

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Actualmente, existen diversas metodologías normadas para el mejoramiento de suelos, entre las cuales destaca la estabilización con cal, considerada una de las técnicas más antiguas, empleada desde la época romana en vías como la Vía Apia en el año 312 a.C. (Arkiplus, 2015). Esta técnica sigue vigente debido a la facilidad de obtención del material, su notable capacidad cementante y sus beneficios ambientales (AASHTO M 216; FHWA NHI-06-037, 2006).

Según los “Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia” y el “Manual de Ensayos de Suelos, Materiales y Hormigones”, los porcentajes óptimos de adición de cal varían según la plasticidad del suelo: para suelos arcillosos de alta plasticidad se recomienda hasta un 12,5%, mientras que para suelos de baja plasticidad los valores oscilan entre 5% y 7%.

Por otra parte, el cloruro de sodio (NaCl) también ha sido empleado en la estabilización de suelos expansivos, ya que contribuye a reducir la humedad óptima de compactación y disminuye la evaporación del agua, debido al aumento de la tensión superficial del suelo (Garnica, Pérez Gómez & Obil, 2002).

A continuación, se presentan algunas investigaciones realizadas en Sudamérica relacionadas con la estabilización de suelos con cal y cloruro de sodio:

- En la Sabana Occidental de Bogotá, se demostró que la adición de 5 % de cal hidratada mejora significativamente la resistencia de suelos arcillosos, incrementando su capacidad de soporte frente a muestras no tratadas (Chocontá Osuna, 2020).
- En el tramo Cruce El Porongo – Aeropuerto – Cajamarca (Perú), se aplicaron diferentes proporciones de cloruro de sodio (1 %, 2 % y 3 %), concluyéndose que entre 2 % y 3 % es el rango óptimo, elevando el CBR del suelo hasta en un 11 % (Caruajulca Chávez Elmer, 2018).

- En Chile, se ejecutaron proyectos en caminos industriales tales como:
 - División Andina de Codelco (2009): se utilizó cloruro de sodio a 2700 msnm para estabilizar la carpeta de rodadura.
 - División Los Bronces de Anglo American (2007): se aplicó mantenimiento con sal después del invierno a 2100 msnm.

Aunque no se especifican las dosificaciones, en ambos casos se destaca que el cloruro de sodio cumple funciones múltiples: mejora de la carpeta de rodadura, disminución del punto de congelación del agua y reducción de polvo en temporada seca.

Investigaciones en el departamento de Tarija (Bolivia):

- Choque Vallejos & Segovia Ceballos (2016), en su investigación sobre los distritos 6, 7, 8 y 9 de la zona norte del casco urbano de Tarija, concluyen que predominan suelos arcillosos de tipo expansivo y plástico, los cuales generan problemas estructurales como agrietamientos y asentamientos diferenciales.
- Gonzales Benítez (2022), “Estudio técnico comparativo para la estabilización de arcillas expansivas con la adición de cal y sal aplicado a cimentaciones en la urbanización Nueva Andalucía del municipio de Tarija”, comprobó que la combinación de cal y sal mejora las propiedades físicas (plasticidad, trabajabilidad y sensibilidad) y mecánicas (resistencia a la compresión simple y reducción de la compresibilidad del suelo).
- Arce Mamani & Quispe Condori (2018), “Análisis comparativo de la estabilización de un suelo fino haciendo uso de tres materiales: cal, sulfato de calcio (yeso) y cloruro de sodio (sal)”, evidencian que la estabilización con 12,5% de sal reduce la expansión del suelo en comparación con el suelo natural, además de requerir menor contenido de humedad para alcanzar la compactación óptima.
- Ovando Rueda (2023), evaluó la estabilización de un suelo A-4(5) de baja capacidad de soporte en el tramo Canaletas–Entre Ríos mediante el uso de sal natural (1%–10%) y agregado de cantera. Se concluyó que la adición del 5% de

sal mejora la densidad y reduce la humedad óptima, aunque no aporta suficiente resistencia por sí sola. Sin embargo, al combinar 5% de sal, 15% de grava y 80% de suelo natural, así como mezclas con mayor proporción de grava, se lograron valores adecuados para una subrasante mejorada.

Estos antecedentes permiten fundamentar la presente investigación, orientada a evaluar el efecto combinado de la cal hidratada y el cloruro de sodio en la estabilización de suelos arcillosos, contribuyendo a la mejora de su desempeño mecánico y físico para aplicaciones en subrasantes y caminos vecinales.

1.2. Situación problemática

El costo económico en la construcción y mantenimiento de carreteras es un aspecto fundamental, muy observado tanto por los contratistas como por la entidad contratante. Esto se debe a que no siempre se dispone de un suelo adecuado que garantice la estabilidad y durabilidad de la subrasante.

La problemática en la ciudad de Tarija radica en que la mayoría de los suelos son arcillosos, los cuales presentan baja resistencia y cambios volumétricos significativos. Estos factores causan daños como baches, rajaduras y hundimientos en la plataforma.

Según los trabajos de investigación en la región se cuenta con la siguiente información.

Barrio: Los Chapacos, Los Olivos, Fortaleza, y el sector de la Nueva Terminal cuentan con la siguiente clasificación: CL (A-7-6), CL (A-7-5), CL (A-6), CL (A-6), respectivamente. Con descripción ARCILLA LIGERA y valores CBR de 2,6%, 3,2%, 3,0% y 3,7% al 100% de D_{max} . La expansión es de 2,9%, 2,2%, 1,7%, 2,5% (Rueda Velásquez Sofía Benita, 2016).

Barrio: San Nicolás, La tablada presentan la siguiente clasificación: CH (A-7), CH (A-7) Con IP de 15 y 15,96 respectivamente (Cristian David Flores, 2023)

Barrio: Miraflores, San Blas tienen los valores de CBR de 4,7%, 5,0% al 100% de D_{max} . La expansión es de 3,5%, 4,2% respectivamente. (Sergio Daniel Alfaro Herrera, 2020).

Estos valores nos muestran suelos con una capacidad de soporte muy baja los cuales nos hace decidir que se necesita un mejoramiento de suelos en nuestra región. Por otra parte, en el departamento se mejora el suelo estabilizando suelos finos con suelos granulares,

pero muchas veces no da resultados favorables debido a que los suelos no están mezclados homogéneamente, no tienen una buena compactación, otra solución sería cambiar el suelo, pero esto implica un costo elevado.

1.2.1. Problema

¿Cómo influye la adición de cal hidratada y cloruro de sodio en el comportamiento de suelos arcillosos estabilizados, destinados a conformar la capa de subrasante en vías terrestre?

1.3. Justificación

La presente investigación surge ante la necesidad de proponer soluciones para el mejoramiento de vías en zonas con suelos arcillosos, como ocurre en el municipio de Tarija. Este tipo de suelo se caracteriza por su baja resistencia y alta expansividad, condiciones que comprometen la estabilidad de la subrasante y disminuyen considerablemente su durabilidad.

Mejorar sus propiedades físicas y mecánicas es fundamental para garantizar la funcionalidad y durabilidad de las carreteras, especialmente en regiones donde se busca facilitar el acceso a áreas aisladas, favoreciendo sectores estratégicos como la educación, la salud y el empleo.

En este contexto, la estabilización química de suelos con cal se reconoce como una técnica consolidada en proyectos viales, debido a su capacidad para incrementar la resistencia, reducir la plasticidad y mejorar la trabajabilidad del suelo. Sin embargo, se plantea la posibilidad de incorporar cloruro de sodio como aditivo complementario, con el objetivo de evaluar su influencia en la mejora del comportamiento del suelo y su viabilidad técnica y económica.

El objetivo central de este trabajo es determinar el porcentaje óptimo de cal para estabilizar los suelos de los barrios Montecristo, Santiago y San Blas, y analizar la sustitución parcial de cal por cloruro de sodio en diferentes proporciones.

Investigaciones previas indican que el cloruro de sodio puede reducir la humedad óptima, mejorar la tensión superficial del suelo y disminuir su expansividad, contribuyendo así a una mayor estabilidad.

Además, Bolivia cuenta con importantes yacimientos de sal en los departamentos de **Potosí, Oruro y La Paz**, lo que representa una oportunidad para el uso de este material como un estabilizante económico, accesible y con bajo impacto ambiental. Se busca no solo comparar el desempeño técnico de las mezclas suelo-cal y suelo-cal-sal, sino también evaluar su comportamiento, costos de ejecución y demás beneficios asociados al empleo combinado de estos estabilizantes en suelos arcillosos.

1.4. Objetivos de investigación

Los objetivos planteados para la siguiente investigación se dividen en dos partes.

1.4.1. Objetivo general

Comparar las propiedades físicas y mecánicas en la estabilización de suelos arcillosos a través de diferentes proporciones de cal y sal mediante ensayos en laboratorio de resistencia y plasticidad para su empleo en subrasantes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar y extraer muestras suficientes del suelo arcilloso, para realizar ensayos de laboratorio
- Caracterizar el suelo en su estado natural.
- Determinar la proporción óptima de cal, necesaria para la estabilización de suelos arcillosos.
- Analizar el comportamiento del suelo arcilloso reemplazando la cal con diferentes proporciones de sal.
- Determinar la dosificación óptima de sal, manteniendo un porcentaje de cal en la mezcla, mediante ensayos de CBR.
- Establecer si el suelo tratado con cal y sal obtiene características mecánicas similares al suelo tratado con cal.
- Analizar los precios unitarios para la estabilización con cal y estabilización con cal y sal.

1.5. Hipótesis

La influencia de cal y sal optimiza técnica y económicamente la estabilización de suelos arcillosos.

1.6. Operacionalización de variables

La Operacionalización de las variables se conforma por independientes y dependientes, que se presentaran a continuación.

1.6.1. Variable independiente

Estabilización de suelos arcillosos mediante la adición de cal y sal.

1.6.2. Variable dependiente

Características físicas, mecánicas y económicas del suelo.

1.6.1.1. Variable independiente

Tabla 1.1: Operacionalización de la variable independiente

Variable Independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Estabilización de suelos	Proceso mediante el cual se mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo como ser el aumento en capacidad de soporte y una disminución en su sensibilidad frente al agua, además de reducir los efectos negativos que afectan la estabilidad del suelo	Cal	Propiedades de la cal	Agente estabilizador que modifica la estructura química y física del suelo arcilloso
			Cantidad de la cal	Adición del 5%, 7% y 12,5% de cal respecto a la masa del suelo arcilloso
		Sal	Cantidad de sal	Porcentaje de sal adecuado respecto al 100% de la masa del suelo arcilloso

Fuente: Elaboración propia

1.6.2.1. Variable dependiente

Tabla 1.2: Operacionalización de la variable dependiente

Variable Dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Características físicas	Mejora significativamente su comportamiento físico y reduciendo los problemas típicos de los suelos arcillosos no tratados, como su alta plasticidad, baja resistencia a la compresión, expansión y contracción por humedad	Propiedades físicas de un suelo arcilloso	Color	Depende del tipo de estabilizante o aditivo utilizado
			Textura	Incluye una mayor densidad del suelo, menor cohesión y plasticidad mayor resistencia a la humedad
Características mecánicas	Mejora sustancialmente sus características mecánicas, haciendo que sea más resistente, durable y menos susceptible a deformaciones plásticas y expansivas.	Propiedades mecánicas de un suelo arcilloso	Capacidad de soporte CBR	Se genera un impacto significativo en su resistencia y comportamiento mecánico del suelo
			Límites de plasticidad	Reduce la plasticidad de la arcilla, mejora su estabilidad y capacidad de soportar cargas sin sufrir deformaciones excesivas
Costo económico	La capacidad de una investigación para obtener resultados con menor cantidad de recursos.	Evaluación económica	Costo de estabilización	Costo unitario

Fuente: Elaboración propia

1.7. Alcance

La investigación compara las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos estabilizados con diferentes proporciones de cal hidratada y cloruro de sodio, evaluando el desempeño obtenido para condiciones de subrasante. Para ello, se ha realizado una caracterización detallada de tres muestras representativas de suelos arcillosos, provenientes de los barrios Montecristo, Santiago y San Blas, ubicados en la ciudad de Tarija. La clasificación de estos suelos se efectuó conforme a la Norma SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), la cual permitió identificar sus características predominantes.

Las muestras fueron tratadas con distintas dosificaciones de cal y sal, con el fin de evaluar el efecto de estos aditivos sobre las propiedades del suelo. Se llevaron a cabo diversos ensayos de laboratorio para determinar parámetros clave, tales como: análisis granulométrico, contenido de humedad, límites de Atterberg, compactación y capacidad de soporte (CBR).

El alcance de este trabajo se centra en analizar el comportamiento de los suelos estabilizados a partir de los resultados obtenidos en laboratorio, haciendo énfasis en la mejora de la capacidad de soporte, la reducción de la plasticidad y los efectos sobre la compactación. Además, se incorpora un análisis comparativo de precios unitarios en función de los porcentajes de cal y sal empleados, con el fin de valorar la viabilidad técnica y económica de cada alternativa de estabilización.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES Y

DEFINICIONES

CAPÍTULO II

GENERALIDADES Y DEFINICIONES

2.1. Suelo

El origen del suelo está vinculado a un proceso geológico y biológico, proceso mediante el cual las rocas se desintegran debido a la acción de factores físicos (como el viento, el agua y los cambios de temperatura) y químicos (como la disolución de minerales), cambiándole la composición y mineralogía, así como sus propiedades físicas y mecánicas a través del tiempo. Una vez que las rocas se han descompuesto en fragmentos más pequeños, la descomposición de la materia orgánica como plantas y animales, también juega un papel importante en la formación de nuevas estructuras del suelo.

Por otro lado, el clima (temperatura, precipitaciones y humedad) es fundamental en la velocidad y naturaleza de la meteorización y la formación del suelo.

Este es un proceso continuo y puede llegar a durar largos períodos de tiempo, dando lugar a la formación de suelos con diferentes características dependiendo del entorno.

Según Peck et al. (1983); destaca que, en la práctica, no existe diferencia tan simple entre roca y suelo a unas las rocas más rígidas y fuertes pueden debilitarse al sufrir el proceso de meteorización, y algunos suelos muy endurecidos pueden presentar resistencias comparables a la de una roca meteorizada.

Desde el punto de vista ingenieril, el suelo se considera un material de soporte fundamental para la construcción y las infraestructuras. Su evaluación y caracterización son cruciales para garantizar la estabilidad, seguridad y durabilidad de cualquier obra civil, como edificios, carreteras, puentes y otras estructuras. El análisis del suelo en ingeniería se enfoca en cómo este material responde a las cargas aplicadas, cómo se comporta ante la humedad y las condiciones del entorno, y cómo interactúa con otras estructuras. (Braja M. Das, 1999).

El suelo según su textura se clasifica según la proporción de sus partículas minerales, principalmente arcilla, limos y arena. Los suelos arenosos son partículas grandes (de 0,05 mm a 2 mm), que permiten un excelente drenaje y aireación, pero tienen una capacidad

limitada de retención de agua y nutrientes, los suelos limosos son partículas de tamaño intermedio (entre 0,002 mm y 0,05 mm), que ofrecen una textura más suave que la arcilla y un buen equilibrio entre retención de agua y drenaje. Los suelos arcillosos son partículas muy pequeñas (menos de 0,002 mm), que tienen alta capacidad de retención de agua y nutrientes, son pesados no drenan ni se desecan fácilmente.

Figura 2.1: Suelo arcilloso



Fuente: www.fao.org

2.2. Suelos arcillosos

Los suelos arcillosos son aquellos que tienen una alta proporción de partículas de arcilla, lo que les da propiedades específicas que afectan tanto su comportamiento natural como su interacción con aditivos estabilizantes, como la cal y el cloruro de sodio. En ingeniería civil, su uso es común en la construcción de subrasantes, pero presentan diversos desafíos debido a sus características, que incluyen la baja resistencia, alta plasticidad y capacidad de expansión.

2.2.1. Características de los Suelos Arcillosos

1. Textura y Composición:

Los suelos arcillosos se caracterizan por tener partículas de tamaño inferior a 0,002 mm, lo que les otorga una textura fina y pegajosa, generando rigidez y agrietamiento al secarse.

2. Alta Capacidad de Retención de Agua:

Su capacidad para retener grandes cantidades de agua puede ser tanto una ventaja (para cultivos) como un inconveniente en construcción, donde puede generar problemas de drenaje.

3. Baja Permeabilidad:

Esta característica impide el paso fácil del agua, creando problemas de encharcamiento y acumulación de agua en la superficie, lo que impacta la estabilidad de estructuras y la eficacia de los drenajes.

4. Plasticidad y Cohesión:

Los suelos arcillosos tienen alta plasticidad en su estado húmedo, lo que les da gran capacidad para ser moldeados. Su cohesión también ayuda a mantener la estabilidad del suelo, pero puede ser problemático en cuanto a su expansión y contracción.

5. Expansión y Contracción:

Estos suelos son conocidos por su comportamiento expansivo, particularmente aquellos que contienen minerales como la montmorillonita. Este fenómeno puede causar desplazamientos y agrietamientos en infraestructuras, siendo uno de los principales motivos para la estabilización química.

6. Fertilidad:

La alta capacidad de intercambio catiónico de los suelos arcillosos les permite almacenar nutrientes esenciales para las plantas, lo que los hace fértiles, pero también implica que pueden saturarse de agua si no se drenan adecuadamente.

7. Comportamiento en Climas Húmedos y Secos:

En climas húmedos, estos suelos pueden volverse muy saturados, mientras que en climas secos se endurecen y se agrietan. La gestión de la humedad es clave para su estabilidad.

