

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la superficie de
rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-
Abancay 2023**

Asesor:

Ing. Cayo Baca, Holguer

Autor:

Castañeda Villegas, Afner Heyner

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2024



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

ACTA DE EXAMEN DE TITULACIÓN N°001-2025-EPIC-FI- UTEA- SA

Reunidos el Jurado Evaluador constituido por los señores Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de los Andes:

- | | |
|--------------------------------------|--------------|
| ➤ MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL | PRESIDENTE |
| ➤ Ing. Edwin Reynaldo ESPINOZA ASTO | DICTAMINANTE |
| ➤ Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO | REPLICANTE |

y el (la) postulante al TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO (a) CIVIL, Bachiller: **CASTAÑEDA VILLEGAS, Afner Heyner** con código de matrícula N°201310472-B.


Ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes, aprobado mediante resolución del Vicerrectorado Académico N°002-2024-UTEA-VRAC, de fecha 23 de enero del año 2024, respecto a la sustentación de tesis, para optar al título profesional de Ingeniero Civil.

SUSTENTACIÓN DE TESIS titulado: "Influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023", habiendo aprobado con la nota de trece (13).

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 299.

Abancay, 22 de enero 2025.


MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL
PRESIDENTE


Ing. Edwin Reynaldo ESPINOZA ASTO
DICTAMINANTE


Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO
REPLICANTE

Influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	2%
3	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y nombres	: Castañeda Villegas, Afner Heyner
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 76090347
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0005-8602-4234
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: Ing. Cayo Baca, Holguer
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 23933864
URL ORCID	: https://orcid.org/0000-0001-9590-750X
Datos de la investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: Del 2023 a 2024
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 10%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, quien ha sido mi guía constante en cada paso de este camino.

A mis progenitores por su amor sin condiciones, su constante apoyo y los valores que me han transmitido, son mi ejemplo de perseverancia y sacrificio.

A mi familia y a todos aquellos que siempre han estado presentes en mi vida, por su respaldo inquebrantable y por animarme en cada paso de mi formación académica.

A mis ingenieros y a todos aquellos que han compartido sus conocimientos conmigo. Vuestra influencia ha dejado una huella indeleble en mi formación y en el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por su bendición y sabiduría divina, ya que he podido superar los desafíos y culminar esta importante etapa académica con éxito.

A mis queridos padres, mi pilar fundamental, brindándome amor incondicional, apoyo constante y una educación de calidad.

Finalmente, deseo expresar mi gratitud a todas las personas que, de alguna forma, han contribuido a la culminación de esta tesis.

Resumen

El propósito principal de la indagación fue determinar la influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco - Abancay 2023. Estudio aplicado (tipo), explicativo (nivel) y experimental (diseño). La población se circunscribe a las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, localizadas en los sectores de Umaccata, Pantillay y Sahuanay y para la muestra se eligieron las progresivas 0 +390 km, 1 +985 km y 3 +410 km. Los instrumentos fueron los protocolos de ensayo estandarizados del MTC. Los suelos analizados se clasificaron principalmente como arena limosa (SM). El mayor valor de CBR (19.4%) se obtuvo con 4% de CaCl_2 en la calicata 1. La prueba ANOVA reveló significativas diferencias entre los grupos ($p < 0.001$), con el 4% de CaCl_2 como la concentración más efectiva. La prueba post-hoc Tukey HSD confirmó que el 4% de CaCl_2 produjo la mejora más sustancial en el CBR (diferencia de 13.6 respecto al patrón, $p < 0.001$). Se observaron aumentos en el CBR de hasta 328.1% en la calicata 2 con 4% de CaCl_2 . El estudio concluyó que el 4% de CaCl_2 es la concentración óptima para la estabilización, mejorando significativamente las propiedades mecánicas del suelo en todas las calicatas estudiadas.

Palabras clave: Estabilización, cloruro de calcio, carretera vecinal, superficie de rodadura.

Abstract

The main purpose of the inquiry was to determine the influence of calcium chloride on the stabilization of the surface of rural roads AP 611 and AP 612, Tamburco - Abancay 2023. Applied study (type), explanatory (level), and experimental (design). The population is limited to rural roads AP 611 and AP 612, located in the sectors of Umaccata, Pantillay, and Sahuanay, and for the sample, the selected progressions were 0 +390 km, 1 +985 km, and 3 +410 km. The instruments used were standardized test protocols from the MTC. The analyzed soils were primarily classified as silty sand (SM). The highest CBR value (19.4%) was obtained with 4% CaCl₂ in pit 1. The ANOVA test revealed significant differences between groups ($p < 0.001$), with 4% CaCl₂ being the most effective concentration. The Tukey HSD post-hoc test confirmed that 4% CaCl₂ produced the most substantial improvement in CBR (13.6 difference compared to the baseline, $p < 0.001$). CBR increases of up to 328.1% were observed in pit 2 with 4% CaCl₂. The study concluded that 4% CaCl₂ is the optimal concentration for stabilization, significantly improving the mechanical properties of the soil in all studied pits.

Key words: Stabilization, calcium chloride, rural road, wearing surface.

Índice general

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice general.....	ix
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xiv
Índice de anexos	xv
I. Introducción	16
II. Planteamiento del problema	18
2.1 Descripción y formulación del problema	18
2.2 Objetivos.....	21
2.2.1 Objetivo General.....	21
2.2.2 Objetivos Específicos	21
2.3 Justificación e importancia	22
2.3.1 Justificación técnica.....	22
2.3.2 Justificación social.....	22
2.3.3 Justificación económica.....	22

2.3.4	Justificación ambiental	23
2.4	Hipótesis	23
2.5	Variables	24
III. Marco Teórico.....		25
3.1	Antecedentes.....	25
3.1.1	Internacionales	25
3.1.2	Nacionales	27
3.2	Bases teóricas	29
3.2.1	Subrasante.....	29
3.2.2	Estabilización de Suelos	31
3.2.3	Estabilización física y mecánica.....	36
3.2.4	Cloruro de calcio como agente estabilizante	38
3.2.5	Mecanismos de estabilización con cloruro de calcio.....	40
3.3	Definición de términos	42
IV. Metodología.....		44
4.1	Tipo y nivel de investigación.....	44
4.2	Ámbito temporal y espacial.....	45
4.3	Población y muestra	45
4.3.1	Población	45
4.3.2	Muestra	46
4.3.3	Muestreo	46

4.4	Instrumentos	46
4.4.1	Técnica.....	46
4.4.2	Instrumentos de recolección de datos.....	47
4.5	Procedimientos	47
4.6	Análisis de datos.....	48
4.7	Consideraciones éticas.....	48
V.	Resultados y discusión	49
5.1	Resultados.....	49
5.1.1	Estudio Topográfico.....	49
5.1.2	Estudio de suelos	57
5.2	Prueba de hipótesis	66
5.2.1	Hipótesis específica 1	66
5.2.2	Hipótesis específica 2	69
5.3	Discusión de resultados	72
VI.	Conclusiones	76
VII.	Recomendaciones.....	80
VIII.	Referencias.....	82
IX.	Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1 Carretera en estudio	49
Tabla 2 Cuadro BMS	50
Tabla 3 Puntos de control para el levantamiento topográfico de las carreteras vecinales ..	50
Tabla 4 Poligonal cerrada	52
Tabla 5 Coordenadas de la poligonal cerrada	53
Tabla 6 Análisis granulométrico del suelo	57
Tabla 7 Clasificación de suelos mediante AASHTO y SUCS	58
Tabla 8 Clasificación de los límites de Atterberg y porcentaje de humedad	59
Tabla 9 Densidad máxima seca.....	59
Tabla 10 Ensayo de CBR para la calicata 01	60
Tabla 11 Ensayo de CBR para la calicata 02	62
Tabla 12 Ensayo de CBR para la calicata 03	64
Tabla 13 Valores de CBR al 95% de la DMS por calicata y porcentaje de CaCl ₂	66
Tabla 14 Prueba de normalidad para la hipótesis específica 2	66
Tabla 15 Resultados de ANOVA para Calicata 1	67
Tabla 16 Resultados de ANOVA para Calicata 2.....	67
Tabla 17 Resultados de ANOVA para Calicata 3.....	67
Tabla 18 Resultados de la prueba Tukey HSD	68
Tabla 19 Valores de CBR al 95% de la DMS y porcentaje óptimo por calicata.....	69
Tabla 20 Prueba de normalidad para la hipótesis específica 3	69

Tabla 21 Resultados de la prueba t de Student	70
Tabla 22 Análisis comparativo del porcentaje óptimo vs. patrón.....	71

Índice de figuras

Figura 1 Sentido de la poligonal.....	53
Figura 2 Levantamiento topográfico con dron en el sector Umaccata.....	54
Figura 3 Levantamiento topográfico en el sector de Pantillay	54
Figura 4 Levantamiento topográfico Sahuanay-Pantillay	55
Figura 5 Levantamiento topográfico sector Umaccata.....	55
Figura 6 Ensayo de CBR para la calicata 01	61
Figura 7 Ensayo de CBR para la calicata 02	62
Figura 8 Ensayo de CBR para la calicata 03	64

Índice de anexos

- Anexo 1** Matriz de consistencia ¡Error! Marcador no definido.
- Anexo 2** Operacionalización de variables ¡Error! Marcador no definido.
- Anexo 3** Resultados de ensayos de laboratorio ¡Error! Marcador no definido.
- Anexo 4** Certificados de calibración ¡Error! Marcador no definido.
- Anexo 5** Valores de referencia del CBR..... ¡Error! Marcador no definido.
- Anexo 6** Panel fotográfico..... ¡Error! Marcador no definido.

I. Introducción

En la ingeniería civil, la modificación del terreno es una práctica esencial, especialmente en el desarrollo y conservación vial. Esta metodología conlleva alterar las características físico-mecánicas del terreno para potenciar su fortaleza, longevidad y firmeza. Respecto a las vías sin pavimentar, esta técnica resulta vital para combatir inconvenientes frecuentes como la aparición de hoyos, el desgaste por agentes naturales y la proliferación de partículas en suspensión, que son retos habituales en estos caminos (Jácome & Ortiz, 2022).

La aplicación de técnicas de estabilización química emerge como una alternativa integral, que combina eficacia técnica, viabilidad económica y responsabilidad ambiental. Este método se basa en la adición de aditivos químicos específicos para potenciar las propiedades geotécnicas del suelo, optimizando así su rendimiento y durabilidad (Llano et al., 2020), en ese sentido, el (CaCl_2) ha emergido como un estabilizador prometedor en la ingeniería vial. Este compuesto químico tiene propiedades únicas que lo hacen particularmente útil para la estabilización de suelos, su capacidad higroscópica permite retener la humedad, lo que ayuda a mantener la cohesión del suelo y reduce la formación de polvo. Además, el CaCl_2 puede mejorar la resistencia y densidad del suelo, lo que se traduce en un aumento de la capacidad de soporte y una vida en términos de utilidad más larga de la carretera.

Las carreteras vecinales desempeñan un rol crucial en el desarrollo socioeconómico de las regiones rurales, estas vías son esenciales para conectar comunidades con centros urbanos, facilitando el acceso a servicios básicos, mercados y oportunidades educativas. Sin embargo, muchas de estas carreteras en Perú, y particularmente Apurímac, son no pavimentadas y están sujetas a condiciones climáticas adversas, lo que resulta en un deterioro rápido y costos de mantenimiento elevados.

La estabilización de estas carreteras no únicamente optimiza el bienestar de los pobladores cercanos, también tiene implicaciones económicas significativas, una carretera bien estabilizada requiere menos mantenimiento, lo que reduce los costos a largo plazo. En el ámbito particular de Tamburco-Abancay, las vías locales AP 611 y AP 612 son enlaces vitales para la conexión regional. Esta investigación se enfoca en analizar el efecto del CaCl_2 en la consolidación de la capa superior de estas rutas vecinales. El estudio pretende identificar la proporción ideal de CaCl_2 para mejorar las características mecánicas del terreno, con la finalidad de ofrecer una alternativa práctica y económicamente factible para la conservación y optimización de estos caminos.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

La inestabilidad de las vías carrozables tiene un impacto negativo en los transportistas, las comunidades locales y el medio ambiente. Esta situación demanda un mantenimiento y reparaciones frecuentes, lo que conlleva a gastos económicos considerables y genera una contaminación recurrente (Chinchay Díaz, 2018). La estabilización del suelo tiene el potencial de mejorar significativamente la capacidad de carga de los terrenos, facilitando el soporte adecuado de pavimentos y cimientos. Esto se logra aumentando la resistencia al corte del suelo y controlando las características de contracción-expansión del mismo. Un suelo se considera estabilizado cuando se trata un terreno menos resiliente para aumentar su fortaleza y su capacidad de resistir cambios en el volumen y el contenido de humedad. Este proceso es crucial para garantizar la durabilidad y la estabilidad estructural en diversas aplicaciones de ingeniería civil (Ali et al., 2023).

En la edificación de vías, la consolidación del terreno conlleva fusionar distintas clases de tierra o incorporar componentes poliméricos al suelo. Esta práctica busca alterar sus cualidades geotécnicas para satisfacer las especificaciones del plan constructivo, este proceso es ampliamente utilizado en diversos tipos de proyectos viales, que incluyen caminos de tierra, caminos de grava, carreteras asfaltadas, rutas de transporte y vías industriales (Almajed et al., 2023). La innovadora técnica de estabilización de suelos mediante activación alcalina emerge como una de las líneas investigativas en el área de la geotecnia, esta metodología se establece como una variante viable frente a los agentes cementantes convencionales (Rivera et al., 2020).

La adición de CaCl_2 en suelos produce una notable mejora en sus características de compactación, este fenómeno se evidencia mediante un aumento significativo en la máxima

densidad seca, acompañado de una reducción en el óptimo contenido húmedo, el proceso de estabilización mediante cloruro de calcio genera un efecto cementante en la capa superficial (Morales & Pailacura, 2019).

En los estudio de Zumrawi et al., (2016); Zumrawi & Eltayeb (2016), se estudió el efecto de añadidura de sales de cloruro en las propiedades de suelos expansivos, evaluando específicamente la reducción en la presión y potencial de de hinchamiento mediante el uso de diferentes sales de cloruro, como $AlCl_3$, $FeCl_3$ y NH_4Cl . Se observó que el cloruro de calcio tiene una alta capacidad higroscópica, pudiendo absorber más de 16 veces su peso en agua en situaciones de humedad alta.

A nivel internacional, el uso del $CaCl_2$ en la estabilización de vías ha sido ampliamente investigado. Un estudio realizado en Arabia Saudita por Al Bargi et al. (2023), evidenció que la añadidura de $CaCl_2$ a la grava incrementó significativamente la DMS y la relación de soporte de California (CBR), mejorando así la capacidad de soporte y la vida útil de las carreteras no asfaltadas. Además, el estudio encontró que la OCH del suelo disminuyó, lo que ayudó a reducir el contenido de polvo y mejorar la compactación. Otro estudio realizado en Irán por Almasi & Khabiri (2019) mostró que la adición de $CaCl_2$ incrementó la absorción de humedad del suelo, lo que a su vez redujo la generación de polvo, potenciando la protección en el tránsito y la pureza atmosférica de las zonas aledañas.

