

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

Evaluación de estabilidad de taludes utilizando llantas recicladas y estabilización del suelo arcilloso con cal en la sub rasante del Cv. EMP PE-3SF (Vilcabamba)-Santa Rosa-Grau-2024

Asesor:

Ing. Acosta Valer, Hugo Virgilio

Autores:

Torres Arcega, Liz Rosmery

Torres Huanaco, Gilda

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac - Perú

2024

Acta de sustentación



Universidad Tecnológica de los Andes



Transformando vidas
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 100

En la ciudad de Abancay, a los veintidós días del mes de **diciembre del 2025**, siendo las **11:00 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **1072-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **16 de diciembre del 2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Huanca Astoquillca, Luis
Dictaminante :	Ph. D. Vasquez Ramirez, Abbon Alex
Replicante :	Ing. Cayo Baca, Holguer

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Evaluación de estabilidad de taludes utilizando llantas recicladas y estabilización del suelo arcilloso con cal en la sub rasante del Cv. EMP PE- 3SF (Vilcabamba) – Santa Rosa – Grau – 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Torres Arcega, Liz Rosmery

Br: Torres Huanaco, Gilda

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S):**

Por: Mayoría
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Torres Arcega, Liz Rosmery	Aprobada
Torres Huanaco, Gilda	Aprobada

Siendo las **12:40pm** horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquillca, Luis

Dictaminante: Ph. D. Vasquez Ramirez, Abbon Alex

Replicante: Ing. Cayo Baca, Holguer

Abancay 12 de enero del 2026

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 390

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 a 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud






24% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 18%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 20%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del autor		
Apellidos y nombres	:	Torres Arcega, Liz Rosmery
	:	Torres Huanaco, Gilda
Tipo de documento de identidad	:	DNI
Numero de documento de identidad	:	70762121
	:	72240617
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0009-6597-7713
	:	https://orcid.org/0009-0002-5782-9015
Datos del asesor		
Apellidos y nombres	:	Ing. Acosta Valer, Hugo Virgilio
Tipo de documento de identidad	:	DNI
Numero de documento de identidad	:	31036555
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0003-1492-0441
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	:	2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	24%
URL DE OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedicado a mis padres por su esfuerzo incansable cuyo apoyo constante, valores y ejemplo de dedicación han sido fundamentales en mi formación profesional. A mis hermanas por su respaldo incondicional en todo momento. Quienes han compartido conmigo cada alegría.

Liz Rosmery Torres Arcega

Este trabajo es dedicado mis padres y mis hermanos quienes son las personas que me dieron la fortaleza me brindaron su apoyo incondicional, me motivaron e impulsaron a seguir adelante en el camino de mi formación profesional.

Gilda Torres Huanaco

Agradecimiento

Agradezco a Dios por guiarme y darme salud, a mis padres Javier Torres Carbajal y Silvia Arcega Vargas, a mis hermanas Naysha, Mayli y Paola por su apoyo incondicional y estar presentes en cada paso de mi vida

Agradezco al Ing. Hugo Virgilio Acosta Valer por su orientación en todo el proceso del proyecto.

Liz Rosmery Torres Arcega

Agradecer a Dios a mis padres, hermanos y a la vida por darme la fortaleza, sabiduría y la oportunidad de poder realizarme profesionalmente de la misma manera agradecer los docentes de la Universidad quienes me impartieron su conocimiento durante mi formación profesional y de manera especial al ingeniero Hugo Virgilio Acosta Valer quien me guio y oriento en la elaboración de mi tesis

Gilda Torres Huanaco

Resumen

Esta tesis tiene como finalidad realizar el estudio para la estabilización de taludes a través del empleo de llantas recicladas y la estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de la cal como un aditivo estabilizante ante las inclemencias climatológicas que se presentan durante distintos periodos del año en el tramo comprendido entre los kilómetros 10+300 y 12+540 del camino vecinal EMP PE-3SF, ubicado entre los distritos de Vilcabamba y Santa Rosa, en la provincia de Grau, departamento de Apurímac.

El enfoque que tiene la investigación es cuantitativo, tipo de investigación es aplicada, el diseño es experimental, debido a que se trabajaron mediante la manipulación de variables. La metodología de la investigación empleada fue la observación y el análisis de datos, la población de estudio comprende un total de 2+240 km del camino vecinal ubicado entre los distritos de Vilcabamba y santa Rosa de la provincia de Grau, los resultados obtenidos del estudio de laboratorio indican que el tipo de suelo estudiado es un suelo grava limosa con arena de acuerdo a la clasificación del SUCS Y AASHTO, la adición óptima de cal para la estabilización de suelo es del 4% , el grado de inclinación del talud estudiado y determinado es de 37.78° según todos los estudios realizados, finalmente se concluye que el talud mediante el empleo de las llantas recicladas para la estabilización si cumple con los objetivos planteados del mismo modo se concluye que mediante el empleo de adición de cal en porciones adecuadas se obtiene resultados favorables en el tramo estudiado Vilcabamba Santa Rosa.

Palabras clave: *deslizamiento, suelo arcilloso, estabilidad de talud, neumático.*

Abstract

This thesis aims to conduct a study on slope stabilization through the use of recycled tires and the stabilization of clayey soils by using lime as a stabilizing additive, in response to the climatic conditions that occur during different times of the year. The study was carried out on the section between kilometers 10+300 and 12+540 of the local road EMP PE-3SF, located between the districts of Vilcabamba and Santa Rosa, in the province of Grau, Apurímac region.

The research approach is quantitative, the type of research is applied, and the design is experimental, as it involved the manipulation of variables. The methodology employed included observation and data analysis. The study population covers a total of 2.240 km of the local road located between the districts of Vilcabamba and Santa Rosa in the province of Grau.

The laboratory test results indicate that the studied soil is a silty loam with sand, according to the SUCS and AASHTO classifications. The optimal lime content for soil stabilization was determined to be 4%. The slope inclination angle was established at 37.78° based on all the studies conducted.

In conclusion, the use of recycled tires for slope stabilization proved to be effective, and the addition of lime in adequate proportions also yielded favorable results in the studied section between Vilcabamba and Santa Rosa.

keywords: *slide, clay soil, slope stability, tire.*

Índice

Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice.....	ix
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xiii
Índice de anexo	xiv
I. Introducción	15
II. Planteamiento del problema	17
2.1. Descripción y formulación del problema.....	17
2.2. Formulación del problema de investigación	18
2.2.1. <i>Problema general</i>	18
2.2.2. <i>Problemas específicos</i>	18
2.3. Justificación e importancia	19
2.4. Objetivos.....	20
2.4.1. <i>Objetivo general</i>	20
2.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	20

2.5.	Hipótesis.....	20
2.5.1.	<i>Hipótesis general</i>	20
2.5.2.	<i>Hipótesis específicas</i>	21
2.6.	Operacionalización de variables.....	21
III.	Marco teórico.....	23
3.1.	Antecedentes.....	23
3.2.	Bases teóricas.....	30
3.2.1.	Llantas recicladas.....	30
3.2.2.	Cal.....	31
3.2.3.	Estabilización de talud.....	32
3.2.3.2.	Estabilización de taludes con llantas recicladas.....	33
3.2.2.	Estabilización de suelos.....	34
3.2.2.3.	Estabilización de suelos arcillosos con cal.....	35
3.2.3.	Metodología de implementación.....	36
3.2.4.	Consideraciones ambientales y económicas.....	37
3.3.	Definición de términos.....	38
IV.	Metodología.....	40
4.1.	Tipo y nivel de investigación.....	40
4.2.	<i>Ámbito temporal y espacial</i>	40
4.3.	Población y muestra.....	41
4.3.1.	Población.....	41
4.3.2.	Muestra.....	41
4.4.	Instrumentos.....	41

4.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	41
4.4.2. Instrumentos de medición.....	42
4.5. Procedimiento.....	42
4.6. Análisis de datos.....	45
4.7. Consideraciones éticas.....	45
V. Resultados y discusión.....	46
5.1. Resultados.....	46
5.2. Discusión.....	56
VI. Conclusiones.....	60
VII. Recomendaciones.....	62
VIII. Referencias Bibliográficas.....	64
IX. Anexos.....	69

Índice de tablas

Tabla 1: <i>Resultados del objetivo específico 1: parámetros del suelo vs. pendiente del talud</i>46
Tabla 2: Resultados del objetivo específico 2: comparación de diseño: talud natural vs. talud con llantas recicladas	50
Tabla 3: Resultados del objetivo específico 3 – influencia de la cal en las propiedades físicas	52
Tabla 4: Resultados del objetivo específico 4 – influencia de la cal en las propiedades mecánicas54

Índice de figuras

Figura 1: Gráfico realizado mediante el software SLIDE en talud natural.....	47
Figura 2: Gráfico realizado mediante el software SLIDE en talud natural.....	48
Figura 3: Gráfico realizado mediante el software SLIDE en talud natural.....	49
Figura 4 Gráfico comparativo entre el talud natural y el talud reforzado con llantas recicladas:	51
Figura 5: Influencia del porcentaje de cal en las propiedades físicas del suelo (calicata 04)	53
Figura 6: CBR en función del porcentaje de cal aplicado al suelo de la calicata 04.....	55

Índice de anexo

Anexo 1: Matriz de consistencia	69
Anexo 2: Operacionalización de variables	71
Anexo 3: Ensayos de laboratorio.....	73

I. Introducción

El área de estudio camino vecinal EMP PE-3SF de los distritos Vilcabamba– Santa Rosa, provincia de Grau del departamento de Apurímac, presenta una topografía accidentada con pendientes pronunciadas en taludes que se encuentran en todo el trayecto. Se observa que el sistema de drenaje conformado por cunetas naturales, alcantarillas, badenes, se encuentran fuera de funcionamiento debido a la colmatación con los sólidos que fueron arrastrados y depositados en temporada de lluvias, así como por la falta y/o ausencia del mantenimiento vial y escasa señalización preventiva e informativa. Durante la temporada de lluvias (diciembre a abril), se produce erosión de la subrasante y deslizamiento de taludes debido a las precipitaciones continuas y fallas geológicas en el tramo KM 10+300, así como inestabilidad del suelo arcilloso hasta el KM 12+540, interrumpiendo la transitabilidad vehicular.

En este tramo se enfrentan desventajas por la falta de un mantenimiento deficiente, sumado a las precipitaciones, acelera el desgaste de la infraestructura vial., causando daños materiales y pérdidas económicas, los taludes de corte con pendientes pronunciadas representan un riesgo constante ante la presencia de fuertes lluvias los cuales ocasionan los deslizamientos provocando la interrupción en las vías.

Este problema es común en nuestra provincia de Grau, particularmente en el área de análisis, los habitantes deben buscar alternativas para movilizar sus productos y llegar a las zonas agrícolas cuando las vías se encuentran en condiciones deficientes. Los gobiernos locales, como el Instituto Vial Provincial de Grau, son responsables del mantenimiento y rehabilitación de estos caminos vecinales.

La presencia de suelos arcillosos con baja capacidad portante dificulta el mantenimiento y rehabilitación de los caminos. Las lluvias provocan ahuellamientos, requiriendo un mejoramiento de la subrasante para facilitar la comunicación entre centros poblados, anexos y zonas urbanas.

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), Diseño Geométrico (DG) (2018) resalta la relevancia de estabilizar la subrasante en terrenos con limitada capacidad portante, con el propósito de asegurar la resistencia y operatividad de las vías.

Esta tesis busco analizar la optimización y estabilización de los taludes situados en el kilómetro 10+300, además de fortalecer los suelos arcillosos que componen la subrasante a través del empleo de cal, aplicado hasta el tramo del camino vecinal EMP PE-3SF VILCABAMBA-SANTA ROSA KM 12+540 del distrito de Vilcabamba, Grau, Apurímac.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

La infraestructura vial rural peruana muestra carencias a causa de la topografía irregular, los suelos arcillosos con baja capacidad portante y la ausencia de mantenimiento. Estas circunstancias generan que, sobre todo en temporada de lluvias, se produzca el deterioro de la subrasante y la inestabilidad de taludes. Esto tiene un impacto negativo en la transitabilidad y el crecimiento socioeconómico de las comunidades locales (MTC, 2018).

En el camino vecinal EMP PE-3SF, que conecta los distritos de Vilcabamba y Santa Rosa, en la provincia de Grau, departamento de Apurímac, se evidencia una realidad problemática caracterizada por la presencia de taludes con pendientes pronunciadas y suelos arcillosos altamente sensibles a la humedad. Durante los periodos de precipitaciones intensas, estos suelos pierden resistencia mecánica, incrementando el riesgo de fallas geotécnicas que comprometen la estabilidad de los taludes y la seguridad de los usuarios de la vía (Orihuela, 2023).

Asimismo, la deficiente capacidad de drenaje y la ausencia de soluciones técnicas adecuadas para la estabilización de taludes agravan la problemática, ya que el agua infiltrada incrementa las presiones intersticiales y reduce el factor de seguridad del terreno. Según Hernández (2022), la identificación clara de una realidad problemática permite comprender las causas del fenómeno y sustentar la necesidad de una intervención técnica basada en evidencia científica.