2.2.2. Ventajas de los Suelos Arcillosos

1. Alta retención de nutrientes: Es beneficioso para actividades agrícolas, pero también es relevante en la estabilización de suelos para garantizar un ambiente adecuado para la infraestructura de caminos.
2. Capacidad de retener agua: Este aspecto es útil en la estabilización de suelos de zonas áridas, al evitar la rápida evaporación del agua.
3. Fabricación de productos cerámicos: La plasticidad de los suelos arcillosos facilita la fabricación de ladrillos y otros materiales cerámicos, lo que también es de interés para los aspectos constructivos en ingeniería civil.

2.2.3. Desventajas de los suelos arcillosos

1. Problemas de drenaje: La baja permeabilidad afecta no solo al crecimiento de plantas, sino también a la estabilidad de las estructuras construidas sobre estos suelos.
2. Expansión y contracción: La variabilidad en el volumen de estos suelos puede causar desplazamientos y daños en las infraestructuras, afectando su durabilidad.

2.2.4. Uso de las arcillas en Ingeniería

El uso de suelos arcillosos en ingeniería requiere técnicas de mejora, como la estabilización química, para mitigar sus efectos negativos. El tratamiento con cal y sal, específicamente, ayuda a mejorar la plasticidad y resistencia del suelo, haciéndolo más adecuado para su uso en subrasantes y obras viales.

2.3. Cloruro de sodio

La sal común o cloruro de sodio (NaCl) es un compuesto ampliamente utilizado como condimento, de fácil acceso y bajo costo. Existen tres tipos según su origen:

- Sal marina y sal de manantial, obtenidas por evaporación.
- Sal gema, extraída de minas (halita).
- Sal vegetal, obtenida al hervir plantas gramíneas del desierto de Kalahari.

Se presenta en formatos fino, grueso y en copos, y se comercializa como refinada (cristales blancos y uniformes) o sin refinar (cristales irregulares).

Los métodos principales de obtención son:

- Evaporación solar de agua salada.
- Extracción en minas de sal.
- Evaporación artificial en hornos.

En Bolivia destaca el Salar de Uyuni, uno de los mayores yacimientos de sal del mundo.

2.3.1. Estabilización con sal

La estabilización de suelos mediante la adición de sal, como el cloruro de sodio (NaCl), es una técnica complementaria que mejora las propiedades físicas y mecánicas de los

suelos finos, especialmente en limos y arcillas. Contribuye a la reducción de la plasticidad, la disminución de la humedad óptima de compactación y el aumento de la capacidad de soporte, facilitando una mejor compactación y resistencia del suelo.

Según Garnica, Pérez Gómez y Obil (2002), la adición de cloruro de sodio en suelos arcillosos, particularmente en aquellos con comportamiento expansivo, tiene un efecto notable en la reducción de la plasticidad y la expansión volumétrica. Los porcentajes de sal recomendados varían generalmente entre 2% y 10%, pudiendo alcanzar hasta el 12% en casos particulares, dependiendo del tipo de suelo y sus propiedades iniciales.

Este tratamiento mejora la estructura del suelo al favorecer la floculación de las partículas finas y reducir la actividad de los minerales expansivos. Cuando se aplica conjuntamente con cal, los efectos son aún más significativos, ya que se potencia la mejora de la trabajabilidad, se incrementa la capacidad de soporte y se logra una mayor estabilidad a largo plazo.

2.3.2. Propiedades del suelo que mejoran con la adición de sal

1. El límite líquido y el índice de plasticidad se reducen.
2. Las partículas de roca caliza son solubles o soluciones de cloruro de sodio.
3. Aumenta la capacidad de reacción de humedad.
4. El peso volumétrico y la resistencia a la compresión aumentan.
5. La cohesión y el Angulo de fricción interna disminuyen en especímenes que no pierden la humedad, mientras que si el espécimen se somete a un proceso de secado el Angulo de fricción y la cohesión aumenta considerablemente.

La sal es más efectiva en suelos expuestos al congelamiento debido a que retiene la humedad y sería más difícil disolverlo por la exposición a las lluvias. Tiene mayores resultados en suelos con material fino ya que en material granular solo serviría para quitar el polvo.

2.3.3. Ventajas y desventajas de la estabilización con sal

Se analizarán las ventajas y desventajas para la aplicación de la sal en vías terrestres.

1. Ventajas

- Es un estabilizador natural, existe una gran cantidad en todo el mundo, su bajo costo y su facilidad de aplicación.
- Requiere un periodo de curado de 15 días y si está expuesta a las lluvias requiere una capa de imprimación de 0,5 g cada m² después de cada lluvia.
- Puede abrirse al tránsito inmediatamente después de ser aplicada y el tránsito no es interrumpido durante su ejecución ni durante su curado.
- Disminuye totalmente el polvo, material suelto en la vía y su mantenimiento es mínimo y económico. No existe riesgos contra la salud en las personas.

2. Desventajas

- Produce corrosión en las carrocerías de los vehículos.
- Cuando la humedad ambiental sea alta la superficie se torna resbaladiza.
- Una mala homogenización de la mezcla puede provocar desgaste a la capa y baches.
- Requiere circular con precaución durante el curado debido a que la superficie se torna resbalosa.
- La sal en grandes concentraciones puede producir impactos ambientales negativos como daños en la vegetación, fauna, aguas superficiales.

2.4. Cal hidratada

La cal hidratada o hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es una sustancia alcalina obtenida al hidratar el óxido de calcio (CaO), en un proceso exotérmico conocido como apagado. Este tipo de cal es la más común en ferreterías y se utiliza frecuentemente en obras de construcción y mejoramiento de suelos.

En estabilización de suelos, la cal hidratada se emplea principalmente en suelos arcillosos, ya que ayuda a disminuir la plasticidad, mejorar la resistencia, reducir la humedad y facilitar la compactación. Su uso permite obtener suelos más firmes, secos y estables, ideales para construir sobre ellos.

2.4.1. Estabilización con cal

La estabilización con cal hidratada modifica las propiedades del suelo, incrementando su resistencia y su estabilidad frente a la humedad. Generalmente, se observa una ligera reducción en la humedad óptima de compactación y un aumento en la densidad máxima seca, lo que favorece una mejor densificación. Estas mejoras compensan ampliamente cualquier variación inicial en las propiedades físicas del suelo

La dosificación óptima de cal depende del tipo de suelo y de sus características minerales. **Los suelos CL** (Arcillas de baja plasticidad) requieren **entre 3% y 7% de cal hidratada**, debido a su reacción moderada con el estabilizante, logrando mejoras en plasticidad, trabajabilidad y capacidad de soporte con cantidades relativamente bajas. En contraste, **los suelos CH** (arcillas de alta plasticidad) demandan dosis mayores, siendo común utilizar **hasta 12,5% de cal**, dado su mayor contenido de minerales activos y alta plasticidad. En estos casos, se necesita una mayor cantidad de cal para ^{inducir} formación de compuestos cementantes y mejorar propiedades como la resistencia, durabilidad y comportamiento volumétrico. (AASHTO M 216; FHWA NHI-06-037, 2006).

2.4.2. Propiedades del suelo que mejoran con la adición de cal

1. Plasticidad: La cal hidratada reduce el índice de plasticidad en suelos con alta plasticidad, lo que mejora su trabajabilidad y estabilidad. En suelos de plasticidad media, el efecto es moderado, mientras que, en suelos finos con baja plasticidad, la adición de cal puede incluso incrementar levemente el índice de plasticidad debido a reacciones con minerales presentes en el suelo.

1. Resistencia: La resistencia a la compresión simple es una propiedad clave en suelos cohesivos. La incorporación de cal hidratada mejora esta resistencia en función del porcentaje aplicado y del tiempo de curado. Sin embargo, es necesario considerar el equilibrio técnico-económico, ya que un mayor contenido de cal no siempre representa una mejora proporcional en el comportamiento del suelo.

2.4.3. Ventajas y desventajas de la estabilización con cal

1. Ventajas

- Reduce la plasticidad del suelo, mejorando su trabajabilidad y comportamiento mecánico.
- Mejora la capacidad de soporte (CBR), permitiendo su uso como subrasante en caminos.
- Disminuye la humedad óptima de compactación y facilita la obtención de mayores densidades secas.
- Reduce la expansividad de arcillas activas, controlando problemas de hinchamiento y contracción.
- Aumenta la durabilidad frente a ciclos de humedad-sequía o congelamiento-deshielo.
- Mejora la estabilidad volumétrica, lo que prolonga la vida útil de la vía.

2. Desventajas

- Requiere un buen control de la dosificación y del curado, para asegurar reacciones químicas efectivas.
- Genera polvo durante la aplicación, lo cual implica riesgos de seguridad y salud ocupacional.
- Puede provocar reacciones de hinchamiento si no se aplica adecuadamente en suelos sulfatados.
- Tiempo de reacción no inmediato, ya que el desarrollo completo de las propiedades mecánicas requiere días o semanas de curado.
- Efectividad limitada en condiciones de muy bajas temperaturas, donde las reacciones químicas se ralentizan.

2.5. Subrasante

Una subrasante es la superficie obtenida con las explanaciones, sobre la que apoyará la estructura del pavimento. Constituye el soporte directo de dicho pavimento, por lo que debe tener una resistencia y una regularidad geométrica adecuadas (Kraemer et al. 2004).

Montejo (2002) señala que de la calidad de la subrasante depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea este flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte (CBR) o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito.

Rico y del Castillo (2005) destacan que una subrasante resistente será capaz de tolerar niveles de esfuerzo relativamente altos, con lo que podrán usarse sobre ella espesores reducidos de las capas del pavimento sin comprometer la estabilidad general, lo que generará una importante reducción de costos.

De acuerdo con Kraemer et al. (2004), con la formación de una subrasante se debe conseguir una superficie:

- Sin excesivas irregularidades, de manera que el espesor de la capa inferior del pavimento pueda ser sensiblemente uniforme.
- Poco sensible a los cambios de humedad.
- Con pendientes que permitan drenar las precipitaciones ocurridas durante la ejecución de las obras.
- Con una resistencia suficiente para soportar el tráfico de obra sin presentar erosión o deformaciones.

2.5.1. Características que deben cumplir los suelos para formar una subrasante según SUCS

1. Granulometría:

- Suelos finos (limos y arcillas): Los suelos finos como las arcillas, pueden ser problemáticos para las subrasantes debido a su comportamiento bajo condiciones de humedad (expansión y contracción). Sin embargo, pueden ser usados si tienen características adecuadas de plasticidad y resistencia
- Suelos gruesos (gravas y arenas): Generalmente, los suelos gruesos como las gravas y arenas son adecuados para subrasantes porque permiten un buen drenaje y tienen una buena capacidad para soportar cargas.

2. Plasticidad del suelo:

- Índice Plástico (IP) entre 6 y 20: En este rango, el material tiene suficiente plasticidad para evitar que se agriete o desintegre bajo condiciones de humedad, y no es tan plástico como para volverse muy sensible a la expansión y contracción.
- En general, los suelos con un LL adecuado y un IP razonable (preferentemente $LL < 50$ y $IP < 20$) son más adecuados para la construcción de subrasantes.

3. Capacidad de soporte (CBR):

- la capacidad de soporte o índice CBR (California Bearing Ratio) es fundamental para determinar la aptitud de un suelo para ser usado en la construcción de una subrasante, según el SUCS, un suelo utilizado para subrasante debe tener un índice CBR mínimo que asegure que soportará las cargas del tráfico. Generalmente, se busca que los suelos tengan un $CBR \geq 5\%$ para ser considerados adecuados para una subrasante.

2.5.2. El índice CBR en la evaluación de la calidad de una subrasante

El índice CBR está fuertemente influenciado por las propiedades del suelo que se determinan a través del sistema SUCS, especialmente la granulometría, la plasticidad y la composición del suelo. Veamos cómo se relacionan los valores de CBR con las características del suelo clasificadas bajo SUCS:

1. Suelos gruesos (Gravas y Arenas).
 - Suelos como Grava (GW) o Arena bien graduada (SW) suelen tener un alto índice CBR (generalmente mayor a 10%), adecuados para subrasantes.
 - Estos suelos tienen una alta capacidad de carga, son permeables y resisten bien la compresión bajo las cargas de tráfico.
2. Suelos finos (Arcillas y limos).
 - Los suelos cohesivos como las arcillas (CL, CH) y los limos (ML, MH) tienden a tener valores de CBR más bajos. Estos suelos pueden deformarse fácilmente bajo carga, necesitan un tratamiento adecuado (estabilización, drenaje, etc.) para aumentar su capacidad de soporte y, por lo tanto, elevar su CBR.

3. Suelos intermedios (Limos y arcillas de baja plasticidad).

- Los suelos limosos o arcillas de baja plasticidad (CL) generalmente tienen un CBR moderado que puede variar entre 3% y 5%. Aunque son menos adecuados que las gravas o arenas, se pueden usar como subrasante si se tratan adecuadamente para mejorar su capacidad de carga.

2.5.3. Recomendaciones de la altura de la subrasante según el CBR

El índice CBR mide la capacidad de carga del suelo, mientras que el SUCS lo clasifica según su granulometría y plasticidad. Aunque son métodos distintos, las propiedades descritas por SUCS influyen en el valor del CBR. Esta relación permite estimar el comportamiento del suelo y definir la profundidad mínima de la subrasante según las condiciones del terreno.

Tabla 2.3: Relación entre CBR y la altura de la subrasante

CBR	Recomendaciones para la subrasante	Altura recomendada
$CBR \geq 5\%$	Suelo adecuado para subrasante sin tratamiento.	30 cm por encima del nivel freático
CBR 3% - 5%	Suelo adecuado, pero puede necesitar estabilización.	30 - 40 cm por encima del nivel freático
CBR 1% - 3%	Suelo adecuado solo con tratamiento o mejora.	40 cm o más sobre el nivel freático
$CBR < 1\%$	Suelo no adecuado sin sustitución o mejora significativa.	50 cm o más sobre el nivel freático

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures

2.6. Teoría de los ensayos que determina las propiedades de los suelos

2.6.1. Humedad de los suelos

Se define como contenido de humedad de suelos, a la cantidad de agua que posee una determinada muestra de suelo, expresada en porcentaje y referida al peso seco de la misma.

Figura 2.2: Equipo para determinar la humedad del suelo



Fuente: Norma ASTM D2216.

La fórmula para encontrar el contenido de humedad del suelo es la siguiente:

$$W(\%) = \frac{P_a}{P_{ss}} \times 100$$

Dónde:

W = Contenido de humedad (%)

P_a = Peso del agua (g)

P_{ss} = Peso del suelo seco (g)

2.6.2. Granulometría de los suelos

La granulometría de los suelos finos, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se refiere al análisis del tamaño de las partículas y su distribución en diferentes rangos. Los suelos finos son aquellos en los que más del 50% de las partículas tienen un tamaño menor a 0,075 mm (75 micrómetros). Según el SUCS, estos suelos se dividen principalmente en arcillas y limos.

Para la clasificación de suelos finos, es necesario realizar ensayos granulométricos, siendo el análisis por tamizado uno de los más comunes

Figura 2.3: Conjunto de mallas para el análisis mecánico del suelo



Fuente: Braja M. Das (2004), ASTM D1140.

El Sistema Unificado SUCS define los suelos de la siguiente manera:

Tabla 2.4: Clasificación de un suelo según el tamaño de sus partículas

Clasificación de partículas	Tamaño	Clasificación
Suelos gruesos	> 0,075 mm	Grava (GW, GP)
		Arena (SW, SP)
Suelos finos	< 0,075 mm	Limosa (ML)
		Arcillosa (CL, CH)

Fuente: Clases de suelos según SUCS.

1. Suelos gruesos (suelos con partículas mayores a 0,075 mm)

Grava: Partículas con un tamaño mayor de 4,75 mm

- **GW:** Gravas bien graduadas (buen rango de tamaños).
- **GP:** Gravas mal graduadas (un rango estrecho de tamaños de partículas).

2. Arena: Partículas con un tamaño entre 0,075 mm y 4,75 mm

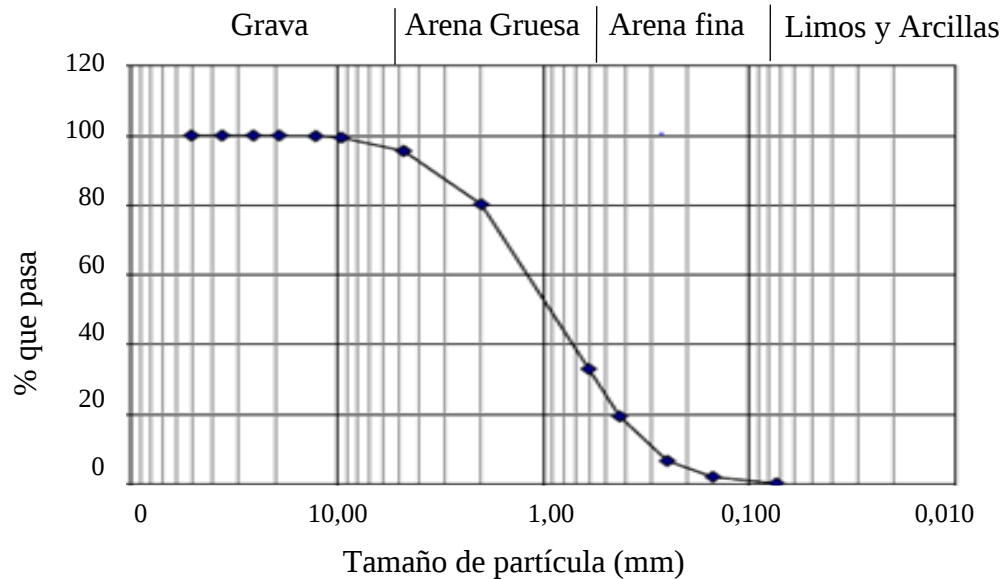
- **SW:** Arenas bien graduadas.
- **SP:** Arenas mal graduadas

3. Suelos finos (suelos con partículas menores a 0,075 mm)

Limo: Tienen una plasticidad baja y un comportamiento menos cohesivo en comparación con las arcillas.