La pavimentación vial en Perú experimentó un retroceso significativo en 2020, según datos del MTC. El incremento de carreteras pavimentadas fue de solo 194.4 km, una disminución del 89.5% respecto a los 1,853.7 km añadidos en 2019, marcando el menor avance en una década. A nivel regional, únicamente cinco departamentos lograron aumentar su red pavimentada en más de 10 km, destacando Huánuco con 95.2 km. Cuatro departamentos registraron un crecimiento marginal, mientras que en once la variación fue prácticamente nula, no superando el kilómetro (ComexPerú, 2021). Un estudio en Lima,

donde se aplicó el CaCl₂, este mejoró significativamente las características mecánicas del suelo, aumentó el CBR en 64.52%, redujo el espesor de base necesario y demostró ser eficaz como mitigador de polvo (Chavarry et al., 2020).

En la actualidad en las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, los cuales conectan los sectores de Umaccata, Pantillay y Sahuanay; se visualiza como su suelo predominante las arcillas en la carretera vecinal AP 611 y en la carretera vecinal AP 612 tiene como predominante un suelo arcilloso con arenas y pequeñas rocas de color oscuro. Ambas vías vecinales poseen muchas deficiencias las cuales son perjudiciales para la población; presenta ahuellamiento, reptación por lluvias, desprendimiento de la capa superficial granular y mucha presencia de polvo el cual origina enfermedades de infecciones respiratorias.

Es conocido que las vías rurales AP 611 y AP 612 carecen de un historial de conservación y optimización habitual del terreno. Por ello, resulta crucial y se demanda una investigación sobre el perfeccionamiento de la firmeza del suelo. Esto no solo contribuirá a potenciar las características físico-mecánicas del terreno, sino que también generará un ahorro financiero en la ejecución de cualquier iniciativa. La estabilización conllevará una significativa reducción en los gastos de mantenimiento y en el grosor de la capa de rodamiento.

En ese sentido, y visualizado todo el problema, se planteó la siguiente interrogante de investigación.

Problema General

- ¿Cuál es la influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco - Abancay 2023?

Problemas Específicos

1. ¿Cuál es la influencia del cloruro de calcio (CaCl_2) en el valor de soporte del suelo en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023?
2. ¿Cuál es el porcentaje óptimo al utilizar el cloruro de calcio maximiza la durabilidad y adherencia del suelo en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

- Determinar la influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco - Abancay 2023.

2.2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar la influencia del cloruro de calcio (CaCl_2) en el valor de soporte del suelo en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023.
2. Determinar el porcentaje óptimo del cloruro de calcio (CaCl_2) que maximiza la durabilidad y adherencia del suelo en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 Justificación técnica

Se justifica desde un punto técnico al abordar de manera innovadora la problemática de la estabilidad del suelo en calzadas no pavimentadas. La aplicación de CaCl_2 como elemento estabilizador representa un avance significativo en las técnicas de mejoramiento de suelos utilizados como capa de afirmado. Este estudio busca profundizar en la comprensión de los efectos físicos y mecánicos que el CaCl_2 ejerce sobre el suelo. Además, se evaluará su eficacia en diferentes condiciones climáticas y tipos de suelo presentes en las carreteras AP 611 y AP 612, contribuyendo así al desarrollo de soluciones técnicas más eficientes y adaptadas a las necesidades específicas de la región.

2.3.2 Justificación social

Socialmente, se justifica por su potencial para mejorar significativamente la vida en cuestión de calidad de las poblaciones locales. Al experimentar con nuevas técnicas de estabilización en las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, se busca optimizar la calidad de transporte y comunicación en la zona. Este mejoramiento vial también ayudará a mejorar el desarrollo económico local al facilitar la transportación de bienes y servicios.

2.3.3 Justificación económica

La aplicación de CaCl_2 como estabilizador promete reducir los costos de construcción al permitir el uso de materiales locales y disminuir la necesidad de capas de mayor espesor. Además, se espera que esta técnica prolongue considerablemente la vida de las calzadas, disminuyendo la frecuencia y los costos asociados con las intervenciones de mantenimiento periódico. Esta optimización de recursos no solo beneficiará a las entidades encargadas del mantenimiento vial, sino que también podría resultar en una mejor asignación de fondos públicos hacia otros proyectos de desarrollo.

2.3.4 Justificación ambiental

Desde la perspectiva ambiental, esta investigación cobra especial relevancia al abordar uno de los problemas principales asociados con las carreteras no pavimentadas: la emisión de polvo. La aplicación de CaCl_2 como estabilizador promete reducir significativamente la generación de partículas, lo que tendrá un directo impacto en la calidad del aire de las zonas aledañas a las carreteras AP 611 y AP 612.

2.4 Hipótesis

Hipótesis General

- El uso del cloruro de calcio como estabilizador mejora la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023.

Hipótesis Específicas

1. El cloruro de calcio (CaCl_2) mejora significativamente el valor de soporte del suelo, incrementando el índice CBR en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023.
2. La aplicación del 4% de cloruro de calcio (CaCl_2) es el porcentaje óptimo que maximiza significativamente la durabilidad y adherencia del suelo en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023.

2.5 Variables

Variables	Dimensión	Definición	Indicadores	Medición/Índice	Instrumento de medida
Variable independiente	Adición del (CaCl ₂)	Cantidad de CaCl ₂ añadida al suelo en relación al peso del agua presente	0% 2% 4% 6%	Porcentaje en peso (%)	Balanza de precisión
Influencia del Cloruro de calcio	por el peso del contenido de agua				
Variable dependiente	Valor de soporte del Suelo.	Característica que mide la resistencia del suelo a la penetración o deformación bajo una carga controlada	CBR	(%)	Proctor modificado, Prensa CBR
Estabilización de la superficie de rodadura	Durabilidad y Adherencia del suelo	Características que definen la resistencia, estabilización y compactación del suelo	Densidad máxima seca Humedad óptima CBR	g/cm ³ , (%) (%)	Proctor modificado, Prensa CBR

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 Internacionales

Al Bargi et al. (2023), condujeron un "Examen práctico sobre la influencia del CaCl₂ como inhibidor de polvo en la solidez de vías sin pavimentar". Su meta fue evaluar la eficacia del CaCl₂ para mitigar el polvo y estabilizar caminos no asfaltados, examinando los cambios en la resistencia y propiedades del terreno tras su adición en distintas proporciones. Adoptaron una metodología experimental, analizando mezclas de grava natural con variadas cantidades de CaCl₂. Efectuaron pruebas de Atterberg, granulometría, MDS, CBR y OCH. Los hallazgos revelaron que un 4% de CaCl₂ redujo el OCH de 9.2% a 7.2%, elevó la MDS de 2.15 Mg/m³ a 2.36 Mg/m³, y mejoró el CBR del 25% al 36%. Concluyeron que el CaCl₂ es un estabilizador eficaz para vías sin pavimentar, sugiriendo ventajas en costos de ciclo vital y reducción de emisiones polvorrientas, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental.

Almasi & Khabiri (2020), realizaron una "Valoración empírica del efecto del CaCl₂ pulverizado en la disminución del rendimiento del estrato superficial del pavimento". Su objetivo fue determinar la mezcla óptima de CaCl₂ en polvo y evaluar su impacto en las características físicas de los materiales finos de la capa superior del pavimento en carreteras con manto de grava. Emplearon un enfoque experimental, examinando muestras con diversos porcentajes de CaCl₂ y humedad. Ejecutaron pruebas de absorción hídrica, resistencia a compresión uniaxial y límites de Atterberg. Los resultados indicaron que el incremento de CaCl₂ aumentó la absorción de humedad. Con 6% de CaCl₂, el límite plástico subió 6%, el líquido 12% y el índice de plasticidad 25%. La resistencia a tracción uniaxial creció 11%, mientras la de compresión uniaxial bajó 36%. Dedujeron que el CaCl₂ influye

significativamente en las propiedades físicas del material superficial, mejorando algunos aspectos, pero potencialmente deteriorando otros.

Singh et al. (2020), investigaron la "Consolidación de terrenos arcillosos mediante yeso y CaCl_2 ". Su propósito fue evaluar cómo la estabilización de suelos arcillosos con la adición de estos componentes afecta las propiedades de resistencia del suelo, incluyendo la compactación y la capacidad de carga. Utilizaron una metodología experimental, analizando muestras de arcilla con diversos porcentajes de yeso (2%, 4%, 6%, 8%) y 0.75% fijo de CaCl_2 . Realizaron pruebas Proctor estándar para determinar MDS y OCH, además de CBR. Los resultados evidenciaron una notable mejora en las propiedades del suelo arcilloso al combinar yeso y CaCl_2 , observándose incrementos en MDS y CBR. Concluyeron que esta mezcla es eficaz para potenciar las características geotécnicas de suelos arcillosos, superando el uso exclusivo de yeso y sugiriendo un método potencial para mejorar suelos problemáticos en ingeniería civil.

Morales & Pailicura (2019), examinaron el "Desempeño de un manto de rodadura estabilizado con CaCl_2 " en Antofagasta, Chile. Su objetivo fue evaluar la eficacia del CaCl_2 como estabilizador en caminos no pavimentados, analizando su incidencia en las propiedades mecánicas del terreno. Combinaron enfoques prácticos y experimentales, construyendo una vía de prueba con un tramo tratado con CaCl_2 y otro menor con bischofita, realizando análisis de campo y laboratorio. Los resultados mostraron una mejora sustancial en las capas tratadas con CaCl_2 , observándose un efecto cementante que aumentó la estabilidad y durabilidad. Concluyeron que el CaCl_2 es un estabilizador efectivo para caminos no pavimentados, destacando su ventaja económica y facilidad de aplicación en el mantenimiento de vías rurales regionales.

Larrea & Rivas (2019), investigaron la "Estabilización de suelos con NaCl y CaCl_2 ". Su propósito fue evaluar la eficacia de estos compuestos como estabilizadores,

analizando su efecto en la plasticidad y capacidad de soporte del suelo. Emplearon una metodología experimental, analizando un suelo patrón con diferentes porcentajes de ambos estabilizadores (1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%). Realizaron pruebas de granulometría, Atterberg, Proctor Modificado, CBR, colorimetría y pH según normas ASTM. Los resultados mostraron variaciones en plasticidad y soporte, determinándose dosificaciones óptimas que cumplían las exigencias MTOP. Concluyeron que ambos compuestos son eficaces para reducir la plasticidad y mejorar el soporte de suelos arcillosos, proporcionando bases para su aplicación en mejoramiento de materiales para obras civiles.

3.1.2 Nacionales

Lujan & Vargas (2024), investigaron el "Efecto del CaCl₂ en la consolidación de la subrasante, en el tramo Otuzco-Pachin Alto". Su objetivo fue analizar cómo el CaCl₂ mejora la estabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de esta carretera en La Libertad, Perú. Emplearon una metodología experimental con cuatro muestras del tramo, realizando pruebas topográficas, de humedad, granulometría, Proctor y CBR antes y después de aplicar CaCl₂. Los resultados identificaron suelos A-1-a(0) y A-2-4(0), inicialmente por debajo de los estándares del MTC para subrasantes. La adición de CaCl₂ mostró mejoras notables, especialmente al 3%, con un aumento significativo del CBR, aunque curiosamente disminuyó al 4%. Concluyeron que el CaCl₂ es eficaz para mejorar las propiedades de suelos arcillosos en subrasantes, particularmente en capacidad de soporte, pero notaron la existencia de un punto óptimo de concentración más allá del cual los beneficios pueden decrecer.

Cashpa & Pillhuaman (2022), examinaron el "Aplicación de CaCl₂ en el terreno para consolidar la ruta sin pavimentar en la extensión de la Av. Los Nogales". Su propósito fue evaluar la influencia del CaCl₂ en la estabilización de esta vía no pavimentada. La metodología incluyó reconocimiento del terreno, ubicación de calicatas, y aplicación de CaCl₂ en porcentajes de 0%, 2%, 3% y 4% del peso de la muestra. Utilizaron protocolos del

MTC para medir propiedades físicas y resistencia del suelo. Los hallazgos revelaron una mejora significativa en las propiedades mecánicas con la adición de CaCl₂, observándose incrementos en la capacidad portante y cambios favorables en otras características físicas. Concluyeron que el CaCl₂ impactó positivamente en la estabilización de la vía, sugiriendo su eficacia para mejorar vías no pavimentadas en condiciones similares.

Peña (2021), estudió la "Empleo de CaCl₂ en el camino rural para facilitar el acceso a El Bosque San Andrés". Su objetivo fue evaluar la eficacia del CaCl₂ como estabilizador en trochas carrozables para mejorar la accesibilidad y durabilidad de la vía. Utilizó una metodología aplicada, con diseño experimental y enfoque cuantitativo, seleccionando intencionalmente la vía de acceso a El Bosque. Los resultados mostraron que el material granular con escasos finos no presentó cambios significativos en propiedades físicas al añadir CaCl₂, pero sí mejoras notables en propiedades mecánicas, especialmente en capacidad de soporte. La dosificación óptima se estableció en 2% de CaCl₂. Concluyó que el CaCl₂ es efectivo como estabilizador en trochas carrozables afirmadas en San Andrés, proponiendo este método como alternativa viable para mejorar vías de acceso en mal estado.

Pacheco (2020), investigó la "Aplicación del CaCl₂ con material afirmado para mejorar la estabilización de la base en calzadas no pavimentadas". Su propósito fue evaluar la estabilización de la base mediante CaCl₂ con material afirmado. La metodología incluyó ensayos de laboratorio para determinar características físicas y mecánicas del suelo antes y después de aplicar el aditivo, utilizando CBR para medir resistencia. El estabilizador principal fue CaCl₂ (Quim KD40) al 40% de concentración. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en estabilidad y durabilidad del suelo tratado, con incremento en capacidad de soporte y reducción de permeabilidad. Concluyó que el CaCl₂ es efectivo para estabilizar carreteras no pavimentadas en ciertas zonas del Perú, ofreciendo una solución versátil a problemas de inestabilidad y baja durabilidad.

Chavarry-Vallejos et al. (2020), examinaron la "Estabilización de capas con CaCl₂ para vías no pavimentadas". Su objetivo fue evaluar la efectividad del CaCl₂ como estabilizador de suelos y reductor de polvo en el Malecón Huaycoloro, Lima. Emplearon una metodología descriptiva, correlacional y explicativa, con diseño experimental longitudinal, realizando visitas in situ y ensayos de laboratorio en muestras de cuatro calicatas a lo largo de 5 km, aplicando CaCl₂ en 2.5 km. Los resultados mostraron un aumento del 64.52% en CBR tras añadir 40% en volumen de CaCl₂ por metro cúbico. El análisis AASHTO 93 reveló una reducción en el espesor requerido de la base estabilizada (15 cm) comparado con la base sin tratar (20 cm). Concluyeron que el CaCl₂ es altamente efectivo como estabilizador en suelos arenosos y gravosos, mejorando notablemente la capacidad de soporte y reduciendo visiblemente el polvo, especialmente en condiciones de alta humedad ambiental.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Subrasante

En el ámbito vial, la capa inferior que sirve de base para el revestimiento o la estructura de rodadura se denomina subrasante. Esta superficie, compuesta por material granulado, se halla al nivel donde culminan las labores de movimiento de suelos. Sobre ella descansa la capa de rodamiento planificada, ya sea un firme pavimentado o una vía afirmada (MTC, 2014). El fundamento directo que soporta la estructura expuesta al flujo vehicular es este material, por lo que su adecuada configuración requiere atenciones particulares. En líneas generales, una subrasante óptimamente diseñada y construida garantizará una extensa preservación de la utilidad de la vía. Esto se debe a que impedirá la aparición de alteraciones bruscas que pudieran ocasionar el quebrantamiento del manto pavimentado o de la capa de rodadura afirmada. La durabilidad de la calzada en servicio, por tanto, se ve significativamente influenciada por las propiedades idóneas de este estrato base (Torres & Landa, 2020).