Frente a este escenario, surge la necesidad de implementar alternativas de estabilización sostenibles y de bajo costo, como el uso de llantas recicladas para el refuerzo de taludes y la estabilización de suelos arcillosos mediante la adición de cal. Estas técnicas han demostrado ser eficaces para mejorar la estabilidad estructural del terreno y las propiedades mecánicas del suelo, además de contribuir a la gestión adecuada de residuos sólidos y al desarrollo sostenible en zonas rurales (Shariati et al., 2024; Moale & Rivera, 2022).

En consecuencia, la realidad problemática del tramo vial EMP PE-3SF (Vilcabamba– Santa Rosa) evidencia la necesidad de evaluar soluciones técnicas innovadoras que permitan mitigar los riesgos geotécnicos existentes, mejorar la transitabilidad de la vía y garantizar una infraestructura vial más segura y durable para la población beneficiaria.

2.2. Formulación del problema de investigación

2.2.1. Problema general

¿De qué manera se estabilizarán los taludes con el uso de llantas recicladas y como contribuirá la incorporación de cal a mejorar la estabilización de suelo arcilloso en las progresivas 10+300 a 12+540 de la sub rasante del Cv. EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau - 2024?

2.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el impacto del uso de llantas recicladas en la estabilización y resistencia de taludes ubicado en el KM 10+300 del camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa?
- ¿Qué diferencias existen entre un talud diseñado con la incorporación de llantas recicladas y un talud convencional sin refuerzo en las condiciones específicas del terreno estudiado?
- ¿La incorporación de cal influirá en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024?
- ¿La incorporación de cal influirá en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024?

2.3. Justificación e importancia

Este estudio se centró en evaluar la estabilidad de los taludes a través de la utilización de neumáticos reciclados y reforzar los suelos arcillosos presentes en el área. Dicha tesis responde a la necesidad de optimizar la infraestructura vial en zonas rurales con topografía accidentada y suelos problemáticos. La investigación aborda dos desafíos críticos: la inestabilidad de taludes y la baja capacidad portante de suelos arcillosos, que afectan la seguridad y durabilidad de las vías.

La utilización de neumáticos reciclados como método de estabilización de taludes representa una alternativa innovadora y ambientalmente sostenible, aprovechando materiales de desecho para crear estructuras de contención eficaces. Esto no solo mejora la estabilidad geotécnica, sino que también contribuye a la disminución de desechos y la preservación del entorno natural.

Asimismo, la aplicación de cal para estabilizar suelos arcillosos se ha demostrado como una estrategia ampliamente respaldada que optimiza las características físicas y mecánicas de la subrasante. Este método resulta fundamental para incrementar la capacidad portante del suelo y minimizar su sensibilidad a variaciones volumétricas, contribuyendo de esta manera a prolongar la vida útil de las infraestructuras viales.

La combinación de estas técnicas promete una solución integral y económicamente viable con el propósito de optimizar la infraestructura vial en regiones montañosas del Perú, contribuyendo al desarrollo socioeconómico de comunidades rurales al facilitar el transporte y la conectividad.

Debido a que la tesis de investigación consta de dos temas se tiene mayor cantidad de variables, haciendo que el trabajo sea más complejo, por lo cual este justifica la elaboración de tesis de dos personas.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

Estabilizar los taludes con llantas recicladas en el KM 10+300 y la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos adicionando cal en el KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE - 3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau – 2024.

2.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la eficiencia del uso de llantas recicladas en la estabilización de taludes en el KM 10+300, considerando su impacto en la resistencia y estabilidad estructural del terreno.
- Determinar el diseño de un talud con la incorporación de llantas recicladas con relación a un talud normal
- Describir la influencia de la incorporación de cal en las propiedades físicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.
- Describir la influencia de la incorporación de cal en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

La implementación de muros de contención con llantas recicladas en el KM 10+300 y la adición de cal en el suelo arcilloso entre el KM 10+300 y el KM 12+540 del camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa – Grau mejorará significativamente la estabilidad de taludes y las propiedades mecánicas del suelo.

2.5.2. Hipótesis específicas

- La incorporación de llantas recicladas en la estabilización de taludes en el KM 10+300 incrementará significativamente la resistencia y estabilidad estructural del terreno.
- El diseño de un talud con la incorporación de llantas recicladas permitirá una inclinación más pronunciada y una mayor altura en comparación con un talud normal.
- La utilización de cal en el suelo arcilloso mejorará significativamente las propiedades físicas en la estabilización de suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau- 2024.
- La utilización de cal en el suelo arcilloso mejorará significativamente las propiedades mecánicas en la estabilización de suelo arcilloso en el KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.

2.6. Operacionalización de variables

Variable 1

- Llantas Recicladas
- Cal

Dimensiones:

- Neumático
- Cal hidratada

Variable 2

- Estabilidad de Taludes.
- Estabilidad de suelo.

Dimensiones:

- Diseño de talud y suelo.
- Propiedades físicas
- Propiedades mecánicas

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

Arteaga (2024), el objetivo de este estudio fue determinar la viabilidad de construir muros de contención utilizando neumáticos reutilizados para estabilizar taludes. La metodología incluyó pruebas de laboratorio para caracterizar tres tipos de suelos (arcilla, tepetate y una combinación de ambos) como material de relleno para los neumáticos, así como simulaciones computacionales utilizando el software PLAXIS con el fin de evaluar el rendimiento de los muros, los hallazgos revelaron que tanto el tepetate como la mezcla de materiales presentaron el mejor comportamiento como material de relleno, cumpliendo con los índices de seguridad contra el volcamiento y el deslizamiento en diversas configuraciones de muros. En contraste, la arcilla no logró satisfacer los criterios de estabilidad en ninguna de las configuraciones evaluadas. Como conclusión, se determinó que los muros de contención fabricados a partir de neumáticos reciclados representan una opción rentable y efectiva para estabilizar taludes, particularmente cuando se emplea tepetate o una mezcla de diferentes tipos de suelo como material de relleno. Esta técnica ofrece beneficios ambientales al reutilizar neumáticos desechados y puede ser implementada con participación comunitaria.

Artoshi et al. (2024), el estudio evaluó la eficacia del uso de trozos de neumáticos como estabilizadores del suelo para mejorar las propiedades de resistencia de la mezcla en tres proporciones: 10%, 20% y 30%. La metodología incluyó pruebas de compactación, CBR y corte directo en muestras de arcilla mezcladas con trozos de neumáticos. Los resultados evidenciaron que al incrementar la cantidad de fragmentos de neumáticos redujo los valores de CBR de 4.4% (sin trozos) a 3.3%, 2.98% y 2.3% respectivamente. Sin embargo, la prueba de corte directo reveló un aumento significativo en la tensión de corte con el incremento del contenido de trozos de neumáticos, alcanzando 82.25, 84.14 y 85.87 kPa respectivamente. Se concluyó que los trozos de neumáticos son materiales ligeros que, al aumentar su proporción en la combinación del suelo reduce sus propiedades. Consecuentemente, los

trozos de neumáticos pueden utilizarse junto con el suelo como material alternativo en estructuras de contención.

Khalid y Alshawmar (2024), esta revisión tiene como finalidad ofrecer un examen exhaustivo de las características geotécnicas de los suelos tratados con fibras y tiras de PET reciclado para la estabilización del suelo. La metodología incluyó una extensa búsqueda bibliográfica en bases de datos académicas, identificando más de 140 artículos relevantes publicados en la última década. Se analizaron datos sobre el contenido de PET, longitud de fibra, relación de aspecto y propiedades mecánicas como la resistencia al corte, la compresibilidad y la capacidad portante del suelo fueron evaluadas en este estudio. Los hallazgos indican que el refuerzo con PET incrementa mejora la resistencia al corte, reduce los asentamientos y optimiza tanto la estabilidad como la capacidad portante del suelo. Sin embargo, no se encontró un impacto relevante en la densidad seca del material. En conclusión, la revisión confirma que la adición de fibras y tiras de PET reciclado constituye una alternativa efectiva para la estabilización del suelo, ofreciendo beneficios tanto en términos de rendimiento geotécnico como de sostenibilidad ambiental. Es crucial identificar la cantidad óptima de PET para obtener el máximo rendimiento su efectividad en diferentes tipos de suelo.

Baldovino et al. (2024), el estudio investiga la estabilización sostenible de arcilla plástica utilizando cemento y polvo de vidrio reciclado de residuos sólidos municipales. El propósito radica en mejorar las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso, fomentando la sostenibilidad mediante la reutilización de residuos. La metodología empleada consistió en la elaboración de muestras con distintas proporciones de cemento (3% y 6%) y polvo de vidrio (10% y 20%), las cuales fueron sometidas a ensayos de resistencia a la compresión no confinada, evaluación de rigidez y análisis microestructural mediante SEM-EDS. Los hallazgos indicaron que la combinación más eficiente, con un 20% de contenido, presentó los mejores resultados de polvo de vidrio y 6% de cemento, con compactación en tres puntos y 28 días de curado, logró el mejor rendimiento en términos de resistencia y rigidez. El análisis microestructural reveló diferentes grados de cementación y productos de unión. Se

utilizaron redes neuronales artificiales para predecir la resistencia y rigidez. El análisis llega a la conclusión de que este método de estabilización resulta eficaz para optimizar las propiedades del suelo arcilloso, proporcionando una alternativa sostenible al incorporar desechos de vidrio y reducir el uso de cemento.

Shariati et al. (2024), el objetivo de este estudio es examinar exhaustivamente la utilización de neumáticos de desecho en ingeniería geotécnica, enfocándose en sus aplicaciones, comportamiento mecánico, impacto ambiental y desafíos potenciales. La metodología consiste en un análisis detallado de la literatura disponible, examinando estudios anteriores relacionados con combinaciones de arena y caucho, sus propiedades mecánicas y aplicaciones prácticas. Los resultados indican que la incorporación de neumáticos de desecho en proyectos geotécnicos, como muros de contención, taludes y sistemas de drenaje, ofrece alternativas sostenibles y aborda preocupaciones ambientales. Se observó que factores como las proporciones de caucho, relaciones de aspecto y mecanismos de interacción influyen significativamente en la resistencia al corte, comportamiento de deformación y propiedades del módulo de las mezclas. La conclusión destaca el potencial de los neumáticos de desecho en ingeniería geotécnica, abogando por más investigación e innovación para aprovechar plenamente sus beneficios y contribuir a un entorno construido más sostenible y resiliente.

Antaurco y Cruz (2021), el propósito central de esta investigación fue alcanzar la estabilización de los taludes empleando muros construidos a partir de neumáticos reciclados, con el fin de mitigar los efectos de las condiciones climáticas en el tramo Parco - Utcuyacu, ubicado en Recuay, Áncash, durante el año 2021. La metodología empleada correspondió a un enfoque aplicado, con un diseño cuasiexperimental y un nivel descriptivo y explicativo. Se utilizaron la observación y el análisis como métodos de estudio. La población considerada abarcó 4 km del tramo analizado, seleccionando una muestra de 20 m. Se utilizó una guía de observación como herramienta para recopilar la información necesaria. Los resultados indicaron 5 estratos de suelo y factores de seguridad por debajo del mínimo de 1.5 según la norma AASHTO en condiciones estáticas (0.521), sísmicas

(0.461) y con presencia de agua (0.496). Se determinó la implementación de muros de contención fabricados con neumáticos reciclados proporciona una resistencia efectiva frente a los deslizamientos ocasionados por las precipitaciones, lo que confirma la viabilidad de su aplicación en el área analizada.

Barriga (2021), el objetivo de la investigación fue comparar la estabilización de suelos arcillosos en la región Madre de Dios utilizando cal y cemento, evaluando sus efectos en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. La metodología consistió en un diseño experimental cuasi-experimental con enfoque cuantitativo, donde se adicionaron 2%, 4% y 6% de cal y cemento a muestras de suelo natural, evaluando parámetros como los parámetros evaluados incluyeron los límites de consistencia, la densidad seca máxima (MDS) y el índice de soporte CBR fueron evaluados. Los datos obtenidos mostraron que al incorporar un 4% de cemento, las propiedades del suelo experimentaron una mejora significativa, alcanzando un índice CBR ponderado de 10.4% con una capa estabilizada de 40 cm de espesor., superando a la cal en capacidad de soporte. En conclusión, el cemento es el agente estabilizante más efectivo para mejorar suelos arcillosos en esta región, cumpliendo los requisitos técnicos establecidos por el MTC para subrasantes estabilizadas.

Orihuela (2023), el objetivo de esta tesis es determinar la influencia de la saturación de suelos finos en la estabilidad de taludes en la cantera Inay, Saños Chaupi. La metodología empleada es de enfoque aplicado, con un nivel explicativo y un diseño cuasiexperimental, empleando observación directa y pruebas de laboratorio estandarizadas. Se analizaron muestras de suelo con diferentes grados de saturación, desde 10% hasta 100%, para evaluar cambios en propiedades físicas y parámetros de resistencia cortante. Los resultados muestran que la cohesión varía de 14 kPa a 46.28 kPa con la saturación máxima, mientras que el ángulo de fricción disminuye de 28.50° a 5.10° al saturarse completamente. El factor de seguridad del talud disminuye de 1.67 a 0.36 en condiciones estáticas y de 1.18 a 0.25 en condiciones pseudoestáticas conforme aumenta la saturación. Se concluye que el factor de seguridad aumenta ligeramente hasta alcanzar la cantidad

óptima de humedad, que posteriormente se reduce de manera significativa a medida que el suelo se acerca a la saturación total.