Arcillas (CL y CH): Tienen un comportamiento más cohesivo y plástico, lo que significa que pueden deformarse fácilmente bajo esfuerzo.

Figura 2.4: Distribución granulométrica

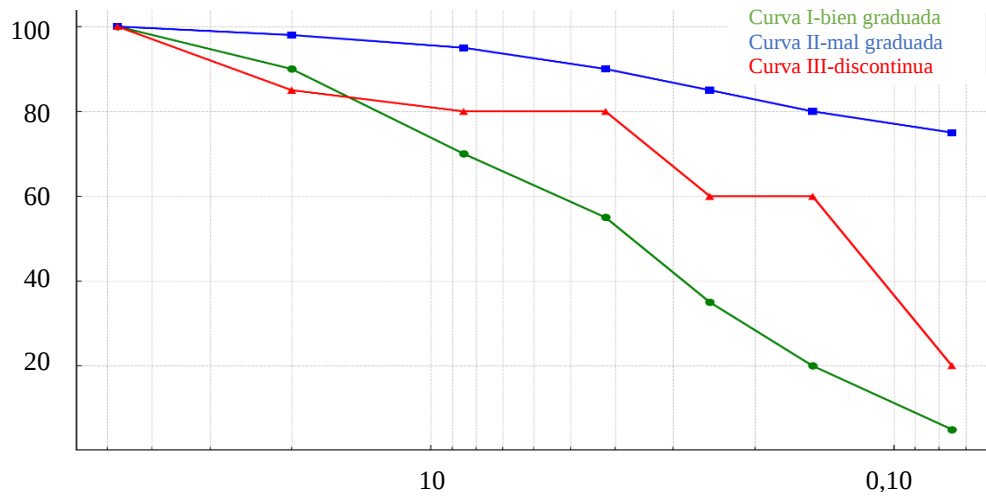


Fuente: Braja M. Das (2004)

La curva de distribución granulométrica es una herramienta clave en la ingeniería geotécnica, ya que representa de manera detallada el rango y la distribución porcentual de los tamaños de partículas presentes en el suelo. Una distribución granulométrica adecuada puede optimizar la compactación, mejorar las propiedades de resistencia y deformabilidad, y garantizar la estabilidad y durabilidad de las subrasantes en caminos vecinales.

En el análisis de la distribución granulométrica, los diámetros de las partículas se grafican en una escala logarítmica, mientras que el porcentaje de finos se representa en escala aritmética. Estas gráficas o curvas son esenciales para caracterizar el material a utilizar. Siempre que se disponga de suficientes puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica puede completarse con tablas.

Figura 2.5: Curvas granulométricas



Fuente: Braja M. Das (2004)

Las curvas granulométricas pueden clasificarse en tres tipos principales:

Curva I – Bien graduada: Representa una distribución continua de tamaños de partículas, desde gruesas hasta finas. La curva es suave y extendida, lo que indica una buena compactación y baja permeabilidad.

Curva II – Mal graduada (uniforme): En esta curva, la mayoría de las partículas tienen tamaños similares, lo que da lugar a una curva empinada y estrecha. Esto indica mala compactación y alta permeabilidad.

Curva III – Discontinua: Presenta “saltos” o tramos planos donde faltan ciertos rangos de tamaños. Esto refleja vacíos mal distribuidos y una posible inestabilidad del material.

2.6.3. Límites de Atterberg

Figura 2.6: Equipo para límites de Atterberg



Fuente: ASTM D4318

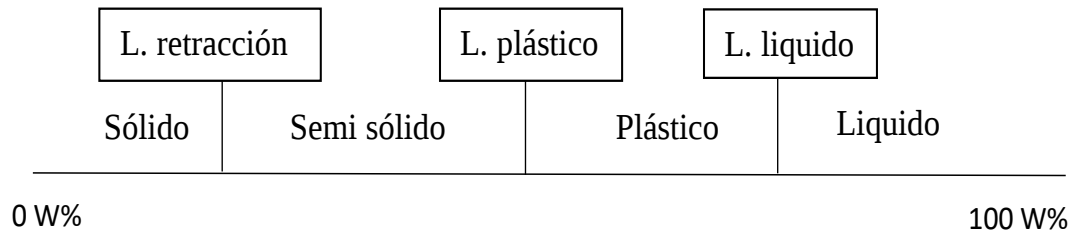
La plasticidad es una propiedad clave en la caracterización de suelos finos, vinculada a su comportamiento mecánico y a las propiedades fisicoquímicas de las arcillas. Su cuantificación mediante el índice de plasticidad (IP) permite diferenciar suelos arcillosos ($IP > 10$) de limosos ($IP \leq 10$), según el SUCS. Este parámetro es clave en el diseño de subrasantes, ya que su valor está relacionado con el comportamiento del suelo frente a cargas, reflejado en el índice CBR. Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan.

Un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso.

La arcilla, por ejemplo, si está seca se encuentra muy suelta o en terrones, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida.

Cada uno estos cambios o estados varían según el contenido de humedad.

Figura 2.7: Variación de la plasticidad según el contenido de humedad



Fuente: Braja M. Das (2004)

2.6.4. Estados de consistencia

Para medir la plasticidad de las arcillas se han propuesto varios criterios, siendo el más reconocido el de Atterberg. Él estableció que la plasticidad no es una propiedad constante, sino que depende del contenido de agua del suelo. Una arcilla seca puede ser rígida y quebradiza, mientras que con mayor humedad puede comportarse como lodo o incluso como una suspensión líquida. Atterberg también determinó que la plasticidad debe evaluarse mediante dos parámetros: el **límite líquido** y el **límite plástico**, que permiten definir los distintos estados de consistencia del suelo según su contenido de humedad.

- Límite líquido

El límite líquido se refiere al contenido de humedad que está representada en porcentaje, en el cual un suelo puede estar entre estado líquido y plástico, se lo determina con un ensayo denominado Casagrande.

- Límite plástico

El límite plástico se refiere al contenido de humedad que está representada en porcentaje del suelo seco, en el cual un suelo puede cambiar del estado plástico a un estado semisólido y de un estado semisólido a sólido. Este límite se considera como el más bajo contenido de humedad.

- Plasticidad de los suelos.

Se denomina plasticidad de suelos al rango de contenido de humedad de un suelo, el cual soporta deformaciones, pero sin agrietarse, también es llamado índice de plasticidad y su cálculo se determina mediante la diferencia entre el límite líquido y límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

Tabla 2.5: Clasificación de un suelo según su índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Características
IP > 20	Alta	Suelo muy arcilloso
7 < IP < 20	Media	Suelo arcillo
IP < 7	Baja	Suelo poco arcilloso
IP = 0	No plástica	Suelos exentos de arcilla

Fuente: ASTM D4318 (2016)

La plasticidad es la capacidad del suelo para deformarse sin romperse dentro de ciertos límites de humedad (Crespo, 2004). En las arcillas, esta propiedad varía según su composición y contenido de agua. Según Sowers y Sowers (1972), puede medirse mediante el índice de plasticidad (IP) o estimarse por la resistencia de muestras secadas al aire. Según la Transportation Research Board (2002), los suelos con un índice plástico (IP) superior a 20 pueden experimentar expansión significativa durante ciclos de humedad y sequía, lo cual compromete la estabilidad de la subrasante. Por el contrario, suelos con un IP inferior a 15 suelen presentar un comportamiento más estable, siendo más adecuados para su uso en subrasantes de caminos vecinales, especialmente en zonas expuestas a variaciones climáticas.

Tabla 2.6: Caracterización de la plasticidad de un suelo

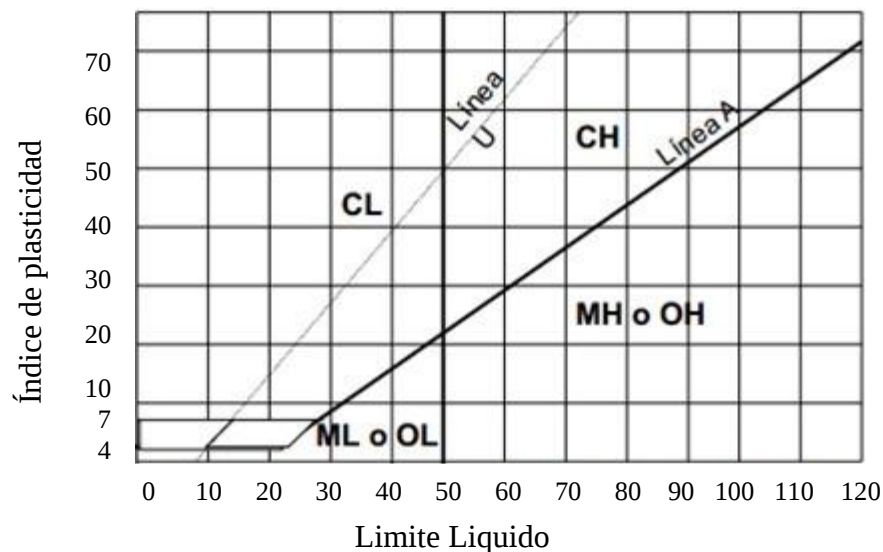
Termino usado	IP	Resistencia estado seco	Ensayos de campo
No plástico	0 - 3	Muy baja	Cae en pedazos fácilmente
Ligeramente plástico	4 - 15	Ligera	Se tritura fácilmente en los dedos
Medianamente plástico	15 - 30	Mediana	Difícil de triturar
Muy plástico	≥ 31	Alta	Imposible de triturar con los dedos

Fuente: Tomado de Sowers, GB y Sowers, GF 1972:11

2.6.5. Clasificación del suelo según SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS; clasifica los suelos en dos grupos principales a partir del tamiz N.º 200: suelos gruesos (más del 50 % retenido) y suelos finos (más del 50 % pasa). Los suelos gruesos se subdividen según el tamiz N.º 4, que diferencia entre gravas y arenas. Para los suelos finos, la clasificación se basa en los límites de Atterberg, principalmente el Límite líquido y el Índice de plasticidad.

Figura 2.8: Límite de Atterberg (Carta de plasticidad)



Fuente: ASTM D-2487-93

Tabla 2.7: Clasificación de suelos

Divisiones principales				Símbolo	Nombre clásico	
1		2			3	4
Suelos de grano grueso. Más de la mitad del material es mayor que el tamiz N°200	El tamiz N°200 separa las partículas más finas del suelo, casi invisibles a simple vista.	GRAVA Más de la mitad de los gruesos mayor a 5 mm	Tamiz N°4 (4,75 mm), separa grava de arena	Gravas limpias	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, poco o ningún fino
					GP	Gravas pobremente graduadas, mezclas de grava arena, poco o ningún fino
				Gravas con fino	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
					GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
		ARENA Más de la mitad de los gruesos menor a 5 mm	Arenas limpias	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, poco o ningún fino	
				SP	Arenas pobremente graduadas arenas con grava, poco o ningún fino	
				Arenas con finos	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
					SC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla
Los de grano fino. Más de la mitad del material es menor que el Tamiz N°200		Limos y arcilla. Límite líquido menor que 50			ML	Limos orgánicos de baja compresibilidad
					CL	Arcilla inorgánica de baja a media compresibilidad arcilla con grava, arcilla arenosa, arcilla limosa
					OL	Limos orgánicos y arcilla limosa orgánicas de baja compresibilidad
		Limos y arcillas. Límite líquido mayor que 50			MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad
					CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad
					OH	Arcilla y limo de media a alta compresibilidad
Suelos altamente orgánicos				Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos	

Fuente: Conanma (2016). Geotecnia

Tabla 2.8: Requerimiento inicial para la estabilización suelo-cal.

Clasificación del suelo	Requerimiento inicial estimado de cal en porcentaje del peso seco
GW-SW	5
GP, SW-SM, SW-SC-SW-GW	6
GP, SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC-GP-GM, GP, GC, SM-SC.GM, GC	7
SP, CL, ML-CL	7
MH, CH	10
CH	12,5

Fuente: USACE 1984:3-3

2.6.6. Compactación

La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos.

Figura 2.9: Equipo para la compactación Proctor modificado



Fuente: ASTM D1557 y AASHTO T 180

La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes.

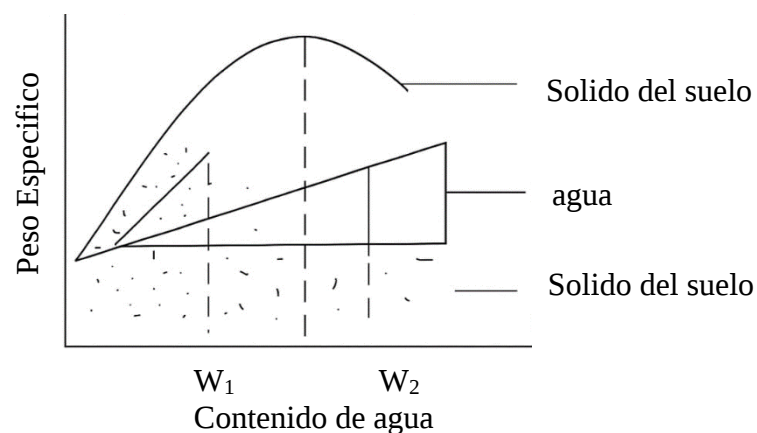
Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso.

El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua.

Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual.

Más allá de un cierto contenido de agua, cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo.

Figura 2.10: Principio de la compactación



Fuente: Braja M. Das (2004)

Como muestra la gráfica los valores máximos de la curva de compactación se pueden encontrar gráficamente por simple visualización, siempre y cuando las escalas utilizadas en cada uno de los ejes estén de acuerdo a los valores de dicha curva.

Para una mayor precisión se puede recurrir a la utilización de las derivadas, para ello es imprescindible conocer la ecuación de la curva de compactación, entonces por simple procedimiento de derivadas, donde la pendiente sea cero se encontrará el punto máximo.

Se entiende por compactación de suelos a un proceso mecánico al cual se somete un determinado suelo para mejorar algunas características, como la resistencia, compresibilidad, y disminución de la deformación de dichos suelos provocados a causa de las cargas que puede llegar a soportar, esta compactación se la realiza expulsando el aire que se encuentra en el suelo y de esta manera reducir la cantidad de vacíos y lograr un acomodamiento de todas las partículas que conforman el suelo, aumentando su

densidad, al realizar la compactación se eliminan los vacíos del suelo y generalmente no el agua que contiene el suelo

- Finalidad de la compactación

Es aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando así la su densidad, su capacidad de soporte y su estabilidad entre otras.

Una compactación puede seguir muchos objetivos, como ser que el suelo compactado adquiera una resistencia suficiente para resistir con seguridad el propio peso de alguna estructura civil o las cargas que transmiten las ruedas al suelo.

También el suelo compactado no debe deformarse tanto, por efecto de las cargas que resiste, de manera que no se dañe dicho suelo ni la estructura que soporta, es decir, no debe retraerse ni expenderse excesivamente.

- Curva de compactación

La curva de compactación de suelos es una gráfica que se dibuja en un eje de coordenadas, en la cual el eje de las abscisas va los valores de contenido de humedad de los suelos expresado en porcentaje y en el eje de las ordenadas van los valores correspondientes a la densidad seca máxima, dicha grafica es útil para conocer los valores máximos de humedad.

- Humedad óptima

Es el contenido de agua bajo el cual un suelo alcanza la máxima densidad seca, un contenido de humedad mayor del optimo tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas.

- Densidad seca máxima

Es la densidad a la cual una muestra de suelo puede llegar a adquirir, siempre y cuando la compacten a la humedad óptima de dicho suelo.

2.6.7. Capacidad de soporte de los suelos

Figura 2.11: Equipo de laboratorio para ensayo CBR



Fuente: ASTM D1883 y AASHTO T 193

La capacidad de soporte se refiere a la resistencia que presenta a las deformaciones bajo la aplicación de cargas de tránsito. Presentan factores que interviene en la capacidad de soporte de los suelos como la resistencia al esfuerzo cortante, este depende de la densidad alcanzada y su humedad, los suelos saturados poseen baja capacidad soporte en comparación a suelos no saturados, debido a la relación que a mayor humedad menor capacidad de soporte del suelo.

Valor Relativo de Soporte (Ensayo CBR): El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0,1" o 0,2" de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar.

También se dice que mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada.

El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lb/pulg².) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de

penetración (19,4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lb/pulg².) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para un suelo específico, el cual es determinado utilizando el ensayo de compactación estándar o modificado.

Para los cálculos del CBR se utilizaron las siguientes formulas:

1. El peso unitario de la muestra

$$P_{uh} = \frac{P_{ms}}{Vol. molde}$$

Dónde:

P_{uh} = Peso unitario de la muestra humedad (g/cm³)

P_{ms} = Peso muestra seca (g)

2. El peso unitario de la muestra seca

$$P_{ums} = \frac{P_{uh}}{100 + W} \times 100$$

Dónde:

P_{ums} = Peso unitario de la muestra seca (g/cm³)

P_{uh} = Peso unitario de la muestra de humedad (g/cm³)

W = Porcentaje de humedad (%)

3. La expansión se calcula de la siguiente manera:

$$\% Exp = \frac{(L_f - L_i)}{h} \times 100$$

Dónde:

% Exp = Porcentaje de expansión (%)

Lf = Lectura final del extensómetro (cm)

Li = Lectura inicial del extensómetro (cm)

h = Altura total del espécimen.