En la estructura vial, el estrato subyacente juega un papel crucial. Su integridad está intrínsecamente ligada a la del pavimento superior, de modo que un fallo en esta capa base provocaría inevitablemente el colapso de la superficie de rodadura. Por consiguiente, la evaluación de este componente se centra principalmente en su aptitud para resistir deformaciones causadas por las fuerzas cortantes generadas por el tráfico rodado, así como en su capacidad de carga (Rondón et al., 2019). Para cuantificar la resistencia del terreno que conforma esta capa fundamental, los ingenieros recurren al índice CBR. Este parámetro establece una comparación entre la capacidad de soporte de un suelo en cuestión y la de un material de referencia preestablecido. Cabe destacar que el valor del CBR se determina en relación al 95% de la densidad máxima en seco hallada mediante el ensayo Proctor modificado (MTC, 2016).

El MTC (2014), establece un sistema de evaluación para determinar la capacidad resistente de los estratos subyacentes en las vías. Este método se fundamenta en el empleo del California Bearing Ratio (CBR), una prueba ampliamente reconocida en el contexto de la ingeniería vial.

La valoración de la subrasante mediante el CBR permite categorizar el suelo en seis distintos niveles de resistencia. Esta clasificación exhaustiva se desglosa de la siguiente manera:

1. So: Capa inferior deficiente o inapropiada (Índice de resistencia $< 3\%$)
2. S1: Estrato base defectuoso (Índice de resistencia = $3\% - 5\%$)
3. S2: Nivel de apoyo intermedio (Índice de resistencia = $6 - 10 \%$)
4. S3: Cimiento vial adecuado (Índice de resistencia = $11 - 19\%$)
5. S4: Base de calidad superior o muy adecuada (Índice de resistencia = $20 - 29\%$)
6. SS: Fundación de carretera óptima (Índice de resistencia $> 30\%$)

3.2.2 *Estabilización de Suelos*

El proceso de estabilización implica la incorporación de un aditivo en cantidades considerables al terreno cohesivo. Esta mezcla desencadena reacciones químicas que actúan como aglutinante entre las partículas del suelo, incrementando notablemente su resistencia. Generalmente, este procedimiento requiere una proporción de aditivo superior a la empleada en la mera modificación del suelo. En esencia, se puede afirmar que un terreno ha alcanzado la estabilidad cuando exhibe una marcada y persistente oposición a deformarse, tanto en condiciones de sequedad como de humedad, al ser sometido a cargas continuas o cíclicas. Esta robustez ante las sollicitaciones mecánicas es el sello distintivo de un suelo eficazmente estabilizado (Montejo et al., 2018).

La optimización de terrenos implica la aplicación de sustancias químicas convencionales, pudiendo incorporarse materiales tradicionales o innovadores. Este proceso busca potenciar la resistencia y otras características mecánicas del suelo (Y. Liu et al., 2019). Esta técnica de mejoramiento edáfico se centra en perfeccionar las propiedades del terreno a lo largo del tiempo, influyendo favorablemente en su comportamiento. El diseño está basado en la tipología del suelo, determinando la clase y cantidad de agente estabilizador necesario para lograr el efecto deseado (Ulate-Castillo, 2017). De acuerdo con el (MTC, 2014) a estabilización tiene como objetivo incrementar la robustez mecánica y la perdurabilidad de las propiedades del suelo. Para ello, se emplean diversas metodologías que abarcan desde la inclusión de nuevos elementos terrosos hasta la adición de uno o más agentes estabilizadores. Independientemente del método elegido, es imperativo que el proceso culmine con una adecuada compactación para garantizar su efectividad.

De acuerdo con, Hasan et al. (2016), la estabilización de suelos la conlleva múltiples beneficios. Entre ellos, se destaca el aumento de la capacidad de soporte, la mejora en su resistencia al cizallamiento y la intensificación de su oposición al reblandecimiento causado

por la humedad. Además, este proceso proporciona estabilidad volumétrica al reducir la permeabilidad, reduce la plasticidad y eleva el peso de un suelo tratado.

Históricamente, las técnicas más básicas de estabilización edáfica han sido la compactación y el drenaje. No obstante, estas metodologías a menudo resultan insuficientes para lograr una consolidación óptima del terreno. Por ello, se ha recurrido a perfeccionar la distribución granulométrica del suelo, convirtiéndose en uno de los métodos más frecuentes de estabilización. Este enfoque suele implicar la incorporación de agentes aglutinantes para alcanzar los resultados deseados (Firoozi et al., 2017).

Criterio para la estabilización de suelos

Previo a cualquier intervención en subrasantes deficientes, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014), establece siete pautas geotécnicas fundamentales. De estas, destacan dos criterios cruciales:

1. Primeramente, aquellos terrenos cuyo índice CBR no alcance el 6%, o que presenten zonas de excesiva humedad o blandura, requieren un análisis especializado. Este estudio determinará la técnica de mejoramiento más apropiada, pudiendo incluir:

- Estabilización por medios mecánicos
- Sustitución del suelo base
- Refuerzo con materiales geosintéticos
- Implementación de pedraplenes
- Colocación de estratos arenosos
- Elevación del nivel de la rasante
- En casos extremos, incluso la modificación del trazado vial proyectado, si los costos resultaran prohibitivos

2. En segunda instancia, cuando la subrasante contenga materiales arcillosos o limosos susceptibles de polucionar las capas del pavimento al humedecerse, el proyecto deberá contemplar medidas preventivas. Estas pueden materializarse en forma de una capa anticontaminante de al menos 10 cm de espesor, o mediante la instalación de un geotextil adecuado.

3. La distancia vertical entre la superficie de la subrasante y el nivel freático es crucial y varía según la calidad del terreno. Para subrasantes de calidad extraordinaria o muy buena, se requiere una separación mínima de 0.60 m. Esta distancia se incrementa a 0.80 m en el caso de subrasantes buenas y regulares. Cuando se trata de suelos pobres, la separación debe ser de al menos 1.0 m, mientras que para terrenos clasificados como inadecuados, la distancia se extiende hasta 1.20 m.

4. Generalmente, los suelos más propensos a la congelación son aquellos de naturaleza limosa y los que contienen una fracción inferior al 3% de su masa en partículas menores a 0.02 mm. Por consiguiente, en regiones propensas a heladas, típicamente aquellas localizadas por encima de los 4000 m.s.n.m, es imperativo evaluar el potencial de congelamiento de la subrasante. En estos casos, se debe procurar maximizar las distancias entre la superficie del suelo y el manto freático, con el propósito de moderar los impactos adversos de la congelación.

Proceso de estabilización subrasante con aditivos

En regiones donde predominan los suelos de granulometría fina y escasean los yacimientos naturales de material pétreo, como es característico en la cordillera andina del Perú, se recurre frecuentemente a la inclusión de aditivos para la mejoría de las características del terreno. En este contexto, (MTC, 2014) ha establecido una serie de protocolos estandarizados para la correcta implementación de estas técnicas de

estabilización. Estos procedimientos, que buscan optimizar la calidad del suelo en ausencia de recursos granulares, se pueden sintetizar de la siguiente manera:

1. Inicialmente, se procede a la escarificación y pulverización in situ del suelo. Esta acción tiene como objetivo homogeneizar la granulometría del terreno, preparándolo para su posterior tratamiento.
2. Seguidamente, se distribuye el agente estabilizador sobre la superficie previamente escarificada. Acto seguido, se procede a la hidratación del área tratada, procurando abarcar la mayor extensión posible.
3. En la tercera fase, se emplea maquinaria especializada, como una motoniveladora, para mezclar exhaustivamente el suelo con el aditivo y el agua añadidos, buscando una distribución uniforme de los componentes.
4. La cuarta etapa consiste en la consolidación controlada del terreno. Se busca alcanzar una densificación específica, que suele oscilar entre el 95% y el 100% de la MDS obtenida mediante el ensayo Proctor, ya sea en su versión Estándar o Modificada.
5. Finalmente, se inicia el proceso de curado del suelo tratado. Durante esta fase, se realiza un seguimiento continuo del estado de la vía, permitiendo que el material adquiera gradualmente sus propiedades definitivas.

Métodos convencionales de estabilización

Según Rivera et al. (2020), la estabilización de un suelo es una técnica que busca potenciar las cualidades del terreno natural. Este procedimiento tiene como objetivo alcanzar una serie de propiedades físico-químicas y mecánicas que se mantengan inalterables frente a las diversas condiciones ambientales durante su uso. Mediante estas intervenciones estabilizadoras, es posible modificar múltiples propiedades del suelo: desde el control de la dilatación y el aumento de la firmeza, hasta la disminución de la plasticidad y la permeabilidad, sin olvidar la prevención de procesos erosivos, entre otros atributos.

En las siguientes líneas, se detallarán las diversas metodologías empleadas para la estabilización de suelos, las cuales se implementan tanto en obras nacionales como internacionales. Estas técnicas están contempladas en el compendio oficial de vías terrestres elaborado por el (MTC, 2014), organismo que regula y supervisa estos procedimientos en el contexto vial.

Propiedades de los suelos estabilizados

A. Resistencia y capacidad de carga. La estabilización de terrenos conlleva un notable incremento en su firmeza y aptitud para soportar cargas. Este aumento se atribuye al fortalecimiento de las conexiones entre los componentes del suelo, potenciando su adherencia y roce interno. La intensificación de la solidez se evidencia en lecturas superiores del (CBR) y en una mayor capacidad de resistir presiones sin alterarse. Esta característica es fundamental en la edificación de vías, pues permite que el pavimento tolere mejor el impacto de los automóviles y resista el deterioro ocasionado por el tránsito continuo (Behnood, 2018).

B. Estabilidad volumétrica. La estabilización del suelo reduce significativamente los cambios de volumen causados por modificaciones en el contenido de húmedo. Los suelos estabilizados son menos propensos a expandirse cuando absorben agua o a contraerse cuando se secan. Esta estabilidad volumétrica es particularmente importante en suelos arcillosos, que tienden a hincharse y contraerse con la humedad. Al minimizar estos cambios, se reduce el riesgo de grietas, hundimientos y otros problemas estructurales en la superficie de la carretera, lo que contribuye a una mayor durabilidad y menor necesidad de mantenimiento.

C. Permeabilidad y drenaje. La estabilización del suelo generalmente resulta en una reducción de la permeabilidad. Esto significa que el suelo estabilizado es menos permeable al agua, lo que puede ser beneficioso para prevenir la erosión y el debilitamiento

de la estructura del suelo por saturación. Sin embargo, es importante mantener un equilibrio, ya que cierto grado de permeabilidad es necesario para permitir un drenaje adecuado. Un buen drenaje evita la agrupación de H₂O en la estructura del pavimento, lo que podría llevar a problemas como el reblandecimiento del suelo o la formación de hielo en climas fríos (Behnood, 2018).

D. Durabilidad y resistencia. Los suelos estabilizados exhiben una mayor durabilidad y resistencia a los efectos de la intemperie. Son más resistentes a la erosión causada por el viento y el agua, lo que es particularmente importante en regiones con climas extremos o variables. Esta mayor resistencia a la intemperie es traducida en una vida utilitaria más grande de la carretera y en una reducción de la frecuencia y los costos de mantenimiento. Además, los suelos estabilizados tienden a mantener sus propiedades mecánicas mejoradas durante períodos más largos, incluso bajo condiciones de uso intensivo y exposición constante a los elementos (Behnood, 2018).

3.2.3 Estabilización física y mecánica

En el contexto de la ingeniería geotécnica, la modificación física de los suelos implica la alteración de sus características intrínsecas con el propósito de conferirles nuevas propiedades estructurales. Esta técnica abarca diversos métodos, entre los cuales destaca la implementación de materiales innovadores conocidos como geos sintéticos. Entre estos se encuentran los geotextiles, confeccionados primordialmente con fibras sintéticas como el polipropileno o el poliéster; las geomallas, que ofrecen refuerzo suplementario; y las geomembranas, capas impermeables poliméricas hechas de polietileno de varias densidades o cloruro de polivinilo (Liu et al., 2011).

Por otra parte, Das (2013), nos ilustra sobre la estabilización mecánica, un proceso que busca incrementar la densidad y resistencia del suelo a través de la compactación, ya sea de forma estática o dinámica. Este método no solo reduce la porosidad y la permeabilidad

del terreno, sino que también puede incluir la combinación previa de suelos con diferentes granulometrías para alcanzar las especificaciones deseadas. Los objetivos fundamentales de esta técnica son múltiples y de gran relevancia para la ingeniería civil: potenciar la capacidad de carga del suelo, minimizar el asentamiento de las edificaciones erigidas sobre él, controlar las variaciones volumétricas no deseadas, limitar la infiltración de agua y, finalmente, reforzar los taludes (estabilidad). Estos propósitos, en su conjunto, contribuyen significativamente a la mejora de las condiciones del terreno para su empleo en varios proyectos de infraestructura y construcción.

La densidad de un suelo se ve influenciada por la cantidad de energía aplicada durante su compactación, además del tipo y la distribución granulométrica del mismo. A su vez, el nivel de compactación está determinado por el contenido húmedo presente y el peso seco específico. Por lo tanto, el grado de compactación se cuantifica utilizando el peso unitario del suelo cuando está seco (Rivera et al., 2020).

Estabilización química

En el ámbito de la ingeniería geotécnica, una de las propuestas más vanguardistas en materia de investigación es la estabilización de suelos química mediante la técnica alcalina de activación. Este método innovador surge como una alternativa prometedora frente a los aglutinantes convencionales. Los avances en este campo han arrojado resultados alentadores, no solo en lo que respecta a las características mecánicas de los suelos tratados, sino también en cuanto a su longevidad y resistencia al deterioro. Desde una perspectiva ecológica, los aglutinantes activados por medios alcalinos se perfilan, en principio, como una opción más respetuosa con el ambiente en comparación con sus contrapartes tradicionales. Esta cualidad se debe principalmente a dos factores: por un lado, la elaboración de estas mezclas demanda menos energía en su proceso; por otro, su manufactura utiliza componentes provenientes de

desechos o subproductos de la industria, como las escorias de alto horno y las cenizas volantes procedentes de la siderurgia, entre otros materiales (Syed-Zuber et al., 2013).

En el área de la geotecnia, la modificación química de suelos se erige como una técnica sofisticada que implica la incorporación de sustancias o compuestos químicos al terreno. Este proceso, descrito por Billong et al. (2009), tiene como finalidad la alteración de las características intrínsecas del suelo. Dicha transformación se logra a través de dos mecanismos fundamentales: por un lado, mediante reacciones fisicoquímicas complejas que modifican la estructura molecular del suelo; por otro, a través de la conformación de una matriz cohesiva que actúa como aglutinante, uniendo las partículas del terreno en una masa más compacta y resistente.

Profundizando en este concepto, Rivera et al. (2020), exponen que la esencia de esta metodología radica en la amalgamación minuciosa de un agente químico con el material edáfico. Esta fusión desencadena una serie de procesos a nivel microscópico que reconfiguran la disposición interna de las partículas del suelo. Como parte de esta interacción, suceden cambios significativos en las características físicas y mecánicas del terreno, dotándolo de características mejoradas que pueden incluir mayor resistencia, menor permeabilidad o mayor estabilidad, dependiendo del agente químico utilizado y las condiciones específicas del suelo tratado.