Quispe (2023), la investigación tuvo como objetivo analizar los efectos de la adición de ceniza de cáscara de cebada y cal hidratada en la estabilización de suelos arcillosos del centro poblado de Palián, Huancayo. El estudio se basó en un diseño cuasi-experimental, utilizando un muestreo no probabilístico. Como parte del proceso, se recolectaron cáscaras de cebada que luego fueron calcinadas y molidas, y se excavaron tres calicatas en un área de 952 m². La calicata con las condiciones más desfavorables se seleccionó para añadirle cal hidratada y ceniza en distintas proporciones. Se realizaron diferentes pruebas para evaluar las características del suelo, entre ellas análisis de granulometría, determinación de límites de consistencia, medición del contenido de humedad, cálculo del peso volumétrico, determinación de la gravedad específica, ensayos de corte directo y pruebas de consolidación. Los resultados mostraron que la proporción óptima consistió en la adición de 8% de cal hidratada y 3% de ceniza, lo que permitió reducir el índice de plasticidad de 22.49% a 16.69%. También se observó una disminución del material fino retenido en el tamiz N°200 de 89.40% a 23.06%, cambiando la clasificación SUCS de CL a SM. Además, se registró un incremento en el ángulo de fricción interna de 19.27° a 25.17°, una reducción en la cohesión de 0.14 kg/cm² a 0.05 kg/cm², un aumento de la capacidad portante del suelo de 0.82 kg/cm² a 1.52 kg/cm², y una disminución en los asentamientos por consolidación de 2.88 cm a 0.34 cm. En conclusión, la adición de cal y ceniza de cáscara de cebada mejora de forma significativa las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos evaluados.

Rojas (2023), el objetivo de esta investigación fue estudiar la efectividad de las geoceldas elaboradas con llantas recicladas para mejorar la subrasante de arcilla en Huancayo. La metodología consistió en evaluar la subrasante arcillosa natural y estabilizada con geoceldas de llantas recicladas, midiendo la deflexión mediante un deflectómetro de impacto LWD en tres tramos con diferentes alturas de lona (19.5 cm, 20.5 cm y 25.5 cm). Se realizaron mediciones en múltiples puntos para cada tramo y se compararon los

resultados. Los resultados mostraron una reducción en la deflexión al usar las geoceldas: 27.31% para el primer tramo, 10.12% para el segundo y 10.34% para el tercero. Se concluyó que las geoceldas elaboradas con llantas recicladas son efectivas para optimizar la resistencia estructural de la subrasante compuesta por arcilla, reduciendo significativamente la deflexión en comparación con la subrasante natural sin estabilizar.

Tacca (2021), el propósito de este trabajo fue estabilizar un suelo arcilloso mediante la introducción de cal, orientada a mejorar la subrasante de la Vía de Evitamiento, en Abancay - Apurímac, durante el año 2021, fue el enfoque central de esta investigación. Con un enfoque cuantitativo, se utilizó el método hipotético-deductivo y un diseño experimental de carácter aplicado. Los resultados mostraron que la adición de cal en cantidades de 4%, 8% y 12% incrementó la capacidad de carga del suelo y optimizó la estabilidad de la subrasante. En particular, se obtuvieron valores de CBR (95% 0.1") de 28.5% para un 12% de cal, 24.95% para un 8% y 19.2% para un 4%, todos superiores al 9.4% registrado en el suelo no tratado. Asimismo, el análisis arrojó un p-valor de 0.00, lo que evidencia una diferencia altamente significativa. En resumen, la adición de cal en estas proporciones mejoró notablemente las propiedades de soporte y la estabilidad del suelo de la subrasante, concluyéndose que la proporción óptima es del 8%.

Alvarado et al. (2022), el objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de los residuos de concreto (RC) en la estabilización del suelo arcilloso para mejorar la subrasante en la vía de Evitamiento de Abancay, Apurímac en 2022. La metodología utilizada correspondió a un enfoque aplicado, con un alcance explicativo y basado en un diseño experimental. Se trabajó con muestras de suelo recolectadas de nueve calicatas ubicadas a lo largo de la Vía de Evitamiento. Para caracterizar el suelo, se realizaron ensayos de laboratorio que analizaron tanto sus propiedades físicas como mecánicas, tanto en su estado original como tras la adición de 5%, 10% y 15% de RC. Los resultados mostraron que la incorporación de un 15% de RC proporcionó las mayores mejoras, disminuyendo el límite líquido de 39.93% a 32.77% y el índice plástico de 14.34% a 9.17%. Asimismo, se detectó un aumento en la densidad seca máxima, que pasó de 1.714 g/cm³ a 1.901 g/cm³,

y en el CBR al 95%, que se incrementó de 7.02% a 13.92%. En resumen, la adición de RC al suelo arcilloso tiene un efecto positivo sobre su estabilización, mejorando notablemente sus propiedades físicas y mecánicas, y haciéndolo más apto para su uso como subrasante.

Farfán (2022), el objetivo de la investigación fue evaluar el comportamiento mecánico de la subrasante en suelo arcilloso estabilizándolo con cemento en la investigación se llevó a cabo en la Av. Los Naranjos, ubicada en la Unidad Vecinal Ccehuarpampa, en la provincia de Andahuaylas, Apurímac. La metodología empleada se basó en un enfoque aplicado, con un diseño experimental y un alcance explicativo. Para el análisis, se llevaron a cabo pruebas de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR en muestras de suelo, tanto en su estado original como tras ser estabilizadas mediante la adición de 10%, 13% y 16% de cemento. Los resultados revelaron que el suelo natural presentaba un índice CBR menor al 4%, clasificándose como subrasante insuficiente. Al estabilizar con cemento, el CBR aumentó significativamente, alcanzando valores de hasta 29.64% con 16% de cemento. Se determinó que la estabilización con cemento optimizó de manera significativa las características mecánicas del suelo arcilloso, cumpliendo los requerimientos mínimos de resistencia para subrasante según el MTC, aunque con un costo relativamente elevado de S/. 26.50 por metro cúbico.

Luyo y Tello (2022), el objetivo de este estudio fue mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante del suelo arcilloso de la trocha carrozable AP-557 Chumbibamba en Apurímac, mediante la incorporación de cal y cenizas. La metodología consistió en realizar Se realizaron pruebas para determinar el contenido de sulfatos, la granulometría, los límites de Atterberg, el Proctor modificado y el CBR en tres muestras de suelo. A estas muestras se les añadieron cenizas en proporciones del 18%, 28% y 38%, acompañadas de un 2% de cal en cada caso. Posteriormente, se compararon los resultados con los valores obtenidos en la muestra que no recibió tratamiento. El análisis reveló que la combinación óptima correspondió a la adición del 28% de cenizas y 2% de cal, lo que permitió mejorar el CBR de 4.3% a 63.4%, representando un incremento del 59.1%. En síntesis, la incorporación de cal y cenizas contribuye de manera significativa a mejorar las

propiedades de la subrasante, aumentando su capacidad portante y reduciendo su plasticidad. Según lo estipulado en el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el suelo tratado alcanzó la clasificación de subrasante de excelente calidad.

López y Ortiz (2021), el presente estudio tuvo como finalidad optimizar las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en un suelo arcilloso de la trocha carrozable AP-557 Chumbibamba, en Apurímac, a través de la incorporación de cal y cenizas. La metodología adoptada consistió en la realización de pruebas para determinar el contenido de sulfatos, la granulometría, los límites de Atterberg, el Proctor modificado y el CBR. Se evaluaron tres muestras de suelo a las que se añadieron cenizas en proporciones del 18%, 28% y 38%, junto con un 2% de cal en cada caso, comparándolas con una muestra en su estado original. Los resultados demostraron que la combinación más efectiva fue la de 28% de cenizas y 2% de cal, lo que incrementó el CBR de 4.3% a 63.4%, reflejando un aumento del 59.1%. En conclusión, la adición de cal y cenizas generó mejoras significativas en las propiedades de la subrasante, aumentando su capacidad de soporte y reduciendo su plasticidad. En consecuencia, el suelo tratado fue clasificado como una subrasante de excelente calidad, según los estándares definidos por el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Llantas recicladas

Desde una perspectiva ambiental, el uso de llantas recicladas contribuye a la reducción de residuos sólidos y a la mitigación del impacto negativo que generan los neumáticos desechados cuando son abandonados o incinerados. En este sentido, su aplicación en proyectos de estabilización no solo mejora la seguridad y funcionalidad de la infraestructura vial, sino que también promueve prácticas de economía circular y desarrollo sostenible (Shariati et al., 2024).

Desde una perspectiva ecológica y financiera, el uso de cal para estabilizar suelos se considera una alternativa sustentable, dado que facilita el empleo de tierras locales, disminuye la necesidad de materiales externos y reduce los gastos relacionados con el transporte y la eliminación de desechos. Asimismo, su uso ayuda a extender la durabilidad de las infraestructuras viales, reduciendo así los requerimientos de mantenimiento en un horizonte de tiempo más amplio (ANFACAL, 2015).

3.2.1.1. Neumático

El neumático, el componente principal de las ruedas recicladas, es esencial para estabilizar pendientes debido a sus propiedades mecánicas y físicas. Su composición está compuesta, sobre todo, por goma sintética y natural, metal y fibras textiles; estos materiales le brindan una resistencia considerable a la compresión, un tiempo de vida extenso frente a factores ambientales y una capacidad destacada para deformarse sin que su estructura original se vea alterada. Gracias a estas propiedades, los neumáticos reciclados pueden ser usados como elementos estructurales en muros de contención y en sistemas de soporte de pendientes (Rojas y Piñeros, 2022).

Desde una perspectiva ecológica, el neumático reciclado se ofrece como una alternativa sostenible, dado que reduce la acumulación de residuos sólidos y promueve la reutilización de materiales que son difíciles de descomponer. En esta línea, su aplicación en el campo de las "llantas recicladas" cumple no solo con exigencias técnicas, sino que también está en consonancia con los principios de la economía circular y la sostenibilidad en proyectos relacionados con la infraestructura vial (González, 2014).

3.2.2. Cal

Muchos estudios han demostrado que la proporción óptima de cal se encuentra entre el 2% y el 6% del peso seco del terreno, lo cual varía según las propiedades físicas y la mineralogía de este. En suelos con baja capacidad de soporte, compuestos por arcilla, el empleo de cal para estabilización ha demostrado avances significativos en factores como el

ángulo de fricción interna, la densidad seca máxima y el índice CBR. Esto posibilita que se use de manera eficaz como base para carreteras y caminos. (Thompson, 1966; Moale & Rivera, 2022).

3.2.2.1. Cal hidratada

La cal hidratada fomenta, en términos mecánicos, reacciones puzolánicas a medio y largo plazo entre el calcio y los elementos silíceos y alumínicos del suelo. Como resultado de estas interacciones, se crean compuestos cementantes que mejoran la resistencia al corte, la capacidad de carga y el índice CBR. Según varios estudios, la dosificación ideal de cal hidratada para tierras arcillosas varía entre el 2% y el 6% del peso seco del terreno, lo cual depende de las características locales y mineralógicas (Thompson, 1966; Moale & Rivera, 2022).

La cal hidratada es un aditivo que se emplea para estabilizar suelos arcillosos; al disminuir la plasticidad, incrementar la resistencia al corte y potenciar la capacidad portante del terreno, mejora el comportamiento geotécnico de estos suelos. Por lo tanto, se trata de una técnica eficaz para optimizar las subrasantes viales (Little, 1995).

3.2.3. Estabilización de talud

La estabilización de taludes es un procedimiento geotécnico que combina el estudio del suelo, la configuración geométrica de la pendiente y las condiciones medioambientales para implementar soluciones de mejora o refuerzo que disminuyan el peligro de deslizamientos y garanticen la estabilidad a largo plazo de las infraestructuras, particularmente en proyectos relacionados con transporte y vías (Sharma & Kumar, 2020).

El proceso de estabilización de taludes se basa en la implementación de medidas geotécnicas que buscan aumentar la seguridad de las pendientes al controlar la geometría, el drenaje y reforzar el suelo o roca. El objetivo es disminuir las posibilidades de fallas y garantizar un comportamiento estable a largo plazo en obras de infraestructura (Abramson et al., 2021).

3.2.3.1. Diseño de talud

El diseño de la pendiente es un proceso geotécnico que establece la forma más conveniente de una inclinación (altura, ángulo y grado de inclinación), considerando las propiedades físicas y mecánicas del suelo o formación rocosa, las condiciones geológicas e hidrológicas y las cargas implicadas. Su finalidad es garantizar la estabilidad del terreno y prevenir fallos por deslizamiento, asegurando así un margen de seguridad apropiado a lo largo de la vida útil del edificio (Das, 2016; Duncan, Wright & Brandon, 2014).