4. La determinación del CBR se basa en las cargas correspondientes a penetraciones de 0,1 y 0,2 pulgadas.

Para 0,1" tenemos:
$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)}{70,3 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)} \times 100$$

Para 0,2" tenemos:
$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)}{105,5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)} \times 100$$

Según la norma, se debe utilizar el valor de resistencia correspondiente a una penetración de 0,1 pulgadas, salvo que el valor a 0,2 pulgadas sea menor. En ese caso, se adopta este último como el valor de CBR.

Esto se debe a que, por lo general, el esfuerzo medido a 0,2" es superior al de 0,1". Si no es así, puede indicar un comportamiento atípico del suelo. Por ello, se toma el valor más bajo como medida conservadora, conforme lo establece la norma ASTM D1883 y en el AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.

5. Descripción de las gráficas utilizadas en el análisis del CBR

Relación entre carga y penetración: se representa la carga aplicada (kg) en el eje vertical y la penetración (in) en el eje horizontal, a partir de los datos registrados durante el ensayo. En algunos casos, estos valores también se expresan como presión (kg/cm²) para facilitar su análisis comparativo.

Relación entre CBR y densidad seca: se grafica el CBR (%) en el eje horizontal y la densidad seca (g/cm³) en el eje vertical. Esta representación permite estimar los valores de densidad correspondientes al 100 % y al 95 % de la densidad seca máxima, lo cual resulta útil para evaluar el comportamiento mecánico del suelo.

A continuación, se presenta la tabla según el valor de CBR.

Tabla 2.9: Clasificación de suelos según el valor de CBR

CBR	Clasificación 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
Mayor a 80	Excelente	Base

Fuente: Assis A., 1988. “Diseño de pavimento AASHTO-93”

2.7. Estabilización de suelos

La estabilización de suelos tiene como objetivo brindarle al suelo natural la suficiente al esfuerzo cortante para poder resistir ciertas cargas independientemente en el estado climático que se encuentre.

2.7.1. Beneficios de la estabilización de suelos

- Controlar cambios volumétricos
- Aumentar la resistencia
- durabilidad
- Reducir la permeabilidad
- Reducir la compresibilidad
- Disminuir la plasticidad

2.7.1.1. Controlar cambios volumétricos

La estabilidad volumétrica de un suelo se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido al cambio de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua.

Cuando un suelo saturado se seca, cambia su volumen (retracción). Esta pérdida de volumen se debe a la desecación ocurrida en el suelo, que provoca una modificación en la tensión capilar del menisco formado en cada poro de la superficie.

Luego se produce una tracción en el agua del suelo y la correspondiente compresión en la estructura del mismo, siendo ésta última bastante considerable e inclusive actúa como una carga en el mismo.

Se produce la expansión o hinchamiento cuando un suelo seco cohesivo aumenta su humedad; este fenómeno se debe a diversos factores como la atracción del agua por los minerales arcillosos, la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes absorbidos.

La estabilidad volumétrica está íntimamente relacionada con la composición mineralógica de los suelos y los cambios climatológicos que se presentan en la región, esta propiedad es particular de los suelos que contienen un alto porcentaje de minerales arcillosos.

La estabilidad volumétrica se modifica cementando el material de modo que disminuya la capacidad del material de adsorber agua, siendo más efectivos en las arcillas profundas.

2.7.1.2. Aumentar la resistencia

La resistencia o capacidad de soporte de un suelo es la propiedad que se refiere a la capacidad que tiene el suelo de soportar cargas continuas de tráfico, para no sufrir fallas y deformaciones inadmisibles en su estructura.

En general, todas las formas de estabilización química revisadas anteriormente, pueden mejorar en mayor y menor grado de resistencia del suelo; pero mucho depende de la cantidad de materia orgánica que contiene el mismo, ya que el efecto de la materia orgánica en el suelo estabilizado por medios químicos, reduce la reacción con el aditivo empleado y disminuye considerablemente la resistencia normalmente adquirida.

2.7.1.3. Durabilidad

La durabilidad es la propiedad que tiene el suelo de mantener las propiedades mecánicas a través del tiempo, ofrecer resistencia al intemperismo, la erosión y abrasión del tráfico.

Esta propiedad de durabilidad se refiere a los suelos que están sujetos a solicitaciones de trabajo, más específicamente en las superficies de rodadura, y su menor o mayor deterioro dependerá su menor o mayor calidad del mismo, de ahí que viene a la importancia del análisis de las estabilizaciones.

Un suelo estabilizado puede utilizarse como un revestimiento que soporte directamente los efectos del tránsito sobre su superficie

2.7.1.4. Reducir la permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que indica la mayor o menor facilidad que tiene el agua de fluir a través de los vacíos del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico determinado.

Esta propiedad depende de una serie de factores y propiedades físicas del suelo, algunas de ellas como la temperatura, viscosidad del agua, el tamaño, la forma y el área de los conductos a través de los cuales circula el agua, son factores determinantes de esta propiedad.

La permeabilidad puede reducirse llenando los poros con un material impermeable o, modificando la estructura del mineral de arcilla con el fin de impedir la floculación de las partículas. Por otro lado, se puede aumentar la permeabilidad quitando los granos finos del suelo o creando una estructura conglomerada.

Los métodos de estabilización tales como la compactación de suelos y el uso de algunas sustancias químicas, pueden modificar significativamente la permeabilidad; pero el uso de esta última técnica debe ser cuidadosamente analizado, ya que en algunos casos puede ejercer efectos desfavorables en otras propiedades de los suelos estabilizados.

2.7.1.5. Reducir la compresibilidad

La compresibilidad es una propiedad que está relacionada íntimamente con el cambio volumétrico del suelo, el cual se manifiesta a través de un asentamiento.

Este asentamiento es producido por el peso propio del material o por cargas externas superficiales que originan un cambio en la relación de vacíos, flexión y la distorsión o, cambio de formas de la fase sólida del suelo inmediatamente debajo de la carga. Sin embargo, en las arcillas el factor más importante de la compresibilidad es la repulsión eléctrica entre sus partículas que tienen cargas iguales o, que están rodeadas de cationes con cargas semejantes que las mantienen apartadas.

La reducción de la compresibilidad del suelo puede lograrse llenando los poros del mismo, es decir, cementando los granos con un material rígido.

En términos generales, todos los métodos de estabilización revisados en anteriores secciones pueden incluir en esta propiedad, pero frecuentemente la compactación y la estabilización química son las que más se utilizan.

2.7.1.6. Disminuir la plasticidad

La manera más eficiente de disminuir la plasticidad es mediante la estabilización química.

La plasticidad del suelo está relacionada con el concepto de límites de Atterberg, término conocido en la mecánica de suelos.

Los límites de Atterberg relacionan la capacidad que tienen los suelos cohesivos para adsorber agua sobre la superficie de sus partículas, ya que cuanto mayor es la cantidad de agua que contiene un suelo, menor es la interacción entre sus partículas adyacentes y más se aproxima el suelo en su comportamiento al de un material líquido; por lo tanto, una alteración en los valores de estos límites indicara una modificación del agua adsorbida por el suelo.

2.7.2. Tipos de estabilización

2.7.2.1. Estabilización mecánica

La compactación es un método de estabilización mecánica que busca densificar el suelo mediante medios mecánicos, generalmente en la subbase y base. Sus objetivos principales son:

- Reducir la relación de vacíos según la estructura mineral del material.
- Aumentar la resistencia al corte por el tránsito.
- Minimizar la susceptibilidad a cambios de volumen, especialmente por presencia de agua.
- Se puede realizar de dos formas: **compactación estática** con rodillos cilíndricos, ideal para suelos ricos en finos, y **compactación dinámica** con rodillos vibrantes, más efectiva para suelos gruesos.

Figura 2.12: Compactación del suelo



Fuente: Tecnología integrada de compactación de suelos de Caterpillar

2.7.2.2. Estabilización física

Uno de los métodos de estabilización física del suelo consiste en mezclar dos o más suelos con diferentes clasificaciones y granulometría para obtener un material que cumpla con las características deseadas. Esta mezcla se puede realizar in situ y luego extender y compactar. Otros métodos de estabilización física incluyen el uso de geotextiles, vibro flotación y consolidación.

Figura 2.13: Estabilización física por mezcla de suelos



Fuente: Mezcla de suelos para la mejora del suelo

2.7.2.3. Estabilización química

Los aditivos químicos se utilizan frecuentemente para estabilizar suelos no útiles, este método se lo utiliza cuando los métodos mecánicos y físicos no son suficientes o inadecuados. Existe un porcentaje muy elevado de proyectos que utilizan este método para mejorar los suelos mediante los siguientes aditivos que son los más comunes: cal, cemento, material bituminoso y cenizas.

Cal: la cal es un estabilizante usado para modificar las propiedades físicas de suelos arcillosos, reduciendo la plasticidad, mejorando la compacidad y aumentando la resistencia.

Cemento portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Otros productos utilizados son:

Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

Cloruro de sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos. Se usa en conjunto con cal para estabilizar suelos.

Cloruro de calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Escorias de fundición: se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Caucho de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Figura 2.14: Compactación química del suelo



Fuente: Estabilización química

2.7.2.3.1. Ventajas de la estabilización

Desde el punto de vista de la Ingeniería, la estabilización de suelos puede suministrar las siguientes ventajas si se compara con los suelos existentes no estabilizados:

- Funciona como una plataforma de trabajo.
- Impermeabiliza el suelo.
- Mejora la resistencia.
- Controla el cambio de volumen del suelo.
- Mejora la capacidad de manejo del suelo.
- Disminuye los espesores de pavimentos.
- Suministra una superficie de desgaste temporal.
- Reduce la producción de polvo.
- Mejora los materiales de segunda clase.
- Aumenta la durabilidad.
- Seca los suelos húmedos.
- Conserva los agregados.
- Reduce los costos.
- Conserva energía.

2.8. Evaluación de métodos de estabilización de suelos

Para seleccionar el método adecuado, es importante evaluar ciertos criterios, que pueden variar dependiendo del contexto y de las características del suelo. A continuación, se describen los principales factores a considerar en la evaluación de los métodos de estabilización:

2.8.1. Características del Suelo

- Determinar si el suelo es arcilloso, arenoso, orgánico, o mixto es esencial para seleccionar el método adecuado. Por ejemplo, suelos con alta proporción de

arcilla expansiva suelen requerir estabilización con cal o cemento, mientras que los suelos arenosos pueden ser más fáciles de estabilizar con asfalto o polímeros.

2.8.2. Costo

- El costo de los materiales y la mano de obra es un factor clave. Métodos como la estabilización con cal o cemento pueden ser más costosos que métodos como el uso de polímeros o cenizas volantes. El costo debe ser evaluado en relación con los beneficios que ofrece el método.

2.8.3. Eficiencia a Largo Plazo

- La durabilidad y la estabilidad a largo plazo del método de estabilización deben ser consideradas. Algunos métodos, como la estabilización con cal o cemento, son conocidos por proporcionar mejoras permanentes, mientras que otros, como los polímeros, pueden no ser tan duraderos en condiciones extremas.

2.8.4. Impacto Ambiental

- Los métodos de estabilización deben ser evaluados en función de su sostenibilidad. El uso de materiales no tóxicos y biodegradables, como los polímeros o los métodos biológicos, tiene ventajas en cuanto a su impacto ambiental. Mientras que el uso de cemento o asfalto tiene un impacto ambiental más significativo debido a la producción de dióxido de carbono y los residuos generados.

2.8.5. Condiciones Climáticas y del Terreno

- Las condiciones climáticas (temperatura, humedad, lluvias) y la naturaleza del terreno (pendientes, acceso, y capacidad de carga) también influyen en la selección del método. Por ejemplo, en climas cálidos y secos, los métodos que mejoren la permeabilidad son más eficaces, mientras que, en zonas húmedas, el control de la expansión puede ser más relevante.

2.8.6. Tiempo de Implementación

- Algunos métodos requieren tiempos de curado más largos (como el cemento), mientras que otros son rápidos y pueden implementarse en poco tiempo (como el uso de geosintéticos).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA

INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo cuantitativa intencional debido a que se está llevando a cabo una investigación numérica y con un objetivo definido, centrada en medir y analizar los efectos de la estabilización sobre el comportamiento físico y mecánico del suelo.

3.1.2. Nivel de investigación

La investigación adopta un enfoque explicativo-correlacional, cuyo objetivo es comprender y establecer relaciones entre las variables dependientes, como el índice de plasticidad, el Proctor modificado y el índice CBR, en relación con la variable independiente, como el uso de cal y sal.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño experimental, el cual es definido esquemáticamente como un método de investigación que se utiliza para evaluar el efecto de una o más variables independientes sobre una variable dependiente. En este caso, el control experimental que refiere a la manipulación planificada de propiedades particulares en la muestra requiere adherirse a la normatividad vigente para los métodos de ensayo en geotécnica y mecánica de suelos, en todo caso se aplican directrices y métodos establecidos en las Normas Técnicas pertinentes, como el SUCS, ASTM y AASHTO, para llevar a cabo un análisis de manera rigurosa.

El esquema del diseño experimental sigue lo siguiente:

$$O_i \rightarrow X(a, b) \rightarrow O_f$$

Donde:

O_i = Observación inicial: caracterización de las propiedades del suelo natural.

$X(a, b)$ = Aplicación del tratamiento de estabilización química, con:

a) Cal hidratada

b) Cloruro de sodio

Of = Observación final de las propiedades del suelo a estabilizar

Por otro lado, para la elección de los porcentajes de adición en el tratamiento químico con cal y sal, se consideraron los rangos más efectivos identificados en la bibliografía técnica. Con base en ello, se definieron las siguientes dosificaciones para la presente investigación:

1. Para el primer caso:

- Se aplicó únicamente cal en proporciones de **5 a 7%**, en **arcillas de baja plasticidad** y **12,5%**, en **arcillas con alta plasticidad**.

2. Para el segundo caso:

- Se utilizó una combinación de **cal entre 3 y 6%** y **sal entre 1 y 4%**, en **arcillas de baja plasticidad** y una combinación de **cal entre 5,5 y 10,5%** y **sal entre 2 y 7%**, en **arcillas de alta plasticidad**.

3.3. Población de estudio, muestra y unidad de análisis

3.3.1. Población

En esta investigación la población está compuesta por muestras de suelos arcillosos de alta y baja plasticidad.

3.3.2. Muestra

Se analizaron 3 muestras de suelos arcillosos en diferentes barrios de la ciudad de Tarija.

- B/ Monte Cristo
- B/ Santiago
- B/ San Blas

Tabla 3.10: Peso total - muestra suelo 1

B/ Monte Cristo			
Muestra (g)	Descripción	Numero de ensayos	Total (kg)
2000	Granulometría	1	2
300	Limites	7	2,1
25000	Compactación	7	175
15000	CBR	7	105
Total, de la muestra			285

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11: Peso total - muestra suelo 2

B/ Santiago			
Muestra (g)	Descripción	Numero de ensayos	Total (kg)
2000	Granulometría	1	2
300	Limites	7	2,1
25000	Compactación	7	175
15000	CBR	7	105
Total, de la muestra			285

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12: Peso total - muestra suelo 3

B/ San Blas			
Muestra (g)	Descripción	Numero de ensayos	Total (kg)
2000	Granulometría	1	2
300	Limites	8	2,4
25000	compactación	8	200
15000	CBR	8	120
Total, de la muestra			325

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Unidad de Análisis

Muestras de suelos arcillosos representativos.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas

La recolección de datos se efectuó mediante procedimientos técnicos, combinando la observación directa en campo, la recolección de muestras representativas y la ejecución de ensayos de laboratorio bajo normas establecidas, complementados con el análisis de información previa. La cantidad y ubicación de las calicatas se definieron según lineamientos vigentes, recomendando una calicata cada 150 m para caminos vecinales.

Las técnicas aplicadas fueron:

- Extracción de muestras inalteradas y remoldeadas a partir de calicatas, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D420.
- Determinación del contenido de humedad natural, según los lineamientos de la norma ASTM D2216.
- Análisis granulométrico mediante lavado por tamiz N°200 para suelos finos, conforme a la norma ASTM D1140.
- Determinación de los límites de Atterberg, que incluyen:
 - Límite líquido (ASTM D4318 / AASHTO T 89).
 - Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 / AASHTO T 90).
- Clasificación del suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- Ensayo de compactación Proctor modificado para determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima, según ASTM D1557 / AASHTO (T 180).
- Ensayo CBR (Capacidad de soporte del suelo), según ASTM D1883 / AASHTO (T 193).

3.4.2. Instrumentos

Para el desarrollo de la investigación, se utilizaron instrumentos tanto de campo como de laboratorio, con el propósito de garantizar la precisión en la obtención y procesamiento de los datos geotécnicos. Los principales materiales e instrumentos empleados fueron los siguientes:

- Cuaderno de campo, utilizado para el registro de coordenadas, observaciones generales y condiciones del terreno durante la toma de muestras en campo.
- Formatos para el Registro de Ensayos en Laboratorio
 - Formato para análisis granulométrico
 - Formato para contenido de humedad
 - Formato para límites de Atterberg
 - Formato para ensayo Proctor modificado
 - Formato para ensayo CBR
- Ensayos realizados
 - Análisis granulométrico
 - Determinación del contenido de humedad
 - Límites de Atterberg
 - Ensayo Proctor modificado
 - Ensayo CBR
- Equipos Utilizados en Laboratorio para Cada Ensayo
 - Tamices para análisis granulométrico
 - Horno de secado para humedad
 - Aparato de Casagrande para límite líquido
 - Balanza electrónica para pesajes
 - Herramienta de medición y limpieza

- Equipo de compactación Proctor
- Prensa CBR para la ejecución del ensayo
- Bolsas selladas para la recolección, transporte y conservación de muestras.