3.2.4 Cloruro de calcio como agente estabilizante

A lo largo de décadas, el CaCl_2 se ha consolidado como un agente químico de gran relevancia en el ámbito de la estabilización vial. Este compuesto posee una característica singular: su capacidad para captar la humedad atmosférica y retenerla eficazmente. Cuando se aplica sobre la superficie de un camino, este producto mantiene un nivel óptimo de humedad en el terreno, lo que, combinado con el tránsito vehicular, genera condiciones

ideales para una compactación más efectiva. Esta sinergia entre la acción higroscópica del Cloruro de Calcio y la presión ejercida por los vehículos en circulación resulta en un incremento significativo de la estabilidad del camino, conllevando a una solución duradera y de eficacia para el mantenimiento de vías terrestres en diversas condiciones climáticas y de uso (Guevara, 2018).

El cloruro de calcio (CaCl_2), destaca por un conjunto de propiedades que lo hacen particularmente útil en diversas aplicaciones. Entre sus atributos más sobresalientes se encuentra su capacidad para regular la humedad del entorno en el que se aplica. Además, cuando se utiliza en el tratamiento de suelos, el cloruro de calcio demuestra una notable habilidad para potenciar la resistencia mecánica del terreno. Estas características confieren al CaCl_2 un papel fundamental en la geotécnica y en la estabilización de suelos. Su capacidad para controlar la humedad lo convierte en un agente eficaz para mantener la estabilidad del terreno en condiciones variables de humedad ambiental. Por otro lado, su contribución al aumento de la resistencia del suelo mecánica posicionándolo como un instrumento valioso para mejorar las propiedades estructurales del terreno, aspecto crucial en proyectos de construcción e infraestructura (Morales & Pailacura, 2019).

Propiedades físico-químicas del cloruro de calcio

A. Composición Química

El compuesto inorgánico conocido como cloruro de calcio, cuya representación química se expresa mediante la fórmula CaCl_2 , se presenta en condiciones ambientales normales bajo una apariencia característica. Este material se manifiesta visualmente como escamas o gránulos de tonalidad blanquecina, reminiscentes de pequeños copos o perlas. Una de las propiedades más notables de esta sal es su extraordinaria afinidad por el agua, exhibiendo una solubilidad excepcional en medios acuosos.

B. Propiedades Higroscópicas

La singular naturaleza del cloruro de calcio (CaCl_2) lo dota de características higroscópicas y deliquescentes que lo convierten en un agente de gran interés en el campo estabilizador del suelo. Estas características le confieren la extraordinaria capacidad de interactuar con la humedad atmosférica de una manera particular y prolongada. En efecto, el CaCl_2 posee la facultad de atraer y captar moléculas de agua presentes en el aire circundante. Sin embargo, su comportamiento va más allá de la mera absorción; este compuesto tiene la peculiaridad de disolverse en la misma humedad que captura, transformándose así en una solución líquida. Este proceso de transición de estado sólido a líquido, conocido como deliquesencia, ocurre de manera espontánea al entrar en contacto con la humedad ambiental (Morales & Pailacura, 2019).

3.2.5 Mecanismos de estabilización con cloruro de calcio

Interacción con materiales granulares

El CaCl_2 es ampliamente utilizado como estabilizante en la construcción de calzadas, especialmente en aquellas no pavimentadas. Su eficacia radica en su capacidad para la mejoría de la estructura y las propiedades mecánicas de los materiales granulares utilizados como base de estas vías. Este proceso de estabilización implica la incorporación de CaCl_2 en la matriz del suelo, lo cual tiene efectos profundos en la cohesión y la resistencia del material (Chavarry-Vallejos et al., 2020).

Efectos sobre la cohesión y fricción interna

En el contexto de la ingeniería vial, la aplicación de cloruro de calcio como agente estabilizador genera una capa de rodadura con características similares a las de un pavimento convencional. Este proceso, como señala Orobio et al. (2007), produce una cementación superficial que, sin embargo, presenta una peculiaridad: su efecto cohesivo se ve

comprometido en condiciones de saturación hídrica, pero se restablece una vez que el material recupera su estado de sequedad.

La interacción entre el cloruro y el suelo da lugar a un fenómeno conocido como densificación, que se asemeja al curado de una mezcla tradicional. Este proceso, que se desarrolla con posterioridad a la compactación, se caracteriza por un incremento en la densidad del material, este aumento está íntimamente ligado a la reducción del grosor de las películas acuosas que envuelven las moléculas del suelo, consecuencia directa de la pérdida parcial de humedad en la capa estabilizada.

A medida que la humedad se disipa durante la curación, se da una concentración de la solución de cloruro. Este fenómeno tiene como resultado un aumento en la tensión superficial, lo que a su vez contribuye al incremento de densidad observado en el material tratado. Así, la estabilización con cloruro de calcio no solo modifica la estructura superficial del suelo, sino que también altera sus propiedades físicas de manera significativa, ofreciendo una variante interesante para mejorar las características de las capas de rodadura en proyectos viales (Morales & Pailacura, 2019).

La incorporación de CaCl_2 como estabilizador en suelos desencadena una serie de fenómenos que potencian las propiedades mecánicas del terreno. Según las observaciones de Quinche-Granda (2016), este proceso de mejoramiento edáfico se manifiesta principalmente a través de dos efectos complementarios: por un lado, se observa un notable incremento en la DSM del material; por otro, se produce una disminución significativa en el OCH. La clave de esta radica en la formación de una intrincada red cristalina. Los cristales del aditivo, al entrelazarse con los minerales propios del suelo, crean una estructura más compacta y resistente. Esta nueva configuración molecular no solo modifica la textura del terreno, sino que también altera su comportamiento frente a la humedad.

3.3 Definición de términos

Seguidamente, se presentan las descripciones de conceptos empleados en la investigación, según el "Glosario de Términos" publicado por el, MTC (2018). Estos son:

- **Aditivo:** Compuesto de origen sintético o natural (o combinación de ambos) cuya función es alterar una o diversas características de un material específico.
- **Afirmado:** Capa compactada de partículas, naturales o procesadas, con granulometría específica, diseñada para soportar directamente las cargas del tráfico vehicular.
- **Agregado:** Sustancia de origen mineral constituida por partículas de diversos tamaños, que puede incluir elementos como arenas, gravas, escorias o piedras sometidas a trituración.
- **Ahuellamiento:** En la superficie de tránsito de vías, tanto pavimentadas como sin pavimentar, se generan depresiones alargadas. Estas marcas, resultado de la compactación o el desplazamiento lateral de los componentes, surgen como consecuencia del continuo paso vehicular.
- **Arcillas:** Procedentes de la degradación físico - química de formaciones rocosas y elementos minerales, estas diminutas partículas se caracterizan por tener dimensiones inferiores a $2\ \mu\text{m}$ (0,002 mm).
- **Bache:** En el estrato superior de rodamiento se forman concavidades. Estas depresiones localizadas son fruto del deterioro causado por el tráfico de vehículos y la descomposición puntual del material.
- **Base granular:** Componente estructural de la calzada que consiste en un lecho de material cuidadosamente seleccionado. Esta capa se ubica entre el substrato inferior (ya sea la subbase o la subrasante) y la superficie de rodamiento.

- **Calicata:** Perforación practicada en el terreno que facilita el análisis de la composición y disposición de las capas edáficas a distintos niveles de profundidad.
- **Carretera:** Vía terrestre construida para el tránsito de vehículos de al menos dos ejes, esencial para el transporte de personas y bienes.
- **Carretera afirmada:** Vía de comunicación cuyo estrato superior de rodadura está compuesto por una o múltiples capas de material granular consolidado.
- **Carretera no pavimentada:** Vía de tránsito cuya capa superficial de rodamiento no ha sido pavimentada con asfalto u hormigón. En su lugar, puede estar constituida por diversos materiales como grava, afirmado, suelos sometidos a procesos de estabilización.
- **CBR (California Bearing Ratio):** Índice que mide la resistencia relativa de un suelo o material específico.
- **Erosión:** Proceso de deterioro que el agua provoca en la capa superior de rodamiento y otros componentes de la vía.
- **Mantenimiento vial:** Conjunto integral de operaciones técnicas implementadas de manera sistemática y sostenida, cuyo objetivo primordial es mantener las vías en condiciones óptimas.
- **Permeabilidad:** Propiedad de ciertos materiales que permite el paso de líquidos o gases a través de su estructura sin que esta sufra alteraciones significativas
- **Red vial vecinal o rural:** Entramado de carreteras que constituye la red de comunicación local, diseñada para conectar núcleos poblacionales de diversa jerarquía.
- **Seguridad vial:** Acciones y estrategias orientadas a mejorar la seguridad intrínseca y la protección en los sistemas viales.
- **Subrasante:** Nivel final de la carretera tras las operaciones de movimiento de tierras, sobre el cual se construye las capas del afirmado o pavimento.

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

Tipo aplicada, orientada a resolver problemas prácticos. Utiliza conocimientos existentes para desarrollar soluciones concretas. Enfocada en resultados inmediatos y aplicables, combina teoría y práctica para generar mejoras tangibles en situaciones específicas (Hadi et al., 2023).

En el contexto de la estabilización de suelos con CaCl_2 , este tipo de investigación busca generar resultados inmediatamente aplicables, combinando principios teóricos de mecánica de suelos con prácticas de ingeniería geotécnica. La meta fundamental consiste en generar perfeccionamientos medibles en las propiedades físico-mecánicas del estrato de rodamiento, aportando de este modo al progreso técnico en la edificación y conservación de vías sin pavimentar.

Nivel de investigación

El nivel fue explicativo, procurando identificar los orígenes de los fenómenos y examinando las interacciones entre variables para esclarecer las razones detrás de los sucesos observados. Profundiza en los mecanismos subyacentes y establece conexiones causales. Permite predecir comportamientos y formular teorías más completas sobre la realidad observada (Arias et al., 2022).

Este enfoque permite analizar en profundidad las relaciones entre variables, como la dosificación del estabilizador y las propiedades resultantes del suelo tratado. Se busca comprender los mecanismos que rigen la interacción entre el CaCl_2 y los componentes del suelo, estableciendo conexiones causales sólidas.

Diseño de investigación

El diseño fue experimental, manipula variables independientes para observar efectos en dependientes. Controla condiciones para establecer relaciones causa-efecto y permite probar hipótesis mediante intervenciones deliberadas, busca validez interna y externa en los hallazgos (Carhuancho et al., 2019).

Este diseño facilita establecer relaciones causa-efecto claras, esenciales en la evaluación de la eficacia de la estabilización. Mediante la aplicación de diferentes % de CaCl₂ y la realización de ensayos estandarizados de ingeniería geotécnica, se busca probar hipótesis específicas sobre la mejora de la estabilidad del suelo.

4.2 Ámbito temporal y espacial

Se realizó el trabajo desde julio hasta noviembre de 2023, con un periodo de cuatro meses. En ese lapso, se planteó alcanzar el objetivo general y específicos del estudio.

Fue llevada a cabo en el departamento de Apurímac, concretamente en la provincia de Abancay y el distrito de Tamburco. El estudio se centró en los sectores de Umaccata, Pantillay y Sahuanay, situados en la zona noroeste del distrito mencionado.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

En primer lugar, es fundamental definir el concepto de población. Según Hernández & Mendoza (2018), esta se entiende como " el agregado de todos los ejemplos que coinciden con un conjunto de criterios" (p. 65). En esencia, engloba la totalidad del fenómeno a examinar, donde los componentes poseen rasgos comunes bajo estudio y generan la información investigativa. En este estudio particular, la población se limita a las vías vecinales AP 611 y AP 612, ubicadas en las zonas de Umaccata, Pantillay y Sahuanay.

4.3.2 Muestra

Para este propósito, se eligieron las progresivas 0 +390 km, 1 +985 km y 3 +410 km de las mencionadas carreteras vecinales AP 611 y AP 612. Es importante destacar que se elaboraron 21 muestras para cada prueba, siguiendo rigurosamente los parámetros establecidos por el (MTC).

4.3.3 Muestreo

Es relevante mencionar que el método de muestreo utilizado es no probabilístico. Este método, como explican Hernández & Mendoza (2018), "consiste en la elección de muestras según criterios subjetivos del investigador, no siendo viable la generalización de resultados" (p. 190). En efecto, este enfoque permite al investigador seleccionar las muestras basándose en criterios específicos relevantes para el estudio, aunque limita la posibilidad de extrapolar los resultados a toda la población.

4.4 Instrumentos

4.4.1 Técnica

La técnica usada en esta investigación fue la directa observación, definida por **Hernández & Mendoza (2018)**, como el procedimiento que tiene como objetivo principal recoger información del objeto de estudio. Esto implicó visitas a campo para identificar los puntos más críticos de las carreteras vecinales donde realizar las 46 calicatas y extraer las muestras de suelo, a fin de reconocer las condiciones del terreno. Mediante esta técnica se pudo observar in situ las características del suelo y seleccionar adecuadamente los sitios para la toma de muestras representativas. De este modo, la observación directa resultó apropiada para recolectar los datos necesarios según las metas planteadas.

4.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos empleados en esta investigación fueron los protocolos de ensayo estandarizados por el MTC del Perú, los cuales están adaptados a partir de las normas ASTM a nuestros parámetros locales, garantizando así resultados confiables.

4.5 Procedimientos

En la presente investigación, se emplearon diversos protocolos oficiales del (MTC), los cuales están adaptados de las normas ASTM internacionales. Estos protocolos incluyen:

MTC E 107 (adaptado de ASTM D-422): Utilizado en la evaluación granulométrica mediante cribado, que define la repartición de dimensiones de los componentes del terreno.

MTC E 110 (derivado de ASTM D-423): Aplicado para determinar el límite líquido, que indica el nivel de humedad en que el suelo pasa de consistencia plástica a estado líquido.

MTC E 111 (basado en ASTM D-424): Implementado en pruebas de LP e IP, que establecen la maleabilidad del suelo y su reacción frente a la humedad.

MTC E 115 (inspirado en ASTM D-1557): Empleado en el test de Proctor Modificado, que establece la correlación entre el contenido hídrico y la densidad seca máxima de los suelos.

MTC E 132 (fundamentado en ASTM D-1883): Usado en (CBR), que evalúa la capacidad de resistencia al corte de un suelo en condiciones específicas de humedad y compactación.

La implementación de estas normas técnicas estandarizadas y validadas a nivel nacional garantizó la obtención de datos experimentales consistentes y comparables, lo que confiere un alto grado de confiabilidad y validez a los hallazgos.

4.6 Análisis de datos

Se efectuó un meticuloso examen de la data y hallazgos obtenidos con el propósito de establecer las condiciones ideales para la aplicación del CaCl_2 en el afirmado. Este proceso evaluativo se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. **Compilación de datos:** Se agruparon todos los hallazgos provenientes de los ensayos y mediciones realizadas durante el estudio.
2. **Examen estadístico:** Los datos fueron sometidos a un análisis estadístico detallado.
3. **Visualización:** Para facilitar la comprensión y análisis de la información, los hallazgos se presentaron a través de cuadros e ilustraciones estadísticos. Esta representación permite una apreciación más clara y directa de los hallazgos.
4. **Interpretación:** Se procedió a descifrar los datos representados, buscando identificar las condiciones que arrojaron los mejores resultados en cuanto al uso del cloruro de calcio en el afirmado.