El diseño de talud es un método de ingeniería geotécnica que establece la forma geométrica apropiada de una pendiente, teniendo en cuenta la altura, el ángulo de inclinación y las propiedades del suelo o roca, además de los factores geológicos e hidrológicos y las cargas presentes. Su finalidad es asegurar la estabilidad del talud y un factor de seguridad aceptable durante la vida útil del trabajo (Abramson et al., 2021).

3.2.3.2. Estabilización de taludes con llantas recicladas

Define como una técnica para la estabilización de taludes mediante el uso de llantas recicladas para el diseño, aportando en la reducción de la contaminación del ecosistema, cabe mencionar que el uso de llantas recicladas es una buena alternativa práctica y económica comparada con otros métodos constructivos y que cumple con los estándares de seguridad y calidad (González, 2014)

Las llantas usadas, representan una opción alternativa. viable y económica frente a los métodos tradicionales de estabilización. Su estructura circular y resistente permite la creación de diseños adaptables a diversas formas y tamaños de áreas a proteger (Zambrano y Peña, 2014).

Ventajas del Uso de Llantas Recicladas

- **Durabilidad:** Las estructuras de contención elaboradas con neumáticos presentan una durabilidad prolongada y una elevada resistencia frente a factores naturales como la acción del agua y las características del suelo.

- **Facilidad de Construcción:** Su implementación su implementación es simple y se adapta con facilidad a las comunidades rurales.
- **Sostenibilidad:** Utiliza materiales de desecho, contribuyendo a la mejora del medio ambiente.
- **Eficacia Mecánica:** Proporciona un sistema de contención que soporta empujes de manera similar a los muros de gravedad.

Aspectos Técnicos

Funciona por su peso gravitacional contribuye a su estabilidad, la cual se mejora mediante la disposición escalonada de neumáticos reforzados e inclinados hacia la parte posterior, colocadas de abajo hacia arriba a modo de escalera. El relleno interior se realiza con tierra, pudiendo mejorarse con la adición de cemento en proporciones adecuadas (Zambrano y Peña, 2014).

3.2.2. Estabilización de suelos

la estabilidad de los suelos tiene que ver con el potencial del terreno para mantener su equilibrio y resistir deformaciones o fallas cuando se le aplican cargas y condiciones medioambientales. Los factores que más influyen en su comportamiento geotécnico son la resistencia al corte y las condiciones de drenaje (Das, 2016).

3.2.2.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo son atributos que definen su composición y condición natural, y que tienen un impacto directo en cómo se comporta frente a la humedad y las cargas aplicadas. La granulometría, la humedad, la densidad, el peso por unidad y los límites de consistencia son propiedades que componen un componente esencial para clasificar el suelo y hacer análisis geotécnicos al diseñar taludes y obras de infraestructura (Coduto, Yeung & Kitch, 2021).

Las características físicas del suelo son los rasgos que caracterizan su composición, estructura y estado natural; estos determinan cómo se comporta el suelo ante el agua y las

cargas externas. La densidad, la porosidad, el contenido de humedad, los límites de Atterberg y la distribución granulométrica son algunas de estas propiedades. Son esenciales para clasificar el suelo y para el análisis geotécnico que se aplica al diseño de taludes y obras de infraestructura (Murthy, 2020).

3.2.2.2. Propiedades mecánicas

Los parámetros que caracterizan cómo el suelo responde a la aplicación de cargas y esfuerzos son sus propiedades mecánicas, las cuales posibilitan determinar su estabilidad, deformabilidad y resistencia. Para realizar un análisis geotécnico y diseñar de manera segura taludes, cimentaciones y obras de infraestructura vial, propiedades como la cohesión, la resistencia al corte y el ángulo de fricción interna son esenciales (Sharma & Kumar, 2020).

Los parámetros que determinan la deformación y resistencia del suelo cuando se le aplican cargas, así como los que permiten anticipar su reacción frente a esfuerzos, son las propiedades mecánicas del suelo. Dado que estas características impactan directamente en la seguridad y el rendimiento de las obras de ingeniería (Mitchell & Soga, 2005),

3.2.2.3. Estabilización de suelos arcillosos con cal

El suelo arcilloso, presente en diversas partes del mundo, es el tipo de suelo menos apropiado para la construcción debido a sus deformaciones y su escaso soporte de carga. Por esta razón, este material se descarta frecuentemente en numerosos proyectos. Los suelos arcillosos son los que tienen partículas de menos de dos micras. Estos elementos están constituidos por silicatos de hierro, aluminio, minerales arcillosos y otros componentes. Asimismo, poseen la propiedad de volverse plásticos al combinarse con agua (ANFACAL, 2015a) (SIACOT, 2019)

Proceso de Estabilización

El propósito de la prueba es calcular el porcentaje de cal para crear una mezcla que modifique y estabilice el terreno, así como aumentar su resistencia mecánica y d

urabilidadLa prueba se fundamenta en el cambio de pH causado por las diversas adiciones a la arcilla.

Este cambio es un indicador excepcional del porcentaje de cal que se necesita para estabilizar los terrenos arcillosos. Es un procedimiento simple que no necesita instrumentos específicos. (SIACOT, 2019)

Beneficios de la Estabilización con Cal

- **Mejora de la Capacidad Portante:** Incrementa significativamente la resistencia y estabilidad del suelo.
- **Reducción de la Plasticidad:** Disminuye la sensibilidad del suelo ante los cambios en su contenido de humedad.
- **Aumento de la Trabajabilidad:** Facilita la compactación y manejo del suelo durante la construcción.
- **Aprovechamiento de Recursos Locales:** Permite utilizar los suelos disponibles en el lugar de la construcción, reduciendo la necesidad de trasladar materiales de préstamo.

Aplicaciones en Infraestructura Vial

Según Moale y Rivera (2022), la estabilización con cal se utiliza en diversos componentes de la infraestructura vial, incluyendo:

- Terracerías
- Subbases y bases de carreteras
- Plataformas y vialidades en desarrollos industriales y de vivienda
- Caminos secundarios y de servicio

3.2.3. Metodología de implementación

Según Mamani (2020), para la implementación efectiva de estas técnicas de estabilización, se requiere un enfoque sistemático que incluya:

- **Análisis del Suelo:** Ejecución de ensayos mediante ensayos de laboratorio realizados para identificar las propiedades iniciales del suelo, incluyendo análisis de granulometría, límites de consistencia y el índice de soporte CBR.

Diseño de la Solución:

- **Para taludes:** Diseño del muro de llantas considerando la geometría del talud y las cargas esperadas.
- **Para suelos arcillosos:** Establecimiento de la proporción óptima de cal a emplear, usualmente entre el 2% y el 6% del peso seco del suelo.

Construcción y Aplicación:

- **Taludes:** Colocación y unión de neumáticos, incorporación de material de relleno y proceso de compactación.
- **Suelos:** Mezcla homogénea de cal con el suelo, compactación y curado.
- **Monitoreo y Evaluación:** Seguimiento del comportamiento de las estructuras y del suelo estabilizado para asegurar su efectividad a largo plazo.

3.2.4. Consideraciones ambientales y económicas

Según Moale y Rivera (2022), la implementación de estas técnicas no solo aborda los desafíos técnicos de la estabilización de taludes y suelos, sino que también ofrece beneficios ambientales y económicos significativos:

- **Reducción de Residuos:** El uso de llantas recicladas contribuye a la disminución de desechos sólidos.
- **Costo-Efectividad:** Ambas técnicas ofrecen soluciones económicamente viables en relación con los métodos convencionales.
- **Sostenibilidad:** Promueven el uso eficiente de recursos locales, así como la disminución de la emisión de carbono vinculada al traslado de materiales.

La integración del uso de neumáticos reciclados para estabilizar taludes y la mejora la estabilización de suelos arcillosos mediante la incorporación de cal constituye una respuesta integral a los desafíos geotécnicos asociados tanto

a la construcción como al mantenimiento de infraestructuras viales en terrenos de topografía compleja y suelos de difícil comportamiento. Estas estrategias no solo optimizan la estabilidad y vida útil de las vías, sino que también generan importantes beneficios ambientales y económicos, promoviendo el desarrollo sostenible en comunidades rurales.

3.3. Definición de términos

Estabilización: Procedimiento mediante el cual se mejoran las propiedades del terreno natural, mediante aditivos químicos, mecánicos u otros métodos, con el objetivo de incrementar la capacidad de soporte y durabilidad (Ariza, 2022).

Talud: Pendiente o superficie del terreno, natural o artificial, resultado de un corte o relleno. Es común en cortes de carreteras, presas y excavaciones, requiriendo análisis de estabilidad (Oros, 2020),

Llantas: Neumáticos es un componente anular hecho de caucho actualmente se usan y reciclan para aplicaciones en ingeniería civil. Se utilizan en la edificación de muros de contención y la estabilización de taludes y su uso como material de relleno en proyectos viales (Rojas & Piñeros, 2022)

Arcilloso: Suelo caracterizado por un elevado porcentaje de partículas finas de arcilla, con dimensiones menores a 0.002 mm. Se caracteriza por su elevada plasticidad, baja capacidad de permeabilidad y una notable propensión a cambios volumétricos cuando varía el contenido de humedad (Alvarado et al., 2022)

Subrasante: Consiste en una capa de suelo, que puede encontrarse en su condición original o estabilizada previamente, y que sirve como base de apoyo para la estructura del pavimento. Su calidad y resistencia son cruciales para el desempeño y durabilidad de la vía (Ariza, 2022)

Cal: Es empleado en la estabilización de suelos arcillosos, optimizando tanto sus propiedades físicas como sus características mecánicas. Este material disminuye la plasticidad del suelo y refuerza su resistencia a la compresión (Vera et al., 2022).

Sostenibilidad: la sostenibilidad se puede interpretar como la capacidad para dar una solución de estabilización con fines de mantener las condiciones de seguridad, funcionalidad y coexistencia ambiental, sin poner en riesgo recursos futuros. Implica diseño eficiente, uso de materiales ecológicos y minimización del impacto ambiental en proyectos (Banco Interamericano de Desarrollo, 2018).

Geotecnia: Área de la ingeniería civil que se enfoca en analizar el comportamiento tanto de los suelos como de las formaciones rocosas. Para ello, emplea fundamentos de la mecánica de suelos y la geología, con el objetivo de diseñar cimentaciones, pendientes estabilizadas y elementos de retención (Oros, 2020).

Compactación: Este procedimiento incrementa la densidad del suelo mediante el empleo de energía mecánica, logrando disminuir el volumen de vacíos y, como resultado, mejorando tanto la estabilidad como la capacidad portante del terreno en proyectos de ingeniería civil (Chirinos et al., 2021).

Drenaje: Es un sistema que tiene como finalidad eliminar el excedente de agua presente en los suelos o las edificaciones. Consiste en la utilización de conductos, tuberías y estructuras complementarias que permiten evitar la saturación del terreno y resguardar las construcciones (Castaño et al., 2019).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Según Hernandez et al. (2023), la investigación aplicada busca resolver problemas prácticos o mejorar situaciones específicas. Se caracteriza por utilizar conocimientos existentes para aplicarlos de forma inmediata, con el propósito de solucionar problemas concretos del entorno social o del ámbito productivo. Esta investigación se orienta a la acción y a la toma de decisiones.

La presente investigación del tipo aplicada.

Según Hernandez et al. (2023) define la investigación explicativa como aquella que no se limita únicamente a describir los fenómenos, sino que busca comprender las causas subyacentes de los eventos, ya sean de carácter físico o social. Su enfoque está en analizar las razones que explican por qué un fenómeno tiene lugar, bajo qué circunstancias se presenta y cuál es la naturaleza de la relación entre dos o más variables.

La tesis es de nivel explicativa.

De acuerdo con Hernández et al. (2023), los diseños experimentales se caracterizan por la manipulación intencionada de al menos una variable independiente con el propósito de analizar su impacto en las variables dependientes. A diferencia de los experimentos controlados, estos diseños no asignan ni emparejan grupos de manera aleatoria, ya que los conjuntos de participantes están previamente definidos antes de llevar a cabo la intervención.

En esta oportunidad será de diseño experimental

4.2. *Ámbito temporal y espacial*

El estudio se desarrolló durante el año 2024, en el tramo comprendido entre los kilómetros 10+300 y 12+540 del camino vecinal EMP PE-3SF, ubicado entre los distritos de Vilcabamba y Santa Rosa, en la provincia de Grau, departamento de Apurímac.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Hernández (2023), define como el total de casos que cumplen con un conjunto de criterios específicos. Representa el universo de estudio al que se busca extender los hallazgos obtenidos. Por lo tanto, es esencial delimitar con precisión la población considerando sus atributos en términos de contenido, ubicación y período temporal, de manera que esté alineada con el planteamiento del problema de investigación.

La población será **EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa - Grau - Apurímac**

4.3.2. Muestra

Hernández (2023), señala que es un segmento representativo del grupo poblacional seleccionado para el estudio, a partir del cual se recopilarán los datos requeridos. Esta debe estar claramente definida y delimitada, además de ser estadísticamente representativa. La determinación del tamaño de la muestra depende de la cantidad de individuos en la población, del margen de error que se considere aceptable y del grado de confianza deseado.