3.5. Ubicación del proyecto

La ubicación de la presente investigación, se encuentra en el departamento de Tarija, provincia Cercado.

Tabla 3.13: Puntos de extracción de muestras de suelo

Coordenadas UTM				
Suelo	Zona	Barrio	Coordenadas Este	Coordenadas Norte
Suelo 1	20 K	Monte Cristo	324253,00 m	7619471,00 m
Suelo 2	20 K	Santiago	322747,00 m	7620784,00 m
Suelo 3	20 K	San Blas	321267,00 m	7614013,00 m

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15: Ubicación muestra suelo 1



Fuente: Google Earth Pro

Figura 3.16: Ubicación muestra suelo 2



Fuente: Google Earth Pro

Figura 3.17: Ubicación muestra suelo 3



Fuente: Google Earth Pro

3.6. Justificación de la zona de estudio

La elección de la zona de muestreo se fundamenta en la presencia predominante de suelos arcillosos en los barrios periurbanos de la ciudad de Tarija. En estos sectores, las vías sin pavimentar suelen presentar problemas recurrentes de transitabilidad, especialmente durante la temporada de lluvias, debido a la plasticidad y a la variación de volumen que presentan las arcillas del terreno

Dado que las arcillas presentan condiciones desfavorables para su uso en capas de subrasante, debido a su baja capacidad de soporte, alta plasticidad y sensibilidad al contenido de humedad, su estabilización resulta de suma importancia. En este contexto, la selección de esta zona permite trabajar con un suelo representativo de condiciones reales que requieren mejoramiento, asegurando que los resultados obtenidos sean significativos para el análisis y comprensión sobre el comportamiento del suelo bajo dichas condiciones.

Además, se busca evaluar la eficacia del uso combinado de cal hidratada y sal como alternativa técnica y económicamente viable para la estabilización de subrasantes, buscando mejorar el comportamiento del suelo en términos de capacidad de soporte y durabilidad, y fomentar el uso de métodos accesibles para zonas con recursos limitados.

3.7. Extracción de la muestra de suelo

La obtención de muestras de suelo se realizó exclusivamente mediante excavación manual de calicatas, conforme a la norma ASTM D420. Cada calicata tuvo dimensiones aproximadas de 1 metro de ancho, 1 metro de largo y 60 cm de profundidad, lo cual permitió observar la secuencia de capas del suelo y extraer material representativo de suelos arcillosos presente en la zona de análisis.

Dado que la extracción de muestras se realizó en barrios ubicados en zonas alejadas del área urbana central, se asumió que los tramos intervenidos corresponden a caminos vecinales, según la clasificación funcional establecida por la ABC. Esta categoría abarca vías de bajo a moderado volumen de tránsito, usualmente sin pavimento. Además, la investigación se orienta exclusivamente al mejoramiento de subrasantes, es decir, al mejoramiento del terreno natural existente.

Siguiendo los lineamientos del Manual de Carreteras de Bolivia (ABC, 2018), se efectuaron tres calicatas por cada tipo de suelo, ubicadas a intervalos de aproximadamente 150 metros en pequeños tramos. De cada calicata se extrajo una muestra representativa, la cual fue almacenada en bolsas plásticas selladas para conservar su humedad natural y posteriormente trasladada al laboratorio de mecánica de suelos.

En laboratorio, las tres muestras correspondientes a cada tipo de suelo fueron sometidas a los ensayos de caracterización, incluyendo el ensayo CBR en su condición natural. Como criterio metodológico, se seleccionó para la fase de estabilización la muestra que presentó el valor más bajo de CBR, con el propósito de evaluar el comportamiento del suelo en condiciones desfavorables y verificar el resultado del proceso de estabilización.

En campo, como parte de la identificación preliminar del tipo de suelo, se aplicó la prueba empírica del rollito, que consistió en mezclar una porción del material con agua hasta alcanzar una consistencia plástica, moldeando un cilindro delgado de aproximadamente 3 mm de diámetro. La capacidad del suelo para mantener dicha forma sin desmoronarse fue indicativa de un material arcilloso.

Figura 3.18: Extracción muestra suelo 1



Fuente: ASTM D420

Figura 3.19: Extracción muestra suelo 2



Fuente: ASTM D420

Figura 3.20: Extracción muestra suelo 3



Fuente: ASTM D420.

3.8. Caracterización de los materiales estabilizantes

3.8.1. Características y propiedades de la Cal

Las características físicas, químicas y mecánicas de la cal empleada en este trabajo fueron proporcionadas por **CALCO S.A.**, empresa legalmente establecida y supervisada por las autoridades competentes. Dado que no se realizaron ensayos de laboratorio

específicos para determinar estos valores, la información fue extraída directamente de la documentación técnica facilitada por la empresa, la cual incluye las características más importantes del producto, tales como su composición y calidad.

Es importante señalar que dichos valores son aproximados y pueden variar dependiendo del origen, pureza y proceso de fabricación de la cal. Por ello, el análisis se centró principalmente en evaluar los efectos de la aplicación de la cal sobre el comportamiento del suelo, a través de los ensayos de estabilización.

En la ciudad de Tarija, la venta de cal se realiza principalmente al por mayor, aunque en muchos casos, la comercialización no está estandarizada ni cuenta con supervisión técnica. Sin embargo, en el caso de **CALCO S.A.**, la empresa cumple con todos los requisitos de calidad y control necesarios, garantizando un producto conforme a las normativas vigentes.

Tabla 3.14: Características de la cal

General	
Nombre Comercial	Cal hidratada
Fórmula molecular	Ca(OH)_2
Otros nombres	Cal apagada-Cal hidratada en polvo

Fuente: Calco Bolivia

Tabla 3.15: Propiedades físicas y químicas de la cal

Estado de agregación	Sólido o polvo
Apariencia	Blanco o cristalino blanco
Densidad	2,21 g/cm ³
Masa molar	74,09 g/mol
Punto de fusión	580 °C
Punto de ebullición	No tiene
Solubilidad en agua	Poco soluble (1,73 g/L a 20 °C)
Reactividad en agua	Reacciona lentamente con el agua

Fuente: Calco Bolivia

3.8.2. Propiedades y características de la sal

La sal es uno de los compuestos más abundantes en nuestro medio, formada principalmente por sodio y cloruro. Es fácilmente soluble en agua, no inflamable, inodora y presenta un sabor característico salado.

Las características físicas y químicas presentadas a continuación fueron proporcionadas por **EXPROSAL S.A.**, empresa legalmente establecida y con un control de calidad riguroso sobre sus productos. Dado que no se realizaron ensayos de laboratorio específicos para determinar estos valores, la información fue extraída de la documentación técnica facilitada por la empresa, la cual incluyó los aspectos más relevantes del producto, tales como su composición y calidad.

Es importante señalar que estos valores son referenciales y pueden variar dependiendo del origen, proceso de extracción y tratamiento de la sal. El análisis se centró en evaluar el efecto de su aplicación en la estabilización de suelos mediante ensayos específicos.

Tabla 3.16: Características de la sal

General	
Nombre Comercial	Cloruro de sodio
Otros nombres	Cloruro de sodio o Sal
Fórmula molecular	NaCl

Fuente: ExproSal

Tabla 3.17: Propiedades físicas y químicas de la sal

Estado de agregación	Sólido
Apariencia	Cristales blancos e incoloro
Densidad	2165 kg/m ³
Punto de fusión	(801 °C)
Punto de ebullición	(1413 °C)
Cristalización	Cubica
Presente en la naturaleza	Se encuentran en grandes masas solidas o disueltas en aguas marinas
Solubilidad	Muy soluble en agua
Solubilidad en agua	357 g/l a 20 °C
Reactividad en agua	Ninguna
Conductividad	No conductora en estado sólido; si en solución acuosa
PH	Neutro; tiene un valor de 7

Fuente: ExproSal

3.9. Recolección de datos

Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo es necesario realizar ensayos correspondientes de identificación de suelo, contenidos

óptimos de humedad, capacidad soporte de carga, entre otros; que permitirán un conocimiento del comportamiento de las muestras de suelo antes y después de haber sido combinadas con cal y sal respectivamente. Es así que se han desarrollado los siguientes ensayos.

3.9.1. Análisis mecánico de los suelos

Para la identificación del tipo de suelo, se realiza un análisis mecánico que incluye los ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico y límites de Atterberg. Con base en estos resultados, se clasifica el suelo conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

3.9.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad permite conocer la cantidad de agua presente en el suelo en su estado natural. Este parámetro influye significativamente en el comportamiento mecánico del suelo, especialmente en su compactación y capacidad de soporte.

Figura 3.21: Humedad del suelo



Fuente: ASTM D2216

Procedimiento

1. Se seleccionaron muestras representativas de cada suelo y se transportaron al laboratorio en bolsas selladas.
2. En el laboratorio, se colocó una porción de cada muestra en una cápsula metálica y se registró su peso en estado húmedo.

3. Las muestras fueron introducidas en un horno de secado a 105 ± 5 °C durante un periodo mínimo de 24 horas, hasta alcanzar peso constante, conforme a la norma ASTM D420.
4. Posteriormente, se registró el peso seco de cada muestra.
5. El contenido de humedad se calculó como el porcentaje de la pérdida de masa (agua evaporada) respecto al peso del suelo seco

$$W = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

donde:

- W = Contenido de humedad (%)
- P_h = Peso suelo húmedo (g)
- P_s = Peso suelo seco (g)

Tabla 3.18: Contenido de humedad natural del suelo

Suelo	Humedad 1 (%)	Humedad 2 (%)	Humedad 3 (%)	Promedio (%)
Suelo 1	19,30	15,41	12,12	15,61
Suelo 2	20,50	11,04	12,80	14,78
Suelo 3	24,79	28,49	24,53	25,93

Fuente: Elaboración propia

Para cada muestra de suelo se realizaron tres determinaciones del contenido de humedad, con el fin de obtener un valor promedio representativo de su condición natural. Estos valores permiten caracterizar el estado inicial del material antes de ser sometido a los ensayos de laboratorio complementarios.

3.9.3. Análisis granulométrico

Tabla 3.19: Tamices para fracción fina

Tamiz N.º	Abertura (mm)
Nº4	4,75
Nº10	2,000
Nº40	0,425
Nº200	0,075

Fuente: Norma ASTM D1140

Se realizó el lavado de material para determinar el porcentaje de finos, siguiendo la norma ASTM D1140, utilizando el tamiz N°200 para partículas menores a 0.075 mm, conforme al procedimiento siguiente:

Figura 3.22: Lavado de material



Fuente: Norma ASTM D1140

1. Se efectuó un cuarteo del total del material para obtener una muestra representativa y asegurar una adecuada distribución de partículas. Dado que el suelo es fino y pasa el tamiz N°10, se seleccionó una muestra de 2000 g para el análisis.
2. La muestra fue saturada sumergiéndola en agua hasta su completa saturación, generando una suspensión con características similares a barro o lodo.
3. Posteriormente, sin pérdida de material, la muestra saturada fue introducida en el tamiz N°200 y se realizó el lavado con agua corriente hasta obtener un efluente claro, libre de sedimentos. El material retenido en el tamiz fue colectado en un recipiente para su posterior secado en horno a 105 °C durante 24 horas.
4. Una vez seco, el material fue tamizado nuevamente utilizando los tamices N°40 y N°200, registrándose el peso del material retenido en cada tamiz para el cálculo del porcentaje de finos.

Resumen de resultados:

Tabla 3.20: Resultados del análisis granulométrico

Cercado-Tarija			
Tamices	% Porcentaje que pasa del total		
	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
3"	100	100	100
2 ½"	100	100	100
2"	100	100	100
1 ½"	100	100	100
1"	100	100	100
¾ "	100	100	100
½"	100	100	100
3/8"	100	100	100
Nº4	100	100	100
Nº10	100	100	99,99
Nº40	97,95	99,65	99,29
Nº200	91,78	89,76	98,76

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis granulométrico permiten conocer la distribución porcentual de partículas finas en el suelo. Esta información es fundamental para evaluar las propiedades del suelo y su comportamiento ante procesos de estabilización y mejoramiento.

3.9.4. Límites de Atterberg

Los ensayos de Límites de Atterberg basados en las normas (ASTM D4318) se realizaron con cada una de las muestras de suelo en estado natural y con diferentes porcentajes de adición de cal y sal, de la siguiente manera:

Determinación del límite líquido:

1. Se verificó que la copa de Casagrande presentara una altura de caída de 1 cm y estuviera calibrada según la marca de desgaste.
2. Aproximadamente 250 g de suelo seco fueron tamizados por el tamiz Nº40 (0,425 mm) para la preparación de la muestra.
3. Cápsulas metálicas limpias y vacías fueron pesadas, registrando sus respectivas masas.

4. El suelo tamizado fue mezclado con agua destilada hasta alcanzar una consistencia homogénea.
5. Una porción de la pasta fue colocada en la copa; posteriormente, se formó la ranura con el surcador normalizado y se aplicaron los golpes con la palanca del dispositivo.
6. Se anotó el número de golpes requeridos para el cierre de la ranura, característica que permite identificar suelos limo-arcillosos con presencia de arenas finas.
7. Muestras húmedas fueron tomadas y colocadas en cápsulas metálicas para ser secadas en horno a 105 – 110 °C durante 24 horas.
8. Una vez secas, se calcularon los contenidos de humedad correspondientes.
9. Finalmente, se construyó la curva de relación entre el contenido de humedad y el número de golpes, y a partir de ella se determinó el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes, considerado como el Límite Líquido (LL) del suelo.

Figura 3.23: Límite líquido



Fuente: Norma ASTM D4318

Determinación del límite plástico:

La determinación del límite plástico se realizó utilizando la misma muestra empleada en el ensayo de límite líquido, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

1. Se añadió suelo seco a la muestra del límite líquido hasta obtener una masa moldeable.
2. Con las manos, se formaron cilindros (rollitos) sobre una placa de vidrio, aplicando presión uniforme.
3. Cuando los rollitos alcanzaron un diámetro aproximado de 3 mm y comenzaron a agrietarse, se consideró que el suelo se encontraba en estado plástico.
4. Cápsulas metálicas limpias fueron pesadas, identificadas y registradas en planilla.
5. Los rollitos húmedos fueron colocados dentro de las cápsulas y posteriormente secados en horno a 105 – 110 °C durante 24 horas.
6. Se registró el peso del suelo seco para cada muestra.
7. Finalmente, se calculó el contenido de humedad correspondiente, determinando así el Límite Plástico (LP) del suelo.

Figura 3.24: Límite plástico



Fuente: Norma ASTM D4318

Resultados de los límites de Atterberg

Tabla 3.21: Resultados de los límites de Atterberg

LIMITES DE ATTERBERG SUELO 1					
Dosificación	% Cal	% Sal	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico
Inicial	0	0	36	19	16
1	5	0	46	38	8
2	7	0	46	40	6
3	6	1	37	32	5
4	5	2	41	36	5
5	4	3	42	38	4
6	3	4	40	36	4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22: Resultados de los límites de Atterberg

LIMITES DE ATTERBERG SUELO 2					
Dosificación	% Cal	% Sal	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico
Inicial	0	0	34	22	12
1	5	0	40	29	11
2	7	0	41	32	9
3	6	1	43	34	9
4	5	2	43	35	8
5	4	3	40	33	7
6	3	4	39	33	6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23: Resultados de los límites de Atterberg

LIMITES DE ATTERBERG SUELO 3					
Dosificación	% Cal	% Sal	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico
Inicial	0	0	58	28	30
1	12,5	0	53	23	30
2	10,5	2	51	21	30
3	8,5	4	50	21	29
4	7,5	5	48	20	28
5	6,5	6	48	21	28
6	5,5	7	48	21	27

Fuente: Elaboración propia

Los valores del límite líquido (LL) se obtuvieron mediante una regresión en la gráfica de porcentaje de humedad versus número de golpes, hallando el valor correspondiente a 25 golpes. El límite plástico (LP) se calculó como el promedio del contenido de humedad de las muestras que presentaron rotura al formar rollitos de 3 mm. El Índice de Plasticidad (IP) se obtuvo como la diferencia entre LL y LP, representando el rango en que el suelo presenta comportamiento plástico.

3.9.5. Clasificación del suelo

Se utilizó el sistema de clasificación unificada SUCS, para la clasificación de nuestro suelo basándose en la carta de plasticidad, donde se determinan el límite líquido (LL), el índice de plasticidad (IP) y su composición granulométrica.

Resultados

Tabla 3.24: Resultados de clasificación del suelo según SUCS

Suelo	Ubicación	SUCS	Descripción
Suelo 1	B/ Monte Cristo	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
Suelo 2	B/ Santiago	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
Suelo 3	B/ San Blas	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad

Fuente: Elaboración propia

3.9.6. Compactación Proctor modificado (T 180)

Los ensayos de compactación Proctor modificado (T 180) / ASTM D1557, se realizaron con el propósito de determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de compactación de cada una de las muestras tratadas. El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Para cada punto de la curva de compactación se utilizó aproximadamente 5.500 gramos de suelo seco, previamente tamizado por el tamiz N°4 (4,75 mm). El suelo fue mezclado homogéneamente con diferentes contenidos de agua para simular condiciones de humedad creciente.
2. Se pesó el molde cilíndrico de 6 pulgadas de diámetro sin base ni collarín, registrando su masa en la planilla correspondiente. Posteriormente, se ensambló el molde con su base y collarín para proceder con la compactación.