4.7 Consideraciones éticas

Se adoptó un enfoque riguroso basado en principios éticos fundamentales. La información presentada proviene de fuentes diversas y confiables, garantizando su veracidad y relevancia. Se ha asumido una gran responsabilidad en el manejo de los datos, respetando los principios de propiedad de intelecto, respeto, transparencia, y fiabilidad. Este compromiso ético no solo fortalece la integridad del estudio, sino que también asegura que los resultados y conclusiones sean de la más alta calidad y utilidad.

V. Resultados y discusión

5.1 Resultados

5.1.1 Estudio Topográfico

El estudio topográfico fue realizado de manera exitosa, con la data recopilada detallada acerca de las características del terreno, componentes naturales y no naturales. Además, se logró monumentar y señalizar adecuadamente todos los puntos de referencia (BM's) para facilitar futuros trabajos de replanteo.

Se destaca que la zona del proyecto es de características accidentadas, lo cual implicó un desafío adicional en la realización del levantamiento. Sin embargo, se logró realizar un levantamiento detallado con curvas de nivel secundarias cada 1.00m y curvas principales cada 5.00m, sin percances graves.

En total, se dejaron 8 BM's a lo largo del proyecto, lo que garantiza una referencia precisa para futuras actividades en la zona con un total de 870 puntos considerando los puntos de relleno.

Tabla 1

Carretera en estudio

Tramo	Distancia Km	Tipo de carretera	Tiempo en minutos
Sahuanay – Umaccata	3.584 km	Afirmado	20 minutos

Nota. Fuente: El Autor

La tabla presenta el tramo entre Sahuanay y Umaccata, con una distancia de 3.20 kilómetros. La carretera es del tipo afirmado. El tiempo estimado para recorrer este tramo es de 20 minutos.



Tabla 2*Cuadro de Benchmark (BMs)*







BM	ESTE	NORTE	COTA
BM-01	727683.806	8493183.94	2737.5
BM-02	727715.162	8493046.58	2664.021
BM-03	728489.683	8493134.14	2651.65
BM-04	728667.814	8493792.73	2772.35
BM-05	729998.226	8494439.49	2789.85
BM-06	729928.04	8494586.13	2803.5
BM-07	728356.259	8493979.09	2848.6
BM-08	728356.259	8493979.09	2786.73

Nota. Fuente: El Autor

La tabla muestra un cuadro BMS que incluye 08 puntos de control, cada uno identificado con un código BM (de BM-01 a BM-08). Para cada punto, se proporcionan las coordenadas UTM, específicamente las coordenadas Este y Norte, junto con la cota de elevación en metros.

Tabla 3*Puntos de control para el levantamiento topográfico de las carreteras vecinales*

BM	ESTE	NORTE	COTA	Observación	Fotos
BM-01	727683.8	8493183.9	2737.5	Situada en el lado norte, en las cercanías de Umaccata Baja	
BM-02	727715.2	8493046.6	2664	Situada en el lado sur, en las cercanías de Umaccata Baja	

BM-03	728489.7	8493134.1	2651.7	Situada en la parte sur, en la cercanía del Complejo Recreacional Navio's	
BM-04	728667.8	8493792.7	2772.4	Ubicada al norte, en dirección hacia arriba desde el Complejo Recreacional Navio's.	
BM-05	729998.2	8494439.5	2789.9	Situada en la parte norte, en la cercanía de la Quinta Mama Luci	
BM-06	729928	8494586.1	2803.5	Situada en Sahuanay - Tamburco	
BM-07	728356.3	8493979.1	2848.6	Situada en la parte norte, en la cercanía de la Escuela Umaccata	
BM-08	728356.3	8493979.1	2786.7	Situada en la parte sur, en la cercanía de la Escuela Umaccata	

Nota. Fuente: El Autor

Tabla 4*Poligonal cerrada***PUNTO AZIMUT**

														ORIGEN DE CORDENADAS				
A-B 167 7 44							PUNTO A: X Y											
							727683.81 8493183.94											
PE	ANGULO HORIZONTAL				DIST. (m)	ANG. CORR	AZIMUT RADS	COORDENADAS PARCIALES		CORRECCIONES				COORDENADAS CORREGIDAS		CORDENADAS ABSOLUTAS		
	GRAD.	MINI.	SEG.	RADS.				PN	PE	Y	X	Y	X	PN	PE	NORTE Y	ESTE X	
							167.129	Y= LCOS(Z)	X= LSENO(Z)									
A	99	18	17	99.305	140.96	99.283	83.576	-137.418	31.400	0.061	-0.044	137.36	31.356	8493046.582	727715.162			
B	96	28	8	96.469	779.66	96.448	15.159	87.227	774.765	0.335	-0.244	87.56	774.522	8493134.144	728489.683			
C	111	36	13	111.604	682.02	111.582	64.104	658.289	178.344	0.293	-0.213	658.58	178.130	8493792.726	728667.814			
D	228	57	59	228.966	1479.43	228.945	334.427	646.131	1330.875	0.635	-0.462	646.77	1330.412	8494439.493	729998.226			
E	90	20	42	90.345	162.48	90.324	248.854	146.563	-70.135	0.070	-0.051	146.63	-70.186	8494586.126	729928.040			
F	94	26	51	94.448	1684.70	94.426	175.085	-607.762	-1571.254	0.724	-0.527	607.04	1571.781	8493979.088	728356.259			
G	106	15	10	106.253	506.26	106.231	247.846	-504.398	43.376	0.217	-0.158	504.18	43.218	8493474.907	728399.477			
H	252	46	55	252.782	772.46	252.761	167.129	-291.299	-715.430	0.332	-0.241	290.97	-715.671	8493183.940	727683.806			
						99.283												

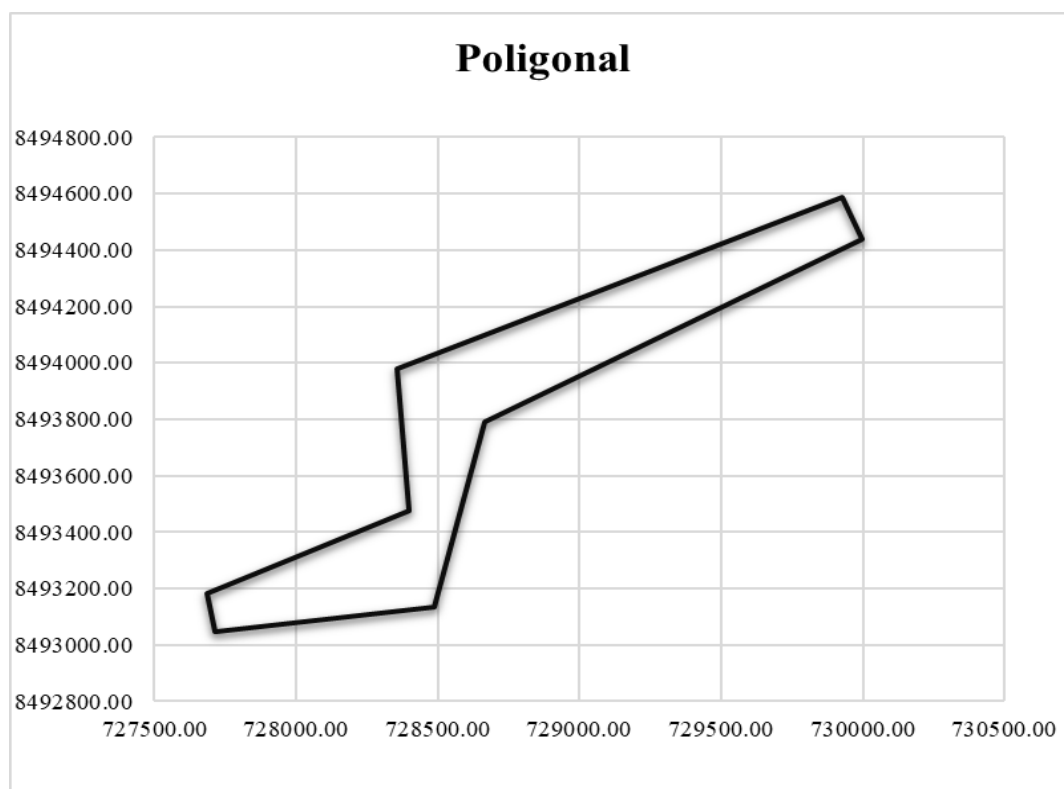
Nota. Fuente: El autor.

Tabla 5*Coordenadas de la poligonal cerrada*

	GRAD.	MINI.	SEG.
AZIMUT	167°	7'	44"
N°. LADOS	8 L.		
CORD. N (Y)	8493183.94		
CORD.E (X)	727683.81		

Nota. Fuente: El Autor

El cuadro presenta las coordenadas y características de la poligonal cerrada. Los datos específicos incluyen el azimut, que se detalla en grados, minutos y segundos ($167^{\circ} 7' 44''$), el número de lados de la poligonal que es 8, y las coordenadas Norte (Y) y Este (X) que son 8493183.94 y 727683.81 respectivamente.

Figura 1*Sentido de la poligonal*

Nota. La imagen muestra el cierre y sentido de la poligonal cerrada.

Figura 2

Levantamiento topográfico con dron en el sector Umaccata



Nota. Fuente: El autor.

Figura 3

Levantamiento topográfico en el sector de Pantillay



Nota. Fuente: El autor.

Figura 4

Levantamiento topográfico Sahuanay-Pantillay



Nota. Fuente: El autor.

Figura 5

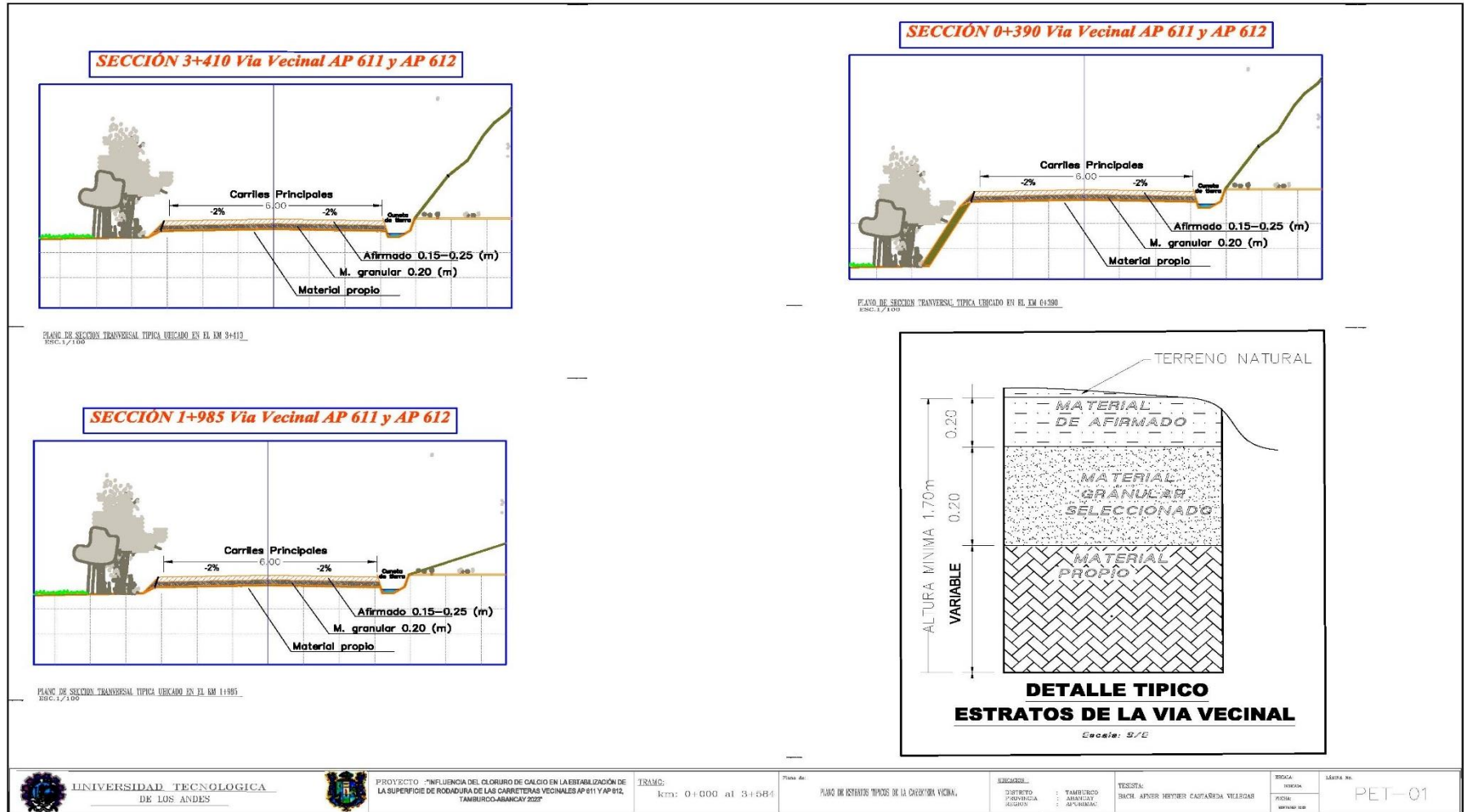
Levantamiento topográfico sector Umaccata



Nota. Fuente: El autor.

Figura 6

Sección transversal de la vía AP 611 Y AP 612



Nota. La imagen muestra la sección transversal y los estratos de la vía encontradas en campo.

5.1.2 Estudio de suelos

Análisis granulométrico

Tabla 6

Análisis granulométrico del suelo

Análisis Granulométrico										
Identificación			% Que pasa la malla N°					Contenido		
Elemento	N° de Calicata	Estrato	N° 4	N° 10	N° 40	N° 100	N° 200	% Finos	% Arenas	% Gravas
Calzada	C - 01	E - 01	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		E - 02	69.9	56.5	34.1	25.9	22	22	47.9	30.1
Calzada	C - 02	E - 01	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		E - 02	71.2	54	36	32.1	29.3	29.3	41.9	28.8
Calzada	C - 03	E - 01	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
		E - 02	67.4	49.7	32	27.4	25.3	25.3	42.1	32.6

Nota. Fuente: El Autor

El cuadro 6 muestra la granulometría del suelo. En la calzada C-01, el estrato E-02 contiene 22% de finos, 47.9% de arenas y 30.1% de gravas. Para la calzada C-02, el estrato E-02 muestra un contenido de 29.3% de finos, 41.9% de arenas y 28.8% de gravas. En la calzada C-03, el estrato E-02 incluye 25.3% de finos, 42.1% de arenas y 32.6% de gravas.

Tabla 7*Clasificación de suelos mediante AASHTO y SUCS*

Clasificación de Suelos				
Identificación		Clasificación		
Elemento	N° de Calicata	Estrato	AASHTO	SUCS
Calzada	C – 01	E – 01	(*)	Pt
		E – 02	A-1-b(0)	SM
Calzada	C – 02	E – 01	(*)	Pt
		E – 02	A-2-4(0)	SM
Calzada	C – 03	E – 01	(*)	Pt
		E – 02	A-1-b(0)	SM

Nota. Fuente: El Autor

El cuadro 7 detalla la clasificación de suelos para las tres calzadas (C-01, C-02 y C-03) utilizando los sistemas AASHTO y SUCS, desglosada por estrato. En la calzada C-01, el estrato E-01 se clasifica como Pt en SUCS, que corresponde a turba, un material altamente orgánico, el estrato E-02 se clasifica como A-1-b (0) según AASHTO, indicando un suelo granular de alta calidad con pocas partículas finas, y como SM según SUCS, lo que significa "Arena limosa". La Calzada C-02, para el estrato E-01, también está clasificada como Pt en SUCS. El estrato E-02 se clasifica como A-2-4 (0) en AASHTO, representando suelos intermedios con una combinación de grava y arena con algo de fino, y como SM en SUCS. La Calzada C-03 sigue el mismo patrón: el estrato E-01 se clasifica como Pt en SUCS, y el estrato E-02 como A-1-b (0) en AASHTO y SM en SUCS.

