referencia, incrementan en sus valores de CBR; el aditivo de la cal permite un aumento del 142,86% aumentando un valor de CBR de (7,00-17,00) %; con la adición de la ceniza de lodo residual se incrementa en un 350% (2-9) % en la muestra (M-01) y en el suelo (M-02) se da una mejoría de 250% (4- 14) % respecto a sus valores de CBR en suelo natural.

Gráfica 4.17 Influencia de los aditivos en la expansión del suelo



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la expansión se puede observar que el aditivo de la cal hace que la expansión se reduzca un 50,35%, con el uso de la ceniza de lodo residual se logra bajar la expansión un 46,29% y 59,29% respectivamente.

Tabla 4.10 Comparación técnica suelo-cal y suelo ceniza

Variable evaluada	Interpretación comparativa
Densidad seca máxima (g/cm³)	La cal aumenta densidad; la ceniza reduce la densidad, pero M-02 conserva mejor compactación.
Humedad óptima (%)	La cal mantiene humedad estable; la ceniza incrementa significativamente la humedad óptima.
CBR (%)	La ceniza mejora el CBR, pero la cal logra la resistencia mayor. M-02 reacciona mejor que M-01.
Expansión (%)	Ambos aditivos reducen expansión; M-02 con ceniza logra el valor más bajo, ligeramente mejor que la cal.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11 Ventajas y desventajas suelo-cal y suelo ceniza

Aditivo	Ventajas (según resultados)	Desventajas (según resultados)
Cal 5 %	• Aumenta densidad seca (1,80). • Reduce humedad óptima. • Mayor CBR (17 %). • Excelente control de expansión (1,40 %). • Genera estructura más estable y resistente.	• Costo mayor que la ceniza. • Requiere manejo cuidadoso. • Puede causar sobre-reacción si se incrementa la dosis.
Ceniza 8 % M-01	• Incremento de CBR (2 - 9). • Reducción de expansión (3,91-2,10). • Alternativa sostenible y económica.	• Reducción de densidad (1,84 - 1,76). • Incremento fuerte de humedad óptima (12,85 -14,77). • CBR final menor que cal y M-02.
Ceniza 8 % M-02	• Alto incremento de CBR (4-14). • Mejor control de expansión (1,38 %). • Mantiene mejor densidad que M-01. • Buena compatibilidad suelo–ceniza.	• Humedad óptima aumenta (11,81-14,33). • No supera el CBR obtenido con cal.

Fuente: Elaboración propia

4.5. Determinación del espesor estructural mediante el método CBR

La determinación del espesor estructural se realizó aplicando el método CBR, utilizando los valores de capacidad soporte obtenidos experimentalmente para el suelo natural y para el suelo estabilizado con ceniza de lodo residual. Este procedimiento permite establecer el espesor total de pavimento requerido en función de la resistencia de la subrasante, y evaluar de manera cuantitativa la mejora estructural lograda mediante el proceso de estabilización. Asimismo, se empleó la curva correspondiente a la categoría C, considerada adecuada para el diseño de pavimentos flexibles de bajo a moderado tránsito,

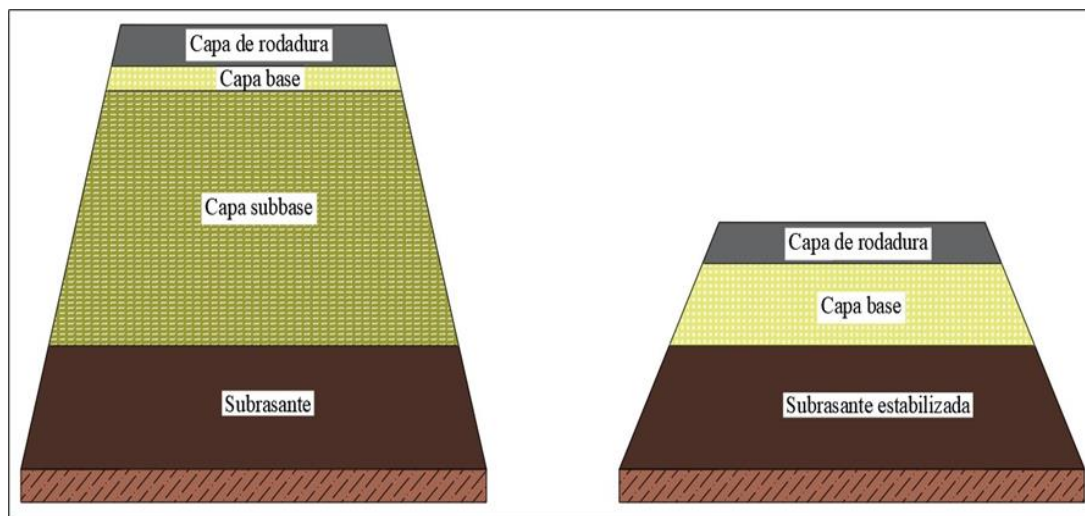
ya que esta clasificación contempla un flujo diario de 45 a 150 vehículos comerciales, coherente con las condiciones de circulación presentes en zonas urbanas residenciales. La categoría C permite representar de manera equilibrada el tránsito mixto existente, evitando tanto la subestimación del diseño como el sobredimensionamiento estructural.

Tabla 4.12 Comparativa de espesores

Muestra	CBR natural	Espesor natural (cm)	CBR 8% ceniza	Espesor mejorado (cm)
M-01	2%	60	9%	30
M-02	4%	45	14%	25

Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.18 Estructura del pavimento con subrasante no estabilizada y estabilizada



Fuente: Elaboración propia

La estabilización con 8% de ceniza de lodo residual incrementó de manera notable la capacidad portante del suelo, reduciendo el espesor estructural teórico, lo que evidencia un beneficio cuantificable en términos de desempeño geotécnico. Si bien el método CBR proyecta espesores totales del orden de 25 a 30 cm para los suelos mejorados, la normativa de la ABC establece un espesor mínimo de 35 cm para pavimentos flexibles, lo que obliga a ajustar el diseño final a dicho requisito. En consecuencia, aunque la ceniza permite una disminución efectiva del espesor calculado, las restricciones normativas limitan la reducción de la estructura, resaltando la importancia de considerar tanto la mejora técnica

obtenida como los criterios mínimos exigidos para garantizar la durabilidad del pavimento.

4.6. Determinación de rendimientos para la subrasante estabilizada

Se determinó el rendimiento de materiales requerido para la conformación de la subrasante estabilizada. Este cálculo se realizó a partir del volumen correspondiente al espesor de diseño y de la densidad seca del suelo compactado, permitiendo establecer la cantidad de material necesaria por unidad de superficie y evaluar la viabilidad constructiva del tratamiento con ceniza de lodo residual.

Espesor de la subrasante, adoptado (20 cm)

Volumen = $1 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ m}$

Volumen = $0,20 \text{ m}^3$ por m^2

M-01 (8% ceniza): densidad seca = $1,76 \text{ t/m}^3$

M-02 (8% ceniza): densidad seca = $1,83 \text{ t/m}^3$

Masa = $0,20 \times 1,76$

Masa = $0,20 \times 1,83$

Masa = $0,352 \text{ t/m}^2$

Masa = $0,366 \text{ t/m}^2$

Equivalentemente: 352 kg/m^2

Equivalentemente: 366 kg/m^2

Tabla 4.13 Rendimientos de la subrasante estabilizada con 8% de ceniza

Muestra	Densidad seca (t/m^3)	Espesor (m)	Volumen (m^3/m^2)	Masa de mezcla (t/m^2)	Masa de mezcla (kg/m^2)	Ceniza 8% (kg/m^2)
M-01	1,76	0,2	0,2	0,352	352	28,16
M-02	1,83	0,2	0,2	0,366	366	29,28

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de ceniza se calculó como el 8% del peso seco de la mezcla estabilizada, resultando en $28,16 \text{ kg/m}^2$ para la muestra M-01 y $29,28 \text{ kg/m}^2$ para la muestra M-02. Estos valores representan la cantidad real de aditivo necesaria para conformar un metro cuadrado de subrasante estabilizada con un espesor de 20 cm.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La caracterización inicial de los suelos limosos de baja plasticidad (A-4) provenientes de los barrios Cañadas II y Las Flores mostró valores de CBR entre 2 % y 4 %, lo que confirma su condición de subrasantes inadecuadas para pavimentos flexibles. Este diagnóstico permitió establecer una línea base sólida para evaluar el efecto de la ceniza de lodo residual como agente estabilizante y comparar objetivamente las mejoras obtenidas en las propiedades mecánicas del suelo.
- La incorporación de ceniza de lodo residual modificó de manera significativa las propiedades físicas y mecánicas del suelo A-4, particularmente en la humedad óptima, la densidad seca máxima, la resistencia (CBR) y la expansión. Estos resultados reflejan que la ceniza posee actividad puzolánica suficiente para interactuar con el suelo y mejorar sus propiedades, lo que confirma su capacidad para funcionar como un estabilizante viable
- El porcentaje del 8 % de ceniza constituyó la dosificación óptima para el suelo analizado, ya que logró el mejor equilibrio entre incremento de la capacidad de soporte y reducción de la deformación volumétrica. En esta proporción, el CBR aumentó de forma notable, mientras que la expansión disminuyó a valores compatibles con su uso como subrasante.
- Las mezclas con 2 % y 4 % de ceniza generaron mejoras moderadas en comparación con el suelo natural, aunque insuficientes para alcanzar los requisitos estructurales de proyectos viales.
- La dosificación del 12 % no resultó adecuada, ya que el incremento de finos elevó la humedad óptima, redujo la densidad seca máxima y limitó la resistencia obtenida. La mayor absorción de agua generó tendencia a la sobresaturación y disminuyó la cohesión del material compactado. Aunque la expansión permaneció baja, el desempeño global fue inferior al alcanzado con la dosificación óptima.
- El aprovechamiento de la ceniza de lodo residual generada en la PTAR San Blas se confirmó como una alternativa técnica y ambientalmente viable, al reducir la acumulación de residuos y ofrecer un material económico que mejora el comportamiento del suelo A-4.

- La mejora del CBR obtenida con la dosificación del 8 % permitió reducir el espesor total de la carpeta estructural requerida en el diseño del pavimento. Esta disminución validó la eficiencia de la estabilización, demostrando que la ceniza incrementa la capacidad portante de la subrasante y permite estructuras más económicas y sostenibles.
- Se comprobó mediante prueba t de Student que la mejora obtenida en el CBR es estadísticamente significativa ($t = 6,07 > t \text{ crítico} = 1,71$), confirmando que la ceniza de lodo residual influye de manera positiva en la capacidad portante del suelo limoso tratado.
- El uso de ceniza de lodo residual aportó ventajas técnicas y ambientales significativas, al mejorar el desempeño mecánico del suelo A-4 y contribuir a la valorización de un residuo abundante en la PTAR San Blas. Su disponibilidad local y bajo costo la convierten en una alternativa sostenible para proyectos viales que buscan optimizar recursos sin comprometer la calidad estructural.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda emplear 8 % de ceniza de lodo residual como dosis óptima para estabilizar suelos limosos de baja plasticidad (A-4) destinados a subrasantes de pavimentos flexibles, dado que este porcentaje equilibra resistencia y estabilidad.
- Evitar el uso de porcentajes superiores al 8 %, debido al incremento del contenido de finos, mayor humedad óptima y la disminución de la densidad seca máxima, factores que pueden afectar negativamente la resistencia final del material.
- Se recomienda complementar futuros estudios con ensayos de durabilidad a largo plazo, incluyendo ciclos de humedecimiento–secado y congelamiento–deshielo, para evaluar el comportamiento del suelo estabilizado bajo condiciones ambientales reales.
- Implementar un protocolo de calcinación controlada del lodo para obtener una ceniza homogénea y con mayor contenido de sílice y óxidos activos.
- Evaluar combinaciones de ceniza de lodo residual con otros agentes estabilizantes, tales como cal o pequeñas proporciones de cemento, con el propósito de generar sinergias, mejorar la resistencia y optimizar la reducción de la expansión.

- Promover el uso de ceniza de lodo residual en programas de gestión sostenible de residuos, incentivando su valorización y reduciendo la presión sobre las áreas de disposición final generadas por la PTAR San Blas.
- Se recomienda implementar el quemado del lodo residual previamente deshidratado en un horno artesanal de mayor capacidad, con el fin de procesar volúmenes superiores y obtener una cantidad suficiente de ceniza. Esto permitiría superar la limitación de la mufla utilizada en el laboratorio, cuyo reducido tamaño restringe la producción de ceniza y dificulta la obtención de muestras representativas para estudios experimentales y aplicaciones a mayor escala.
- Para una aplicación a escala real en plantas de tratamiento de aguas residuales, se recomienda la coordinación con empresas especializadas en el diseño e instalación de hornos industrializados, que cuenten con sistemas de control de temperatura y tratamiento de gases, considerando la ausencia de una normativa específica en Bolivia para la incineración de lodos residuales. Esta medida permitiría minimizar la emisión de compuestos tóxicos al medio ambiente y garantizar una gestión ambientalmente adecuada del proceso.