3. La muestra se colocó en el molde en cinco capas de aproximadamente igual espesor. Cada capa fue compactada aplicando 56 golpes con un pisón de 4,54 kg (10 lb), dejándolo caer desde una altura de 457 mm (18 pulgadas). Los golpes fueron distribuidos uniformemente sobre la superficie de cada capa. Durante la compactación, el molde se mantuvo sobre una base rígida y plana para asegurar una transmisión adecuada de la energía.
4. Una vez finalizada la compactación, se retiró el collarín y se enrasó la superficie con una regla metálica. A continuación, se pesó el molde con el suelo compactado para calcular la densidad húmeda. Se extrajo una muestra representativa del suelo para determinar su contenido de humedad mediante secado en horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante.
5. El proceso se repitió para diferentes contenidos de humedad, aumentando progresivamente la cantidad de agua en cada ensayo, con el objetivo de obtener al menos cinco puntos experimentales para la construcción de la curva de compactación.
6. Con los datos obtenidos se calcularon las densidades secas correspondientes y se construyó la curva de compactación. Mediante una interpolación parabólica se determinó el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima para cada tipo de muestra.

Figura 3.25: Ensayo de compactación Proctor (T 180)



Fuente: Norma ASTM D1557 / AASHTO T 180

Resultados:

Tabla 3.25: Resultados de compactación Proctor modificado (T 180)

COMPACTACIÓN SUELO 1				
Dosificación	% Cal	% Sal	Densidad Máxima	Humedad Óptima
Inicial	0	0	1,73	17,73
1	5	0	1,83	13,56
2	7	0	1,85	12,43
3	6	1	1,86	9,71
4	5	2	1,91	9,64
5	4	3	1,95	9,59
6	3	4	1,96	9,51

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26: Resultados de compactación Proctor modificado (T 180)

COMPACTACIÓN SUELO 2				
Dosificación	% Cal	% Sal	Densidad Máxima	Humedad Óptima
Inicial	0	0	1,88	13,43
1	5	0	1,89	11,63
2	7	0	1,99	9,79
3	6	1	2,00	9,50
4	5	2	2,02	8,02
5	4	3	2,07	7,23
6	3	4	2,10	6,77

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27: Resultados de compactación Proctor modificado (T 180)

COMPACTACIÓN SUELO 3				
Dosificación	% Cal	% Sal	Densidad Máxima	Humedad Óptima
Inicial	0	0	1,78	14,09
1	12,5	0	1,89	12,57
2	10,5	2	1,89	12,38
3	8,5	4	1,90	12,18
4	7,5	5	1,93	12,14
5	6,5	6	1,94	12,10
6	5,5	7	2,03	11,30

Fuente: Elaboración propia

Se analizaron los datos de densidad húmeda y contenido de humedad para cada punto, generando las curvas de compactación correspondientes. De estos resultados se determinaron el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima, parámetros clave para el control de calidad y buen desempeño del suelo en procesos de estabilización y compactación.

3.9.7. Ensayo de valor relativo de soporte (CBR)

Una vez finalizado el ensayo Proctor modificado, se determinaron la humedad óptima y la densidad máxima seca de cada suelo. Con base en estos valores, se prepararon muestras compactadas al 95% y al 100% de la densidad máxima seca, las cuales fueron utilizadas en el ensayo CBR para el suelo natural y las mezclas estabilizadas con cal y cal-sal en diferentes proporciones.

El ensayo de índice CBR se realizó conforme a las normas **ASTM D1883** y **AASHTO T 193**, siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

1. Para cada suelo, se prepararon tres muestras compactadas a la humedad óptima determinada en el ensayo Proctor modificado. La compactación se efectuó en cinco capas de igual espesor, con diferentes energías de compactación: 56, 25 y 12 golpes por capa. Se pesaron los moldes con la muestra compactada antes de la inmersión en agua, y se registraron los datos correspondientes.
2. Antes de la inmersión, se registraron las lecturas iniciales del extensómetro para controlar la expansión inicial del suelo.
3. Las muestras permanecieron sumergidas en agua durante 96 horas. Al término de este periodo, se midió la expansión mediante el extensómetro, observándose una expansión mínima, lo que indica ausencia de cambios volumétricos significativos. Posteriormente, los moldes fueron retirados del agua y se dejó drenar el exceso.
4. Se realizó la penetración utilizando un pistón cilíndrico de 49,6 mm de diámetro en la prensa de CBR. La profundidad de penetración fue medida mediante un extensómetro calibrado, registrándose las lecturas hasta alcanzar una profundidad de 0,5 pulgadas (12,7 mm).
5. Finalizado el ensayo de penetración, se procedió al desmoldeo de las muestras. Para garantizar una adecuada representatividad, se extrajeron muestras en tres niveles diferentes del molde: superior, medio e inferior. Estas muestras fueron pesadas en estado húmedo y posteriormente secadas en horno para determinar su contenido de humedad. Con estos datos y el volumen del molde, se calculó la densidad seca promedio de cada muestra.
6. Las lecturas de carga y penetración se graficaron para obtener la curva carga en función de la penetración. En caso de ser necesario, se aplicaron correcciones a las lecturas. El índice CBR se calculó comparando la presión ejercida por el pistón para penetraciones de 0,1 y 0,2 pulgadas con las presiones estándar. Finalmente, se graficó la relación entre densidad seca y CBR relativo. A partir de

esta gráfica, se proyectó la línea correspondiente al 95% de la densidad seca máxima, obteniéndose así el valor del CBR de diseño.

Figura 3.26: Ensayo de capacidad de soporte



Fuente: ASTM D1883 / AASHTO T 193

Resultados:

Tabla 3.28: Resultados de la capacidad de soporte CBR

CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO 1				
Dosificación	% Cal	% Sal	CBR al 95%	CBR al 100%
Inicial	0	0	1,92	2,46
1	5	0	12,68	14,70
2	7	0	20,73	22,32
3	6	1	22,54	24,21
4	5	2	22,35	24,84
5	4	3	22,39	25,49
6	3	4	20,13	22,79

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29: Resultados de la capacidad de soporte CBR

CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO 2				
Dosificación	% Cal	% Sal	CBR al 95%	CBR al 100%
Inicial	0	0	1,57	1,99
1	5	0	11,25	11,77
2	7	0	19,51	20,06
3	6	1	22,19	23,69
4	5	2	23,44	24,87
5	4	3	23,46	25,17
6	3	4	20,04	22,02

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30: Resultados de la capacidad de soporte CBR

CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO 3				
Dosificación	% Cal	% Sal	CBR al 95%	CBR al 100%
Inicial	0	0	2,96	3,74
1	12,5	0	23,14	27,21
2	10,5	2	24,23	27,11
3	8,5	4	24,59	28,76
4	7,5	5	25,07	29,88
5	6,5	6	25,10	30,44
6	5,5	7	24,42	26,36

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos del ensayo CBR reflejan el comportamiento mecánico del suelo natural y las mezclas estabilizadas con cal y cal-sal bajo condiciones de humedad y compactación controlada. Estos valores permitirán evaluar la mejora en la capacidad de soporte de la subrasante y definir las dosificaciones óptimas para su aplicación en caminos vecinales, asegurando un desempeño adecuado en servicio.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE

RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Presentación de los resultados técnicos de los tres suelos

- I. Análisis granulométrico y clasificación del suelo.** Se determinó la distribución de tamaños de partículas mediante el ensayo de granulometría en los suelos naturales. Con estos datos y los límites de Atterberg, se clasificaron los materiales según el sistema SUCS. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 4.31: Distribución granulométrica y clasificación SUCS de los suelos

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa Suelo 1	% Pasa Suelo 2	% Pasa Suelo 3
Nº10	2,00	100	100	99,99
Nº40	0,425	97,95	99,65	99,29
Nº200	0,075	91,78	89,76	98,76
Clasificación SUCS	-	CL	CL	CH

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de granulometría muestran que los tres suelos presentan un predominio de partículas finas, con porcentajes que superan el 89% de paso por el tamiz Nº200. Este comportamiento indica que se trata de suelos finos, con una mínima proporción de fracción arenosa o gruesa. Comparativamente, el suelo 3 presenta el mayor porcentaje de finos (98,76%), seguido por el suelo 1 (91,78%) y el suelo 2 (89,76%), lo que sugiere una mayor cohesión y plasticidad en el primero.

La clasificación SUCS, apoyada por los límites de Atterberg, permitió identificar que los Suelos 1 y 2 corresponden a arcillas de baja plasticidad (CL), mientras que el suelo 3 fue clasificado como una arcilla de alta plasticidad (CH). Esta diferencia entre los materiales refleja un comportamiento frente a la humedad, la compactación y la estabilización. En particular, el suelo 3, por su alto contenido de finos y mayor plasticidad, presenta mayores desafíos en términos de estabilidad volumétrica y resistencia mecánica, lo que hace necesario implementar técnicas más fuertes para su estabilización.

I. Comparación técnica de los suelos

Se compararon tres suelos estabilizados con cal y sal, evaluando plasticidad, densidad seca y CBR para analizar los resultados según las proporciones empleadas.

Tabla 4.32: Análisis comparativo de suelos estabilizados con cal y sal

SUELO 1									
Dosificación	% Cal	% Sal	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ (g/cm ³)	W (%)	CBR 95%	CBR 100%
Inicial	0	0	36	19	16	1,73	17,73	1,92	2,46
1	5	0	46	38	8	1,83	13,56	12,68	14,70
2	7	0	46	40	6	1,85	12,43	20,73	22,32
3	6	1	37	32	5	1,86	9,71	22,54	24,21
4	5	2	41	36	5	1,91	9,64	22,35	24,84
5	4	3	42	38	4	1,95	9,59	22,39	25,49
6	3	4	40	36	4	1,96	9,51	20,13	22,79
SUELO 2									
Dosificación	% Cal	% Sal	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ (g/cm ³)	W (%)	CBR 95%	CBR 100%
Inicial	0	0	34	22	12	1,88	13,43	1,57	1,99
1	5	0	40	29	11	1,89	11,63	11,25	11,77
2	7	0	41	32	9	1,99	9,79	19,51	20,06
3	6	1	43	34	9	2,00	9,50	22,19	23,69
4	5	2	43	35	8	2,02	8,02	23,44	24,87
5	4	3	40	33	7	2,07	7,23	23,46	25,17
6	3	4	39	33	6	2,10	6,77	20,04	22,02
SUELO 3									
Dosificación	% Cal	% Sal	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ (g/cm ³)	W (%)	CBR 95%	CBR 100%
Inicial	0	0	58	28	30	1,78	14,09	2,96	3,74
1	12,5	0	53	23	30	1,89	12,57	23,14	27,21
2	10,5	2	51	21	30	1,89	12,38	24,23	27,11
3	8,5	4	50	21	29	1,90	12,18	24,59	28,76
4	7,5	5	48	20	28	1,93	12,14	25,07	29,88
5	6,5	6	48	21	28	1,94	12,10	25,10	30,44
6	5,5	7	48	21	27	2,03	11,30	24,42	26,36

Fuente: Elaboración propia

a) Plasticidad (Límites de Atterberg)

En su estado natural, los tres suelos presentan diferentes grados de plasticidad:

- **Suelo 1 (CL):** Plasticidad media - alta (LL = 36%, IP = 16%), con elevada retención de humedad.

- **Suelo 2 (CL):** Plasticidad moderada (LL = 34%, IP = 12%).
- **Suelo 3 (CH):** Alta plasticidad (LL = 58%, IP = 30%), con gran susceptibilidad a la humedad.

Tras la estabilización, todos los suelos mostraron mejoras, aunque con distinta magnitud:

- En los **suelos CL (1 y 2)**, el uso de cal y sal redujo significativamente la plasticidad, alcanzando valores mínimos de IP de **4% (suelo 1)** y **6% (suelo 2)**, con límites líquidos de 40% y 39% respectivamente.
- En el **suelo 3 (CH)**, la reducción fue más limitada debido a su naturaleza arcillosa activa; el IP disminuyó de 30% a **27%**, y el LL de 58% a **48%**, lo que refleja una mejora parcial en su estabilidad volumétrica.

Los tratamientos mostraron mejor respuesta en suelos CL, donde se logró una mayor reducción del índice plástico. En el CH, si bien hubo mejora, esta fue más moderada debido a su alta plasticidad residual.

b) Compactación (Ensayo Proctor modificado)

Los valores de densidad seca aumentaron en todos los casos tras el tratamiento, con una reducción paralela en la humedad óptima:

- **Suelo 1:** De 1,73 g/cm³ (natural) a **1,96 g/cm³** (cal + sal).
- **Suelo 2:** De 1,88 g/cm³ a **2,10 g/cm³**.
- **Suelo 3:** De 1,78 g/cm³ a **2,03 g/cm³**.

Todos los suelos mostraron mejoras en compactibilidad. El **suelo 2 (CL)** presentó el mayor aumento de densidad, lo que lo hace especialmente adecuado para ser compactado en obra con mejores resultados mecánicos.

c) Capacidad de soporte (CBR)

El valor CBR aumentó de manera significativa tras la estabilización:

- **Suelo 1:** De 1,92% (natural) a un **máximo de 22,39%** con 4% cal + 3% sal.
- **Suelo 2:** De valores bajos a **23,46%** con la misma dosificación, mostrando una respuesta técnica muy similar al suelo 1.
- **Suelo 3:** De 2,96% (natural) a un máximo de **25,10%** con 6,5% cal + 6% sal.

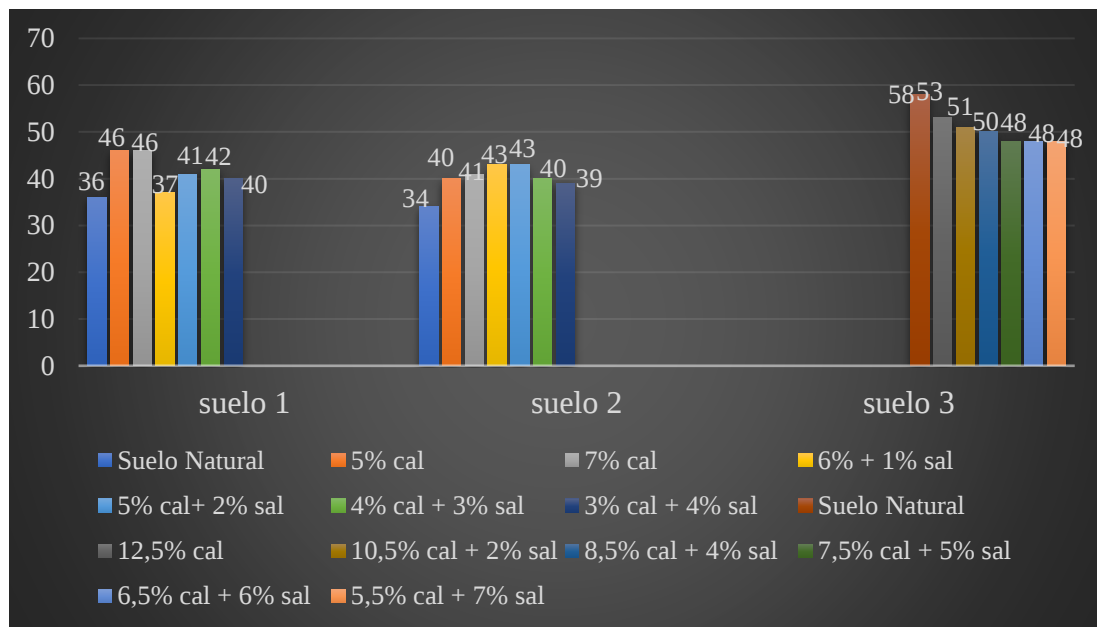
Cabe destacar que en todos los casos se identificó un **punto óptimo de dosificación**, a partir del cual un aumento adicional de sal provoca una disminución en el CBR, posiblemente por efectos adversos en la estructura interna del suelo.

Aunque el **suelo 3 (CH)** presentó la mayor mejora en términos absolutos de CBR, su tratamiento requirió dosis más elevadas de aditivos. En cambio, los suelos CL respondieron eficientemente con menores porcentajes, lo cual es técnicamente y económicamente más favorable.

4.2. Análisis del límite de Atterberg

A continuación, se expone un análisis técnico de los resultados obtenidos en los ensayos de límites de Atterberg para las tres muestras de suelo. Este análisis examina la respuesta de cada material frente a las distintas dosificaciones de cal y sal, con el objetivo de evaluar, desde una perspectiva geotécnica, cómo estos tratamientos modifican sus propiedades de plasticidad y comportamiento mecánico.

Figura 4.27: Análisis del límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Suelo 1 (CL):

El límite líquido inicial del suelo es de 36%. Con la adición de 7% de cal, este valor se incrementa hasta aproximadamente 46%, debido a la modificación de la estructura

interna del suelo, lo que genera mayor cohesión y demanda más agua para el paso del estado plástico al líquido. Sin embargo, al incorporar sal, el límite líquido disminuye gradualmente, alcanzando alrededor de 40% con 3% a 4% de sal. La dosificación óptima corresponde a una mezcla de 4% cal + 3% sal, donde se logra un balance adecuado entre capacidad de soporte y reducción de plasticidad.