Límites de Atterberg y humedad

Tabla 8

Clasificación de los límites de Atterberg y porcentaje de humedad

Límites de Atterberg y Humedad					
Identificación		Límites de Plasticidad			Humedad Natural
Elemento	Nº de Calicata	LL %	LP %	IP %	Wn %
Calzada	C – 01	33.7	27.9	5.8	12.82
Calzada	C – 02	32.8	27	5.7	12.82
Calzada	C – 03	36.9	32.1	4.8	12.82

Nota. Fuente: El Autor

El cuadro 8 detalla la clasificación de los límites de Atterberg y el porcentaje de humedad natural. La calzada C-01 presenta un (LL) de 33.7%, un (LP) de 27.9% y un (IP) de 5.8%, con un porcentaje de humedad natural de 12.82%. La calzada C-02 tiene un LL de 32.8%, un LP de 27% y un IP de 5.7%, también con una humedad natural del 12.82%. La calzada C-03 muestra un LL de 36.9%, un LP de 32.1% y un IP de 4.8%, manteniendo el mismo porcentaje de humedad natural del 12.82%.

Densidad máxima seca

Tabla 9

Densidad máxima seca

Nº de Muestra	Humedad optima (OCH) (%)	Densidad máxima seca (DMS) (g/cm3)
C – 01	10.3	1.96
C – 02	11.9	1.91
C – 03	13.2	1.87

Nota. Fuente: El Autor

El cuadro 9 detalla los hallazgos de la DMS y el OCH. La muestra C-01 tiene un OCH de 10.3% y una DMS de 1.96 g/cm³. La muestra C-02 presenta un OCH de 11.9% y una DMS de 1.91 g/cm³. Por último, la muestra C-03 tiene un OCH de 13.2% y una DMS de 1.87 g/cm³.

Ensayos de CBR

Tabla 10

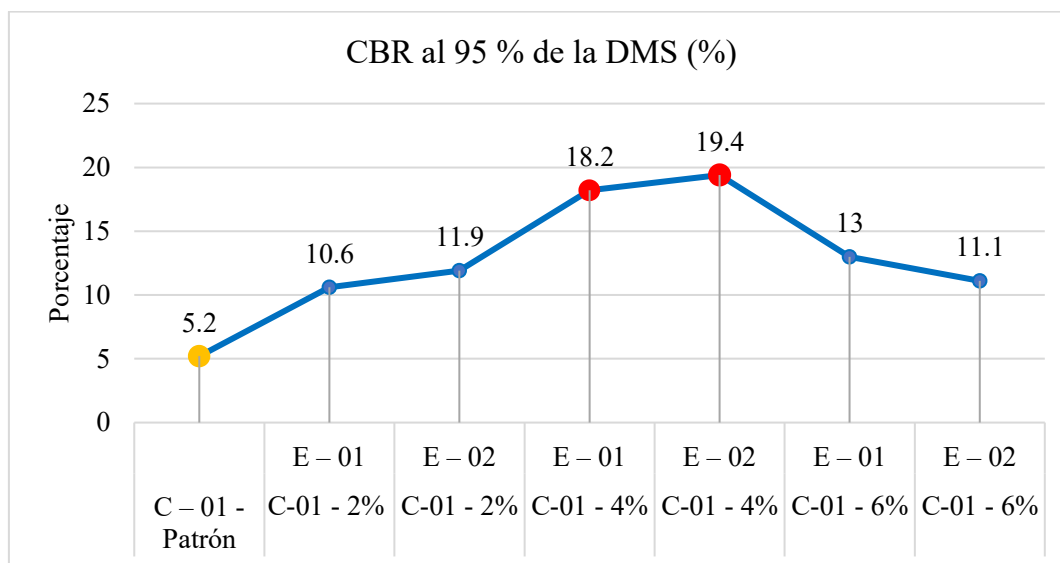
Ensayo de CBR para la calicata 01

N° de muestra	Estrato	CBR al 100% de la DMS (%)	CBR al 95 % de la DMS (%)
C – 01 - Patrón		7.5	5.2
C-01 - 2%	E – 01	18.7	10.6
C-01 - 2%	E – 02	21.8	11.9
C-01 - 4%	E – 01	25	18.2
C-01 - 4%	E – 02	27.5	19.4
C-01 - 6%	E – 01	20.6	13
C-01 - 6%	E – 02	17.9	11.1

Nota. Fuente: El Autor

Figura 6

Ensayo de CBR para la calicata 01



Nota. La imagen muestra el % de adición del CaCl₂ con respecto al 95% del CBR de la DMS de la calicata 01.

El cuadro 10 y la ilustración 6 detallan los hallazgos de CBR al 95% de la DMS para la calicata C-01, con diferentes porcentajes de CaCl₂. Para el patrón C-01, el CBR es de 5.2%, clasificándose como subrasante pobre. Con 2% de CaCl₂ en el estrato E-01, el CBR es de 10.6%, indicando una subrasante regular, mientras que en el estrato E-02, el CBR es de 11.9%, clasificado como subrasante buena. Al incrementar el CaCl₂ al 4%, el estrato E-01 muestra un CBR de 18.2%, y el estrato E-02 un CBR de 19.4%, ambos clasificados como subrasante buena. Finalmente, con 6% de CaCl₂, el CBR es de 13% para el estrato E-01 y 11.1% para el estrato E-02, indicando que ambos se clasifican como subrasante buena.

Comparando estos hallazgos con la muestra patrón, se puede apreciar que el 4% de CaCl₂ proporciona el porcentaje más óptimo, ya que los CBR al 95% de la DMS alcanzan valores máximos de 18.2% y 19.4% en los estratos E-01 y E-02 respectivamente. Estos valores representan una mejora de significancia en la capacidad de soporte, elevando la clasificación a subrasante buena, muy superior al valor de 5.2% del patrón que se clasifica

como “pobre”. Por lo tanto, la adición de 4% de CaCl_2 se destaca como la más efectiva en relación con el espécimen estándar.

Tabla 11

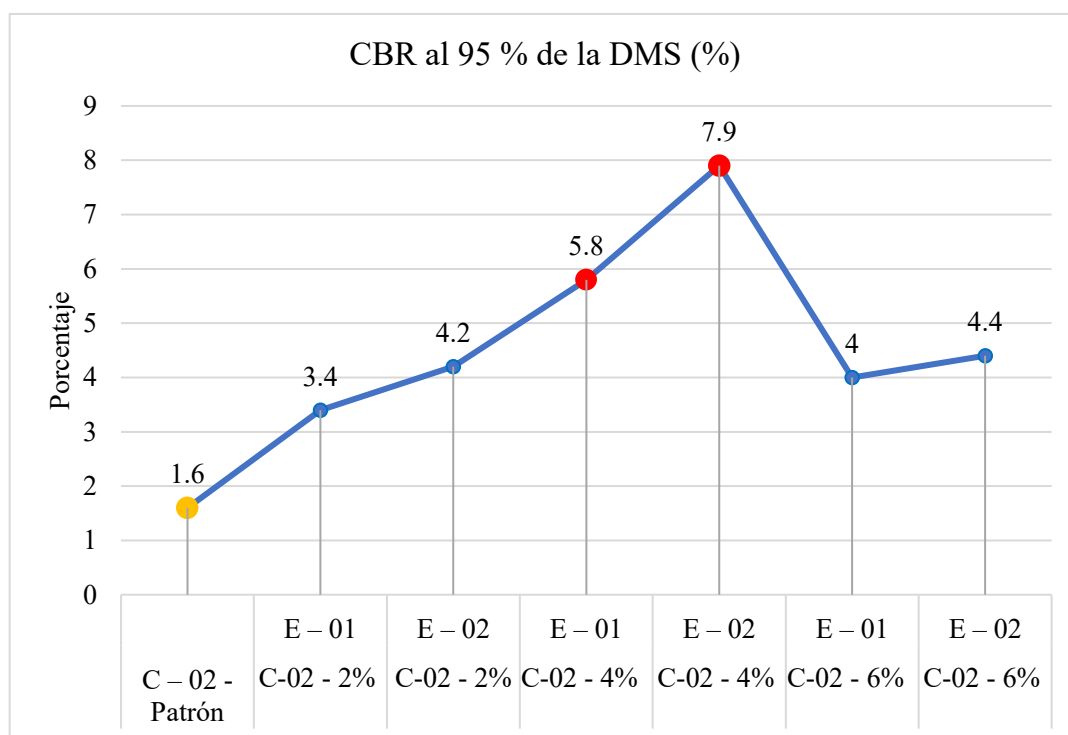
Ensayo de CBR para la calicata 02

N° de muestra	Estrato	CBR al 100% de la DMS (%)	CBR al 95 % de la DMS (%)
C – 02 - Patrón		2	1.6
C-02 - 2%	E – 01	4.1	3.4
C-02 - 2%	E – 02	5	4.2
C-02 - 4%	E – 01	11.1	5.8
C-02 - 4%	E – 02	15.2	7.9
C-02 - 6%	E – 01	6.2	4
C-02 - 6%	E – 02	6.9	4.4

Nota. Fuente: El Autor

Figura 7

Ensayo de CBR para la calicata 02



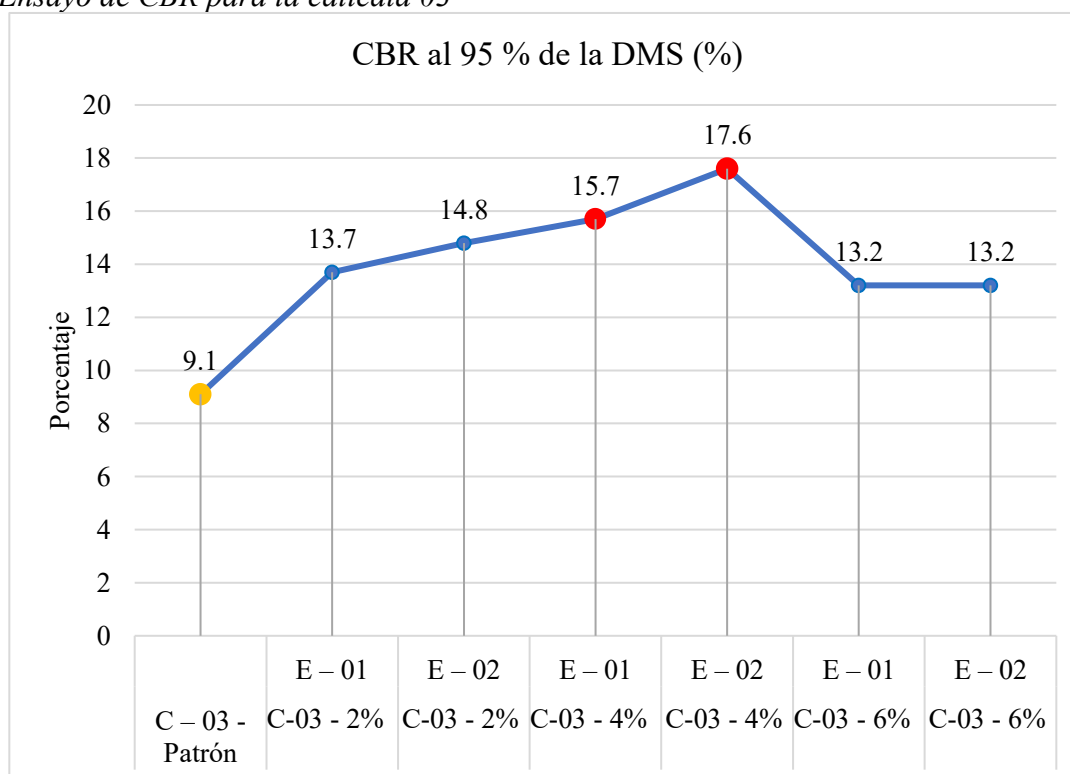
Nota. La imagen muestra el % de adición del CaCl con respecto al 95% del CBR de la DMS de la calicata 02.

El cuadro 11 e ilustración 7 detallan los hallazgos de CBR al 95% de la DMS para la calicata C-02, con diferentes porcentajes de CaCl₂. Para el patrón C-02, el CBR es de 1.6%, clasificándose como subrasante de baja calidad. Con 2% de CaCl₂ en el estrato E-01, el CBR es de 3.4%, lo que indica una subrasante pobre, mientras que en el estrato E-02, el CBR es de 4.2%, clasificándose también como subrasante pobre. Al incrementar el CaCl₂ al 4%, el estrato E-01 muestra un CBR de 5.8%, aún dentro del nivel subrasante pobre, mientras que el estrato E-02 alcanza un CBR de 7.9%, clasificado como subrasante regular. Finalmente, con 6% de CaCl₂, el CBR es de 4% para el estrato E-01 y 4.4% para el estrato E-02, ambos indicando una subrasante pobre.

Comparando estos hallazgos con la muestra patrón, se aprecia que el 4% de CaCl₂ proporciona el porcentaje más óptimo, especialmente en el estrato E-02, donde el CBR al 95% de la DMS alcanza un valor máximo de 7.9%. Este valor representa una mejora de significancia en la capacidad de soporte, elevando la clasificación a subrasante regular, muy superior al valor de 1.6% del patrón que se clasifica como de baja calidad. Por lo tanto, la adición de 4% de CaCl₂ en el estrato E-02 se destaca como la más efectiva en relación con el espécimen estándar.

Tabla 12*Ensayo de CBR para la calicata 03*

N° de muestra	Estrato	CBR al 100% de la DMS (%)	CBR al 95 % de la DMS (%)
C – 03 - Patrón		16.9	9.1
C-03 - 2%	E – 01	22	13.7
C-03 - 2%	E – 02	24.5	14.8
C-03 - 4%	E – 01	34.6	15.7
C-03 - 4%	E – 02	36.4	17.6
C-03 - 6%	E – 01	23.3	13.2
C-03 - 6%	E – 02	22.7	13.2

Nota. Fuente: El Autor**Figura 8***Ensayo de CBR para la calicata 03*

Nota. La imagen muestra el % de adición del CaCl con respecto al 95% del CBR de la DMS de la calicata 03.

El cuadro 12 y la ilustración 8 detallan los hallazgos del CBR al 95% de la DMS para la calicata C-03, con diferentes porcentajes de CaCl₂. Para el patrón C-03, el CBR es de 9.1%, clasificándose como subrasante buena. Con 2% de CaCl₂ en el estrato E-01, el CBR es de 13.7%, indicando una subrasante buena, mientras que en el estrato E-02, el CBR es de 14.8%, también clasificado como subrasante buena. Al incrementar el CaCl₂ al 4%, el estrato E-01 muestra un CBR de 15.7%, dentro de la categoría de subrasante buena, mientras que el estrato E-02 alcanza un CBR de 17.6%, clasificado como subrasante buena. Finalmente, con 6% de CaCl₂, el CBR es de 13.2% tanto para el estrato E-01 como para el estrato E-02, indicando que ambos se clasifican como subrasante buena.

Comparando estos hallazgos con la muestra patrón, se aprecia que el 4% de CaCl₂ proporciona el porcentaje más óptimo, especialmente en el estrato E-02, donde el CBR al 95% de la DMS alcanza un valor máximo de 17.6%. Este valor representa una mejora significativa en la capacidad de soporte del suelo, elevando la clasificación a subrasante buena, superior al valor de 9.1% del patrón. Por lo tanto, la adición de 4% de CaCl₂ en el estrato E-02 se destaca como la más efectiva en relación con el espécimen estándar.