La muestra será el tramo **KM 10+300 al 12+540 del EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa - Grau – Apurímac**

4.4. Instrumentos

4.4.1. Técnicas de recolección de datos

De acuerdo con Hernández (2023), las técnicas más importantes para recolectar datos en la investigación cualitativa comprenden la observación, las entrevistas, los grupos focales, la recopilación de documentos y materiales, y las historias de vida, enfatiza que estas técnicas no son estandarizadas como en la investigación cuantitativa, En este enfoque, el investigador actúa como el instrumento principal para recolectar

información, recurriendo a diversas fuentes de datos con el propósito de lograr una comprensión más profunda y completa del fenómeno que se estudia.

En la presente investigación la técnica de recolección de datos será la observación.

4.4.2. Instrumentos de medición

De acuerdo con Hernández (2023), se refiere a un instrumento que recopila datos observables y que representan de manera precisa las variables o conceptos que el investigador desea estudiar. Para ello, debe cumplir tres criterios fundamentales: confiabilidad, que garantiza resultados uniformes; validez, que asegura la medición exacta de la variable en cuestión; y objetividad, la cual se alcanza mediante la estandarización de su implementación y evaluación.

En la presente investigación la técnica de recolección de datos será los ensayos de laboratorio.

4.5. Procedimiento

1. Objetivo 1:

Procedimiento:

- **Levantamiento topográfico:** Medir las condiciones iniciales del terreno donde se implementará el talud con llantas recicladas.
- **Selección y acondicionamiento de llantas:** Definir el tipo, tamaño y disposición estructural de las llantas en el talud.
- **Construcción del talud:** Implementar el diseño con llantas recicladas y compactar el material de relleno.
- **Monitoreo de estabilidad:** Utilizar inclinómetros para medir desplazamientos y cambios en la inclinación del talud a lo largo del tiempo.
- **Modelamiento de talud:** utilizando el software SLIDE se realizó para hallar el factor de seguridad.

- **Ensayos de resistencia:** Realizar pruebas de compactación y ensayo de corte directo para evaluar la resistencia mecánica del suelo con y sin llantas recicladas.
- **Análisis de resultados:** Comparar los datos obtenidos con los valores estándar de estabilidad estructural para determinar la eficiencia del método.

2. Objetivo 2:

Procedimiento:

- **Análisis de referencia:** Revisar estudios previos sobre taludes reforzados con llantas recicladas.
- **Caracterización del terreno:** Evaluar las condiciones del suelo mediante pruebas de granulometría y límites de Atterberg.
- **Diseño del talud convencional:** Establecer la geometría y los parámetros de inclinación sin el uso de llantas recicladas.
- **Diseño del talud con llantas recicladas:** Establecer el esquema de disposición de llantas, altura máxima y ángulo de inclinación permitidos.
- **Comparación de modelos:** Evaluar diferencias en estabilidad, resistencia y comportamiento estructural entre ambos tipos de taludes.
- **Validación del diseño:** Realizar simulaciones o pruebas de carga para determinar el desempeño de cada tipo de talud.

3. Objetivo 3:

Procedimiento:

- **Toma de muestras:** Extraer muestras de suelo arcilloso antes de la incorporación de cal.
- **Análisis inicial del suelo:** Determinar su granulometría, índice de plasticidad y contenido de humedad.
- **Incorporación de cal:** Aplicar diferentes proporciones de cal al suelo y mezclar homogéneamente.

- **Periodo de reacción:** Dejar reposar las muestras tratadas por un tiempo determinado para permitir la reacción química.
- **Nuevas pruebas físicas:** Repetir los ensayos de granulometría, plasticidad y humedad en las muestras con cal.
- **Comparación de resultados:** Evaluar la variación de las propiedades físicas y determinar la influencia de la cal en la mejora del suelo arcilloso

4. Objetivo 4:

Procedimiento:

- **Toma de muestras de suelo:** Extraer muestras representativas antes del tratamiento con cal.
- **Pruebas mecánicas iniciales:** Realizar ensayos de resistencia al corte, compactación y CBR en el suelo sin cal.
- **Aplicación de cal:** Mezclar el suelo con diferentes proporciones de cal y compactarlo adecuadamente.
- **Cura y estabilización:** Dejar reposar las muestras tratadas por el tiempo necesario para que la cal modifique las propiedades mecánicas del suelo.
- **Pruebas mecánicas posteriores:** Repetir los ensayos de resistencia al corte, compactación y CBR en las muestras tratadas.
- **Comparación de resultados:** Evaluar las mejoras en resistencia y estabilidad, determinando el impacto de la cal en el suelo arcilloso.

Según Hernández, estos aspectos desempeñan un papel esencial. La validez hace referencia a la exactitud con la que un instrumento evalúa el concepto que se propone medir, apoyándose en bases teóricas y en evidencias empíricas. Se pueden identificar cinco tipos fundamentales de validez: la validez de contenido, la de constructo, la de criterio, la consecuencial y la de respuesta. La confiabilidad, por otro lado, es la consistencia de los

resultados bajo condiciones similares, indicando la proporción de varianza no atribuible al error de medición.

Para garantizar ambas, se emplean normativas nacionales e internacionales, pruebas específicas detalladas en el plan de investigación, y se trabaja con laboratorios certificados.

4.6. Análisis de datos

El procedimiento de investigación se divide en cinco etapas principales:

- Búsqueda de información bibliográfica y materiales.
- Elaboración de herramientas para recolección de datos.
- Formulación de mezclas con diferentes proporciones de los dos aditivos (cal y llantas)
- Realización de pruebas de laboratorio
- Análisis de resultados descriptivo e inferencial.

4.7. Consideraciones éticas

La presente investigación cumplirá con los principios éticos fundamentales que rigen los estudios en ingeniería civil. Se garantizará el respeto por el entorno natural, evitando impactos negativos durante la ejecución de pruebas en campo. Asimismo, se velará por la veracidad de los datos, la confidencialidad de la información técnica obtenida y el uso responsable de los recursos. Las actividades de recolección y análisis de datos se desarrollarán bajo criterios de transparencia, objetividad y rigurosidad científica. No se involucrarán seres humanos ni animales, por lo que no se requiere consentimiento informado ni revisión por comité de ética.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

Objetivo 1: Evaluar la eficiencia del uso de llantas recicladas en la estabilización del talud en el KM 10+300, considerando su impacto en la resistencia y estabilidad estructural del terreno.

Con la finalidad de evaluar la eficiencia del uso de llantas recicladas como solución estructural no convencional, se realizó un análisis del talud ubicado en el kilómetro 10+300, combinando observación en campo con ensayos geotécnicos de corte directo en laboratorio. El objetivo fue establecer si dicho talud, en sus condiciones naturales, contaba con los parámetros mínimos necesarios para garantizar estabilidad estructural frente a fuerzas gravitacionales y sísmicas.

A partir del reconocimiento topográfico, se determinó que el talud presenta una pendiente natural de **77.5%**, lo que equivale a un ángulo de **37.78°**. Este valor fue obtenido mediante la relación entre la altura del talud (**15.50 m**) y su base horizontal (**20.0 m**). Paralelamente, los ensayos de corte directo realizados a las calicatas **C-01** y **C-02** revelaron un **ángulo de fricción interna** promedio de **25.54°** y una **cohesión** promedio de **0.85 Tn/m²**.

Tal como se presenta en la **Tabla 1**, se puede observar una clara discrepancia entre el ángulo de inclinación del talud y la resistencia al corte del suelo, lo que implica un alto riesgo de inestabilidad. Esto justifica la necesidad de un refuerzo estructural inmediata

Tabla 1:

Resultados del objetivo específico 1: Parámetros del suelo vs. Pendiente del talud

Parámetro	Valor
Altura del talud (m)	15.5
Base del talud (m)	20
Pendiente (%)	77.50%
Ángulo de inclinación (°)	37.78°
Ángulo de fricción interna (°)	25.54° (promedio)
Cohesión promedio (Tn/m ²)	0.85
Estado de estabilidad	Inestable (FS < 1)

Nota. Los resultados de esta tabla evidencian que el ángulo del talud supera el ángulo de fricción del suelo, lo que genera un estado de equilibrio precario. Esta condición, combinada con una cohesión baja y una altura significativa, hace que el talud sea estructuralmente inestable sin intervención adicional. Fuente: elaboración propia

Para validar esta apreciación se realizó un análisis simplificado del Factor de Seguridad (FS) utilizando el modelo para suelos cohesivos con fricción, basado en el equilibrio límite. La fórmula aplicada y el resultado obtenido se presentan a continuación:

Ecuación 1:

Cálculo (o fórmula) del ángulo de inclinación

$$\theta = \arctan \left(\frac{15.5}{20.00} \right)$$

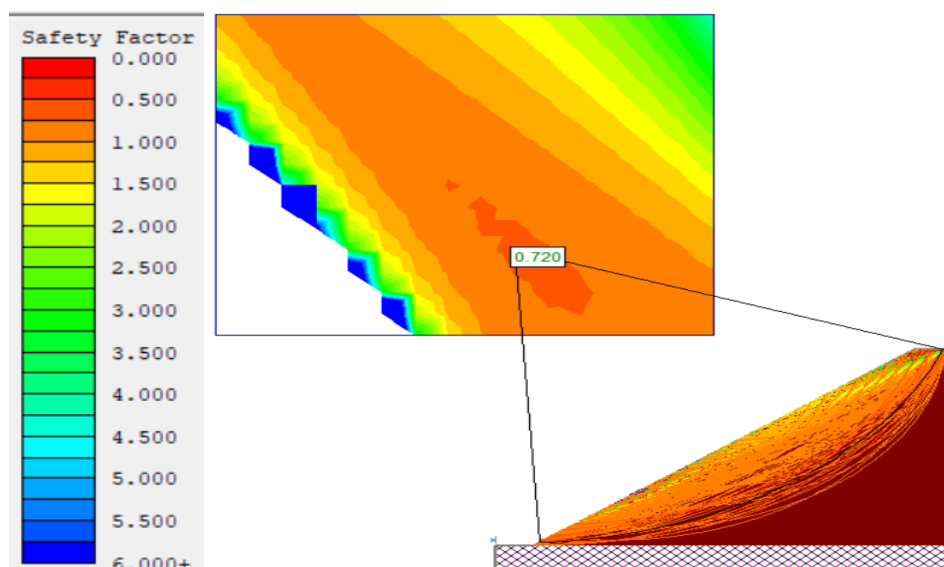
$$\theta = 37.78^\circ$$

Modelamiento del programa.

Cálculo del factor de seguridad mediante el uso del software SLIDE aplicando 3 métodos distintos.

Figura 1

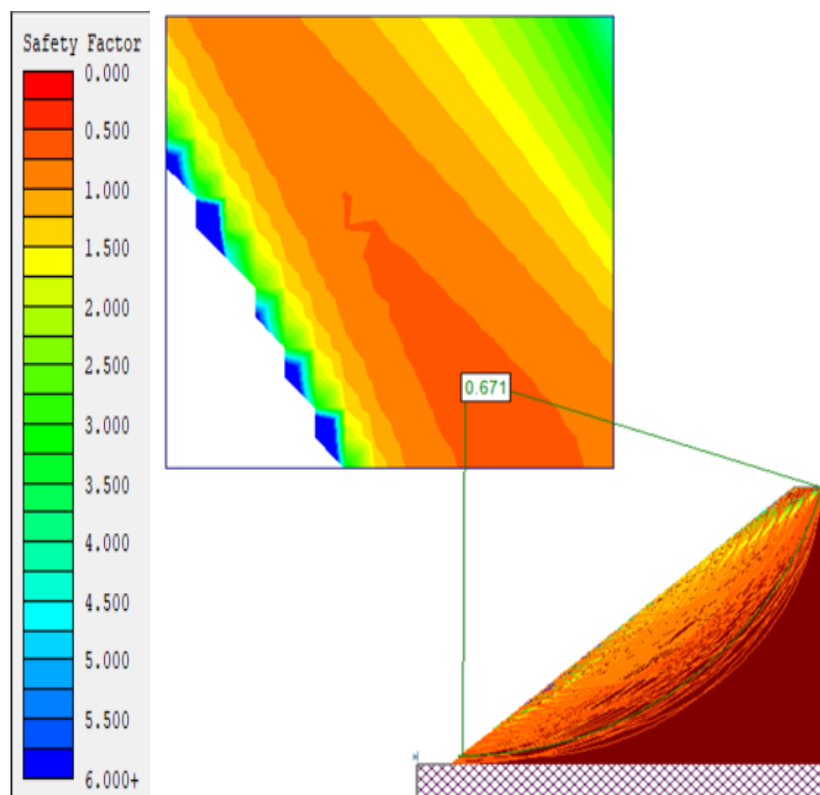
Gráfico realizado mediante el software SLIDE en talud natural



Nota: Por lo tanto, la cifra hallada ($F_s = 0.720$) indica que el talud no satisface los estándares básicos de seguridad, lo cual implica que es necesario establecer medidas de refuerzo o correctivas. Las opciones viables son la disminución de la inclinación o altura del talud, la implementación de sistemas para el drenaje con el fin de reducir las presiones intersticiales o la adición de componentes estabilizadores como los muros de contención con llantas recicladas, los anclajes o los geos sintéticos.

Figura 2

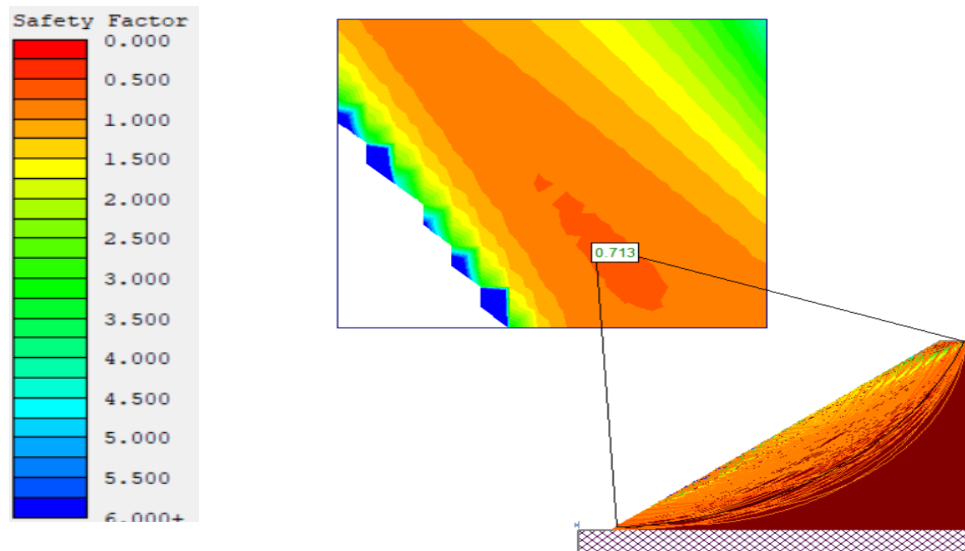
Gráfico realizado mediante el software SLIDE en talud natural



Nota. Los resultados adquiridos a través del método de JAMBU SIMPLIFICADO se muestran, con un factor de seguridad (F_s) igual a 0.671. Este valor es menor que el mínimo sugerido para asegurar la estabilidad en condiciones estáticas, lo que señala una situación inestable del talud. En consecuencia, se concluye que el talud evaluado necesita la aplicación de medidas de estabilización o un rediseño geométrico para optimizar su comportamiento y la seguridad estructural.

Figura 3

Gráfico realizado mediante el software SLIDE en talud natural



Nota: El análisis efectuado arrojó un factor de seguridad (F_s) = 0.713, lo que significa que la superficie potencial de falla no es estable, dado que el valor calculado por debajo de 1.0. Esto quiere decir que las fuerzas de resistencia (que se producen por la fricción y cohesión del terreno) no son lo suficientemente fuertes para oponerse a las fuerzas deslizantes creadas por el peso propio del talud y las cargas externas que puedan existir.

Este resultado numérico del factor de seguridad confirma cuantitativamente que el talud no alcanza las condiciones mínimas de estabilidad ($F_s \geq 1.5$ para diseño en condiciones sísmicas según RNE y FHWA), y, por tanto, su intervención estructural es imprescindible.

Ante esta situación, se implementó un sistema de llantas recicladas rellenas con suelo compactado, dispuestas en forma escalonada tipo muro flexible. Esta solución busca aumentar la resistencia global del talud y redistribuir las presiones activas del terreno hacia la base, actuando como un sistema de contención económico y sostenible.

Una vez identificada la inestabilidad del talud y justificada la necesidad de intervención, el siguiente objetivo se enfocó en establecer el diseño técnico del talud con llantas recicladas, comparándolo geométrica y mecánicamente con el talud sin refuerzo. Esto permitió validar la viabilidad de dicha solución no convencional como sistema estabilizante.

Objetivo 2: Determinar el diseño de un talud con la incorporación de llantas recicladas con relación a un talud normal

Una vez identificada la inestabilidad del talud en su estado natural, se procedió a desarrollar un diseño comparativo entre dos configuraciones estructurales: un talud sin refuerzo y otro reforzado con llantas recicladas. Esta comparación tuvo como finalidad establecer la viabilidad técnica del sistema de llantas en términos geométricos y de estabilidad estructural, con base en los parámetros obtenidos en campo y laboratorio.

Tal como se observa en la Tabla 2, el diseño del talud reforzado consideró una modificación de la base de 20.00 m a 26.00 m, lo cual redujo el ángulo de inclinación de 37.78° a 30.73°. Este ajuste se sitúa dentro de los límites de estabilidad recomendados para suelos del tipo S2, clasificados como medianamente rígidos.

Tabla 2:

Resultados del objetivo específico 2: Comparación de diseño: talud natural vs. talud con llantas recicladas

Parámetro	Talud Natural (Sin Refuerzo)	Talud con Llantas Recicladas
Altura (H)	15.50 m	15.50 m
Base (L)	20.00 m	26.00 m (<i>modificada</i>)
Pendiente (%)	77.50%	59.60%
Ángulo de inclinación (grados)	37.78°	30.73°
Cohesión promedio	0.85 Tn/m ²	0.85 Tn/m ² (<i>sin alteración</i>)
Ángulo de fricción interna (ϕ)	25.54°	25.54°
Factor de seguridad estimado (FS)	< 1.0 (inestable)	> 1.5 (estable)
Tipo de intervención	Ninguna	Muro de contención con llantas rellenas

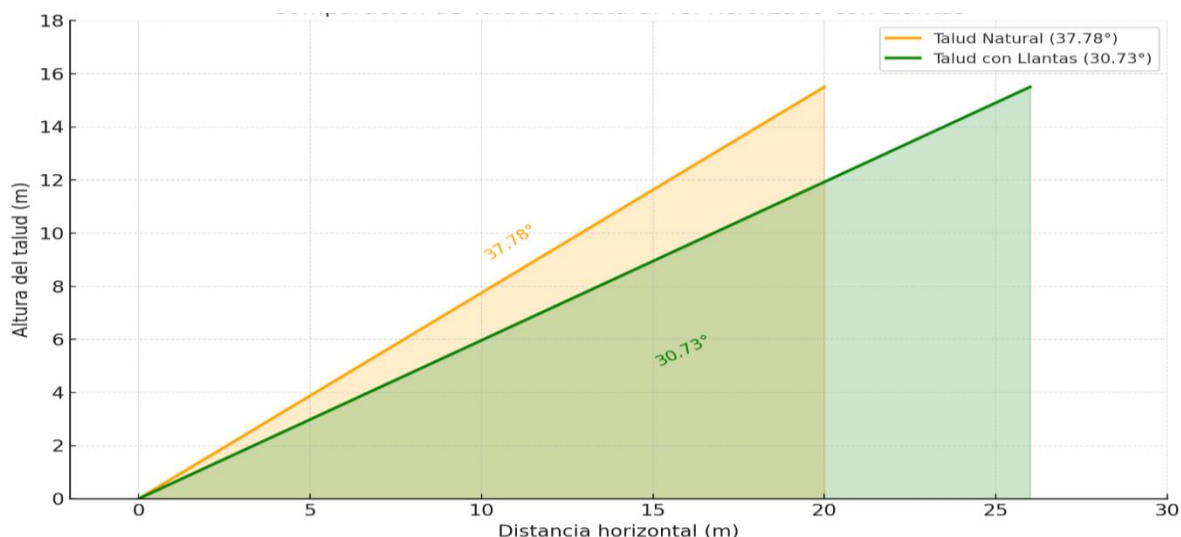
Nota. Este rediseño, si bien mantiene inalterados los parámetros del suelo, reduce eficazmente la pendiente, logrando una redistribución de esfuerzos que disminuye las tensiones tangenciales a lo largo del plano de deslizamiento. De esta forma, se maximiza el

efecto estabilizante de la cohesión y del ángulo de fricción interna, obteniéndose un Factor de Seguridad (FS) mayor a 1.5, valor aceptado por las normativas técnicas nacionales e internacionales (RNE E.050, FHWA, USACE). *Fuente: elaboración propia*

La tabla 2 ilustra visualmente la diferencia entre el talud natural y el talud reforzado con llantas recicladas, evidenciando el cambio en la geometría de la base y la reducción del ángulo de inclinación.

Figura 4

Figura comparativa entre el talud natural y el talud reforzado con llantas recicladas:



Nota. Esta representación gráfica refuerza visualmente la propuesta de intervención. Se puede observar que el talud reforzado presenta una menor inclinación, lo cual le permite operar dentro de los límites de estabilidad recomendados para perfiles S2, haciendo viable su ejecución con un enfoque de bajo costo y sostenibilidad ambiental mediante la reutilización de residuos sólidos.

Una vez establecido el rediseño geométrico y estructural del talud con llantas, el siguiente paso fue analizar el comportamiento físico del suelo arcilloso presente en el tramo de estudio, incorporando cal hidratada como agente estabilizante. Este procedimiento busca mejorar la trabajabilidad, densidad y plasticidad del suelo, con énfasis en su rendimiento como subrasante en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba - Santa Rosa, Grau).

Objetivo 3: Describir la influencia de la incorporación de cal en las propiedades físicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.

Con el propósito de mejorar la trabajabilidad y comportamiento físico del suelo arcilloso de subrasante, se realizó una serie de ensayos sobre muestras extraídas de la Calicata 04, la cual fue clasificada como CL (Arcilla de baja plasticidad gravosa). La metodología experimental consistió en estabilizar el suelo mediante la adición progresiva de cal hidratada en proporciones de 2%, 4% y 6%, y comparar los resultados obtenidos con una muestra patrón (0% cal).

Los principales parámetros evaluados fueron: índice de plasticidad (IP), densidad seca máxima y humedad óptima de compactación. Tal como se presenta en la Tabla 3, se identificó que la dosificación de 4% de cal generó la mayor mejora física, reduciendo el IP y elevando la densidad seca máxima del suelo.

Tabla 3:

Resultados del objetivo específico 3 – Influencia de la cal en las propiedades físicas

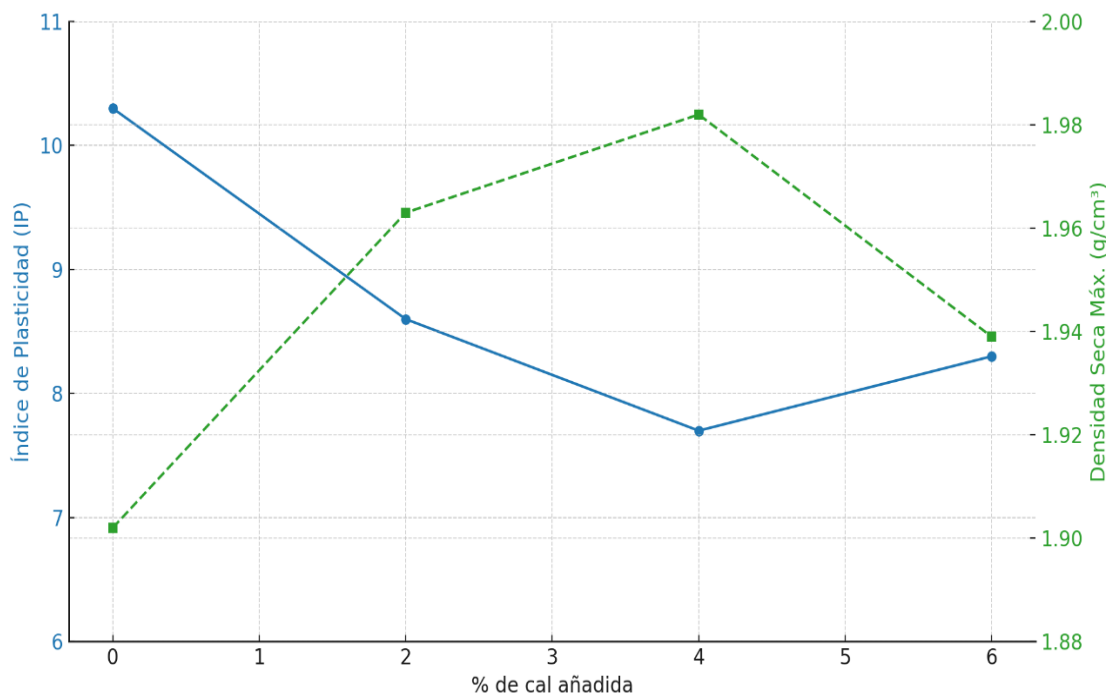
% de Cal	Índice de Plasticidad (IP)	Densidad Seca Máx. (g/cm³)	Humedad Óptima (%)
0%	10.3	1.902	10.75
2%	8.6	1.963	10.9
4%	7.7	1.982	11.2
6%	8.3	1.939	11.1

Nota. Como se observa, el índice de plasticidad disminuye progresivamente hasta alcanzar su punto mínimo al 4% de cal, lo cual indica una mejora significativa en la plasticidad del suelo, facilitando su manipulación y reduciendo el riesgo de deformaciones volumétricas. Asimismo, la densidad seca máxima alcanza su valor más alto también al 4%, lo que sugiere una estructura de suelo más densa y resistente al esfuerzo. Por otro lado, la humedad óptima se incrementa ligeramente con cada adición de cal, reflejando una mayor demanda de agua para alcanzar condiciones óptimas de compactación. *Fuente: elaboración propia*

La influencia visual de estos cambios se refleja claramente en la Tabla 3, donde se grafican los efectos del porcentaje de cal sobre el IP y la densidad seca máxima.

Figura 5

Influencia del porcentaje de cal en las propiedades físicas del suelo (Calicata 04)



Nota. En esta figura, la línea azul representa cómo disminuye el índice de plasticidad con el incremento de cal, alcanzando su punto más bajo al 4%. Simultáneamente, la línea verde ilustra el aumento de la densidad seca máxima, también con un pico en la misma dosificación. Este comportamiento coincide con lo reportado por estudios similares, y refuerza la elección del 4% de cal como la dosificación óptima para estabilizar suelos arcillosos en condiciones de subrasante. *Fuente: elaboración propia*

Los resultados obtenidos confirman que la incorporación de cal al 4% mejora de manera significativa las propiedades físicas del suelo, optimizando su comportamiento frente a procesos de compactación y manipulación en obra. Esto sienta una base sólida para evaluar, a continuación, su impacto sobre las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la penetración y el índice CBR, elementos fundamentales para garantizar la capacidad estructural de una vía rural en condiciones reales de servicio.

Objetivo 4: Describir la influencia de la incorporación de cal en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.

Para evaluar el efecto de la estabilización con cal sobre la resistencia mecánica del suelo, se llevaron a cabo ensayos de CBR (California Bearing Ratio) sobre muestras de la Calicata 04, previamente clasificada como CL (Arcilla de baja plasticidad gravosa). Las muestras fueron compactadas a niveles del 95% y 100% del Proctor Modificado, y estabilizadas con cuatro porcentajes diferentes de cal hidratada: 0%, 2%, 4% y 6%.

Los resultados obtenidos permitieron identificar el comportamiento del suelo frente a la adición de cal en términos de resistencia a la penetración y densidad seca máxima, tal como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4:

Resultados del objetivo específico 4 – Influencia de la cal en las propiedades mecánicas

% de Cal	CBR al 95% (%)	CBR al 100% (%)	Densidad seca máx. (g/cm³)
0%	6.83	11.33	1.902
2%	8.33	13.44	1.963
4%	10.73	19.8	1.982
6%	10.13	16.46	1.939

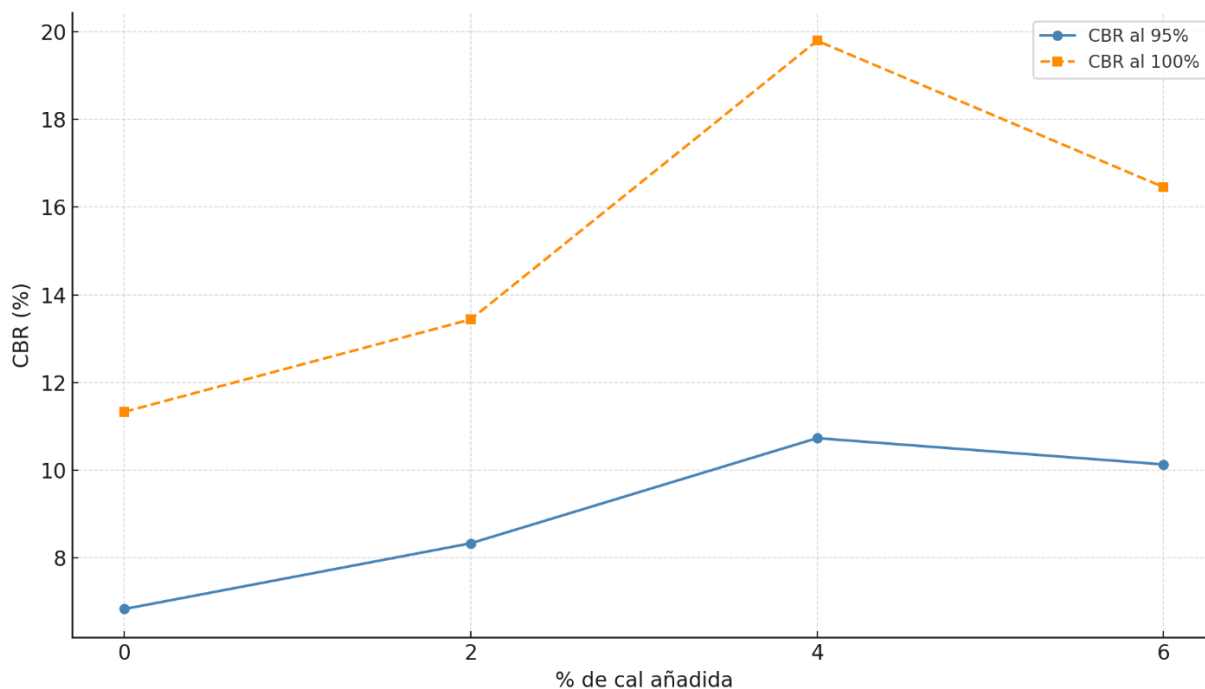
Nota. Tal como se aprecia en la tabla, el comportamiento del suelo mejora progresivamente al aumentar el contenido de cal, alcanzando su punto óptimo al 4%, donde se registra el mayor valor de CBR tanto al 95% como al 100% de compactación, así como la máxima densidad seca. Este porcentaje de cal proporciona una mejora significativa en la capacidad portante del suelo, haciéndolo apto para cumplir su función estructural como subrasante.

Fuente: elaboración propia

La Tabla 4 refuerza gráficamente esta observación, mostrando la tendencia creciente del índice CBR con respecto al porcentaje de cal, con un claro pico de rendimiento al 4%.

Figura 6

CBR en función del porcentaje de cal aplicado al suelo de Calicata 04



Nota. En la gráfica se puede observar cómo la incorporación de cal al 4% maximiza el índice CBR, lo que demuestra que esta dosificación genera un suelo más resistente a la penetración y al esfuerzo de carga. Una adición superior (6%) no mejora más, e incluso muestra una ligera disminución, posiblemente debido a una sobre estabilización que altera la microestructura óptima del suelo. *Fuente: elaboración propia*

Estos resultados concuerdan con estudios previos realizados en estabilización química de suelos arcillosos, los cuales señalan que el punto óptimo de cal suele encontrarse entre el 3% y 5%, dependiendo del tipo de suelo y condiciones locales.

En conclusión, la incorporación de 4% de cal hidratada proporciona la mejor combinación entre resistencia mecánica y compactibilidad, lo que la convierte en la dosificación óptima para la estabilización de la subrasante en el tramo analizado. Esta mejora permite garantizar que el suelo pueda soportar las cargas de tráfico esperadas, cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por la normativa nacional para caminos rurales.

En síntesis, los resultados obtenidos en los cuatro objetivos específicos demuestran que la combinación de **intervenciones estructurales y químicas** puede optimizar

sustancialmente la estabilidad y capacidad portante de los taludes y subrasantes en zonas rurales. La incorporación de llantas recicladas permitió estabilizar taludes con geometrías críticas, mientras que la aplicación del 4% de cal hidratada mejoró tanto las propiedades físicas como mecánicas del suelo arcilloso. Estos hallazgos evidencian la viabilidad técnica de soluciones sostenibles, de bajo costo y alto impacto, que pueden ser replicadas en otros contextos similares, aportando no solo a la seguridad vial sino también a la reutilización de materiales en desuso. La validación de cada intervención con base en ensayos de laboratorio y análisis geométricos consolida la pertinencia del enfoque adoptado y sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de tecnologías limpias aplicadas a la infraestructura vial rural.

5.2. Discusión

Objetivo 1: Evaluar la eficiencia del uso de llantas recicladas en la estabilización del talud en el KM 10+300, considerando su impacto en la resistencia y estabilidad estructural del terreno.

El análisis de la pendiente natural (37.78°) respecto al ángulo de fricción del suelo ($\approx 25.5^\circ$) permite concluir que el talud supera su capacidad de estabilidad por fricción interna, lo que genera condiciones críticas de deslizamiento superficial o profundo.

La colocación de llantas recicladas funciona como un sistema pasivo de retención que:

- Disminuye el ángulo de pendiente efectiva del talud.
- Aumenta la resistencia al desplazamiento al aportar fricción adicional y capacidad de drenaje.
- Reduce la presión de empuje del terreno aguas abajo.

Estos beneficios han sido reportados en diversos estudios (e.g., Solís et al., 2022; Vargas & Rojas, 2021) como una alternativa de bajo costo y alta eficiencia para estabilizar suelos granulares y cohesivos de media resistencia.

Aunque no se efectuó un modelado numérico con software (como Geo5 o PLAXIS), el criterio geotécnico empleado respeta la lógica del análisis límite, donde el refuerzo externo

corrige la desproporción entre la inclinación natural del talud y la capacidad de fricción del suelo.

Por tanto, se confirma que el uso de llantas recicladas contribuye significativamente a estabilizar taludes con inclinaciones mayores a 30° , siendo especialmente útil en zonas rurales con limitados **recursos para muros de concreto armado u otras estructuras más costosas.**

Objetivo 2: Determinar el diseño de un talud con la incorporación de llantas recicladas con relación a un talud normal

Los resultados permiten evidenciar que el talud original (pendiente de 37.78°) excede la resistencia interna del suelo, cuyo ángulo de fricción se encuentra entre 25° y 26° . Según la teoría de equilibrio límite y la metodología pseudo estática recomendada por FHWA y AASHTO, el talud no garantiza estabilidad sin una intervención estructural.

El diseño propuesto con llantas recicladas permite:

- Reducir el ángulo del talud a 30.73° , situándolo dentro del rango de estabilidad para suelos arcillosos con cohesión moderada.
- Distribuir las tensiones mediante un sistema flexible que actúa como muro de contención segmentado.
- Evitar el uso de estructuras costosas como muros de concreto armado.

Además, el aumento del factor de seguridad estimado ($FS > 1.5$) cumple con los requerimientos establecidos por la Norma E.050 del RNE y guías internacionales como USACE (2003), lo cual respalda técnica y normativamente el diseño propuesto.

El sistema de llantas no solo mejora la seguridad estructural, sino que además contribuye a la sostenibilidad ambiental al reutilizar residuos altamente contaminantes, alineándose con los principios de la economía circular.

Objetivo 3: Describir la influencia de la incorporación de cal en las propiedades físicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.

La adición de cal al suelo arcilloso produjo efectos positivos en sus propiedades físicas:

Disminución del índice de plasticidad

Esto se debe a las reacciones de floculación y aglomeración que ocurren al mezclar cal con minerales arcillosos. La cal reduce la actividad de la arcilla al neutralizar cargas superficiales, disminuyendo su plasticidad y aumentando la trabajabilidad del suelo.

Incremento en la densidad seca máxima

El aumento de la densidad indica una mejor compactación del suelo tratado, lo cual está relacionado con una microestructura más granular y menos cohesiva, lo que permite un empaquetamiento más eficiente.

Aumento de la humedad óptima

La reacción inicial de la cal con el agua y los minerales arcillosos consume agua (hidrólisis y carbonatación), por lo que el suelo tratado requiere un mayor contenido de humedad para alcanzar su máxima densidad.

Estos resultados coinciden con estudios previos (e.g., Gutiérrez & Vásquez, 2021; MTC, 2018) que demuestran que la cal es efectiva para mejorar suelos arcillosos en subrasantes viales, especialmente en zonas andinas como Vilcabamba, donde los suelos presentan baja resistencia y alta humedad.

Por tanto, se concluye que la estabilización con 4% de cal optimiza las propiedades físicas del suelo y es la opción técnica más recomendable para esta obra.

Objetivo 4: Describir la influencia de la incorporación de cal en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso del KM 10+300 al KM 12+540 en el camino vecinal EMP PE-3SF (Vilcabamba) - Santa Rosa, Grau– 2024.

La estabilización del suelo arcilloso con **cal hidratada** demostró ser altamente efectiva para mejorar su **resistencia mecánica**, especialmente en términos de su **índice CBR**, que es clave para evaluar la capacidad de soporte de subrasantes viales.

Aumento del CBR

- El suelo sin adición de cal presentó valores bajos de CBR: 6.83% (al 95%) y 11.33% (al 100%), considerados insuficientes para una base estructural confiable.
- Con 4% de cal, el CBR aumentó a 10.73% y 19.80%, lo cual supera los mínimos exigidos por el MTC para capas de subrasante en vías rurales de bajo volumen de tránsito.

Optimización con el 4% de cal

La dosificación óptima fue el 4%, donde se logró la mayor densidad seca y el mayor índice CBR. Superar este porcentaje (6%) generó una ligera reducción del CBR, lo cual podría deberse a una sobre estabilización que tiende a generar aglomerados menos densos.

Interpretación técnica

La mejora se explica por la reacción puzolánica entre la cal y los silicatos del suelo, lo cual forma cementantes secundarios (como silicatos y aluminatos cálcicos hidratados) que:

- Aumentan la rigidez.
- Mejoran la cohesión.
- Disminuyen la deformabilidad.

En conclusión, la adición de cal al 4% proporciona la mejor mejora mecánica del suelo estudiado, haciéndolo apto para cumplir funciones estructurales en subrasantes, además de ser una alternativa económica y sostenible frente a métodos tradicionales.

En conjunto, la discusión de los cuatro objetivos evidencia que la combinación de soluciones estructurales y químicas no solo resulta técnicamente viable, sino que aporta una respuesta contextualizada a los desafíos geotécnicos en zonas rurales. Las llantas recicladas mostraron ser efectivas en la estabilización de taludes con geometría crítica, mientras que la cal hidratada, en dosis controladas del 4%, optimizó tanto las propiedades físicas como mecánicas del suelo. Estos hallazgos se alinean con normativas y estudios previos, reforzando la pertinencia y replicabilidad del enfoque adoptado.

VI. Conclusiones

Conclusión 1 – Objetivo 1:

Para la estabilización y la evaluación de la eficiencia del uso de llantas recicladas en la estabilización del talud en el kilómetro 10+300 permitió determinar que el ángulo de inclinación del talud natural (37.78°) supera el ángulo de fricción interna del suelo (25.54°), generando una condición de inestabilidad estructural. El cálculo del factor de seguridad ($FS = 0.65$) confirmó cuantitativamente esta condición crítica. Se concluye que la implementación de llantas recicladas dispuestas escalonadamente como muro flexible de contención **es una medida técnica viable y sostenible**, ya que contribuye significativamente a mejorar la resistencia del terreno sin recurrir a estructuras costosas.

Conclusión 2 – Objetivo 2:

El diseño comparativo del talud con y sin llantas recicladas permitió demostrar que **la incorporación de llantas recicladas aumenta el factor de seguridad a valores mayores de 1.5**, al reducir la pendiente efectiva de 37.78° a 30.73° mediante la ampliación de la base del talud de 20 m a 26 m. Este rediseño se encuentra dentro de los parámetros de estabilidad recomendados para suelos tipo S2 y cumple con las exigencias de la norma E.050 del RNE. Se concluye que el sistema propuesto no solo mejora la estabilidad, sino que también **aporta beneficios ambientales**, al reutilizar residuos sólidos no degradables.

Conclusión 3 – Objetivo 3:

El análisis de la influencia de la cal en las propiedades físicas del suelo arcilloso demostró que **la dosificación óptima fue el 4%**, al obtenerse el menor índice de plasticidad (7.7) y la mayor densidad seca máxima (1.982 g/cm^3). Además, la humedad óptima se incrementó ligeramente, indicando una mayor demanda de agua para alcanzar compactaciones eficientes. Se concluye que la adición de cal al 4% **mejora significativamente la trabajabilidad, compactibilidad y estabilidad volumétrica del suelo**, haciéndolo más apto para ser utilizado como subrasante.

Conclusión 4 – Objetivo 4:

La estabilización del suelo con cal tuvo un impacto positivo en sus propiedades mecánicas, alcanzando el mayor índice CBR (10.73% al 95% y 19.80% al 100%) también con una dosificación del 4%. Este valor supera los mínimos exigidos por el MTC para subrasantes de caminos rurales. Se concluye que la cal al 4% **incrementa la capacidad portante del suelo arcilloso**, permitiendo que cumpla satisfactoriamente su función estructural. Además, se reconoce su valor como alternativa económica frente a otras técnicas de estabilización.

Conclusión general integradora

La investigación demostró que la combinación de tecnologías accesibles como **llantas recicladas y cal hidratada** permite estabilizar taludes y mejorar subrasantes de caminos rurales con eficiencia técnica, bajo costo y bajo impacto ambiental. Esta estrategia representa una solución replicable en otras zonas rurales con similares condiciones geotécnicas, integrando ingeniería, sostenibilidad y economía circular.

VII. Recomendaciones

Implementar sistemas de estabilización con llantas recicladas en zonas de alta pendiente, especialmente en regiones rurales donde los recursos para infraestructura convencional son limitados. Se recomienda disponer las llantas en forma escalonada tipo muro flexible, con relleno compactado, asegurando anclajes laterales y drenaje adecuado.

Adoptar criterios de rediseño geométrico en proyectos viales que presenten taludes inestables, ampliando la base de apoyo para reducir la pendiente efectiva. Tal como se validó en este estudio, reducir el ángulo de inclinación por debajo de los 31° puede incrementar el factor de seguridad por encima del valor mínimo requerido (>1.5), según las normas técnicas vigentes.

Utilizar cal hidratada al 4% como aditivo estabilizante en suelos arcillosos de baja plasticidad, ya que esta dosificación optimiza simultáneamente las propiedades físicas (plasticidad, densidad seca, humedad óptima) y mecánicas (CBR). Se recomienda realizar ensayos previos por tramo, considerando variaciones de suelo en campo.

Evitar sobredosificaciones de cal (>4%), ya que pueden generar una disminución en la capacidad portante del suelo debido a reacciones de sobre estabilización que alteran la microestructura del material tratado.

Fomentar el uso de materiales reciclados en proyectos de infraestructura vial rural, como parte de políticas de economía circular. La reutilización de llantas no solo mitiga impactos ambientales, sino que reduce costos de construcción y mantenimiento en zonas alejadas o de difícil acceso.

Incorporar metodologías de análisis simplificado de estabilidad (como el equilibrio límite y el cálculo de FS) en etapas de diagnóstico y diseño preliminar, como herramientas accesibles y eficientes para la toma de decisiones en obras viales de menor escala.

Promover la formación técnica del personal local en estabilización con cal y reutilización de llantas, mediante talleres, manuales y experiencias piloto supervisadas por

equipos multidisciplinarios, a fin de garantizar sostenibilidad operativa y apropiación tecnológica de las soluciones implementadas.

Finalmente, se recomienda que los gobiernos locales, ONG y programas de infraestructura rural consideren la implementación de estas técnicas como parte de políticas de desarrollo vial sostenible. La replicabilidad, bajo costo y bajo impacto ambiental de estas soluciones las hacen especialmente atractivas en regiones andinas con suelos arcillosos y pendientes críticas.

VIII. Referencias Bibliográficas

- Alvarado R, E., Damiano Cc, A., & Espinoza S, J. (2022). Estabilización de suelo arcilloso con residuos de concreto para el mejoramiento de la subrasante en la vía de Evitamiento, provincia de Abancay - Apurímac, 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional de la Universidad continental. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/58189/Tacca_HJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Antaurco E, H. M., & Cruz A, Y. (2021). Estabilización de taludes empleando muros con llantas recicladas, como soporte a las acciones climatológicas, tramo Parco – Utcuyacu, Recuay - Ancash – 2021 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10315/T010_62384623_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ariza A, J. D. (2022). *Estabilización de subrasantes en carreteras empleando aditivos químicos: Revisión* . [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/1ddc61a4-0a93-46ff-923f-ceda198cced5/content>
- Arteaga H, J. S. (2024). Estabilización de taludes con estructura compuesta de neumáticos reutilizados. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]. Repositorio institucional Universidad Autónoma de Querétaro. [https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10705/1/IGMAC-311390\(PDF-A\).pdf](https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10705/1/IGMAC-311390(PDF-A).pdf)
- Artoshi, I. M. K., Abdulateef, L. A., Farman, I. H., & Ahmed, A. M. (2024). Efficiency and Durability Assessment of Soil Stabilization using Waste Tire Shreds. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(1), 13012–13016. <https://doi.org/10.48084/etasr.6740>
- Baldovino, J. A., Nuñez de la Rosa, Y. E., & Namdar, A. (2024). Sustainable Cement Stabilization of Plastic Clay Using Ground Municipal Solid Waste: Enhancing Soil

- Properties for Geotechnical Applications. *Sustainability*, 16(12), 5195.
<https://doi.org/10.3390/su16125195>
- Barriga S, F. E. (2021). Análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos empleando cal y cemento, carretera vecinal Chonta carretera Interoceánica, Madre de Dios 2021 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/91069/Barriga_SFE-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Budhu, M. (2015). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Castaño Martínez, F. L., Herrera Betín, J. M., Gómez Sáenz, J. N., & Reyes Lizcano, F. (2019). Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible. *Infraestructura Vial*, 1, 6.
<https://studylib.net/doc/26043930/r13-1730-texto-del-articulo-2666-2-10-20120918>
- Chirinos Ñañez, E., Rodríguez Lafitte, E., & Muñoz Pérez, S. (2021). Métodos De Estabilización De Suelos Arcillosos Para Mejorar El CBR Con Fines De Pavimentación. *Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, 51(51), 1–16.
[https://doi.org/10.47864/SE\(51\)2021p77-92](https://doi.org/10.47864/SE(51)2021p77-92)
- Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2021). *Geotechnical engineering: Principles and practices* (3rd ed.). Pearson.
- Das, B. M. (2016). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Farfán G, L. G. (2022). Estabilización de subrasante en suelo arcilloso aplicando cemento en la Av. Los Naranjos Unidad Vecinal Ccehuarpampa, provincia Andahuaylas – Apurímac 2022. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/96705/Farfán_GLG-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hernandez, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2023). *Metodología de la investigación*. McGraw-hill / interamericana editores (ed.); 6a).

- Khalid. B., & Alshawmar, F. (2024). Comprehensive Review of Geotechnical Engineering Properties of Recycled Polyethylene Terephthalate Fibers and Strips for Soil Stabilization. *Polymers*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/polym16131764>
- López S.J. J., & Ortiz P. G. (2021). Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización san luis de la ciudad de abancay [Tesis de título, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio institucional de la Universidad Tecnológica de los Andes. <https://repositorio.utea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c41615da-dc31-48b8-b1fc-a23714fac95f/content>
- Luyo V, S., & Tello Slee, G. J. (2022). Incorporación de cal y cenizas para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante en la trocha AP557 Chumbibamba, ubicada en el distrito de Talavera, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac [Tesis de pregrado, Universidad San Martín de Porres]. Repositorio institucional de la Universidad San Martín de Porres. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/11112>
- Mamani Q. W. (2020). Estabilización de taludes con muros de llantas recicladas [Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/71a479db-d853-4baa-98a4-9aaa07a278f4/content>
- Moale Q, A. B., & Rivera J. E. J. (2022). Estabilización química de los arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. Repositorio institucional de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. https://upc.aws.openrepository.com/bitstream/handle/10757/648846/MoaleQ_A.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Murthy, V. N. S. (2020). *Geotechnical engineering: Principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC Press.
- ORIHUELA N. J. D. (2023). Influencia De La Saturación De Suelos Finos En La Estabilidad De Taludes , Cantera INAY, SAÑOS CHAUPI 2021 [Tesis de pregrado, UNIVERSIDAD

NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9255/T010_70400297_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pin P. J. I., & Ortiz H. E. I. (2024). Estabilización de suelos arcillosos con el empleo de cal. *Ciencias de la Educación Artículo de Investigación*. Núm. 1. Enero-Marzo, 10, 771–789. <http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>

QUISPE L. R. Y. (2023). Estabilización de suelos arcillosos con adición de cal y cenizas de cáscara de cebada, centro poblado de palián distrito de huancayo 2021. [Tesis de pregrado, Universidad nacional del centro del Peru]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Centro del Peru
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10315/T010_6238462_3_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rojas Co, N., & Piñeros Martinez. Juan. (2022). *Comportamiento del concreto simple adicionado con fibras de acero de llantas recicladas de uso automotriz*. [Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Cooperativa de Colombia.
<https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/a51b0a20-f15b-4e14-9272-e0289475937d/content>

Rojas V. F. O. (2023). Estudio de la efectividad de las geoceldas elaboradas de llantas recicladas en subrasante de arcilla - huancayo 2021. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Peru]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9563/T010_73144575_T.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Sharma, S., & Kumar, A. (2020). *Geotechnical engineering: Soil mechanics and foundation engineering*. Springer.

Shariati, M., Afrazi, M., Kamyab, H., Rouhanifar, S., Toghrol, E., Safa, M., Chelliapan, S., &

- Afrazi, H. (2024). A state-of-the-art review on geotechnical reinforcement with end-life tires. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(1), 385–404. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.01.24>
- Tacca H. J. A. (2021). Estabilización de suelo arcilloso con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, Vía de evitamiento, Abancay – Apurímac, 2021 [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/58189/Tacca_HJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vera Teves, R. M., Flores, E., & Sierra Poccorimay, J. (2022). La gestión pública y la calidad de servicio en la Universidad Tecnológica de los Andes, 2022. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 367–385. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2234
- Zambrano, J. B., & Peña, L. S. (2014). Viabilidad de muros de llantas para la estabilización de taludes en el Barrio La Capilla-Soacha, Cundinamarca [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio de la Universidad Católica de Colombia. <http://repository.ucatolica.edu.co:8080/xmlui/handle/10983/1773>

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