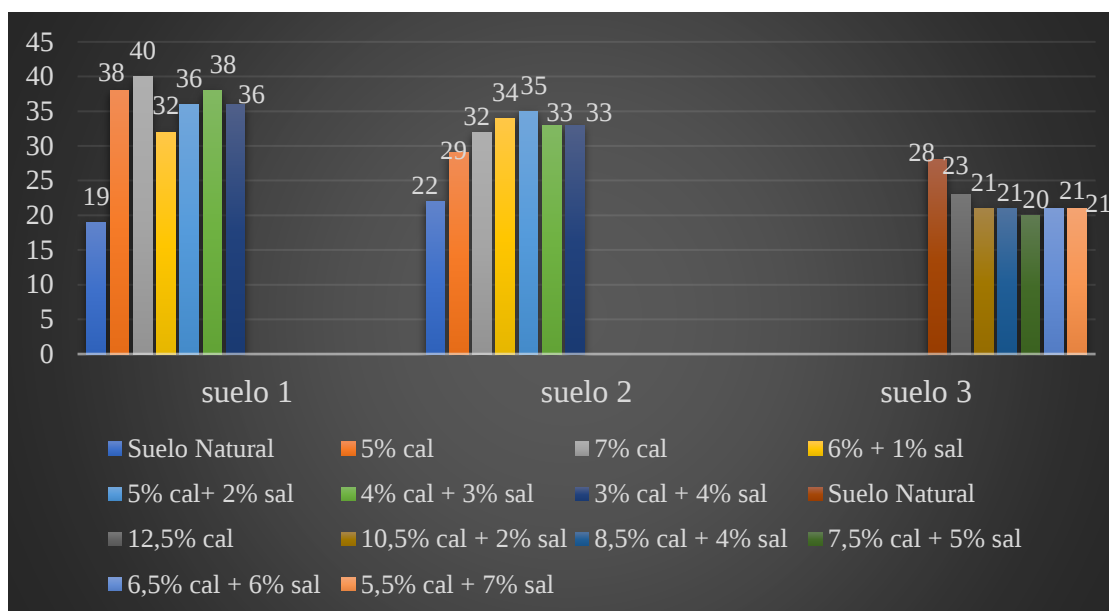
Suelo 2 (CL):

Este suelo presenta un límite líquido natural de 34%, que aumenta a 41% con 7% de cal, por efecto de la reorganización de la estructura arcillosa inducida por la cal. Al añadir sal, el límite líquido disminuye progresivamente hasta valores cercanos al 40%, indicando una menor capacidad del suelo para retener agua en estado líquido. La mezcla más eficiente es 4% cal + 3% sal, con la cual se obtiene una reducción efectiva de la plasticidad sin comprometer la estabilidad del suelo.

Suelo 3 (CH):

Con un límite líquido natural de 58%, este suelo de alta plasticidad responde favorablemente al tratamiento con 12,5% de cal, reduciendo el límite líquido a 53%. La incorporación de sal refuerza esta tendencia, alcanzando valores de hasta 48% con combinaciones de cal entre 5,5% y 7,5%, y sal entre 5% y 7%. La dosificación óptima se identifica en 6,5% de cal + 6% de sal, obteniéndose una reducción significativa de la plasticidad y una mejor respuesta del suelo frente a la presencia de humedad.

Figura 4.28: Análisis del límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Suelo 1 (CL):

El límite plástico inicial es de 19%. Con la aplicación de 7% de cal, este límite aumenta hasta 40%, asociado a la floculación y formación de una estructura más rígida en el suelo. Sin embargo, al combinar cal con sal, el límite plástico se reduce a 36%, lo que indica un mejor control de la plasticidad y una mayor estabilidad mecánica del material.

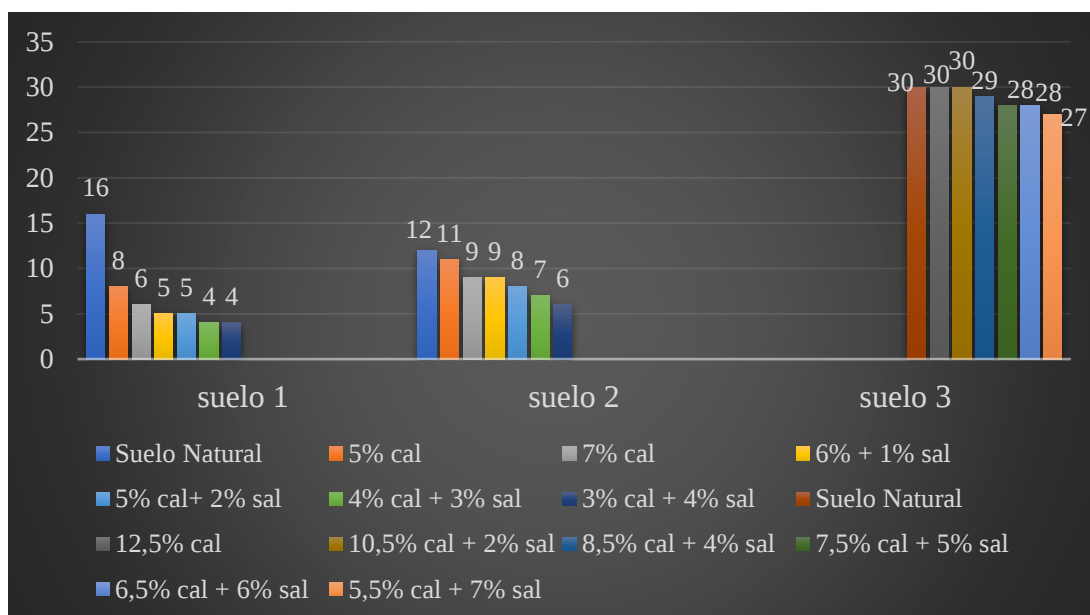
Suelo 2 (CL):

Este suelo presenta un límite plástico natural de 22%, que aumenta a 32% con la aplicación de cal sola. La dosificación conjunta de cal y sal disminuye este valor hasta 33%, favoreciendo la compactación y mejorando la resistencia del suelo mediante la reducción de sus propiedades plásticas.

Suelo 3 (CH):

Con un límite plástico inicial de 28%, el suelo de alta plasticidad reduce este valor a 23% con la aplicación de cal sola. La incorporación de sal genera una disminución adicional hasta 21%, contribuyendo a la reducción de la sensibilidad al agua y mejorando la resistencia del suelo frente a condiciones de humedad.

Figura 4.29: Análisis del índice de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Suelo 1 (CL):

La dosificación óptima para este suelo es 4% cal combinada con 3% sal, lo que reduce el índice de plasticidad (IP) a 4%. Esta reducción mejora la estabilidad del suelo y facilita una compactación adecuada. Además, esta proporción evita una concentración excesiva de sal que podría afectar negativamente la capacidad de soporte, preservando la resistencia mecánica y durabilidad del material.

Suelo 2 (CL):

Con una dosificación óptima igual a la del suelo 1 (4% cal + 3% sal), el IP disminuye a 6%, mejorando las propiedades plásticas y contribuyendo a una mejor compactación y comportamiento mecánico. La dosificación controlada de sal evita efectos adversos sobre la capacidad de soporte del suelo.

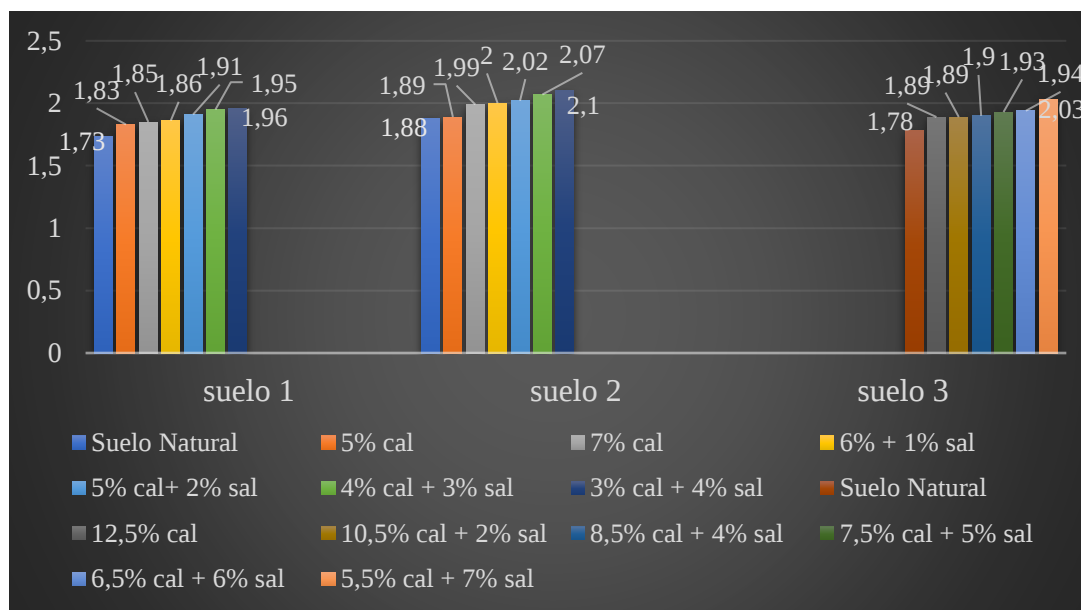
Suelo 3 (CH):

Para este suelo de alta plasticidad, la dosificación óptima es 6,5% cal y 6% sal, con una reducción del IP hasta 27%. Aunque la plasticidad sigue siendo relativamente alta, esta dosificación representa un equilibrio adecuado entre la reducción de la plasticidad y la resistencia del suelo. Dosis mayores de sal en la mezcla reducen la cohesión y disminuye la capacidad de soporte.

4.3. Compactación Proctor (T 180)

Se interpreta la variación de la humedad óptima y la densidad seca máxima en función de las dosificaciones de cal y sal, según el ensayo Proctor modificado. Este análisis permite valorar el efecto del tratamiento en la mejora de la compactación y en el comportamiento del suelo como material de subrasante.

Figura 4.30: Análisis de la densidad máxima



Fuente: Elaboración propia

Suelos 1 y 2 (CL):

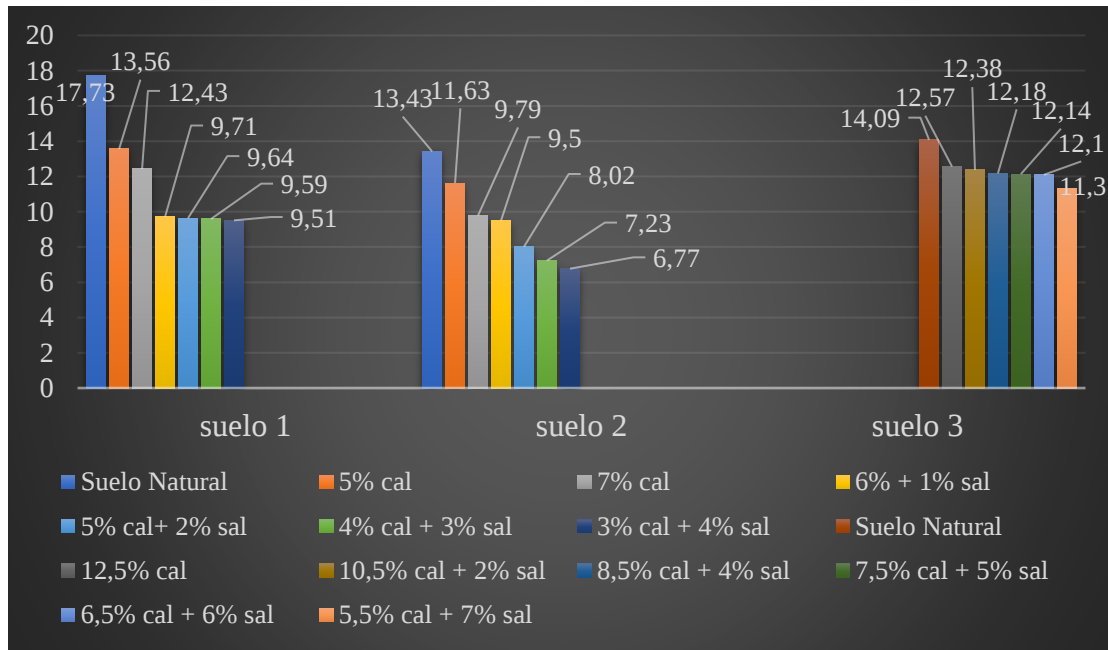
El suelo 1 presenta una densidad seca inicial de 1,73 g/cm³, que aumenta a 1,85 g/cm³ con la adición de cal y alcanza hasta 1,96 g/cm³ con la combinación de cal y sal. Por su parte, el suelo 2 inicia con una densidad seca de 1,88 g/cm³, incrementándose a 1,99 g/cm³ con cal y a 2,10 g/cm³ con la mezcla cal-sal. Estas mejoras reflejan un aumento progresivo en la compactación, atribuible a la aglomeración y mejor cohesión de las partículas del suelo generadas por el efecto estabilizante de la cal y la sal, lo que facilita la reducción de vacíos y un acomodo más denso de las partículas.

Suelo 3 (CH):

Este suelo de alta plasticidad tiene una densidad seca inicial de 1,78 g/cm³. Con la aplicación de cal, la densidad aumenta a 1,89 g/cm³, mientras que la combinación de cal

y sal eleva este valor hasta 2,03 g/cm³. Este incremento indica una compactación más eficiente para el suelo 3 al aplicar ambos estabilizantes, producto de la mayor cohesión y unión entre partículas que reduce la porosidad y mejora la estructura interna del suelo

Figura 4.31: Análisis de la humedad óptima



Fuente: Elaboración propia

Suelo 1 (CL):

En estado natural, presenta una humedad óptima de 17,73%. Con la adición de cal, este valor disminuye a 12,43%, y con la combinación de cal y sal se reduce aún más a 9,51%. Esta disminución indica una menor demanda de agua para alcanzar la máxima compactación, lo que refleja una mejora en la eficiencia del proceso de compactación del suelo.

Suelo 2 (CL):

La humedad óptima inicial es de 13,43%. Al aplicar cal, disminuye a 9,79%, y con la mezcla de cal y sal se reduce hasta 6,77%. Esta reducción progresiva indica una mejora en la eficiencia de compactación, con menor contenido de agua.

Suelo 3 (CH):

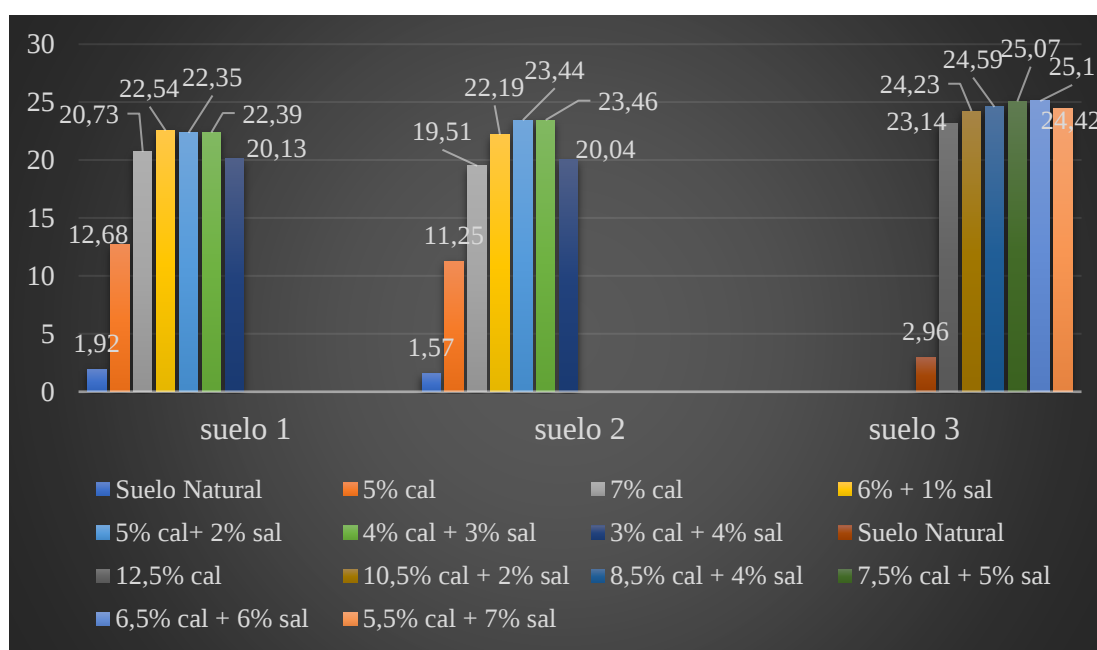
Este suelo presenta una humedad óptima natural de 14,09%, la cual se reduce a 12,57% con la adición de cal. Con la combinación de cal y sal, la humedad óptima disminuye a

11,30%. Aunque la reducción es menor en comparación con los suelos de baja plasticidad, se evidencia una mejora en la eficiencia de compactación al disminuir la cantidad de agua necesaria.

4.4. Capacidad de soporte (CBR)

En este análisis se consideran los valores de CBR obtenidos al 95% de la compactación máxima, con el fin de identificar la dosificación óptima de cal y sal que mejora significativamente la capacidad de soporte del suelo como subrasante.

Figura 4.32: Análisis del CBR al 95%



Fuente: Elaboración propia

Suelo 1 (CL):

En estado natural, el suelo presenta un CBR bajo (1,92%), insuficiente para uso en subrasantes estructurales. Con 5% y 7% de cal, el CBR aumenta a 12,68% y 20,73%, respectivamente, superando el umbral para subrasante excelente. Sin embargo, la combinación de cal y sal muestra resultados superiores; la dosificación óptima de 4% cal + 3% sal alcanza un CBR máximo de 22,39%. Se observa que al incrementar la sal a 4% con 3% de cal, el CBR disminuye ligeramente a 20,13%, evidenciando que un exceso de sal puede reducir la resistencia del suelo estabilizado.

Suelo 2 (CL):

Con un CBR natural de 1,57%, el suelo mejora progresivamente con cal sola (11,25% con 5% cal y 19,51% con 7% cal). La mejor respuesta se obtiene con 4% cal + 3% sal, alcanzando un CBR máximo de 23,46%. De igual manera, al aumentar la sal a 4% y reducir la cal a 3%, el CBR disminuye a 20,04%, confirmando que un contenido excesivo de sal tiene un efecto negativo sobre la capacidad de soporte.