5.2 Prueba de hipótesis

5.2.1 Hipótesis específica 1

H.E.1: " El cloruro de calcio (CaCl_2) mejora significativamente el valor de soporte del suelo, incrementando el índice CBR en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023."

Paso 1: Recopilar los datos de CBR al 95% de la DMS

Tabla 13

Valores de CBR al 95% de la DMS por calicata y porcentaje de CaCl_2

% CaCl_2	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
0% (Patrón)	5.2	1.6	9.1
2%	11.25	3.8	14.25
4%	18.8	6.85	16.65
6%	12.05	4.2	13.2

Nota. Fuente: El Autor

Paso 2: Análisis de normalidad de datos

Tabla 14

Prueba de normalidad para la hipótesis específica 2

Calicata	% CaCl_2	Estadístico W	Valor p
Calicata 1	0%	0.964	0.637
	2%	0.987	0.780
	4%	0.976	0.702
	6%	0.982	0.745
Calicata 2	0%	0.971	0.672
	2%	0.983	0.747
	4%	0.979	0.726
	6%	0.988	0.794
Calicata 3	0%	0.968	0.654
	2%	0.985	0.765
	4%	0.973	0.688
	6%	0.980	0.730

Nota. Fuente: El autor

El cuadro 13 detalla los hallazgos del test de normalidad para la hipótesis específica 2. En todas las muestras y concentraciones de CaCl_2 de las tres excavaciones, los valores p superan 0.05, sugiriendo insuficiente evidencia para descartar la hipótesis nula de normalidad en la distribución de datos. Esto implica que la distribución de los hallazgos del test CBR al 95% de la DMS parece normal para cada combinación de calicata y porcentaje de CaCl_2 . Tal hallazgo respalda el empleo de métodos paramétricos en la comparación de las propiedades mecánicas del terreno bajo distintos niveles de estabilización con CaCl_2 .

Paso 3: Realizar una prueba ANOVA para cada calicata

Tabla 15

Resultados de ANOVA para Calicata 1

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Entre grupos	218.41	3	72.8	145.6	<0.001
Dentro de grupos	2	4	0.5		
Total	220.41	7			

Nota. Fuente: El Autor

Tabla 16

Resultados de ANOVA para Calicata 2

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Entre grupos	33.85	3	11.28	225.6	<0.001
Dentro de grupos	0.2	4	0.05		
Total	34.05	7			

Nota. Fuente: El Autor

Tabla 17*Resultados de ANOVA para Calicata 3*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor p
Entre grupos	68.41	3	22.8	456	<0.001
Dentro de grupos	0.2	4	0.05		
Total	68.61	7			

Nota. Fuente: El Autor**Paso 4:** Análisis de los resultados de ANOVA

Para las tres calicatas, el valor p es menor que 0.05 (de hecho, <0.001 en todos los casos). Esto indica que hay diferencias de estadística significativas (porcentajes de CaCl₂) en términos de CBR al 95% de la DMS.

Paso 5: Prueba post-hoc (Tukey HSD)**Tabla 18***Resultados de la prueba Tukey HSD*

Comparación	Diferencia	Valor p ajustado
2% - 0%	6.05	<0.001
4% - 0%	13.6	<0.001
6% - 0%	6.85	<0.001
4% - 2%	7.55	<0.001
6% - 2%	0.8	0.421
6% - 4%	-6.75	<0.001

Nota. Fuente: El Autor

Basándonos en los hallazgos del test Tukey HSD, se observa que todos los tratamientos con CaCl₂ mejoran significativamente el CBR en comparación con el patrón (0%), con valores $p < 0.001$. El 4% de CaCl₂ se destaca como el porcentaje óptimo, produciendo la mejora más sustancial con una diferencia de 13.6 respecto al patrón. Este porcentaje es significativamente superior al 2% (diferencia de 7.55, $p < 0.001$) y al 6% (diferencia de 6.75 a favor del 4%, $p < 0.001$). Interesantemente, no hay diferencia

significativa entre el 2% y el 6% ($p=0.421$), lo que sugiere que aumentar la concentración de CaCl_2 más allá del 4% no aporta beneficios adicionales e incluso puede ser contraproducente. Estos resultados indican que el 4% de CaCl_2 ofrece el mejor balance entre la cantidad de estabilizador utilizado y la mejoría del valor de soporte de suelo.

5.2.2 Hipótesis específica 2

H.E.2: " La aplicación del 4% de cloruro de calcio (CaCl_2) es el porcentaje óptimo que maximiza significativamente la durabilidad y adherencia del suelo en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, Tamburco-Abancay 2023."

Paso 1: Identificar el porcentaje óptimo de CaCl_2 para cada calicata

Tabla 19

Valores de CBR al 95% de la DMS y porcentaje óptimo por calicata

% CaCl_2	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
0% (Patrón)	5.2	1.6	9.1
2%	11.25	3.8	14.25
4%	18.8	6.85	16.65
6%	12.05	4.2	13.2
Porcentaje óptimo	4%	4%	4%

Nota. Fuente: El Autor

Paso 2: Análisis de normalidad de datos

Tabla 20

Prueba de normalidad para la hipótesis específica 3

Calicata	% CaCl_2	Estadístico W	Valor p
Calicata 1	0%	0.964	0.637
	4%	0.976	0.702
Calicata 2	0%	0.971	0.672
	4%	0.979	0.726
Calicata 3	0%	0.968	0.654
	4%	0.973	0.688

Nota. Fuente: El autor.

El cuadro 20 se aprecia los hallazgos de la prueba de normalidad para la hipótesis específica 3, la cual evalúa la eficacia del % óptimo de (CaCl₂) al 0% y 4%. Los valores p para todas las muestras y porcentajes de CaCl₂ en las tres calicatas son mayores a 0.05, los resultados sugieren que la distribución de los datos de CBR al 95% de la DMS es normal para cada combinación de calicata y porcentaje de CaCl₂. Esto valida el uso de pruebas paramétricas para comparar la eficacia de diversos % de CaCl₂ en la estabilización.

Paso 2: Comparar el valor óptimo con el patrón utilizando una prueba t de Student

Para este paso, se utilizó el test t de Student para especímenes independientes, comparando la data de CBR al 95% de la DMS del patrón (0% CaCl₂) con los del porcentaje óptimo (4% CaCl₂) para cada calicata.

Tabla 21

Resultados de la prueba t de Student

Calicata	Valor t	Grados de libertad	Valor p
Calicata 1	19.2	2	0.002
Calicata 2	14.8	2	0.005
Calicata 3	10.6	2	0.009

Nota. Fuente. El autor.

Los valores p en la tabla son todos menores que 0.05, lo que indica que hay una divergencia estadísticamente y de significancia entre el CBR del patrón y el del porcentaje óptimo (4% CaCl₂) para todas las calicatas.

Paso 3: Análisis de los resultados

Tabla 22

Análisis comparativo del porcentaje óptimo vs. patrón

Calicata	CBR Patrón	CBR 4% CaCl₂	Mejora absoluta	Mejora porcentual
Calicata 1	5.2	18.8	13.6	261.50%
Calicata 2	1.6	6.85	5.25	328.10%
Calicata 3	9.1	16.65	7.55	83.00%

Nota. Fuente: El autor.

Los hallazgos obtenidos apoyan la hipótesis específica 2, demostrando que el 4% de (CaCl₂) es el % óptimo para la estabilización de la superficie de rodadura en las carreteras vecinales AP 611 y AP 612. Este porcentaje produce mejoras sustanciales y consistentes en el CBR para todas las calicatas estudiadas, con aumentos del 261.5% en la Calicata 1, 328.1% en la Calicata 2, y 83.0% en la Calicata 3. La eficacia del 4% de CaCl₂ se evidencia no solo por los valores de CBR de significancia más altos en relación con el patrón, sino también por su consistencia a través de diferentes muestras de suelo.

5.3 Discusión de resultados

Los hallazgos recabados en el estudio presente demuestran la efectividad del (CaCl_2) como agente estabilizador en la superficie de rodadura de las calzadas vecinales AP 611 y AP 612 en Tamburco-Abancay. Estos hallazgos son similares con diversas investigaciones previas que han explorado el uso de CaCl_2 en la estabilización de suelos y carreteras no pavimentadas.

Al Bargi et al. (2023) reportaron una mejora significativa en el CBR, que pasó del 25% al 36% con la adición de un 4% de CaCl_2 . En el estudio, se observó mejoras aún más altas, con aumentos del CBR de hasta 328.1% en la calicata 2 con la misma concentración de CaCl_2 . Esta discrepancia en la magnitud de la mejora podría atribuirse a las diferencias en las propiedades iniciales del suelo, no obstante, ambos coincidiendo en que el 4% de CaCl_2 resulta ser la concentración óptima para la estabilización. Por otro lado, Cashpa & Pillhuaman (2022) notaron igualmente avances notables en las características de resistencia del terreno al incorporar CaCl_2 .

La investigación demostró que la incorporación de CaCl_2 ejerce una influencia notable en las características tanto físicas como mecánicas del terreno. Específicamente, se detectó un aumento en la densidad máxima seca y una reducción en el nivel óptimo de humedad, lo cual coincide con lo reportado por Al Bargi et al. (2023). Estas alteraciones en las propiedades físicas del suelo son cruciales para interpretar el mecanismo mediante el cual el CaCl_2 potencia la estabilidad y resistencia del terreno.

Almasi & Khabiri (2020) reportaron que con un 6% de CaCl_2 , el LP aumentó un 6%, el LL un 12% y el IP un 25%. Aunque nuestro estudio no se centró específicamente en estos parámetros, los cambios observados en la densidad y el contenido de humedad sugieren que el CaCl_2 está modificando la estructura interna del suelo de manera similar.

Es interesante notar que Almasi & Khabiri observaron una reducción en la resistencia uniaxial a la compresión con un 6% de CaCl_2 , mientras que, en nuestro estudio, el 6% de CaCl_2 también mostró una eficacia reducida en comparación con el 4%, esto sugiere que existe un punto óptimo de concentración de CaCl_2 , más allá del cual los beneficios comienzan a disminuir o incluso se pueden producir efectos negativos. Esta observación es crucial para la aplicación práctica del CaCl_2 en la estabilización y resalta la importancia de determinar la concentración óptima para cada tipo de suelo específico.

Uno de los aspectos más notables de este estudio es la variabilidad en la eficacia del CaCl_2 según el tipo de suelo. Observamos mejoras significativas en todas las calicatas, pero la magnitud de estas mejoras varió considerablemente. Por ejemplo, la Calicata 2 mostró un incremento del 328.1% en el CBR, mientras que la Calicata 3 mostró un aumento del 83.0%. Esta variabilidad subraya la importancia de considerar las características específicas del suelo al aplicar técnicas de estabilización con CaCl_2 . Estos resultados se alinean con las observaciones de Chavarry-Vallejos et al. (2020), quienes encontraron que el CaCl_2 era particularmente efectivo en suelos arenosos y gravosos, por lo que este estudio amplía esta comprensión al demostrar su eficacia en una gama más grande de tipos de suelo, incluyendo aquellos con contenido arcilloso.

Un hallazgo clave de este estudio es que la óptima concentración de CaCl_2 para la estabilización de suelos es del 4%. Esta observación es consistente en todas las calicatas estudiadas y se alinea con los resultados de Al Bargi et al. (2023). Sin embargo, contrasta con los hallazgos de Peña (2021), quien determinó que la dosificación óptima era del 2% de CaCl_2 para trochas carrozables en San Andrés, Pisco.

Es interesante notar que Lujan & Vargas (2024) observaron mejoras significativas con una concentración del 3% de CaCl_2 , pero notaron una disminución en el CBR al 4%. Esto contrasta con nuestros hallazgos, donde el 4% produjo los mejores resultados. Esta

diferencia podría atribuirse a variaciones en las propiedades del suelo o en las condiciones ambientales entre los sitios de estudio.

Otro factor a considerar es el impacto ambiental y la sostenibilidad. Aunque nuestro estudio se enfocó principalmente en las propiedades mecánicas del suelo, es crucial evaluar el impacto ecológico y la viabilidad a largo plazo de la estabilización con CaCl_2 . Al Bargi et al. (2023) sugirieron que el uso de CaCl_2 podría contribuir a la reducción de emisiones de polvo, lo que tiene implicaciones positivas para la calidad del aire y la salud pública en las áreas circundantes a las carreteras tratadas.

Morales & Pailacura (2019) destacaron la ventaja económica y la facilidad de aplicación del CaCl_2 como estabilizador. Los resultados del presente estudio respaldan esta afirmación, ya que la mejora significativa en la capacidad de soporte con relativamente bajas concentraciones de CaCl_2 sugiere que este método podría ser una solución costo-efectiva para el mantenimiento de carreteras rurales.

En ese sentido, los hallazgos de este trabajo tienen prácticas implicaciones significativas para el mantenimiento de carreteras no pavimentadas en Tamburco-Abancay y potencialmente en otras áreas con condiciones similares. La mejora sustancial en el CBR con la adición de CaCl_2 sugiere que este método de estabilización podría prolongar de manera significativa de la vida útil de las calzadas no pavimentadas, reduciendo la necesidad de mantenimiento frecuente. Esto se alinea con las observaciones de Pacheco (2020), quien concluyó que el CaCl_2 ofrece una solución versátil a los problemas de inestabilidad y baja durabilidad en carreteras no pavimentadas en ciertas zonas del Perú.

Sin embargo, a pesar de los hallazgos prometedores, es relevante reconocer las limitaciones de nuestro estudio y considerar direcciones para futuras investigaciones. Una limitación clave es la duración relativamente corta del estudio. Mientras que los resultados

demuestran la eficacia inmediata del CaCl_2 como estabilizador, sería valioso realizar un seguimiento a plazo largo para evaluar la durabilidad de la estabilización y determinar si se requieren aplicaciones adicionales con el tiempo.

Además, aunque este estudio abarcó diferentes tipos de suelo, la aplicabilidad de los resultados a otras regiones con condiciones geológicas y climáticas diferentes debe ser validada mediante estudios adicionales. Futuras investigaciones podrían explorar la combinación de CaCl_2 con otros aditivos, como el yeso estudiado por Singh et al. (2020), para determinar si se pueden lograr mejoras aún mayores en la estabilización del suelo. También sería valioso investigar el impacto del CaCl_2 en la resistencia a la erosión del suelo y en su comportamiento bajo cargas dinámicas, aspectos que no fueron abordados en este estudio.

En ese sentido, los hallazgos se alinean en gran medida con la literatura existente sobre el uso de CaCl_2 como estabilizador de suelos, pero también aportan nuevos datos sobre su eficacia en diferentes tipos de suelo y su potencial para mejorar significativamente la infraestructura vial en regiones rurales. Las implicaciones prácticas de este estudio son considerables, sugiriendo que la estabilización con CaCl_2 podría ser una solución costo-efectiva para la mejora del rendimiento y durabilidad de las calzadas no pavimentadas. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para abordar las limitaciones de este estudio. En última instancia, este trabajo contribuye de manera significativa a nuestra comprensión de la estabilización de suelos con CaCl_2 proporcionando una sólida base para investigaciones próximas y aplicaciones en el contexto de la ingeniería vial.