Suelo 3 (CH):

Presenta un CBR natural de 2,96%, bajo para fines estructurales. El tratamiento con 12,5% de cal eleva el CBR a 23,14%. La mezcla óptima para este suelo es 6,5% cal + 6% sal, con un CBR máximo de 25,10%. Sin embargo, al aumentar la sal a 7% y reducir la cal a 5,5%, el CBR desciende a 24,42%, lo que demuestra que un exceso de sal no solo no mejora, sino que puede deteriorar la resistencia final.

Estos resultados indican que la combinación adecuada de cal y sal permite maximizar la capacidad de soporte de los suelos estabilizados al 95% de compactación, logrando condiciones óptimas para su uso en subrasantes. Sin embargo, es fundamental controlar la dosificación de sal, ya que su exceso puede ocasionar una reducción en la resistencia mecánica del suelo tratado.

4.5. Análisis de costos unitarios

Para efectos del análisis de costos unitarios, se considera la ejecución de la estabilización de caminos vecinales mediante la colocación de una capa superficial estabilizada de 20 cm de espesor compactado. Esta capa estará compuesta por mezcla de suelo arcilloso, cal hidratada, cloruro de sodio (considerando un costo referencial de Bs. 23 por bolsa de 50 kg en el mercado local) y agua, utilizando equipos mecánicos adecuados hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 95% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor estándar.

Asimismo, se incluye la preparación previa de la superficie, así como la remoción, carga y disposición de restos y desechos generados durante la ejecución.

Tabla 4.33: Costo en Bs/m² de suelo estabilizado con cal al 7%

Costo unitario Bs/m ²						150,16
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Precio (Bs)	Precio Total (Bs)
1	Mano de obra					
	Especialista en construcción de obra civil	hr	1	0,275	59,67	16,41
	Ayudante 1° de construcción de obra civil	hr	1	0,33	44,6	14,712
	Sub total mano de obra					31,13
	Cargas sociales (% del sub total de M.O.) (55% al 71%)					17,12
	Impuesto IVA M.O. (%suma de sub total de M.O.+ cargas sociales) (14.94)					7,21
	Total mano de obra					55,46
2	Materiales					
	cal	bls		2,59	18	46,62
	agua	m ³		0,05	3,5	0,16
	Total materiales					46,78
3	Equipos					
	Herramientas manuales	%		0,03	55,46	1,66
	Pala cargadora sobre neumáticos de 120 kW/1,9 m ³ .		1	0,1	297,39	29,74
	Motoniveladora de 141 kW.	hm	1	0,002	501,04	1,00
	Dumper de descarga frontal de 2 ton de carga útil	hm	1	0,002	68,53	0,14
	Compactador mono cilíndrico vibrante autopulsado, de 129 kw, de 16,2 ton, anchura de trabajo 213,4 cm.	hm	1	0,03	460,53	13,82
	Camión cisterna de 8 m ³ de capacidad	hm	1	0,002	784,76	1,57
	Total equipos					47,93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.34: Costo en Bs/m² de suelo estabilizado con cal al 4% y sal al 3%

Costo unitario Bs/m ²						136,98
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Precio (Bs)	Precio Total (Bs)
1	Mano de obra					
	Especialista en construcción de obra civil	hr	1	0,275	59,67	16,41
	Ayudante 1º de construcción de obra civil	hr	1	0,33	44,6	14,72
	Sub total mano de obra					31,13
	Cargas sociales (% del Sub total de M.O.) (55% al 71%)					17,12
	Impuesto IVA M.O. (%suma de sub total de M.O. + cargas sociales) (14.94)					7,21
	Total mano de obra					55,46
2	Materiales					
	cal	bls		1,56	18	28,08
	sal	bls		0,23	23	5,38
	agua	m ³		0,04	3,5	0,13
	Total materiales					33,59
3	Equipos					
	Herramientas manuales	%		0,03	55,46	1,66
	Pala cargadora sobre neumáticos de 120 kW/1,9 m ³	hm	1	0,1	297,39	29,74
	Motoniveladora de 141 kW.			0,002	501,04	1,00
	Dumper de descarga frontal de 2 ton de carga útil	hm	1	0,002	68,53	0,14
	Compactador mono cilíndrico vibrante autopropulsado, de 129 kw, de 16,2 ton, anchura de trabajo 213,4 cm.	hm	1	0,03	460,53	13,82
	Camión cisterna de 8 m ³ de capacidad	hm	1	0,002	784,76	1,57
	Total equipos					47,93

Fuente: Elaboración propia

La evaluación de las dos alternativas de tratamiento muestra que la principal diferencia en costos se origina en el precio de los materiales. La opción con 4% de cal y 3% de sal presenta un costo de 33,59 Bs, en contraste con los 46,78 Bs correspondientes a la opción con mayor proporción de cal. En lo referente a mano de obra y equipos, no se evidencian variaciones significativas entre ambas alternativas. El ajuste en la dosificación permite una disminución del costo total por metro cuadrado de 13,18 Bs,

reduciéndose de 150,16 Bs a 136,98 Bs, lo cual resulta relevante la optimización de recursos en la estabilización de suelos.

Observaciones relevantes:

- El incremento en el porcentaje de cal se traduce directamente en un mayor costo de tratamiento.
- La dosificación combinada de cal y sal resulta más eficiente tanto en términos económicos como en el desempeño del suelo tratado.
- La sal, debido a su menor costo unitario, aporta significativamente a la reducción del gasto total en materiales.
- La determinación adecuada de la proporción de aditivos es clave para optimizar los costos sin comprometer la calidad del mejoramiento.

4.6. Evaluación técnica y económica

Este apartado presenta un análisis técnico-económico de las distintas dosificaciones de estabilización, considerando tres variables: CBR, costo por metro cuadrado (Bs/m²) y relación costo/CBR. El objetivo es identificar la alternativa más rentable que proporcione una mejora significativa en la resistencia del suelo con el menor costo. Los resultados respaldan las recomendaciones del proyecto para subrasantes en caminos vecinales de tránsito moderado.

Tabla 4.35: Relación costo - beneficio suelo 1

SUELO 1						
Dosificación	% Cal	% Sal	CBR 95%	CBR 100%	Costo Unitario (Bs/m ²)	Eficiencia Bs por %CBR
Inicial	0	0	1,92	2,46	-	-
1	5	0	12,68	14,70	136,50	10,76
2	7	0	20,73	22,32	150,16	7,24
3	6	1	22,54	24,21	145,40	6,45
4	5	2	22,35	24,84	141,41	6,33
5	4	3	22,39	25,49	136,98	6,12
6	3	4	20,13	22,79	131,89	6,55

Fuente: Elaboración propia

Si bien el uso exclusivo de cal mejora la capacidad de soporte del suelo, implica costos más elevados (hasta Bs 150,16/m²) y menor eficiencia económica (hasta 10,76

Bs/%CBR). En contraste, la incorporación de sal permite reducir significativamente los costos sin comprometer el rendimiento mecánico.

La dosificación de 4% cal + 3% sal representa la solución más eficiente, al combinar un costo moderado de Bs 136,98/m² con la mejor relación costo/CBR (6,12 Bs/%CBR). Este equilibrio entre desempeño y gasto la convierte en la opción técnica y económicamente más viable para estabilización de subrasantes en caminos vecinales de tránsito moderado.

Tabla 4.36: Relación costo - beneficio suelo 2

SUELO 2						
Dosificación	% Cal	% Sal	CBR 95%	CBR 100%	Costo Unitario (Bs/m ²)	Eficiencia Bs por %CBR
Inicial	0	0	1,57	1,99	-	-
1	5	0	11,25	11,77	137,56	12,23
2	7	0	19,51	20,06	153,67	7,88
3	6	1	22,19	23,69	148,56	6,69
4	5	2	23,44	24,87	143,57	6,13
5	4	3	23,46	25,17	139,01	5,93
6	3	4	20,04	22,02	133,89	6,68

Fuente: Elaboración propia

El análisis de costos y eficiencia indica que el uso exclusivo de cal, aunque mejora la capacidad de soporte, resulta económicamente menos favorable, alcanzando un costo de hasta Bs 153,67/m² y una eficiencia baja (hasta 12,23 Bs/%CBR).

En contraste, las combinaciones de cal y sal optimizan el rendimiento económico del tratamiento. La mezcla de 4% cal + 3% sal destaca como la opción más eficiente, con un costo moderado de Bs 139,01/m² y la mejor relación costo/CBR (5,93 Bs/%CBR). Además, otras mezclas con mayor proporción de sal logran reducir aún más el costo por metro cuadrado (hasta Bs 133,89/m²), aunque con una leve disminución en la eficiencia estructural.

En conclusión, la combinación de 4% cal + 3% sal ofrece el equilibrio ideal entre costo y desempeño, consolidándose como la alternativa más rentable para estabilizar subrasantes en caminos de tránsito moderado.

Tabla 4.37: Relación costo - beneficio suelo 3

SUELO 3						
Dosificación	% Cal	% Sal	CBR 95%	CBR 100%	Costo Unitario (Bs/m²)	Eficiencia Bs por %CBR
Inicial	0	0	2,96	3,74	-	-
1	12,5	0	23,14	27,21	188,56	8,15
2	10,5	2	24,23	27,11	178,47	7,37
3	8,5	4	24,59	28,76	168,68	6,86
4	7,5	5	25,07	29,88	164,53	6,56
5	6,5	6	25,10	30,44	159,65	6,36
6	5,5	7	24,42	26,36	156,81	6,42

Fuente: Elaboración propia

Aunque la aplicación exclusiva de cal (12,5%) mejora la capacidad de soporte del suelo, representa el tratamiento más costoso (Bs 188,56/m²) y menos eficiente en términos económicos (8,15 Bs/%CBR).

En cambio, la incorporación de sal reduce considerablemente los costos y mejora la eficiencia. La mezcla de 6,5% cal + 6% sal destaca como la alternativa más eficiente, con un costo de Bs 159,65/m² y la mejor relación costo/CBR (6,36 Bs/%CBR). Este tratamiento no solo reduce el gasto frente al uso exclusivo de cal, sino que también logra el mayor valor de capacidad de soporte del suelo.

Por tanto, esta combinación ofrece el mejor balance técnico-económico, siendo altamente recomendable para estabilización de suelos con alta plasticidad en caminos vecinales de tránsito moderado.

4.7. Comparación de los tres suelos en condiciones óptimas de estabilización

El cuadro presenta los resultados de los tratamientos óptimos aplicados a los tres suelos evaluados, detallando las dosificaciones de cal y sal, los valores de CBR a 95% y 100% de compactación, el costo unitario por metro cuadrado y la eficiencia, entendida como el costo por unidad de CBR al 95%.

Tabla 4.38: Resultados óptimos de estabilización para cada suelo

Suelo	Dosificación óptima	CBR 95%	CBR 100%	Costo Unitario (Bs/m ²)	Eficiencia Bs por %CBR
1	4% cal + 3% sal	22,39	25,49	136,98	6,12
2	4% cal + 3% sal	23,46	25,17	139,01	5,93
3	6,5% cal + 6% sal	25,10	30,44	159,65	6,36

Fuente: Elaboración propia

La comparación entre los tres suelos estabilizados revela diferencias claras en cuanto a resistencia alcanzada, costo unitario y eficiencia técnico-económica. El suelo 3, logra la mayor resistencia, con un CBR de 25,10% al 95% de compactación, resultado de una dosificación más alta. Sin embargo, este beneficio técnico se ve acompañado de un costo unitario elevado (159,65 Bs/m²), lo que disminuye su eficiencia relativa.

Por otro lado, los Suelos 1 y 2, alcanzan valores de CBR ligeramente inferiores (22,39% y 23,46%, respectivamente), pero con menores costos de tratamiento (136,98 y 139,01 Bs/m²). En particular, el suelo 2 presenta la mayor eficiencia, con un valor de 5,93 Bs por unidad de CBR95%, superando a las demás alternativas en términos de rendimiento por inversión.

En consecuencia, si bien el suelo 3 demuestra una mejora técnica más significativa, el suelo 2 ofrece el mejor equilibrio entre costo y resistencia, posicionándose como la opción más rentable dentro de las condiciones evaluadas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Durante la presente investigación se evaluaron las propiedades física y mecánicas de tres muestras de suelo natural mediante la aplicación de procesos de estabilización con **cal y sal en diferentes proporciones**.

El suelo 1 y suelo 2 según la clasificación SUCS es un CL (Arcilla inorgánica de baja plasticidad), el suelo 3 corresponde a un CH (Arcilla inorgánica de alta plasticidad).

Para el **Suelos 1 y 2**, el tratamiento se realizó en dos etapas:

En una primera etapa, se aplicó únicamente **cal en porcentajes de 5 a 7%**.

En una segunda etapa, se utilizó una combinación de **cal entre 3 y 6%** y **sal entre 1 y 4%**.

Para el **Suelo 3**:

- En una primera etapa, se aplicó únicamente **cal en porcentajes de 12,5%**.
- En una segunda etapa, se utilizó una combinación de **cal entre 5,5 y 10,5%** y **sal entre 2 y 7%**.

La adición de cal y sal mejoró considerablemente las propiedades mecánicas de los tres suelos, especialmente en términos de capacidad de soporte (CBR) y trabajabilidad. Los tratamientos estabilizantes redujeron el índice plástico, aumentaron la densidad seca máxima y disminuyeron la humedad óptima de compactación, lo que es favorable para su comportamiento en obra.

I. Comportamiento de los Límites de Atterberg

En todos los suelos, se observó una tendencia decreciente en el IP con el aumento de cal y sal, lo que representa un suelo menos cohesivo y con menor sensibilidad al agua.

- Suelo 1: El IP se redujo de 16 (natural) a 4 con 3% cal + 4% sal.
- Suelo 2: Bajó de 12 a 6 con igual dosificación.

- Suelo 3: Se mantuvo en niveles aceptables (de 30 a 27) aun con contenido más elevado de cal y sal.

Esta mejora indica menor plasticidad, menor retención de agua y mayor resistencia al agrietamiento.

II. Compactación y Humedad Óptima

La estabilización produjo un aumento constante en la densidad seca máxima y una disminución de la humedad óptima, lo cual es positivo para la construcción.

- Suelo 1: De 1,73 g/cm³ (natural) a 1,96 g/cm³ con 3% cal + 4% sal; humedad óptima de 9,51%.
- Suelo 2: De 1,88 g/cm³ a 2,10 g/cm³ con la misma mezcla; humedad óptima bajó a 6,77%.
- Suelo 3: De 1,78 g/cm³ a 2,03 g/cm³ con 5,5% cal + 7% sal.
Esto evidencia una mejora en la estructura del suelo, haciéndolo más denso y menos susceptible a la humedad.

III. Mejoras Significativas en la Capacidad de Soporte (CBR)

- Suelo 1: Se incrementó el CBR al 95% de 1,92% (natural) a 22,39% con la mezcla 93% suelo + 4% cal + 3% sal.
- Suelo 2: El CBR al 95% pasó de 1,57% (natural) a 23,46% con la misma mezcla.
- Suelo 3: Mostró un incremento de 2,96% (natural) a 25,10% con la mezcla 87,5% suelo + 6,5% cal + 6% sal.

Estas mejoras reflejan un notable aumento en la resistencia a la penetración, apta para estructuras de pavimentos y subrasantes.

IV. Relación Costo - Eficiencia Optimizada

El análisis de costo por unidad de CBR (%CBR) mostró que existen combinaciones óptimas que maximizan el rendimiento técnico con el menor costo relativo.

- Suelo 1: La combinación más eficiente fue 4% cal + 3% sal con un costo/CBR de 6,12 Bs/%CBR.
- Suelo 2: Igual resultado, con 5,93 Bs/%CBR.

- Suelo 3: La mezcla más eficiente fue 6,5% cal + 6% sal, con el mejor valor global de 6,36 Bs/%CBR.

Estas proporciones ofrecen un equilibrio ideal entre inversión económica y ganancia en capacidad de soporte.

5.2. Recomendaciones técnicas

1. Proporciones Óptimas por Suelo

Según los resultados obtenidos, se recomienda adoptar las siguientes mezclas estabilizantes:

- Suelo 1 y Suelo 2: 4% cal + 3% sal (93% suelo natural).
- Suelo 3: 6,5% cal + 6% sal (87,5% suelo natural).

Estas dosificaciones lograron una mejora integral en plasticidad, densidad, humedad óptima, CBR y costo-beneficio.

2. Aplicabilidad en Campo

Dadas las mejoras observadas en los parámetros mecánicos, estas mezclas son apropiadas para su uso como **subrasante** en vías con tránsito moderado o controlado. Aunque los valores de CBR aumentan significativamente, no alcanzan niveles suficientes para considerarse como material de base estructural ($\text{CBR} \geq 40\%$). Por tanto, su aplicación es recomendable en:

- Subrasantes mejoradas para caminos vecinales, urbanizaciones y accesos industriales.

3. Ensayos de Validación en Campo

Aunque los resultados de laboratorio son concluyentes, se recomienda realizar ensayos de verificación en condiciones reales para confirmar el comportamiento del suelo estabilizado. Al reducirse la humedad óptima se debe asegurar que se trabaje dentro del rango ideal de humedad, maximizando la densidad obtenida en laboratorio.

4. Sostenibilidad y Reducción de Costos

Las dosificaciones con menor contenido de cal y un uso complementario de sal permiten no solo mejorar el comportamiento del suelo, sino también reducir los costos de estabilización, haciéndolas económicamente viables y ambientalmente más sostenibles.