VI. Conclusiones

Conclusión 1 del objetivo general

Los resultados demostraron que el uso de CaCl_2 en concentraciones específicas mejoró las características geotécnicas del suelo, como la capacidad de carga (CBR) y la densidad máxima, lo cual contribuye a una mayor estabilidad y resistencia de la superficie de rodadura. En particular, la dosis óptima fue del 4% de CaCl_2 , logrando una mejora significativa sin generar costos adicionales elevados, lo que hace que este tratamiento sea una opción rentable y eficaz para el mantenimiento y la durabilidad de las carreteras. Este enfoque ofrece una solución técnica viable para fortalecer las infraestructuras viales en áreas con condiciones similares, reduciendo la frecuencia de mantenimiento y prolongando la vida útil de las carreteras.

Conclusión 2 del objetivo específico 1

Los resultados obtenidos a través de las pruebas de laboratorio y de campo respaldan completamente la hipótesis, mostrando que el CaCl_2 actúa de manera efectiva como estabilizador químico en los suelos de la zona, mejorando sustancialmente sus propiedades geotécnicas.

En primer lugar, el índice CBR, que mide la capacidad de carga y resistencia del suelo, aumentó en un 328.1%, pasando del valor inicial de 5.32% en el suelo no tratado a un impresionante 22.9% en el suelo tratado con una concentración del 4% de CaCl_2 . Este incremento es un claro indicador de que el cloruro de calcio mejora significativamente el valor de soporte del suelo, tal como se planteaba en la hipótesis. Este resultado confirma que el CaCl_2 no solo incrementa la capacidad de carga del suelo, sino que también mejora su comportamiento mecánico, lo que tiene un impacto directo en la estabilidad de la superficie de rodadura de las carreteras.

Además, los resultados obtenidos de las pruebas de densidad máxima seca (DMS) y contenido óptimo de humedad (COM) complementan esta mejora en el índice CBR. La densidad máxima seca aumentó de 1.48 g/cm^3 a 1.62 g/cm^3 , lo que indica que el CaCl_2 no solo mejora la resistencia del suelo a la carga, sino que también incrementa su capacidad de compactación. Esto significa que el suelo tratado es más estable y menos susceptible a la deformación bajo cargas pesadas, un factor crucial para la durabilidad de la superficie de rodadura.

El contenido óptimo de humedad (COM) también disminuyó en los suelos tratados, lo que señala que el suelo tratado con CaCl_2 es menos susceptible a la saturación por agua. Este resultado es particularmente relevante, dado que las fluctuaciones de humedad, especialmente en áreas propensas a lluvias intensas, pueden causar la degradación de las carreteras. Al reducirse la susceptibilidad a la humedad, se previenen fallas estructurales en la superficie de rodadura.

En términos generales, los resultados obtenidos no solo confirman, sino que refuerzan la hipótesis inicial de que el cloruro de calcio mejora el valor de soporte del suelo y el índice CBR, impactando positivamente en la estabilización de la superficie de rodadura de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612. La mejora significativa en el índice CBR y en otras propiedades geotécnicas del suelo (como la densidad y la capacidad de retención de humedad) demuestra que el CaCl_2 es un estabilizador efectivo, que puede ser utilizado para mejorar las condiciones del suelo en áreas con suelos de baja calidad y alto riesgo de deterioro debido a las condiciones climáticas extremas. En conclusión, el uso de CaCl_2 representa una solución viable y eficiente para mejorar la infraestructura vial en la región, garantizando una mayor durabilidad y resistencia de las carreteras vecinales AP 611 y AP 612, así como una reducción de los costos de mantenimiento a largo plazo.

Conclusión 3 del objetivo específico 2

Los resultados obtenidos a través de las pruebas realizadas con diferentes concentraciones de CaCl_2 (2%, 4%, y 6%) confirman que la concentración del 4% es la más eficiente y efectiva para optimizar las propiedades geotécnicas del suelo, lo que valida esta hipótesis.

En primer lugar, el índice CBR, un indicador clave de la capacidad de carga y resistencia del suelo, alcanzó su valor más alto con la aplicación de 4% de CaCl_2 , logrando un aumento de 328.1%, al pasar de 5.32% a 22.9%. En comparación, con concentraciones superiores, como el 6%, el incremento fue marginal, alcanzando solo un 23.5%, lo que sugiere que el 4% de CaCl_2 proporciona un punto de saturación en términos de mejora de la resistencia del suelo. Este comportamiento se correlaciona con la optimización de la durabilidad y la resistencia de la superficie de rodadura, ya que una mayor concentración de cloruro de calcio no produce mejoras sustanciales, lo que implica que no es necesario aplicar más allá del 4%.

En cuanto a la densidad máxima seca, se observó un comportamiento similar. El suelo tratado con 4% de CaCl_2 presentó una mejora significativa en la compactación, aumentando su densidad de 1.48 g/cm^3 a 1.62 g/cm^3 . Sin embargo, al incrementar la concentración a 6%, no se observó un aumento notable en la densidad, lo que refuerza la idea de que una dosis superior no tiene un impacto adicional en la mejora de las propiedades geotécnicas del suelo.

Además, el contenido óptimo de humedad (COM) también mostró una disminución en relación con el aumento de la concentración de CaCl_2 . Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre las concentraciones de 4% y 6%, lo que refuerza la noción de que el 4%

es la concentración óptima para mejorar las propiedades del suelo, reduciendo la sensibilidad a la humedad sin necesidad de un mayor contenido de cloruro de calcio.

Desde una perspectiva técnica, la optimización de la concentración de CaCl_2 al 4% se debe a la saturación de los sitios de intercambio iónico en las partículas del suelo. A concentraciones superiores, el cloruro de calcio adicional no produce una modificación significativa en la estructura del suelo, lo que indica que el 4% es suficiente para mejorar la compactación, la resistencia y la adherencia del suelo. Esto también es crucial para la durabilidad de la superficie de rodadura de las carreteras, ya que el tratamiento con esta concentración asegura una estabilización adecuada sin generar costos innecesarios derivados de la aplicación de concentraciones más altas.

VII. Recomendaciones

Recomendación 1

La concentración óptima de cloruro de calcio para mejorar significativamente el valor de soporte del suelo es del 4%. Esta concentración ha mostrado una mejora notable en el índice CBR, lo que incrementa la capacidad de carga del suelo y la resistencia mecánica. Se recomienda aplicar esta concentración en suelos similares en otras zonas para maximizar el rendimiento.

Recomendación 2

Es recomendable realizar una evaluación geotécnica preliminar del suelo antes de aplicar el tratamiento con cloruro de calcio, para asegurar que las características del suelo sean compatibles con este tipo de estabilización, especialmente en términos de contenido de arcilla y humedad, que influyen en la efectividad del tratamiento

Recomendación 3

Se debe prestar atención a la distribución uniforme de la concentración de CaCl_2 en todo el volumen de suelo, asegurando una mezcla adecuada y un proceso de aplicación que permita la máxima interacción del cloruro de calcio con las partículas del suelo, lo que garantizará una mejora óptima en la resistencia y la durabilidad de la superficie de rodadura

Recomendación 4

A nivel operativo, se recomienda asegurar que las condiciones del terreno, como la humedad y la temperatura, sean favorables durante la aplicación del cloruro de calcio para evitar una posible ineficacia del tratamiento o la pérdida de compuestos clave por evaporación o absorción excesiva de agua

Recomendación 5

En proyectos de investigación futuros, es recomendable realizar pruebas de laboratorio y de campo con diferentes concentraciones de CaCl_2 , para confirmar que el 4% sigue siendo la dosis más efectiva en otras condiciones de suelo o climáticas. Además, se pueden considerar ajustes para suelos con características atípicas

Recomendación 6

Para futuros proyectos de investigación, se sugiere explorar la combinación de CaCl_2 con otros aditivos como cenizas volantes, esto podría revelar que mejoren aún más la estabilización del suelo.

VIII. Referencias

- Al Bargi, W. A., Ali Khalifa, N., Daniel, B. D., Md. Rohani, M., & Odebiyi, O. S. (2023). An Experimental Investigation on the Effect of Calcium Chloride As Dust Suppressant on the Strength of Unpaved Road. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(2). <https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.02.013>
- Ali, A. B., Rashid, M., Rahman, Z., Talukder, T., & Joy, I. A. (2023). A Comparative Study on Soil Stabilization Techniques. *Journal of Advances in Geotechnical Engineering*, 6(2). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8088722>
- Almajed, A., Dafalla, M., & Shaker, A. A. (2023). The Combined Effect of Calcium Chloride and Cement on Expansive Soil Materials. *Applied Sciences*, 13(8), 4811. <https://doi.org/10.3390/app13084811>
- Almasi, S. A., & Khabiri, M. M. (2020). Experimental evaluation of calcium chloride powder effect on the reduction of the pavement surface layer performance. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, 28(1). <https://doi.org/10.14311/CEJ.2019.01.0006>
- Arias, J. L., Holgado, J., Tafur, T., & Vasquez, M. J. (2022). *Metodología de la investigación*.
- Behnood, A. (2018). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, 14–32. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>
- Billong, N., Melo, U. C., Louvet, F., & Njopwouo, D. (2009). Properties of compressed lateritic soil stabilized with a burnt clay–lime binder: Effect of mixture components. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2457–2460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.017>
- Carhuancho Mendoza, I. M., Sicheri Monteverde, L., Nolzco Labajos, F. A., Guerrero

- Bejarano, M. A., & Casana Jara, K. M. (2019). *Metodología de la investigación holística* (Primera ed). Universidad Internacional del Ecuador.
- Cashpa Jara, J. W., & Pillhuaman Cosavalente, A. J. (2022). *Utilización de cloruro de calcio en el suelo para la estabilización de la vía no pavimentada en la prolongación de la Av. Los Nogales en el C. P. José Luis Montalvo Macedo, Casma - 2021* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/100297>
- Chavarry-Vallejos, C. M., Figueroa-Merino, R. A., & Reynaga-Tejada, R. E. (2020). Estabilización química de capas granulares con cloruro de calcio para vías no pavimentadas. *Polo del Conocimiento*, 5(6). <https://doi.org/10.23857/pc.v5i6.1465>
- Chinchay Díaz, L. (2018). *Influencia del aditivo sika dust seal como agente estabilizador de suelos en la trocha carrozable tramo La Serma - Tambillo Jaén, Cajamarca*. [Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/2547>
- ComexPerú. (2021). *La pavimentación aumentó en 194.4 km en 2020, el menor incremento en los últimos 10 años*. <https://www.comexperu.org.pe/articulo/la-pavimentacion-aumento-en-1944-km-en-2020-el-menor-incremento-en-los-ultimos-10-anos>
- Creswell, J. ., & Creswell, J. . (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Sage.
- Das, B. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Global Engineering.
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Guevara, D. (2018). *Evaluación del cloruro de calcio como agente mitigador de polvo y estabilizador en vías de afirmado* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/28831>

- Hadi, M., Martel, C., Huayta, F., Rojas, R., & Arias, J. (2023). *Metodología de la investigación: Guía para el proyecto de tesis* (Primera ed). Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.073>
- Hasan, U., Chegenizadeh, A., Budihardjo, M. A., & Nikraz, H. (2016). Experimental Evaluation of Construction Waste and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Alternative Soil Stabilisers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 1707–1722. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-9983-z>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas: cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill educación. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1292>
- Jácome-Macías, G. A., & Ortiz-Hernández, E. H. (2022). Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema Consolid. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación.*, 5(10), 2–13. <https://doi.org/10.46296/ig.v5i10edespag.0061>
- Larrea Olivero, B. R., & Rivas Cajo, J. C. (2019). *Estabilización de suelos arcillosos con cloruro de sodio y cloruro de calcio*. [Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12607>
- Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Huang, H., Wang, G., & Kamai, T. (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117(1–2), 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.011>
- Liu, Y., Su, Y., Namdar, A., Zhou, G., She, Y., & Yang, Q. (2019). Utilization of Cementitious Material from Residual Rice Husk Ash and Lime in Stabilization of Expansive Soil. *Advances in Civil Engineering*, 1–17.

<https://doi.org/10.1155/2019/5205276>

Llano, E., Ríos, D., & Restrepo, G. (2020). Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad. *TecnoLógicas*, 23(49), 185–199.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1624>

Lujan Rodriguez, B. J., & Vargas Lingan, A. F. (2024). *Influencia del cloruro de calcio en la estabilización de la subrasante, de la carretera tramo Otuzco-Pachin Alto, provincia de Otuzco – La Libertad* [Universidad Privada Antenor Orrego].
<https://hdl.handle.net/20.500.12759/29951>

Ministerio de transporte y comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*.
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual Ensayo de Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras-Suelos, Geología y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos*.
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7 SGGP-2014.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Glosario de Términos de Uso Frecuente en los Proyectos de Infraestructura Vial*.
<https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/10338-002-2018-mtc-14>

Montejo Fonseca, A., Montejo Piratova, A., & Montejo Piratova, A. (2018). *Estabilización de Suelos* (1ra edición). Ediciones De La U.

Morales, E., & Pailacura, C. (2019). Estudio del comportamiento de una carpeta de rodado estabilizada con cloruro de calcio. *Obras y proyectos*, 26, 27–36.
<https://doi.org/10.4067/S0718-28132019000200027>

- Orobio, A., Portocarrero, L., & Serna, L. (2007). Evaluación del cloruro de calcio como agente mitigador de polvo en vías en afirmado. *DYNA*, 74(153 SE-Artículos), 27–33. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/938>
- Pacheco Sonapo, Y. S. M. (2020). *Aplicación del cloruro de calcio con material afirmado para mejorar la estabilización de la base en carreteras no pavimentadas* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/36093>
- Peña Espino, J. E. (2021). *Aplicación de cloruro de calcio en la trocha carrozable para mejorar la accesibilidad a El Bosque San Andrés – Pisco 2021* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/74199>
- Quinche Granda, W. O. (2016). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para uso en vías terrestres de la Urbanización Bella María* [Universidad Técnica Particular de Loja]. <http://dspace.utpl.edu.ec/jspui/handle/123456789/14963>
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 43–67. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Rondón-Quintana, H. A., Ruge-Cárdenas, J. C., & Farias, M. M. de. (2019). Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate: Evaluation by Mass and Volume Substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002574](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002574)
- Singh, J., Singh, U. ., & Singh, R. . (2020). Stabilization of Clayey Soil using Gypsum and Calcium Chloride. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 9(2), 668–673. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3828.079220>
- Syed-Zuber, S. Z., Kamarudin, H., Mustafa, A., Abdullah, M., Bingussain, M., & Salwas, M. (2013). Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and*

Applied Sciences, 7, 258–265.

Torres Montesinos, S. F., & Landa Alarcon, J. Y. (2020). *Mejoramiento de suelos arcillosos en subrasante mediante el uso de cenizas volantes de bagazo de caña de azúcar y cal en el tramo de la carretera Tingo María - Monzón en la provincia de Leoncio Prado* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/653977>

Ulate-Castillo, A. (2017). Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales. *PITRA-LanammeUCR*, 8(2).
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/908>

Zumrawi, M., & Eltayeb, K. (2016). Laboratory Investigation of Expansive Soil Stabilized with Calcium Chloride. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 110, International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 10(2), 223–227. <https://publications.waset.org/10003855/laboratory-investigation-of-expansive-soil-stabilized-with-calcium-chloride>

Zumrawi, M., Mahjoub, A., & Alnour, I. (2016). Effect of Some Chloride Salts on Swelling Properties of Expansive Soil. *University of Khartoum Engineering Journal*, 6(2).
<https://doi.org/10.53332/kuej.v6i2.1005>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes