

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Efecto de la adición de óxido de calcio en la estabilidad de talud arcilloso en el sector
de Umaccata baja, Abancay, Apurímac, 2025**

Asesor:

Ph. D Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Caballero Quispe, Jean Carlos

Para optar el Título Profesional de: Ingeniero Civil

Abancay-Apurímac-Perú

2026

Acta de sustentación



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 049

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los dieciséis (16) días del mes de julio del 2026, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0593-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Mag. ROLDAN JUAREZ, Américo
Dictaminante	:	Mag. LEGUIA VALVERDE, Willy Silvestre
Replicante	:	Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Hassan

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis

☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: **Efecto de la adición de óxido de calcio en la estabilidad de talud arcilloso en el sector de Umaccata baja, Abancay, Apurímac, 2025**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br. CABALLERO QUISPE, Jean Carlos

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) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐.

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. CABALLERO QUISPE, Jean Carlos	14	APROBADO

Siendo las 11:57 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. ROLDAN JUAREZ, Américo

()

Dictaminante: Mag. LEGUIA VALVERDE, Willy Silvestre

()

Replicante: Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Hassan

()

Nota: Desaprobado: 0-10; Aprobado: 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud

JEAN CARLOS CABALLERO QUISPE

TESIS CON DEPOSITO

 Efecto de la adición de óxido de calcio en la estabilidad de talud arcilloso en el sector de Umaccata baja, Abancay, Apurímac, 2025

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:628135116

Fecha de entrega

22 sept 2026, 12:25 GMT-5

Fecha de descarga

22 sept 2026, 12:28 GMT-5

Nombre del archivo

TESIS CON DEPOSITO.pdf

Tamaño del archivo

10.6 MB

176 páginas

24.570 palabras

135.820 caracteres



Página 2 de 185 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:628135116

16% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

▸ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

16%  Fuentes de Internet

4%  Publicaciones

0%  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	:	Caballero Quipe, Jean Carlos
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	71573624
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0008-3033-2248
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
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	:	2025
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	16%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A mis padres, Rubén y Sonia, por constituir el pilar fundamental de mi formación personal y académica; por su orientación constante, su paciencia infinita y por inculcarme, a través de su ejemplo, que los logros se alcanzan con esfuerzo sostenido, disciplina y humildad.

A mi familia, Katherine, Keyla Meylin, Jean Franco y Kael Ramiro, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza permanente a lo largo de cada etapa de este proceso académico, incluso en los momentos en que las dificultades parecían superar las metas trazadas.

Caballero Quipe, Jean Carlos

Agradecimientos

A mi asesor de tesis, al ingeniero Ph. D. Alex Abbon Vásquez Ramírez, por su valioso acompañamiento académico, orientación constante y disposición permanente a lo largo del desarrollo de la presente investigación.

A mis docentes, por su guía, paciencia y dedicación, así como por compartir su experiencia y conocimientos, brindándome las herramientas necesarias para mi formación académica y crecimiento personal.

A, Helen Sonaly, quien con sus gestos cotidianos llenaron de esperanza mis días y transformaron el cansancio en fortaleza. Por cada abrazo oportuno, por su confianza silenciosa pero firme, dedico estas páginas con profunda gratitud y eterno amor.

Caballero Quipe, Jean Carlos

Resumen

La presente tesis determina la influencia la adición de óxido de calcio en la estabilidad de un talud arcilloso ubicado en el sector Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, durante el año 2025. La investigación busca evaluar el mejoramiento de los parámetros de resistencia al corte, específicamente la cohesión y el ángulo de fricción, y su efecto sobre el factor de seguridad del talud.

Se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño experimental de tipo aplicado y nivel explicativo. Las muestras fueron extraídas de dos puntos de investigación seleccionados según su contenido de arcilla. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, los materiales fueron clasificados como arena arcillosa y arcilla inorgánica de mediana plasticidad.

Los ensayos se realizaron incorporando óxido de calcio (CaO) en proporciones de 5 %, 10 % y 15 % respecto al peso de la muestra. Se evidencian que la adición de óxido de calcio incrementó significativamente los parámetros de resistencia al corte, destacando la dosificación de 15 % como la más eficiente, al aumentar la cohesión de 12.10 % a 40.94 % y el ángulo de fricción de 1.05 % a 33.50 %. Asimismo, el factor de seguridad de los taludes se incrementó de 12.12 % a 64.47 %.

Se concluye que la incorporación de óxido de calcio mejora progresivamente la resistencia al corte y la estabilidad del talud, permitiendo alcanzar valores cercanos al umbral mínimo de estabilidad establecido por el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (factor de seguridad ≥ 1.30).

Palabras Clave: Óxido de calcio, ángulo de fricción interna, estabilidad de taludes, factor de seguridad, suelos arcillosos.

Abstract

This thesis examines the influence of adding calcium oxide on the stability of a clay slope located in the Umaccata Baja sector, Abancay, Apurímac, in the year 2025. The research aims to evaluate improvements in shear strength parameters—specifically cohesion and the angle of friction—and their effect on the slope's safety factor.

The study was conducted using a quantitative approach, with an applied experimental design at the explanatory level. Samples were extracted from two research sites selected based on their clay content. According to the Unified Soil Classification System, the materials were classified as clayey sand and inorganic clay of medium plasticity.

The tests were conducted by incorporating calcium oxide (CaO) at proportions of 5%, 10%, and 15% by weight of the sample. The results demonstrate that the addition of calcium oxide significantly increased shear strength parameters; the 15% dosage proved to be the most efficient, increasing cohesion from 12.10% to 40.94% and the friction angle from 1.05% to 33.50%. Additionally, the slope safety factor increased from 12.12% to 64.47%.

It is concluded that the incorporation of calcium oxide progressively improves shear strength and slope stability, allowing values close to the minimum stability threshold established by the Ministry of Transportation and Communications' Highway Manual (safety factor ≥ 1.30) to be achieved.

Keywords: Calcium oxide, angle of internal friction, slope stability, safety factor, clay soils.

Índice general

Portada.....	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice general	ix
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Anexos	xiv
I. Introducción.....	15
II. Planteamiento del problema	17
2.1 Descripción y formulación del problema.....	17
2.2 Objetivos	19
2.2.1 Objetivo general	19
2.2.2 Objetivos específicos	20
2.3 Justificación e importancia.....	20
2.4 Hipótesis	21
2.5 Variables.....	22

III. Marco teórico.....	24
3.1 Antecedentes	24
3.2 Bases teóricas	31
3.3 Definición de términos.....	53
IV. Metodología	57
4.1 Tipo y nivel de investigación	57
4.2 Ámbito temporal y espacial	59
4.3 Población y muestra	59
4.4 Instrumentos.....	60
4.5 Procedimientos.....	61
4.6 Análisis de datos	62
4.7 Consideraciones éticas	63
V. Resultados y discusión	64
VI. Conclusiones	97
VII. Recomendaciones	100
VIII. Referencias	102
IX. Anexos	108

Índice de Tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables.....	23
Tabla 2	Ubicación de las secciones transversales estudiadas.....	64
Tabla 3	Análisis granulométrico del suelo.	66
Tabla 4	Resultados del ensayo de Proctor modificado.....	69
Tabla 5	Resultados del ensayo Proctor modificado con adiciones de CaO para C-1	70
Tabla 6	Resultados del ensayo Proctor modificado con adiciones de CaO para C-2	71
Tabla 7	Parámetros de resistencia al corte	73
Tabla 8	Resultados de la cohesión y ángulo de fricción en % de adición de CaO.....	74
Tabla 9	Factor de seguridad en los dos subtramos en condiciones naturales de talud.....	77
Tabla 10	Factor de seguridad en los dos subtramos al 5% de adición de CaO.....	77
Tabla 11	Factor de seguridad en los dos subtramos al 10% de adición de CaO.....	78
Tabla 12	Factor de seguridad en los dos subtramos al 15% de adición de CaO.....	78
Tabla 13	Resumen de resultados de la adición en % del CaO en el FS	79
Tabla 14	Valores de la cohesión por calicata y en porcentaje de CaO	81
Tabla 15	Valores del ángulo de fricción por calicata y en porcentaje de CaO	82
Tabla 16	Prueba de normalidad para la hipótesis específica 1	83
Tabla 17	Prueba de homogeneidad para la hipótesis específica 1	84
Tabla 18	Prueba de ANOVA de la cohesión para la hipótesis específica 1	84
Tabla 19	Prueba de ANOVA del ángulo de fricción para la hipótesis específica 1	85
Tabla 20	Prueba post-hoc de Tukey de la cohesión para la hipótesis específica 1	85
Tabla 21	Prueba post-hoc de Tukey del ángulo de fricción para la hipótesis específica 1 ..	86
Tabla 22	Valores del FS por calicata y en porcentaje de CaO	87
Tabla 23	Prueba de normalidad para la hipótesis específica 2	88
Tabla 24	Prueba de homogeneidad para la hipótesis específica 2	89

Tabla 25 Prueba de ANOVA de la cohesión para la hipótesis específica 2	89
Tabla 26 Prueba post-hoc de Tukey del FS para la hipótesis específica 2	90
Tabla 27 Resumen de los indicadores geotécnicos y de estabilidad según porcentaje de óxido de calcio.	91
Tabla 28 Variación porcentual de los indicadores geotécnicos y de estabilidad para el tratamiento óptimo (15 % CaO)	92

Índice de Figuras

Figura 1	Deslizamientos en suelos blandos.	33
Figura 2	Deslizamiento de traslación en la vía Tijuana – Ensenada (México).	33
Figura 3	Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.	34
Figura 4	Valores referenciales para taludes en corte.	37
Figura 5	Talud sometido a lluvia.	38
Figura 6	Falla de talud	45
Figura 7	Software Geo5- Slope Stability	47
Figura 8	Mapa de ubicación de la zona de estudio.	65
Figura 9	Exploración C-1	67
Figura 10	Exploración C-2	67
Figura 11	Resultados de % de adición VS pd Max.	71
Figura 12	Resultados de la cohesión por calicata y en porcentaje de CaO	74
Figura 13	Resultados del ángulo de fricción por calicata y en porcentaje de CaO	75
Figura 14	Resultados de % de adición VS Factor de Seguridad	80

Índice de Anexos

Anexo 1 Matriz de Consistencia	109
Anexo 2 Operacionalización de variables.....	110
Anexo 3 Lista de ecuaciones.....	111
Anexo 4 Estudio de suelos	112
Anexo 5 Certificados de calibración	137
Anexo 6 Análisis de estabilidad de taludes.....	147
Anexo 7 Autorización de ensayos.....	163
Anexo 8 Declaración personal de autenticidad y de no plagio	166
Anexo 9 Panel fotográfico	167

I. Introducción

En los últimos años, los deslizamientos de tierra y las fallas de taludes se han consolidado como problemas recurrentes que afectan la infraestructura vial, urbana y agrícola en las zonas montañosas del Perú. Estos procesos de inestabilidad del terreno no solo generan pérdidas económicas, sino que también constituyen un aspecto alarmante para la seguridad y la conservación del entorno ambiental. En Apurímac, específicamente en el sector Umaccata Baja, distrito de Abancay, las condiciones geológicas y climáticas favorecen la ocurrencia de movimientos de masa, debido a la presencia de suelos arcillosos de alta plasticidad, pendientes pronunciadas y precipitaciones estacionales intensas. Ante este escenario, se evidencia la urgente necesidad de que se aplique técnicas que favorezcan la sostenibilidad que se orienten a mejorar la estabilidad y resistencia mecánica.

La presente tesis se orienta a identificar como influye el óxido de calcio (CaO) para estabilizar taludes arcillosos, tuvo como propósito evaluar los efectos de este estabilizante sobre la resistencia al corte del suelo. Para ello, se desarrollaron ensayos de laboratorio y modelaciones geotécnicas considerando las condiciones de las muestras de suelo y la geometría de los taludes analizados. El procedimiento comprendió la evaluación de muestras en estado natural y de muestras tratadas con CaO en dosificaciones de 5 %, 10 % y 15 %, para determinar variaciones en los parámetros geotécnicos del suelo arcilloso.

La tesis en mención contiene nueve secciones que han de ser las siguientes: I. Introducción, que guía el estudio; II. Planteamiento del problema, que comprende el planteamiento del problema, que debe comprender la descripción y formulación del problema, así como el objetivo general y los específicos, la justificación, las hipótesis y las variables; III. Marco teórico, que agrupa los trabajos de investigación anteriores, que se debe entender como uno en donde se agrupa el soporte teórico y de los conceptos básicos que guiarán la etapa de la investigación; IV. Metodología, que contiene el diseño del

estudio, la población, los instrumentos, los procedimientos llevados a la práctica, el análisis de la información y los aspectos éticos tratados; V. Resultado y discusión, en donde se especifican los resultados obtenidos, su análisis y la contrastación de las hipótesis dadas; VI. Conclusiones, en donde se hace mención de las conclusiones específicas y de las generales del estudio; VII. Recomendaciones, en donde se presentan propuestas técnicas que guían la práctica apoyados en la evidencia emergente de la experimentación llevada a cabo; VIII. Referencias, que contiene los elementos que evidencian la información de carácter bibliográfico; y IX. Anexos, que contiene información de interés y documentación.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

Las obras viales en gran parte, presentan dificultades están relacionadas al diseño y estabilidad de taludes, debido a que la variación de estos en suelos arcillosos es uno de los principales riesgos para la seguridad de las personas y puede ocasionar daños materiales, año tras año la ocurrencia de esta catástrofe deja damnificados, heridos y víctimas, además de grandes pérdidas económicas. La colisión que estos tipos de riesgos y amenazas producen, es más significativa en países con pocos recursos, generando un alto grado de suspicacia (Huamán y De la Cruz, 2019).

En Perú territorialmente el relieve es demasiado complejo, debido a que se cuenta con la cordillera de los andes esto origina la variación y concentración de cumbres. Estas condiciones favorecen la ocurrencia de desplazamientos de tierra, fenómeno muy común en los sistemas montañosos. Dicha vulnerabilidad puede estar asociada a factores condicionantes y desencadenantes, entre los que sobresale el relieve accidentado, la actividad sísmica, la presencia de lluvias de gran intensidad y los materiales geológicos (Suarez, 2009).

En el sector Umaccata Baja, distrito de Abancay, Apurímac, se evidencia una problemática persistente asociada a la inestabilidad de taludes constituidos por suelos arcillosos. Durante los periodos de precipitación, debido a que se infiltra agua en el terreno reduce progresivamente la cohesión y la resistencia al corte del suelo, incrementando la probabilidad de deslizamientos y procesos de erosión superficial. Esta condición afecta la seguridad de la población, compromete el adecuado funcionamiento de las vías de comunicación y pone en riesgo la infraestructura local, así como a las comunidades asentadas en las zonas próximas al área de influencia.

Los suelos arcillosos tienen sensibilidad a variaciones de humedad y alta plasticidad, por lo que se saturan y experimentan una expansión volumétrica, lo cual altera su estructura interna, reduciendo su estabilidad, estas características agravan los problemas de inestabilidad de taludes y requieren soluciones de ingeniería sostenibles y económicamente viables (Okeke et al., 2021).

La estabilización química constituye una de las posibilidades que se utilizan para modificar el comportamiento geotécnico de los materiales problemáticos de cuantas técnicas existen para la mejora de suelos. En este sentido, el CaO, más conocido como cal viva, es el estabilizador más destacado dada su capacidad para inducir cambios mediante la producción de transformaciones fisicoquímicas en la estructura del suelo. La producción de compuestos cementosos como los silicatos/aluminatos de calcio hidratados se da como resultado de los procesos de intercambio de iones y reacciones puzolánicas a las que da lugar el CaO con los minerales arcillosos, de modo que estos productos son los que mejoran la resistencia al corte, disminuyendo así la susceptibilidad a la deformación y la plasticidad (Manzoor y Yousuf, 2020).

Sin embargo, en el ámbito local no se cuenta con investigaciones experimentales que determinen el efecto real de la adición del CaO en los suelos arcillosos. Esta ausencia de información técnica dificulta establecer el porcentaje adecuado de adición del aditivo, para mejorar el ángulo de fricción interna, la cohesión, y en consecuencia, el factor de seguridad del talud. Considerando las particularidades geológicas, climáticas y geotécnicas de la zona, es fundamental realizar un estudio que permita conocer con precisión cómo influye el CaO en la estabilidad de los taludes arcillosos del área de Umaccata Baja, Abancay.

El desarrollo de esta investigación permitió generar información confiable y aplicable para la ingeniería geotécnica local, aportando soluciones prácticas para la prevención de deslizamientos y la protección de la infraestructura. Además, el estudio

brindará criterios técnicos relevantes para la toma de decisiones en futuros proyectos direccionados a la estabilidad de suelos, favoreciendo la seguridad de la infraestructura vial y contribuyendo al desarrollo sostenible de la región.

En ese sentido, se busca proporcionar, una alternativa de solución sobre el uso del CaO para estabilizar este talud.

Formulación del problema de investigación

2.1.1 Problema general

¿Cuál es la influencia de la adición de óxido de calcio (5%, 10% y 15%) en la estabilidad del talud arcilloso del sector Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025?

2.1.2 Problemas Específicos

1. ¿Cuál es la influencia de la adición de óxido de calcio en la cohesión y el ángulo de fricción interna, en la estabilidad del talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025?
2. ¿Cuál es la influencia de la adición de óxido de calcio en el factor de seguridad, en la estabilidad del talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025?
3. ¿Cuál es el porcentaje de óxido de calcio que permite obtener una mejora significativa en la estabilidad del talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia de la adición de óxido de calcio (5%, 10% y 15%) en la estabilidad del talud arcilloso del sector Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

2.2.2 *Objetivos específicos*

1. Calcular la influencia de la adición de óxido de calcio en la cohesión y el ángulo de fricción interna, en la estabilidad del talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.
2. Calcular la influencia de la adición de óxido de calcio en el factor de seguridad, en la estabilidad del talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.
3. Calcular el porcentaje óptimo de óxido de calcio que permite mejorar significativamente la estabilidad del talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 *Justificación*

Se justifica por el requerimiento de proponer alternativas técnicas que contribuyan al mejoramiento de la estabilización de los taludes conformados por suelos arcillosos, ubicados en Umaccata Baja, Abancay, donde los desplazamientos de tierra constituyen una amenaza recurrente durante los periodos de precipitaciones intensas. La inestabilidad de los taludes afecta la transitabilidad de las vías locales, restringe el acceso oportuno a servicios básicos y genera riesgos significativos para la seguridad de la ciudadanía.

Respecto al entorno, la estabilización de los suelos por medio de la incorporación de CaO es una alternativa viable, técnica y económicamente conveniente ante métodos tradicionales, como el uso de geotextiles o muros de contención, los cuales requieren mayores inversiones y recursos materiales de difícil acceso en zonas rurales. Diversos estudios demuestran que el empleo de CaO tiende a mejorar de forma significativa las características mecánicas del suelo, aumentando su resistencia y reduciendo problemas de inestabilidad con una menor inversión económica (Driss et al., 2021).

2.3.2 Importancia

Se centra en su aporte social, económico y ambiental. Desde el enfoque social, permitirá fortalecer el bienestar y la seguridad la ciudadanía al reducir el peligro de desplazamientos y fallas de taludes. En el aspecto económico, contribuirá a optimizar recursos en la ejecución y mantenimiento de obras civiles mediante el empleo de un estabilizante de bajo costo.

Asimismo, la investigación posee relevancia ambiental al promover soluciones sostenibles que disminuyan el deterioro del suelo y reduzcan intervenciones de mayor impacto. Finalmente, los hallazgos serán base técnica para otros estudios que estudien el mismo tema en condiciones geotécnicas semejantes.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

La adición de óxido de calcio (5%,10% y 15%) influyen en la estabilidad de talud arcillosos en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

2.4.2 Hipótesis Específicas

1. La adición de óxido de calcio influye en la cohesión y ángulo de fricción interna, en la estabilidad de talud arcillosos del sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.
2. La aplicación de óxido de calcio influye significativamente en el factor de seguridad, al interactuar con la geometría del talud, generando un incremento en la estabilidad de talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.
3. Existe un porcentaje óptimo de óxido de calcio que mejora significativamente la estabilidad del talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

2.5 Variables

VARIABLE INDEPENDIENTE

VI: Adición de óxido de calcio

VARIABLE DEPENDIENTE

VD: Estabilidad de talud arcilloso

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
Variable independiente	Es la incorporación de cal al suelo teniendo como propósito cambiar las características mecánicas y físicas mediante reacciones de hidratación y procesos puzolánicos que favorecen la generación de productos cementantes, lo que permite el incremento de la rigidez, resistencia y la estabilidad del suelo bajo análisis (Diniz et al., 2024).	Cantidad de CaO incorporada al suelo arcilloso, determinado con relación al peso seco de la muestra analizada.	Dosificación de CaO	5% 10% 15%	Porcentajes en peso (%)	-Fichas de laboratorio. -Manual de ensayo de materiales (MTC, 2016).
Variable dependiente	La estabilidad de un talud corresponde a la capacidad de una masa de suelo para mantenerse en equilibrio sin presentar deslizamientos o fallas, dependiendo principalmente de los parámetros geotécnicos asociados a la resistencia al corte, tales como la cohesión y el ángulo de fricción interna, así como del factor de seguridad obtenido mediante análisis geotécnicos de estabilidad (Vintimilla, 2009).	Variación de cada uno de los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción y cohesión), similarmente el FS definidos por la adición de porcentajes del CaO.	Cohesión (c)	Presión	(KPa)	-E.050 suelos y cimentaciones (RNE). - Ensayos de corte directo.
Estabilidad de talud arcilloso			Ángulo de fricción interna (ϕ°)	Grados sexagesimales	(°)	- E.050 suelos y cimentaciones (RNE). - Ensayo de corte directo.
			Factor de seguridad (F.S.)	Adimensional		-Software geotécnico (Geo5). -E.050 suelos y cimentaciones (RNE).

Nota. Los datos muestran la operacionalización de las variables.

III. Marco teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 A nivel internacional

Aqel y El-Emam (2024) en su artículo denominado “Piping stabilization of clay soil using lime”. El fin fue realizar un análisis del efecto de la cal en la estabilización contra erosión interna (piping) en suelos arcillosos de tipo CH y ML. El estudio fue de tipo experimental en laboratorio y cuantitativo, preparando muestras con 2% y 5% de cal viva y periodos de curado de 2 días, sometidas a ensayos de erosión interna. Hallaron que el 2% de cal estabilizó efectivamente el suelo CH y el 5% el suelo ML, mejorando significativamente el índice de erosión y la resistencia crítica al corte. Concluyeron que agregar cal es una técnica efectiva y eficiente para realizar el control de la erosión interna en suelos arcillosos.

Harichane y Ghrici (2022), en su artículo titulado “Effect of lime on the stabilization of an expansive clay soil in Algeria”, busco evaluar el impacto de cal en la estabilización, para lo cual realizó un estudio experimental e incluyó ensayos de Atterberg, ensayos de compactación y ensayos de hinchamiento, todos ellos realizados con diferentes concentraciones de cal. Los resultados demostraron una disminución en el potencial de expansión e índice de plasticidad, así como un aumento considerable de la resistencia mecánica del suelo. Como conclusión, estabilizar mediante cal contribuye al comportamiento geotécnico en suelos expansivos.

Driss et al. (2021), en su artículo titulado “Assessing the effect of moulding water content on the behaviour of lime-stabilised an expansive soil”, se propusieron investigar el impacto del contenido de agua de moldeo en el comportamiento geotécnico del suelo expansivo estabilizado con cal. El diseño fue experimental de laboratorio y un enfoque cuantitativo, incluyendo cal en proporciones que oscilaban entre el 0 % y el 8 %. Para

lograr este objetivo, se prepararon muestras bajo tres condiciones de compactación: contenido óptimo de humedad, lado seco y lado húmedo, tomando en cuenta además diferentes períodos de curado. Los resultados permitieron demostrar que a mayor contenido de cal se reduce la densidad seca, mientras que existe un aumento de humedad, lo cual favorece en que se disminuya la gravedad específica máxima. Como conclusión, los autores determinaron que la eficacia de la estabilización con cal en suelos expansivos depende del contenido de agua de moldeo.

Hasan et al. (2023), en su artículo titulado “Clayshale stabilization using active natural lime to increase the shear strength of soil”, buscaron determinar el impacto de incorporar cal natural activa en la resistencia al corte de la arcilla-pizarra. La investigación implicó la realización de experimentos de caracterización física, compactación y resistencia a la tracción con mezclas que contenían un 5 %, un 8 % y un 11 % de cal. Los resultados indicaron que la resistencia del material aumentó gradualmente a medida que aumentaba el porcentaje de cal incorporada. Como conclusión, la cal natural activa estabiliza, es rentable y eficaz.

Diniz et al. (2024), en su artículo titulado “Lime Stabilization of Tropical Soil for Resilient Pavements: Mechanical, Microscopic, and Mineralogical Characteristics”, En su artículo «Estabilización con cal de suelos tropicales para pavimentos resilientes: características mecánicas, microscópicas y mineralógicas», Diniz et al. (2024) investigaron el impacto de la estabilización con cal en las propiedades mecánicas, microscópicas y mineralógicas de un suelo tropical destinado a la construcción de pavimentos resilientes. Para llevar a cabo el estudio, se empleó un diseño experimental de laboratorio y un enfoque cuantitativo. En los resultados la incorporación de dolomita y calcítica en cantidades de 3% y 5% respectivamente favorecieron en estabilizar, mejorar la resistencia y rigidez que los tratados con cal dolomítica, los cuales mostraron un comportamiento más

deformable y una mayor deformación por tracción en el punto de falla. Además, se observó que el proceso de floculación provocó el cierre de la matriz porosa del suelo en ambos tratamientos después de siete días. Sin embargo, el efecto fue más notable en las muestras tratadas con cal calcítica. El consumo de minerales arcillosos aumentó, y los picos asociados con el hidróxido de calcio disminuyeron significativamente, según reveló el análisis mineralógico. De acuerdo con estos hallazgos, los autores concluyeron que la cal calcítica es más eficaz en aplicaciones de pavimentación debido a que mejora las propiedades de ingeniería del suelo. Además, observaron que este método es una alternativa sostenible, ya que mejora la resistencia del pavimento a la precipitación, reduce los requisitos de mantenimiento, aumenta la durabilidad y promueve el uso de materiales locales.

3.1.2 A nivel nacional

Quispe y Tarif (2022), en su tesis titulada “Estabilización de suelos arcillosos con cal y cenizas de cáscara de castaña para la subrasante en la Av. Circunvalación, Tambopata 2022”, buscó mejorar las propiedades mecánicas y físicas en suelo arcilloso. Se consideró un diseño cuasiexperimental. La población consistió en el área de estudio, mientras que la muestra estuvo compuesta por tres pozos de prueba situados en los marcadores progresivos 0+020, 0+520 y 0+970. Los experimentos de laboratorio se realizaron de conformidad con las normas NTP, ASTM, SUCS y AASHTO, y se combinó un 5 % de cal con un 10 %, un 15 % y un 20 % de ceniza de cáscara de castaña para el procedimiento de estabilización. Tras la adición de los estabilizadores, el índice de plasticidad inicial de las muestras C-1, C-2 y C-3 fue de 12,16 %, 17,30 % y 14,34 %, respectivamente. Sin embargo, estos valores disminuyeron a 7,51 %, 7,41 % y 7,30 %, tal como lo indican los resultados. De manera similar, el contenido óptimo de humedad aumentó de 9,80 %, 10,22 % y 9,33 % a 11,17 %, 11,18 % y 11,60 %, respectivamente. En cuanto al CBR, el suelo natural presentó

valores de 6.67 %, 6.31 % y 7.86 %, los cuales se incrementaron hasta 23.20 %, 24.00 % y 25.00 % después del tratamiento. Como conclusión, combinar ceniza y cal favorece en mejorar las propiedades geotécnicas en suelos arcillosos.

Quispe (2023) mediante ensayos triaxiales y de corte directo, determinó que con una dosificación del 4%,6% y 8% de CaO se aumentó la resistencia al corte en más del 30%, además de reducir la humedad y la plasticidad. El investigador destacó que la estabilización con cal tiende a mejorar las condiciones físico-mecánicas del terreno y contribuye a la durabilidad estructural de las obras de infraestructura vial.

Silva (2019) analizó la estabilización de suelos arcillosos con cal viva aplicada en capas de base para pavimentos urbanos. Evidenciando que con una adición del 15% y 18% de CaO, el índice de plasticidad se redujo considerablemente, mientras que la capacidad portante y la resistencia al corte aumentaron de forma sostenida. El autor sostuvo que el óxido de calcio no solo permite que se mejore la compactación, sino que también incrementa la durabilidad del suelo y reduce la deformación bajo cargas repetidas, mostrando beneficios similares a los observados en taludes naturales.

Tarazona (2024), en su tesis titulada “Efectividad del uso del cloruro de calcio en la estabilización de los suelos arcillosos de la subrasante en el tramo Nueva Requena – Campo Verde, Ucayali, 2021”, buscó evaluar como el cloruro de calcio favorece en estabilizar suelo arcilloso. La investigación fue de diseño preexperimental. En la investigación se emplearon dieciséis muestras de suelo arcilloso, cada una de las cuales pesaba aproximadamente 190 kg. Los datos se obtuvieron a través de hojas de datos técnicos y observación. Los resultados indicaron que el índice de plasticidad disminuyó de 22,48 % a 10,47 %, y la densidad máxima en seco aumentó de 1,813 g/cm³ a 1,988 g/cm³. Del mismo modo, la capacidad portante CBR subió de 4,72% a 44,64 %. En cuanto a la expansión, se observó que disminuyó de 0,254 mm a 0,078 mm, mientras que la expansión

debida a la inmersión en agua disminuyó de 0,312 a 0,118 mm. Mediante el análisis estadístico se demostró una significancia de 0.0, lo cual demuestra que el cloruro de calcio mejora significativamente las propiedades mecánicas y físicas. Como conclusión, este insumo favorece la estabilización en suelos arcillosos.

Ríos y Solano (2021), en su tesis titulada “Estudio exploratorio de estabilización de una subrasante de suelo arcilloso con cal viva como material estabilizante en el A.A.H.H. Las Colinas, calle Lagunas - San Juan Bautista – 2021”, buscó mejorar las características mecánicas y físicas con cal viva. La metodología consistió en el uso de concentraciones de cal de 1 %, 3 % y 5 % para realizar ensayos de análisis granulométrico, límites de consistencia, el ensayo de Proctor modificado y el índice de resistencia al carga de California (CBR). Los resultados indicaron que el suelo en su estado natural tenía un CBR de 4,82 %, mientras que las mezclas de suelo y cal alcanzaron valores de 11,20 %, 17,60 % y 19,30 % para las proporciones de 1 %, 3 % y 5 %, respectivamente. Los resultados fueron favorables al contribuir en un aumento de la capacidad de carga y resistencia mediante la cal añadida. Como conclusión, la adición de cal repercute en mejoras de propiedades en suelo arcilloso.

Quispe y Roldán (2022), en su tesis titulada “Estabilización de suelo con Cloruro de Sodio (NaCl) y Cal para mejorar sus propiedades físico-mecánicas, Lima – 2022”, buscaron mejorar propiedades del suelo mediante cloruro de sodio y cal en diferentes dosis. Para lograr este objetivo, se realizaron experimentos de laboratorio con el fin de determinar la combinación más eficaz que cumpliera con las normas de capacidad portante establecidas por la normativa de carreteras. La investigación tuvo un diseño experimental y un nivel explicativo. El procedimiento consistió en la realización de ensayos de laboratorio utilizando diversas combinaciones de cloruro de sodio y cal. Los resultados de ensayos se compararon a través de una muestra a suelo natural y una estándar. Los resultados

indicaron que la dosificación más eficaz fue una combinación de 1,75 % de cal y 6 % de cloruro de sodio, lo que dio como resultado un CBR de 46 %. Este valor superó ampliamente la capacidad de carga natural del suelo y cumplió con los criterios para su uso como material de base en vías de transporte. En consecuencia, los autores determinaron que la aplicación combinada de cloruro de sodio y cal mejora sustancialmente la capacidad portante del suelo.

Sánchez (2019), en su tesis titulada “Estabilización de taludes mediante la técnica de bioingeniería con cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales, año 2019”, tuvo como objetivo investigar el impacto de una técnica de bioingeniería en la estabilidad de los taludes, analizando la contribución de las raíces del vetiver a la resistencia al corte del suelo. La investigación se llevó a cabo en el campo e incluyó experimentos de laboratorio destinados a evaluar el impacto del sistema radicular del vetiver en la estabilidad de la pendiente y en las propiedades geotécnicas del suelo. Los resultados indicaron que los parámetros de resistencia del suelo experimentaron una transformación favorable como resultado del refuerzo radicular. Específicamente, los ángulos de fricción aumentaron de $20,41^\circ$ a $22,41^\circ$ y de $19,14^\circ$ a $24,61^\circ$. De manera similar, el factor de seguridad en condiciones estáticas pasó de valores inestables de 0,905 y 0,881 a valores estables de 1,504 y 1,444, respectivamente. Por el contrario, en condiciones pseudoestáticas, este factor aumentó de 0,751 y 0,728 a 1,278 y 1,218. Con base en estos hallazgos, el autor concluyó que la aplicación de la bioingeniería mediante el uso de la hierba vetiver mejoró la estabilidad del talud entre un 66 % y un 70 %, transformando una condición inicialmente inestable en una estable y reduciendo los costos de intervención en comparación con los métodos convencionales.

Rivera (2023) en su tesis de maestría denominada “Suelos arcillosos de depósitos marinos estabilizados con cal, para optimización de estructuras de contención mecánicamente estabilizadas con geosintéticos en proyectos de infraestructura vial”. El objetivo fue optimizar el uso de suelos arcillosos estabilizados con cal en estructuras de contención. La investigación fue tanto experimental como aplicada, e incorporó experimentos geotécnicos y análisis de la interacción con los geosintéticos. Se mejoraron la estabilidad y la resiliencia de las estructuras. La investigación determinó que la estabilización con cal permite optimizar los proyectos viales tanto en términos técnicos como económicos.

Venegas (2022), en su tesis titulada “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de cal para carreteras no pavimentadas”, buscó evaluar hasta qué punto se pueden estabilizar los suelos arcillosos considerando ceniza de cal. Durante la investigación se aplicaron metodologías cuantitativas y diseños experimentales. En el estudio se evaluó un suelo con alto contenido de arcilla, al cual se le añadió ceniza de cal en porcentajes variables de 25 %, 50 % y 75 %. Los resultados indicaron que las propiedades geotécnicas del suelo mejoraron sustancialmente con la dosificación óptima del 50 % de ceniza de cal. Además, se obtuvieron valores de CBR de 95,20 %, 91,40 % y 93,60 %, así como porcentajes de abrasión de Los Ángeles de 48,00 %, 48,84 % y 49,66 %. También se obtuvieron índices de plasticidad de 9 %, 9 % y 8 %. Estos resultados cumplieron con los parámetros del MTC. Como resultado, el autor determinó que la incorporación de ceniza de cal mejora la estabilización de los suelos arcillosos al aumentar su capacidad portante y hacerlos aptos para su uso como material en caminos sin pavimentar.

3.1.2 A nivel regional y local

Tacca (2021), en su tesis de pregrado titulada “Estabilización de suelo arcilloso con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, Vía de Evitamiento, Abancay –

Apurímac, 2021”, buscó estabilizar suelos arcillosos. El estudio fue un diseño experimental. Para lograr este objetivo, se extrajeron muestras de suelo arcilloso del área de estudio y se realizaron experimentos de laboratorio para evaluar la capacidad portante CBR con concentraciones de cal del 4 %, 8 % y 12 %. Los resultados indicaron que el CBR del suelo era de 9,40 % en su estado natural. Sin embargo, el CBR aumentó a 19,20 % con la adición de un 4 % de cal, a 24,95 % con un 8 % y a 28,50 % con un 12 %. Además, el análisis estadístico reveló un valor p de 0,000, lo que sugiere que los tratamientos evaluados mostraron diferencias altamente significativas. Como resultado, el autor determinó que el porcentaje óptimo para el caso en estudio es del 8 %, y que la incorporación de cal mejora sustancialmente la capacidad portante del suelo arcilloso.

López y Ortiz (2018), en su tesis de pregrado titulada “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”, buscaron mejorar las propiedades geotécnicas a través de cal. El diseño fue experimental. Para alcanzar este objetivo, se realizaron experimentos para evaluar el contenido de humedad, la compactación, la plasticidad y la resistencia CBR, con concentraciones de cal de 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 %. resultado, la investigación concluyó que la adición de cal al suelo arcilloso mejora sustancialmente sus propiedades mecánicas y ofrece una alternativa viable para el mejoramiento de la sub-base.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Adición de óxido de calcio (CaO)

Se trata del uso de cal en el suelo con el propósito de modificar sus características físicas y mecánicas por medio de reacciones de hidratación y vías puzolánicas que fomenten la aparición de compuestos cementantes, incrementando la resistencia, rigidez y estabilidad del material (Diniz et al., 2024).

3.2.2 Estabilidad del talud arcilloso

Alude a la situación en la que una masa del suelo se mantenga en equilibrio sin que se produzcan procesos de deslizamientos. Su estabilidad depende fundamentalmente de los parámetros de resistencia al corte como son el ángulo de fricción y la cohesión y sobre todo como así el factor de seguridad logrado a través de análisis geotécnicos de estabilidad (Vintimilla, 2009).

3.2.3 Teoría de deslizamientos

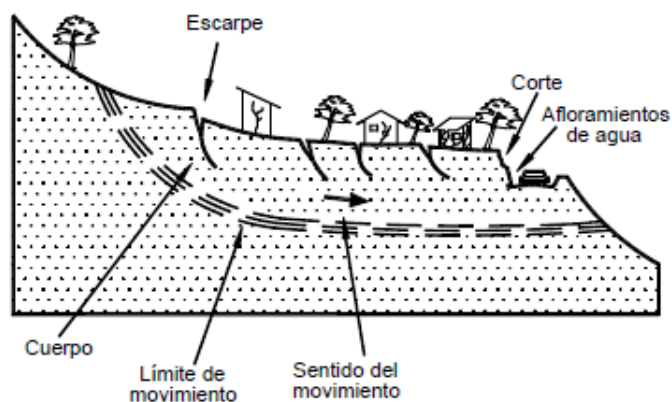
De acuerdo con Suarez (2009), un deslizamiento sería el desplazamiento de una masa tierra cuyo desplazamiento es ocasionado por la disminución de la resistencia al corte de la masa de suelo que se desplaza sobre un plano de falla establecido o en un plano que presenta un fallo interno, de tal manera que el movimiento de la masa de tierra es de tipo gravitacional.

Igualmente Toro (2014) menciona: los deslizamientos pueden presentarse iguales en laderas generadas de manera natural que en taludes significados. En igual sentido, estos pueden desarrollarse en suelos situados en casos drenados o no drenados de forma general.

Deslizamiento rotacional Suarez (2009) apunta que, en un desplazamiento del tipo rotacional, la superficie de falla presenta forma curva o cóncava dirigida hacia arriba; y el bloque de suelo rota alrededor de un eje aproximadamente paralelo al talud y perpendicular a la dirección del desplazamiento.

Figura 1

Deslizamientos en suelos blandos.



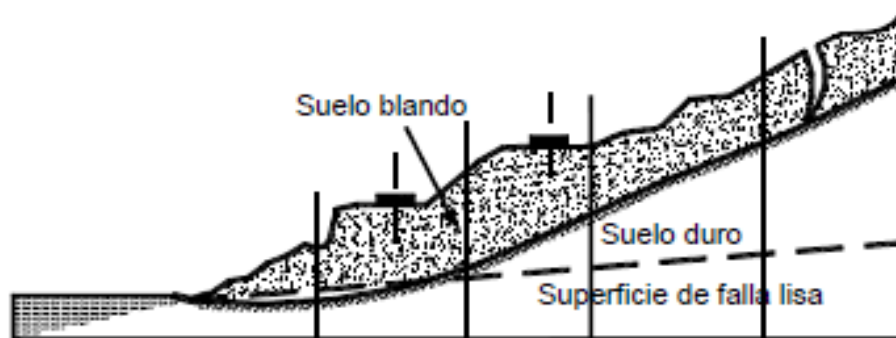
Nota. El grafico representa los suelos blandos. Tomado de Suarez, 2009.

3.2.4 Deslizamiento de traslación

Según Suarez (2009) indica: en un deslizamiento traslacional, la masa de suelo se desplaza predominantemente hacia el exterior o en dirección descendente de la pendiente, siguiendo una superficie de falla plana o suavemente ondulada. En este tipo de movimiento, la rotación del material desplazado es mínima o prácticamente inexistente.

Figura 2

Deslizamiento de traslación en la vía Tijuana – Ensenada (México).



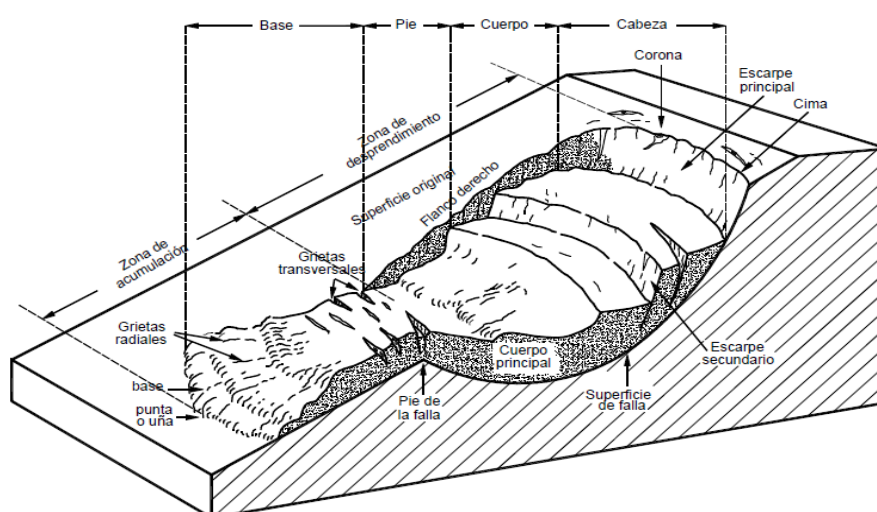
Nota. El grafico representa el deslizamiento de traslación en la vía Tijuana – Ensenada (México). Tomado de Suarez, 2009.

3.2.5 Partes de un deslizamiento

Suarez (2009) define: el deslizamiento de un talud se compone de tres zonas principales: una parte superior convexa (cabeza o escarpe) donde predominan procedimientos de erosión; una zona intermedia relativamente recta; y una parte inferior cóncava (pie o base), donde se acumulan los materiales transportados.

Figura 3

Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.



Nota. El grafico representa e indica las partes de un talud en deslizamiento. Tomado de Suarez, 2009.

3.2.6 Inestabilidad de taludes

Se origina por el desequilibrio entre las fuerzas tanto internas como externas que actúan sobre el terreno. Esta condición se presenta cuando las fuerzas desestabilizadoras superan la capacidad resistente o estabilizadora del suelo, ocasionando condiciones propicias para la ocurrencia de fallas o deslizamientos. Esta inestabilidad puede ser realizada a causa de ciertas modificaciones o como también puede ser por la aplicación de nuevas fuerzas provenientes del lado exterior en las cuales pueden ser dinámicas o estáticas (Gonzales, 2022).

3.2.7 Clasificación de fallas en taludes

Desprendimiento o caídas

Este tipo de movimiento es de caída rápida, generalmente en un contexto de caída libre, que se presenta cuando una porción de suelo se separa de una ladera o estructura con pendiente pronunciada. Cuando el material impacta sobre una superficie con inclinación de más de 75° , el desplazamiento se considera predominantemente de caída libre; pero si la pendiente es menos de 45° , el movimiento se desarrolla por medio de rodamiento. Estas condiciones permiten distinguir los mecanismos de movimiento asociados al colapso y desprendimiento (Corominas y Garcia,1997).

Volteo

Es un movimiento en que una masa del talud rota hacia el exterior alrededor de un punto ubicado por debajo de su centro de gravedad. Este tipo de falla es común en taludes rocosos y puede ser provocado por sismos, presión de agua en grietas, expansión del material o discontinuidades del macizo (Corominas y Garcia,1997).

Reptación

Este tipo de desplazamiento ocurre de manera progresiva a lo largo de periodos prolongados y se considera el más lento entre los movimientos en masa. No presenta una superficie de deslizamiento claramente definida y suele estar asociado a condiciones climáticas que afectan a suelos blandos o previamente alterados. (Suarez ,2009).

3.2.8 Clasificación de las inestabilidades en taludes

Son fenómenos que no siempre se presenta como fenómenos aislados, ya que con frecuencia evolucionan hacia mecanismos complejos que integran distintos tipos de movimientos. No obstante, diferentes autores han planteado clasificaciones que permiten identificar las formas más comunes de inestabilidad en ladera. A continuación, se presenta

una propuesta de clasificación basada en las tipologías de movimiento más comunes (Toro, 2014).

Se diferencian por el grado de actividad; activo que son movimientos con bastantes reactivaciones, poco activo en donde el suelo presenta poco movimiento e inactivo que son aquellos que no presenta movimientos de masa.

3.2.9 Factores influyentes en la inestabilidad de taludes

Factores condicionantes o pasivos

Corresponden a características propias de los materiales naturales y del terreno. Estos dependen de la naturaleza, composición, configuración y estructura geomorfológica del área, incluyendo aspectos como la litología, estratigrafía y las estructuras geológicas presentes (Coliente, 2010).

Factores desencadenantes o activos.

Los factores desencadenantes corresponden a agentes externos que inducen o activan procesos de inestabilidad en el terreno. Estos intervienen directamente en la generación de fallas, así como en la magnitud del deslizamiento o desprendimiento y en la velocidad con la que se desarrolla el movimiento de masa (Coliente, 2010).

3.2.10 Pendiente y relieve

La pendiente topográfica y las alteraciones efectuadas en las laderas constituyen factores que pueden intensificar los procesos de deslizamiento, debido a que incrementan la condición de inestabilidad de los materiales que conforman el talud. Por esta razón, dichas variables son consideradas de manera recurrente en los métodos de análisis de estabilidad. En terrenos homogéneos, cada tipo de material posee una altura crítica y un ángulo límite, cuyos valores, al ser superados, pueden generar desequilibrio gravitacional y provocar la falla del terreno. No obstante, en zonas húmedas, la presencia de una morfología abrupta no siempre es indispensable para que ocurra la inestabilidad, puesto

que los suelos arcillosos, al alcanzar condiciones de saturación, pueden originar movimientos rápidos de tipo flujo con velocidades significativas (Martínez, 1998).

Según el Manual de Carreteras (MTC, 2014), presenta valores referenciales para los taludes en corte según el tipo de material y la altura del frente excavado. Dichos valores expresan la relación horizontal–vertical (H:V) recomendada para garantizar condiciones mínimas de estabilidad frente a posibles deslizamientos.

La Figura 4 clasifica los materiales de corte según su resistencia y comportamiento geomecánico, distinguiendo entre roca fija, roca suelta, gravas, limos arcillosos, arcillas y arenas. Diversos estudios muestran que la estabilidad del talud depende del tipo de suelo y la altura del corte; por ello, el MTC (2014) plantea taludes más tendidos en materiales con menor cohesión y fricción interna.

Figura 4

Valores referenciales para taludes en corte.

Clasificación de materiales de corte		Roca fija	Roca suelta	Material		
				Grava	Limo arcilloso o arcilla	Arenas
Altura de corte	<5 m	1:10	1:6–1:4	1:1 – 1:3	1:1	2:1
	5–10 m	1:10	1:4–1:2	1:1	1:1	*
	>10 m	1:8	1:2	*	*	*

Nota. El grafico representa los valores referenciales para los cortes en los taludes. Tomado de MTC,2014.

En términos prácticos, estas relaciones constituyen medidas preventivas para reducir el riesgo de inestabilidad superficial o profunda. En suelos cohesivos como limos y arcillas, el MTC (2014) recomienda taludes de 1H:1V hasta 10 m de altura debido a su menor resistencia al corte bajo saturación. Por el contrario, en materiales granulares

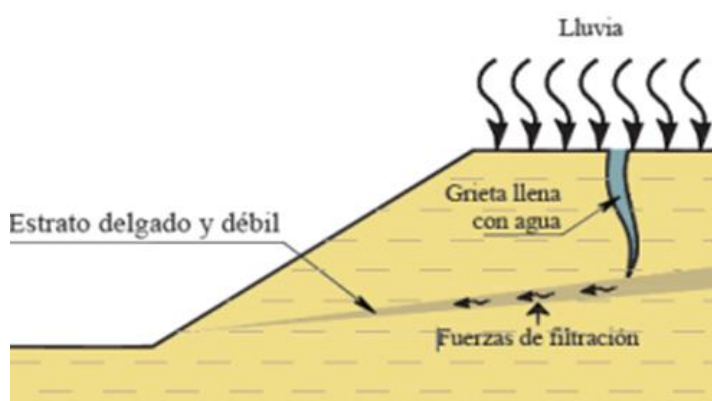
competentes (gravas o roca), pueden adoptarse pendientes más empinadas sin afectar el Factor de Seguridad.

3.2.11 Clima y la hidrología

Las precipitaciones es uno de los mecanismos de activación más frecuente de deslizamientos en depósitos coluviales. Se estima que una precipitación de 5 a 6 mm/h puede desencadenar flujos de detritos, mientras que una lluvia acumulada de aproximadamente 267 mm permite alcanzar un contenido de agua en el cual la infiltración se equilibra con el drenaje del terreno (Campbell, 1975)

Figura 5

Talud sometido a lluvia.



Nota. El grafico representa un talud sometido a lluvia. Tomado de Suarez, 1998.

3.2.12 Caracterización geotécnica

Primero, es importante recordar que todo el suelo comenzó como resultado de la descomposición física y química de una roca, sin importar qué otros procesos se aplicaron posteriormente.

Es un conjunto de partículas sólidas y sedimentos que fueron originados a través de la desintegración y alteración química en rocas. Esta definición se mantiene independientemente ausencia a presencia de materia orgánica. (Terzaghi, 1943)

Granulometría

Según Norma Técnica Peruana (NTP.400.012 /ASTM C-33), denominada como análisis granulométrico, es uno de los ensayos básicos y esenciales para su caracterización. La capacidad de carga y otras características geotécnicas importantes del suelo pueden aproximarse con esta única prueba. La curva granulométrica de una muestra, obtenida desde un análisis de tamizado, es una buena aproximación para distribución de tamaños de partículas en la muestra. En la técnica seca, se utilizan tamices o mallas con diferentes tamaños de apertura, desde 125 mm hasta 0,075 mm, para separar las partículas en una muestra (tamiz n.º 200). La granulometría por sedimentación con un hidrómetro se utiliza para medir partículas más pequeñas que un cierto tamaño umbral. A diferencia del ensayo anterior, este se reserva para circunstancias especiales en las que se requiere una determinación precisa del porcentaje de partículas finas. (Olarde, 2017)

Límite líquido

Es el contenido de humedad obtenida a partir de la pérdida de agua y su mezcla con el suelo, el cual se encuentra por debajo de este valor, el material mantiene una mayor consistencia y presenta mejores condiciones de manejo. En ese sentido, tanto el límite líquido como el límite plástico de un suelo remoldeado se determinan en función del contenido de agua, expresado como porcentaje respecto al peso seco del suelo. Las variaciones de humedad próximas a estos límites inciden directamente en la consistencia, deformabilidad y comportamiento volumétrico del material. (Osorio, 2010)

Límite plástico

El suelo posee cierta proporción de humedad, que pasa de un estado semisólido a un estado plástico, perdiendo su comportamiento frágil y adquiriendo capacidad de deformarse sin agrietarse. Por debajo de esta humedad, el suelo carece de plasticidad y puede agrietarse fácilmente cuando se somete a cambios bruscos de humedad. Tanto la

norma ASTM como la británica utilizan una prueba en la que se hace rodar una pequeña muestra de suelo a presión y frecuencia estándar para crear un rollo de 3,2 mm de diámetro. Este rollo debe alcanzar una humedad en la que se rompa y no se pueda volver a moldear. (Osorio, 2010)

Índice de plasticidad

Se calcula disminuyendo el límite líquido del suelo de su límite plástico empleando la fórmula: $IP = LL - P_L$ (Das, 2013). La humedad del margen de la malla es plástica, medida por el índice de plasticidad. El límite plástico y el límite líquido se ven afectados por el contenido de arcilla del suelo, pero el índice de plasticidad suele ser más sensible al primero que al segundo. (Crespo, 2004)

3.2.13 Clasificación de suelos

Según Berry y Reid (1993), la clasificación de los suelos resulta necesaria para comparar distintos materiales, describir sus principales características y evaluar su idoneidad en una determinada obra de ingeniería, considerando sus propiedades físicas y su apariencia. De manera similar, Braja (2001) señala que, en el ámbito de la ingeniería geotécnica, la clasificación de los suelos suele realizarse mediante sistemas basados en la distribución granulométrica y la plasticidad del material. Entre los métodos más utilizados se encuentran el sistema AASHTO, empleado principalmente en obras viales, y el SUCS, que se muestra a continuación:

Clasificación de suelos AASHTO

Según el método, se pueden agruparse de forma general en: suelos granulares y de grano fino. Luego los agrupamos en subgrupos de acuerdo con las propiedades, incluida la distribución del tamaño de las partículas, índice de plasticidad y límite líquido. (Ocon, 2013)

Clasificación de suelos SUCS.

Son en dos grupos: suelos granulares y suelos finos. Cuando las partículas del suelo quedan retenidas en el tamiz N°200, se consideran materiales de grano grueso, mientras que aquellos que pasan dicho tamiz se clasifican como suelos de grano fino (Juárez, 2005)

3.2.14 Contenido de humedad

Es la cantidad presente en suelo en relación al peso de partículas solidas secas. Este parámetro puede representarse por medio de diferentes símbolos, como θ_M . cuando se refiere a humedad gravimétrica, θ_v , cuando corresponde a humedad volumétrica, y permite establecer la proporción entre el agua contenida y el peso seco del suelo.

3.2.15 Densidad de campo

Es un parámetro relevante en el diseño y ejecución de terraplenes, rellenos viales y otras estructuras de tierra. Por ello, antes del inicio de este tipo de obras, se realiza el ensayo de densidad con el fin de verificar las condiciones de compactación y garantizar el adecuado comportamiento del material. La densidad del material "in situ" y los porcentajes de contracción o expansión también se pueden calcular utilizando este método. (MTC, 2016)

3.2.16 Ensayo de corte directo

Utilizado para obtener la resistencia al corte del suelo, la fricción interna (ϕ) y cohesión (c) bajo condiciones controladas de carga y deformación. Además, es particularmente pertinente en suelos arcillosos y subrasantes estabilizados, porque permite evaluar el comportamiento del material frente a esfuerzos tangenciales, simulando el deslizamiento entre partículas que ocurre en taludes y bases de pavimento.

Su elección metodológica se justifica por su simplicidad, reproducibilidad y capacidad para medir la tensión cortante máxima asociada al plano potencial de falla. Los resultados obtenidos proporcionan datos esenciales para el análisis de estabilidad.

3.2.17 Ángulo de fricción interna (ϕ)

Es la resistencia a las partículas para que se deslicen, siendo en suelos gruesos, la fricción domina sobre la cohesión; sin embargo, en suelos finos tratados con estabilizantes, ambos mecanismos se combinan.

Incrementar ϕ mejora directamente el factor de seguridad del talud, ya que aumenta la resistencia al corte total del macizo (Das, 2001).

3.2.18 Cohesión

Muestra el grado de unión existente entre las partículas del suelo. En mecánica de suelos, este término se relaciona con la resistencia al corte generada por los enlaces internos o procesos de cementación entre las partículas. La cohesión, por otro lado, se usa para denotar estrés en el ámbito de la física. Los suelos extremadamente granulares, donde ningún agente o material cementante puede producir adherencia, se clasifican como "Suelos No Cohesivos" o "Suelos Friccionales", asumiendo que la cohesión es cero en estos casos. (Braja, 2001)

3.2.19 Peso unitario del suelo

Comprende el volumen que se ocupa en relación al peso de partículas sólidas, incluyendo tanto los sólidos como los vacíos presentes en su estructura. Desde el enfoque geotécnico, este parámetro permite expresar el peso del material seco por unidad de volumen total, por lo que constituye una propiedad fundamental para analizar el comportamiento físico y mecánico del suelo. Asimismo, su determinación resulta relevante en estudios de compactación, estabilidad y capacidad resistente, debido a que permite establecer el grado de densificación alcanzado por el material. En la literatura geotécnica, este concepto se asocia con el peso unitario del suelo, término que resulta más apropiado que denominaciones antiguas o poco precisas utilizadas en textos tradicionales. (Braja, 2001)

3.2.20 Fundamentos teóricos del suelo y estabilidad de taludes

Constituye un campo de la ingeniería geotécnica, que permite evitar fallas que comprometan obras viales, urbanas o hidráulicas.

Se considera a un talud estable cuando las fuerzas resistentes producto de la cohesión y la fricción entre partículas superan a las fuerzas deslizantes generadas por el peso propio del suelo y la acción del agua.

Según Duncan y Wright (2021), la evaluación de la estabilidad requiere comprender el comportamiento mecánico del suelo frente a los esfuerzos cortantes y las variaciones de humedad.

Los suelos arcillosos tienen un comportamiento particularmente complejo debido a su alta plasticidad y capacidad de retener agua. Cuando se saturan, pierden resistencia al corte y generan deslizamientos superficiales o profundos.

Por ello, el análisis de estabilidad en este tipo de suelos debe considerar tanto sus características mineralógicas como las condiciones hidrológicas del terreno. (Terzaghi et al., 2020)

3.2.21 Propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos

Los suelos arcillosos se caracterizan por partículas menores a 0.002 mm, elevada superficie específica y una marcada actividad coloidal.

Estas propiedades les confieren alta plasticidad y variaciones volumétricas significativas frente a los cambios de humedad.

Según Craig (2022), las principales propiedades físicas relevantes son la humedad natural, los límites de Atterberg, la densidad aparente, y la granulometría. Además, las propiedades mecánicas se vinculan con la resistencia al corte, la cohesión y el ángulo de fricción interna.

La resistencia al corte (τ) se expresa mediante la ecuación de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3-1)$$

donde c es la cohesión, σ la tensión normal y ϕ el ángulo de fricción interna. Esta relación muestra que la resistencia depende tanto de la unión entre partículas como del rozamiento que se opone al movimiento relativo.

Cuando el suelo se encuentra saturado, el valor de c disminuye por la pérdida de succión capilar, mientras que ϕ se reduce debido a la lubricación de las partículas (Budhu, 2023).

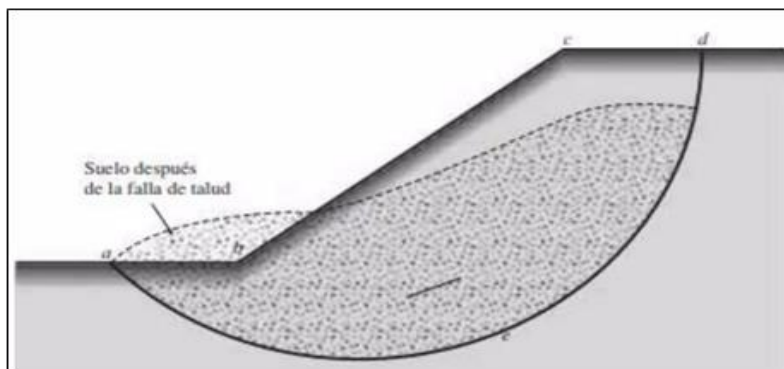
3.2.22 Factor de seguridad en taludes

En el análisis de estabilidad de taludes, su determinación permite identificar la condición más crítica del terreno y evaluar el nivel de estabilidad frente a posibles mecanismos de falla. (Suarez, 2013)

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_n} \quad (3-2)$$

Donde:

- τ_f : Es la resistencia al corte máximo que puede desarrollarse en la superficie potencial de deslizamiento
- τ_n : Es la resistencia al corte que el suelo moviliza a lo largo de la superficie potencial de falla.

Figura 6*Falla de talud*

Nota. Se visualiza la falla de un talud. Tomado de Suarez, 1998.

Para el cálculo del FS, generalmente se emplea el criterio de falla de Mohr Coulomb, mediante el cual se evalúa el equilibrio de una masa de suelo considerando las fuerzas actuantes y resistentes. En este análisis, la resistencia disponible del suelo se compara con los esfuerzos que tienden a generar la falla, obteniéndose finalmente el valor del FS. Asimismo, otra alternativa de evaluación corresponde al método de dovelas, el cual divide la masa potencialmente inestable en segmentos y analiza las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos.

El FS calculado para el análisis estático (equilibrio límite) nos indica que:

- Si $FS < 1$, el talud es inestable o ya colapsado.
- Si $FS > 1$, el talud es estable.
- Si $FS \approx 1$, el talud está en condición límite.

Según la normativa peruana del Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC (2014) y la práctica geotécnica en carreteras, el FS para taludes en uso o en servicio (es decir, ya construidos y sujetos a cargas normales sin condiciones extremas) debería cumplir al menos un valor de:

Uso normal (estático – situación en servicio):

Se suele exigir $FS \geq 1.30$ como mínimo para taludes en uso permanente y carreteras principales, para asegurar un margen de estabilidad razonable bajo condiciones normales de carga estática.

Condiciones más conservadoras:

En estudios o diseños más rigurosos (por ejemplo, incluyendo incertidumbre geotécnica o cargas adicionales), se recomienda $FS \geq 1.5$ para condiciones permanentes.

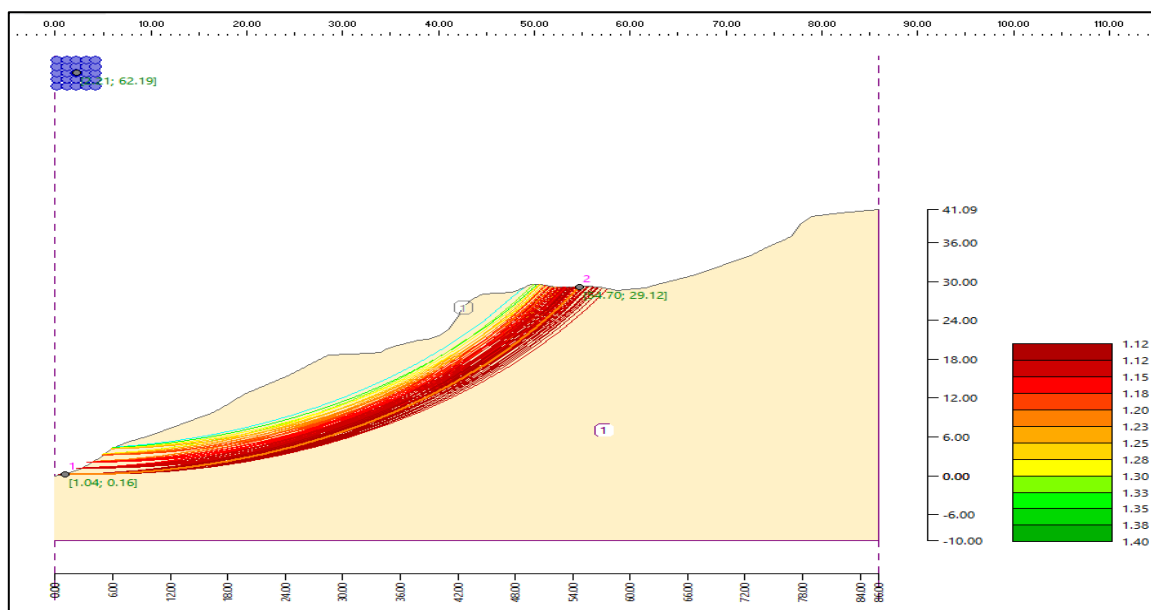
La normatividad específica del Manual de Carreteras del MTC (2014) típicamente contiene directrices de estabilidad de taludes y recomendaciones de diseño, pero no siempre especifica un único valor general de FS para todas las situaciones sin contexto del proyecto. Lo usual es que los valores objetivo dependan del tipo de talud, condiciones de carga, consecuencia de falla y método de análisis, siguiendo criterios de ingeniería geotécnica aceptados internacionalmente y adaptados al contexto vial peruano.

3.2.23 Software geotécnico GEO5

Es una de las herramientas mayormente utilizadas en ingeniería geotécnica para el análisis y diseño de estabilización de taludes, cimentaciones y estructuras de sostenimiento.

Para analizar la estabilidad global del talud antes y después del tratamiento con CaO, se empleó el software geotécnico GEO5 – Slope Stability, el cual utiliza métodos de equilibrio límite ampliamente aceptados en ingeniería geotécnica.

El objetivo del uso de este software es determinar el FS del talud en condición natural y estabilizada mediante la modificación de los parámetros resistentes obtenidos experimentalmente, con el fin de verificar el incremento de estabilidad asociado a la dosificación de CaO.

Figura 7*Software Geo5- Slope Stability*

Nota. El grafico muestra la modelación del talud por el Software Geo5- Slope Stability.

3.2.24 Estabilización de suelos

Se busca mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un terreno natural mediante tratamientos físicos, químicos o mecánicos. Su propósito es incrementar la resistencia, disminuir la deformabilidad y reducir la susceptibilidad al agua. De acuerdo con Ingles y Metcalf (2021), los métodos de estabilización se clasifican en mecánicos como la compactación y la sustitución y químicos, donde se utilizan aditivos como la cal, el cemento o el CaO.

La estabilización química se aplica con frecuencia en suelos arcillosos debido a su alta plasticidad y baja capacidad portante. Cuando se incorpora un aditivo como el CaO, se generan reacciones químicas con los minerales arcillosos, lo que produce una estructura más rígida y estable. Estas reacciones modifican la mineralogía y las propiedades del suelo, generando un material más resistente y menos susceptible a la expansión por humedad (Zhang et al., 2020).

3.2.25 El óxido de calcio como agente estabilizador

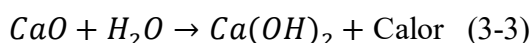
Conocido comúnmente como cal viva, es uno de los aditivos más empelados en ingeniería geotécnica para la estabilización de suelos finos. Su efectividad radica en su capacidad para reaccionar con los silicatos y aluminatos presentes en la arcilla, formando compuestos cementantes como el silicato de calcio hidratado (C–S–H) y el aluminato de calcio hidratado (C–A–H) (Lime Stabilization of Tropical Soil, 2023).

Cuando el CaO se mezcla con suelo húmedo, reacciona con el agua, liberando calor y formando hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). Este hidróxido, a su vez, reacciona con los componentes de la arcilla, generando los productos que otorgan rigidez y cohesión al material. Según (Okeke et al., 2021), el proceso de estabilización con cal se desarrolla en dos etapas: una inicial de intercambio catiónico y floculación, y otra de reacción puzolánica, donde se forman los compuestos cementantes que mejoran la resistencia a largo plazo.

3.2.26 Reacciones químicas del CaO en suelos arcillosos

Las principales reacciones del óxido de calcio con el suelo arcilloso son las siguientes:

Hidratación del óxido de calcio:

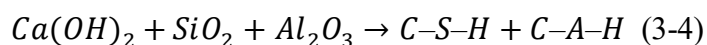


Esta reacción exotérmica seca el suelo y reduce su contenido de humedad.

Intercambio catiónico y floculación:

Los iones de calcio reemplazan a los cationes de sodio, potasio o hidrógeno presentes en la superficie de las partículas de arcilla. Este proceso disminuye la repulsión entre partículas, haciendo que se aglomeren y mejoren la trabajabilidad del material (Driss et al., 2021).

Reacción puzolánica:



En esta etapa se forman los compuestos cementantes responsables del aumento en la cohesión y la resistencia al corte. Estas reacciones ocurren de manera gradual, proporcionando una mejora duradera en las propiedades del suelo.

3.2.27 Normas técnicas aplicables en el Perú

El estudio de la estabilidad de taludes y la mejora de suelos se rige por diversas normas técnicas nacionales e internacionales. En el Perú, el RNE establece en su Norma E.050 – Suelos y Cimentaciones los lineamientos para el reconocimiento de suelos, ensayos de laboratorio y control de calidad en obras civiles. Esta norma señala que todo proyecto que implique movimiento de tierras o excavaciones debe considerar el análisis de estabilidad de taludes, la clasificación de suelos y los ensayos de resistencia al corte (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021).

Asimismo, los procedimientos utilizados para la determinación de propiedades físicas y mecánicas del suelo deben seguir las metodologías establecidas por la ASTM y la AASHTO. Entre las normas más aplicadas se encuentran:

- **ASTM D4318:** Límites de Atterberg.
- **ASTM D3080:** Ensayo de corte directo.
- **ASTM D2166:** Resistencia a la compresión no confinada.
- **AASHTO T99 y T180:** Compactación estándar y modificada.

La aplicación de la normativa garantiza la validez técnica de los resultados experimentales y permite comparar los datos obtenidos con investigaciones similares realizadas en otros contextos.

3.2.28 Relación entre la granulometría y la respuesta del suelo estabilizado

La granulometría del suelo influye directamente en el comportamiento del material frente al tratamiento con óxido de calcio. Los suelos con una proporción equilibrada de finos y arena suelen responder mejor al proceso de estabilización, ya que permiten una adecuada difusión de los productos químicos y un mejor interbloqueo entre partículas.

En suelos predominantemente arcillosos, la reacción del CaO depende de la cantidad de minerales activos presentes, especialmente la montmorillonita y la illita, que reaccionan con el calcio para formar compuestos cementantes.

Según López y Ortiz (2018), los suelos con mayor contenido de montmorillonita presentan mejores resultados de estabilización debido a su alta capacidad de intercambio catiónico.

Por otro lado, el control de la granulometría durante la preparación de las muestras es esencial para tener resultados consistentes. La presencia de materiales orgánicos o limosos puede interferir en las reacciones químicas, reduciendo la eficiencia del CaO. Por ello, los suelos deben ser previamente tamizados y homogenizados antes de iniciar los ensayos de laboratorio.

3.2.29 Recomendaciones técnicas para la estabilización con CaO

El éxito de la estabilización de suelos arcillosos con óxido de calcio depende en gran medida de la correcta aplicación del material y de las condiciones de laboratorio o campo en que se ejecute el proceso. Diversos autores coinciden en que la preparación del terreno, la dosificación, la humedad y el tiempo de curado son factores determinantes en la efectividad del tratamiento. (Ingles y Metcalf, 2021)

En primer lugar, es indispensable realizar una caracterización previa del suelo, que favorezca en densidad aparente, límites de Atterberg, contenido de humedad natural y así como clasificación SUCS o AASHTO.

Estos ensayos permiten determinar el tipo de arcilla y su reactividad con el CaO.

La dosificación óptima de CaO debe definirse mediante ensayos de laboratorio, variando los porcentajes de adición entre 4 % y 15 %, según la plasticidad y el contenido de finos.

Durante la mezcla, el CaO debe aplicarse uniformemente sobre el suelo previamente pulverizado, garantizando una adecuada homogeneización. El contenido de humedad debe mantenerse cercano a la humedad óptima de compactación (± 2 %), lo que facilita la reacción de hidratación y el proceso de compactación.

El curado del suelo estabilizado debe realizarse en condiciones controladas durante al menos 7 a 28 días, a fin de permitir el desarrollo completo de las reacciones puzolánicas.

El control de calidad posterior toma en cuenta ensayos de resistencia a la compresión simple, la determinación de densidad seca y corte directo. De acuerdo con Beltrán (2025), la resistencia final de un suelo estabilizado con CaO puede incrementar entre 25% y 50% en contraste con su condición natural, siempre que la mezcla y el curado se realice bajo condiciones controladas.

3.2.30 Impacto ambiental y sostenibilidad del uso de óxido de calcio

El empleo de óxido de calcio para la estabilizar los suelos es una alternativa viable y más sostenible frente a intervenciones de gran impacto, como el reemplazo total del material o la construcción de estructura de contención de concreto. Asimismo, el CaO es un recurso disponible y bajo costo, que permite que su aplicación de manera controlada ayuda a mejorar las propiedades del suelo sin ocasionar una intervención excesiva sobre el terreno (Torres y Jiménez, 2023).

Durante su aplicación, el principal riesgo ambiental se asocia a la manipulación del material en polvo, que puede generar emisiones de partículas finas y elevar el pH del entorno inmediato. Aún así, dichos efectos pueden controlarse si se aplican de forma

preventivas, como en uso de equipos de seguridad para el personal, la humectación del material y confinamiento del área donde se llevará a cabo el trabajo (Rueda, 2021).

En términos de sostenibilidad, la estabilización con CaO contribuye a la reducción del consumo de cemento Portland, cuyo proceso de producción es uno de los mayores emisores de dióxido de carbono (CO₂). Además, al mejorar la durabilidad del suelo tratado, se reduce la necesidad de realizar mantenimientos continuos en carreteras u otras superficies intervenidas, lo que permite reducir el impacto ambiental con el transcurso del tiempo.

3.2.31 Consideraciones económicas y de durabilidad

La realización de la estabilización con CaO presenta ventajas económicas importantes frente a otros métodos convencionales de mejoramiento de suelos. Su costo a nivel de toneladas es menos que el cemento, al igual que su transporte y aplicación es más práctico en obra. Además, no demanda equipos especializados, lo que es una alternativa accesible para proyectos de mediana y pequeña escala, específicamente en zonas rurales del Perú donde logísticos y técnicos suelen ser más limitados (Torres y Jiménez, 2023).

Sobre la durabilidad, los suelos estabilizados con CaO permiten mantener un buen comportamiento al transcurrir el tiempo y los cambios de humedad. Beltrán (2025) indicó que las reacciones puzolánicas no culminan de forma inmediata luego de la aplicación, sino que continúa desarrollándose durante semanas o meses. Este proceso progresivo permite que el suelo incremente su resistencia al corte y mejore su cohesión con el tiempo.

A diferencia de los tratamientos solo mecánicos, la estabilidad química con CaO genera un efecto duradero y uniforme en el suelo. Ello porque no solo mejora su compactación, sino que modifica de manera progresiva su estructura interna. Según con Okeke et al. (2021), cuando este procedimiento se aplica de forma adecuada en taludes

naturales y estructuras de soporte, la vida útil del suelo estabilizado puede ser mayor a 20 años.

3.3 Definición de términos

Talud. Es una porción de terreno inclinada, cuya forma se caracteriza por la presencia de una pendiente o por cambios marcados en su elevación. Se denomina ladera cuando el terreno se ha formado por procesos naturales, pero se emplea el término talud cuando la superficie inclinada ha sido generada por la intervención humana. Los taludes se agrupan en: los terraplenes, los cortes de ladera natural y muros de contención. (Suarez, 2009)

Óxido de calcio (CaO). Conocido comúnmente como cal viva, es un compuesto alcalino obtenido mediante el proceso de calcinación de la caliza. Al entrar en contacto con el agua, este material experimenta una reacción exotérmica de hidratación, transformándose en hidróxido de calcio. Posteriormente, dicho compuesto interactúa con los minerales arcillosos presentes en el suelo, favoreciendo reacciones fisicoquímicas que originan productos cementantes, como silicatos y aluminatos de calcio hidratado. Como consecuencia de estos procesos, el suelo mejora progresivamente su rigidez, cohesión y resistencia al corte, contribuyendo de manera directa al incremento de su estabilidad geotécnica (Okeke et al., 2021).

Estabilidad de taludes. Es la condición de equilibrio que permite evitar desplazamientos o fallas en masas de suelo. Esta estabilidad depende del balance entre las fuerzas que tienden a generar el movimiento del material y aquellas que ofrece resistencia, como la cohesión del suelo, la fricción interna y las características propias del terreno (Wyllie y Mah, 2020). Un talud se considera estable cuando el factor de seguridad supera 1.2, límite mínimo aceptable en obras civiles.

Cohesión. Es la capacidad que tienen las partículas o granos de roca para mantenerse unidos entre sí. Esta unión se produce, principalmente, por la presencia de una matriz cementante que favorece la adherencia del material. Dicho comportamiento se relaciona con el grado de diagénesis o litificación alcanzado, por lo que, mientras más avanzado sea este proceso, mayor será la cohesión entre los fragmentos. (Dávila, 2011)

Angulo de fricción. Es un ángulo de rozamiento interno, expresa la resistencia que presenta el suelo frente al deslizamiento entre sus partículas. Este parámetro está condicionado por diferentes características del material, entre ellas el tamaño y la forma de los granos, la distribución granulométrica y el grado de densidad que alcanza el suelo. (Juárez, 2005)

Erosión. Constituye un proceso continuo que afecta a las laderas por acción del viento y del agua. Con el tiempo, este fenómeno va cambiando la geometría del talud y como resultado, cambia la distribución de las fuerzas que actúan sobre él. Esto puede generar condiciones distintas a las consideradas al inicio del análisis de estabilidad, especialmente cuando el desgaste del terreno avanza de forma progresiva. (Juárez, 2005)

Factor de seguridad. Es la relación entre las fuerzas resistentes y deslizantes que actúan sobre un talud. Si el F.S. es mayor a 1, el talud se considera estable; si es igual o menor, existe riesgo de falla (Craig, 2022).

Estratigrafía. Es un subcampo de la geología que se ocupa de explicar y detallar el proceso de eones de duración por medio del cual se depositaron las capas de roca. Recordar que estamos tratando con épocas geológicas ayudará inmensamente a darle sentido a todo el asunto. (Juárez, 2005)

Suelos arcillosos. Están formados por partículas muy finas, menores a 0.002 mm, cuya estructura laminar les brinda plasticidad y cohesión. Sin embargo, cuando se satura de agua, puede deformarse, expandirse y disminuir su resistencia. Según Terzaghi, Peck y

Mesri (2020) su comportamiento está condicionado por la mineralogía y el contenido de agua.

Reacción puzolánica. La reacción puzolánica corresponde a un proceso químico mediante el cual el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, generado por la hidratación del óxido de calcio, reacciona con los silicatos (SiO_2) y aluminatos (Al_2O_3) presentes en el suelo. Como resultado de esta interacción, se forman compuestos cementantes, principalmente silicatos de calcio hidratado (C–S–H) y aluminatos de calcio hidratado (C–A–H), los cuales contribuyen a la unión de las partículas del suelo y al incremento de su resistencia al corte. Este proceso se desarrolla de manera progresiva y depende de condiciones adecuadas de humedad y temperatura para alcanzar un desempeño más eficiente en la estabilización del material. (Driss et al., 2021)

Humedad óptima de compactación. Se define como el contenido de agua que permite obtener la máxima densidad seca de un suelo durante su proceso de compactación. El valor se halla por medio de ensayos de Proctor estándar o modificado (AASHTO T99 y T180). Cuando se utiliza óxido de calcio como estabilizante, el contenido óptimo de humedad puede cambiar debido a la reacción exotérmica que ocurre durante su hidratación, ya que parte del agua disponible es consumida en este proceso (Budhu, 2023). Por ello, controlar de manera adecuada la humedad resulta fundamental para lograr una buena compactación y garantizar que el suelo tratado mantenga un comportamiento resistente y durable con el tiempo.

Compactación del suelo. Es un procedimiento mecánico por medio del cual se realizan reducciones de los vacíos existentes entre sus partículas, lo que permite incrementar su densidad seca y mejora su resistencia. Este proceso suele efectuarse con equipos como pisonés, rodillos u otros medios de compactación. Cuando el suelo logra una

compactación apropiada, presenta mejor deformabilidad y permeabilidad además de una mayor resistencia al corte (Ingles y Metcalf, 2021).

Peso específico. Es la expresión de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la masa de un material por cada unidad de volumen. En geotecnia, esta propiedad es importante porque estima el comportamiento del suelo frente a esfuerzos, cargas y condiciones de estabilidad (Juárez, 2005).

Peso unitario del suelo. También conocido como peso particular, es la masa de un objeto expresada como porcentaje de su volumen. Explicaremos por qué el término correcto es densidad de peso y por qué la definición anterior ahora se considera anticuada y deplorable en una sección posterior (Juárez, 2005).

Plasticidad del suelo. Es la capacidad del suelo de deformarse sin romperse y se evalúa mediante los límites de Atterberg. Un índice de plasticidad elevado, frecuente en suelos arcillosos expansivos, puede favorecer problemas de inestabilidad. La incorporación de CaO ayuda a disminuir la interacción entre el agua y las partículas de arcilla (Zhang et al., 2020).

Intercambio catiónico. El intercambio catiónico es una de las primeras fases de la estabilización con CaO. En esta etapa, algunos iones presentes en el suelo son reemplazados por iones calcio, lo que favorece la floculación y aglomeración de las partículas arcillosas. Como resultado, el suelo disminuye su plasticidad y mejora su trabajabilidad, incluso antes de que se desarrollen con mayor intensidad las reacciones puzolánicas (Ingles y Metcalf, 2021).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de Investigación

De acuerdo a Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) la aplicada se enfoca a la solución de problemáticas concretas mediante conocimientos científicos y tecnológicos. Asimismo, Ruiz y Valenzuela (2022) indican que este tipo de estudios genera conocimientos con propósitos prácticos, permitiendo que se resuelvan situaciones específicas de un determinado contexto de estudio.

El tipo de la investigación fue aplicada, dado que se direccionó a solucionar problemas de inestabilidad del talud arcilloso localizado en Umaccta Baja por medio de la incorporación de óxido de calcio como material estabilizante. Los hallazgos permiten evaluar una alternativa técnica para mejorar el entorno geotécnicas del suelo y contribuir a la estabilidad de talud.

4.1.2 Nivel de Investigación

El nivel explicativo presenta como objetivo el establecimiento de las causas de los fenómenos y explica la relación entre las variables bajo estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). Asimismo, Ruiz y Valenzuela (2022) indicaron que el nivel se orienta en evaluar como una variable genera cambios en otra, con ello permite comprobar asociaciones de causa efecto.

Además, el nivel fue explicativo porque realizó un análisis de la influencia de la adición de óxido de calcio sobre la estabilidad del talud. Para ello, se realizaron evaluaciones de las variaciones producidas en la cohesión, el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad del talud bajo distintos porcentajes de adición del estabilizante.

4.1.3 Diseño de Investigación

Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) indican que en el diseño experimental, el investigador realiza una manipulación deliberadamente la variable independiente para poder observar los cambios que produce en la variable dependiente bajo condiciones controladas. Asimismo, Ruiz y Valenzuela (2022) indican que este diseño permite determinar relaciones de causa y efecto mediante la aplicación de tratamientos y la comparación de los resultados obtenidos.

El estudio empleó un diseño experimental, porque se manipuló la variable independiente correspondiente a la adición de óxido de calcio (CaO) en porcentajes de 5%, 10% y 15%, con la finalidad de evaluar su efecto sobre la estabilidad del talud arcilloso. Para ello, se realizó el establecimiento de los parámetros de resistencia al corte del suelo estabilizado y posteriormente se evaluó el factor de seguridad mediante análisis geotécnico, comparando los resultados obtenidos con la condición natural del suelo.

4.1.4 Enfoque de Investigación

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) un estudio cuantitativo permite recopilar datos numéricos para establecer comportamientos mediante la estadística. Por su parte, Ruiz y Valenzuela (2022) indicaron que el enfoque se orienta en emplear medidas objetivas y datos cuantificables para explicar fenómenos y verificar asociaciones entre variables.

El estudio fue de enfoque cuantitativo, porque se recolectaron datos numéricos de ensayos geotécnicos realizados al suelo natural y al suelo estabilizado con óxido de calcio. Los datos fueron expresados a través de valores de cohesión, factor de seguridad y ángulo de fricción interna, permitiendo evaluar de forma objetiva el efecto del estabilizante sobre la estabilidad del talud arcilloso.

4.2 Ámbito temporal y espacial

4.2.1 *Ámbito temporal*

Según Ruiz y Valenzuela (2022) es el período durante de desarrollo del estudio y se ejecutaron las actividades para la obtención y análisis de los datos.

El estudio se llevó a cabo en el 2025, en donde se ejecutó las actividades de campo, la realización de muestras, ensayos de laboratorio, el análisis de datos y resultados vinculados con la influencia de la adición de óxido de calcio en la estabilidad del talud arcilloso.

4.2.2 *Ámbito Espacial*

El alcance espacial según Ruiz y Valenzuela (2022), es donde se realiza la recolección de información. En este sentido, se llevó a cabo en el sector de Umaccata Baja, situado en el distrito y la provincia de Abancay, departamento de Apurímac. Con el fin de obtener muestras representativas del material arcilloso presente en el talud, se llevó a cabo un estudio geotécnico del suelo en esta región.

4.3 Población y muestra

4.3.1 *Población*

Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) está constituida por fenómenos, procesos y objetos que permiten el análisis de un estudio. De manera similar, Ruiz y Valenzuela (2022) indicaron que la población se encuentra integrada por todas las unidades de análisis vinculadas con el problema de estudio.

El estudio estuvo integrado por los suelos arcillosos que se encuentran en el talud localizado en el sector Umaccata Baja.

4.3.2 *Muestra*

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) es un subconjunto de la población del cual se obtienen los datos para el desarrollo del estudio. Asimismo, Ruiz y Valenzuela

(2022) manifestaron que la muestra debe estar integrada adecuadamente por las características de la población.

La muestra fueron los datos del suelo extraídos de dos calicatas (C-1 y C-2), realizadas en el talud del sector Umaccata Baja. Para la ejecución de los ensayos de laboratorio se emplearon las muestras extraídas de las calicatas seleccionadas, las cuales se consideraron como representativas de las condiciones geotécnicas del área de estudio. Sobre dichas muestras se evaluó el efecto de la adición de óxido de calcio en porcentajes de 5 %, 10 % y 15 %.

Muestreo

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) el muestreo no probabilístico por criterio o intencional es la selección de las unidades de investigación según las características y criterios indicados por el investigador.

Los criterios considerados para la selección fueron:

- Homogeneidad del suelo en cuanto a textura y plasticidad.
- Presencia de indicios de inestabilidad (fisuras, erosión, desplazamientos).
- Accesibilidad y seguridad de los puntos de muestreo.
- Condición de humedad natural estable durante la extracción.

Las muestras alteradas y no alteradas se extrajeron con herramientas manuales, se almacenaron en bolsas rotuladas y fueron acondicionadas en laboratorio para el proceso de estabilización con CaO.

4.4 Instrumentos

Ruiz y Valenzuela (2022) son los medios empleados para la recolección de información de forma confiable y sistemática.

Se empleó fichas de laboratorio, formatos y registros de ensayos para el procesamiento de los datos. Además, se empleó equipos normalizados para los ensayos de

caracterización mecánica-física del suelo y el software GEO5 para la evaluación de estabilidad de taludes.

Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Fichas de registro de laboratorio, para anotar los datos físicos y mecánicos del suelo antes y después del tratamiento con CaO.
- Formatos normalizados de ensayo, elaborados según las normas ASTM, para registrar esfuerzos y deformaciones.
- Hojas de cálculo en Excel, para el procesamiento estadístico y cálculo de valores promedio.
- Software Geo5, empleado para modelar la estabilidad y calcular el factor de seguridad.

La confiabilidad de los instrumentos fue validada por juicio de expertos en geotecnia y estabilización de suelos (Ruiz y Valenzuela, 2022).

4.5 Procedimientos

Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) refiere que es la serie de actividades para recolectar la información requerida que permita lograr los objetivos formulados.

El procedimiento contó con siete etapas principales:

- Reconocimiento de campo: Identificación de taludes críticos entre las progresivas Km 7+140 y Km 7+300.
- Extracción de muestras: Obtención de suelos representativos para su análisis en laboratorio.
- Preparación y mezcla: Incorporación de CaO en proporciones del 5 % – 10 % – 15 %.

- Ensayos de laboratorio: Ejecución de pruebas de corte directo y compresión no confinada.
- Cálculo del factor de seguridad: Aplicación el software Geo5.
- Comparación de resultados: Análisis del efecto del CaO en la cohesión, fricción y estabilidad.
- Determinación del porcentaje óptimo: Identificación del nivel de CaO que maximiza la estabilidad del talud.

4.6 Análisis de datos

Se efectuó de manera rigurosa y estructurada, siguiendo los siguientes pasos:

- Codificación de datos: Se organizaron los valores experimentales de cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ) y factor de seguridad (F.S.) según los porcentajes de CaO aplicados.
- Procesamiento estadístico: Se realizó mediante una prueba de ANOVA, con un nivel de significancia de 5% ($\alpha = 0.05$) para evaluar el efecto del CaO en la resistencia al corte y el FS del talud. Previamente, se evaluó la normalidad y después la homogeneidad de varianzas (Levene), y ante diferencias significativas se aplicó la prueba Tukey HSD para comparar las dosificaciones.
- Elaboración de gráficos y tablas: Se representaron los resultados mediante tablas comparativas y gráficos de barras y líneas, mostrando la relación entre el aumento del CaO y la variación de los parámetros de estabilidad.
- Interpretación técnica: Se analizó cómo la adición de CaO influye en la estructura interna del suelo arcilloso, explicando los mecanismos de reacción química que aumentan la resistencia y reducen la plasticidad.

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el análisis de datos contribuye en la organización, procesamiento e interpretación de datos a fin de dar respuesta a las hipótesis.

4.7 Consideraciones éticas

El estudio se desarrolló cumpliendo de manera rigurosa con los principios éticos y profesionales que rigen la actividad científica. Se aseguro el respeto a los derechos de autor y la confidencialidad de la información técnica empleada, por lo que se utilizó solo documentos y datos de fuentes confiables. Las referencias bibliográficas, normativas y técnicas fueron citadas de manera correcta, según los lineamientos del formato APA (7.^a edición).

Ruiz y Valenzuela (2022) indican que los estudios deben efectuarse dentro del margen de principios éticos relacionados con la información utilizada sea transparente, honesta y veraz.

V. Resultados y discusión

5.1 Resultados

5.1.1 Estudio topográfico

El estudio de topografía, se realizó empleando un dron y un GPS diferencial, estos equipos nos ayudaron para describir las características geométricas del área evaluada, lo cual nos brindaron como resultado una ortofoto referenciada, figura 8. La zona de estudio presenta una topografía accidentada, lo que supuso un desafío para el levantamiento; no obstante, se obtuvo un levantamiento detallado con curvas de nivel secundarias cada 1.00 m y principales cada 5.00 m, sin registrarse inconvenientes importantes.

La investigación se desarrolló en el tramo km 7+140 al km 7+300 de la vía de evitamiento de Abancay, en el sector Umaccata Baja, zona con particularidades geológicas y geotécnicas que condicionan la estabilidad del terreno. El análisis de campo permitió delimitar dos subtramos con progresivas cada 20 m, donde se registró un nivel medio del factor de seguridad y una alta probabilidad de falla en los taludes.

Tabla 2

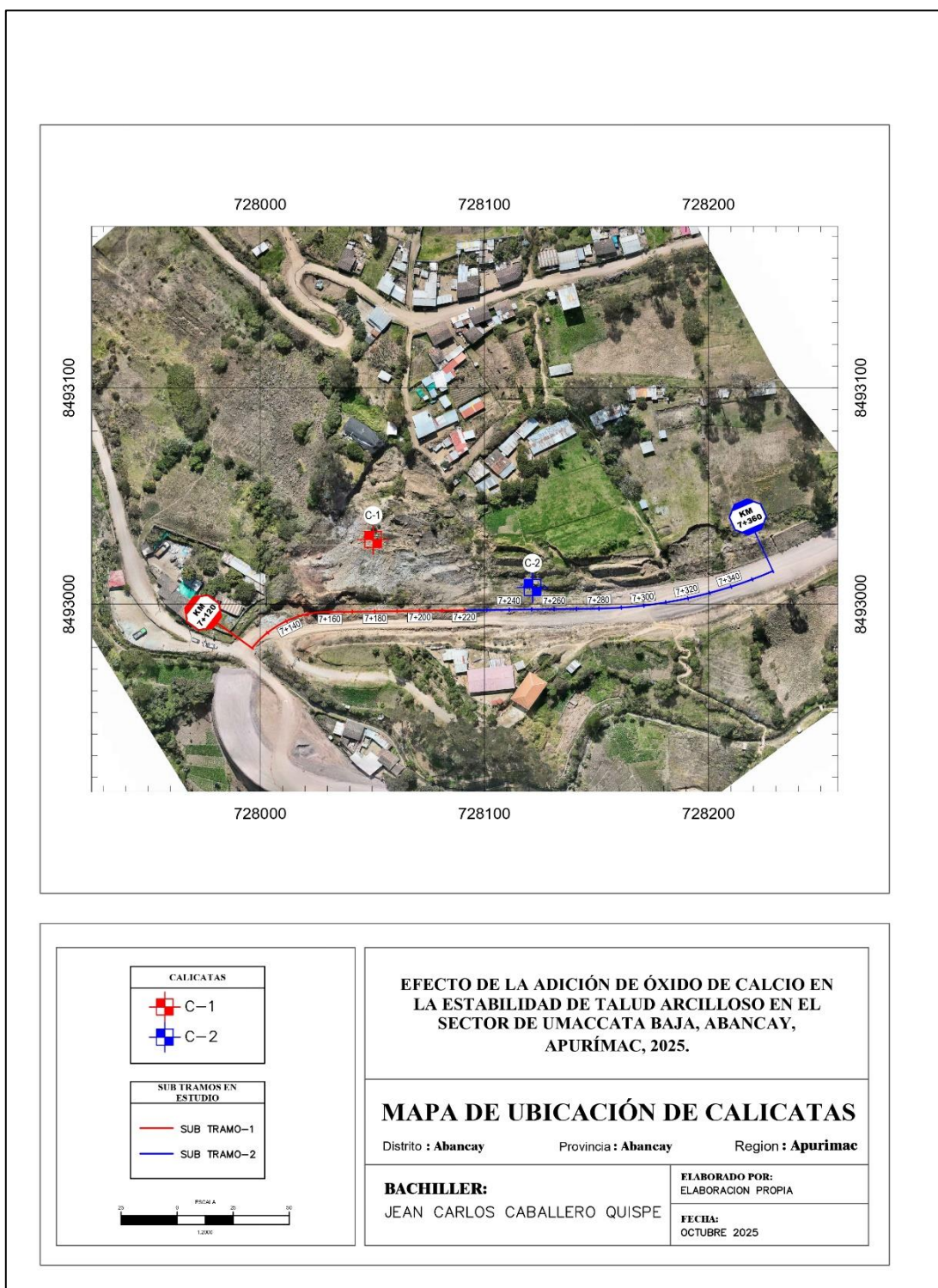
Ubicación de las secciones transversales estudiadas

Calicata	Coordenadas			Lugar
	Este	Norte		
C-1	728050	8493030	Sub tramo -1	7+140- km 7+160
				7+160- km 7+180
				7+180- km 7+200
				7+200- km 7+220
C-2	728122	8493008	Sub tramo -2	7+220- km 7+240
				7+240- km 7+260
				7+260- km 7+280
				7+280- km 7+300

Nota. En cada subtramo se realizó la exploración del estudio de mecánica de suelos.

Figura 8

Mapa de ubicación de la zona de estudio.



Nota. Se visualiza dos subtramos y la ubicación de las exploraciones del estudio de mecánica de suelos.

5.1.2 Estudio de mecánica de suelos

Mediante la recopilación de información se identificó en el material arcilloso del tramo km 7+140 al km 7+300 de la vía de evitamiento de la ciudad de Abancay, sector Umaccata Baja. Se optó en tomar dos muestras representativas en lugares estratégicos etiquetadas como C-1 y C-2, los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran a continuación.

5.1.2.1 Propiedades físicas y clasificación del suelo

Tabla 3

Análisis granulométrico del suelo.

Resultados del Análisis Granulométrico y Límites de Consistencia		
Parámetro	Calicata C-1	Calicata C-2
Profundidad de muestreo (m)	2.00	2.00
Peso total de muestra (gr)	4 021.90	2 001.70
Peso seco después del lavado (gr)	2 685.80	635.70
% Gravas (≥ 4.75 mm)	24.71%	5.67%
% Arenas (0.075 – 4.75 mm)	41.90%	25.82%
% Finos (≤ 0.075 mm)	33.39%	68.51%
Límite Líquido (LL)	32.07%	35.39%
Límite Plástico (LP)	22.00%	20.21%
Índice de Plasticidad (IP = LL – LP)	10.07%	15.18%
Clasificación AASHTO (M145-91)	A-2-4: Grava y arena arcillosa o limosa	A-6: Suelo arcilloso de mediana plasticidad
Clasificación SUCS (ASTM D2487)	SC: Arena arcillosa	CL: Arcilla inorgánica de mediana plasticidad
Textura predominante	Arena arcillosa con contenido medio de gravas	Arcilla limosa con poca arena y baja permeabilidad

Nota. Los resultados se realizaron a las muestras obtenidas de las calicatas C-1 y C-2 del sector, la clasificación de los suelos se efectuó de acuerdo con los sistemas AASHTO M145-91 y SUCS (ASTM D2487). LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad.

Figura 9*Exploración C-1*

Nota. Exploración de la calicata C-1, observándose un perfil de suelo con tonalidad rojiza predominante y un corte claramente definido, diferenciándose visualmente de la otra calicata evaluada.

Figura 10*Exploración C-2*

Nota. Exploración de la calicata C-2, donde se observa un suelo arcilloso con evidencias de desprendimiento y pérdida de estabilidad en el talud.

Los resultados del análisis granulométrico y de consistencia realizados a las calicatas C-1 y C-2 muestran una marcada variabilidad textural y de comportamiento plástico del suelo a lo largo del tramo evaluado.

En la Calicata C-1, el contenido de arena (41.90%) y grava (24.71%) supera al de finos (33.39%), lo cual sugiere un suelo granular con cierto grado de cohesión. Los límites de consistencia ($LL = 32.07\%$ y $LP = 22.00\%$) arrojan un índice de plasticidad (IP) de 10.07%, indicando plasticidad media y buena capacidad de drenaje. Bajo la clasificación AASHTO se identifica como A-2-4, correspondiente a una arena o grava arcillosa o limosa, mientras que según SUCS es SC (arena arcillosa). Este tipo de material es estable y de buen comportamiento estructural al ser compactado, siendo apto para conformar bases o subrasantes en zonas con pendiente moderada.

Por el contrario, la Calicata C-02 evidencia predominio de finos (68.51%), con bajo contenido de arena (25.82%) y mínima grava (5.67%), lo que la clasifica como suelo predominantemente cohesivo. Los valores de $LL = 35.39\%$ y $LP = 20.21\%$ dan un IP de 15.18 %, que corresponde a una arcilla inorgánica de mediana plasticidad (CL, según SUCS). De acuerdo con AASHTO, se clasifica como A-6, caracterizada por baja permeabilidad, alta retención de humedad y tendencia al hinchamiento. Estas propiedades pueden afectar la estabilidad del talud, especialmente durante la temporada de lluvias o saturación.

En términos comparativos, la C-1 representa un suelo de mejor calidad geotécnica, con comportamiento friccional dominante, mientras que la C-2 refleja un suelo más plástico y susceptible a la deformación.

5.1.2.2 Ensayo de Proctor modificado. Los resultados establecen valor de humedad y densidad máxima que se requiere para que se compacte de manera óptima el suelo. Estos parámetros son esenciales para garantizar que el suelo proporcione una base

firme y confiable, capaz de resistir adecuadamente las cargas previstas. Asimismo, estos datos son fundamentales para mejorar el rediseño constructivo de los taludes, pues facilitan la adecuada configuración del suelo en campo y aseguran un desempeño durable.

Tabla 4

Resultados del ensayo de Proctor modificado.

Parámetro / Calicata	C-1	C-2
Profundidad de muestreo (m)	2.00	2.00
Ensayo	Proctor modificado (ASTM D-1557 / MTC E-115)	Proctor modificado (ASTM D-1557 / MTC E-115)
Volumen del molde	944 cm ³ (molde 6")	944 cm ³ (molde 6")
Nº de golpes / capa	56 golpes	56 golpes
Densidad máxima seca ($\rho_{d,max}$)	2.010 g/cm ³	1.863 g/cm ³
Humedad óptima (w_{opt})	11.74%	14.21%
Peso unitario seco ($\gamma_d = \rho_d \cdot g$)	19.72 kN/m ³	18.28 kN/m ³
Peso unitario húmedo a w_{opt} ($\gamma = \gamma_d \cdot (1+w)$)	22.03 kN/m ³	20.88 kN/m ³

Nota. Se visualiza la humedad óptima y densidad máxima seca.

C-1 presenta mayor densidad seca máxima (2.01 g/cm³) y menor humedad óptima (11.74%), lo que concuerda con su composición más granular (mayor % arena + grava). Esto indica mejor respuesta a la compactación y mayor capacidad portante relativa al estado compactado.

C-2 presenta menor densidad seca máxima (1.863 g/cm³) y mayor humedad óptima (14.21%), coherente con su alto contenido de finos (arcillas). Los suelos más finos suelen requerir mayor humedad para alcanzar la máxima compacidad y alcanzan densidades secas menores; además, presentan mayor susceptibilidad a cambios volumétricos por variaciones de humedad.

Estos resultados son clave para definir especificaciones de compactación en obra (objetivo: $\gamma_d \geq \gamma_{d, max}$ % cumplimiento y control de humedad $\pm 1-2\%$ de w_{opt}), y para

evaluar la necesidad de tratamientos (drenaje, estabilización) según la variabilidad espacial del material.

5.1.2.3 Adición de CaO en el Proctor modificado del suelo arcilloso. Las partículas se cribaron a través de filtros de malla n.º 4 y n.º 200, se añadió CaO en las proporciones 5 %, 10 % y 15 %. Los tamaños de las partículas transitan desde 4,75 mm hasta 0,075 mm. Para determinar el efecto de las adiciones de CaO a las propiedades de los límites de Atterberg y la densidad, se aplicó el ensayo de Proctor modificado en los dos puntos de ensayo C-1 y C-2.

Las modificaciones se realizaron con el fin de alcanzar los objetivos de la tesis, lo que permitió obtener datos más completos y detallados. Estos datos fueron esenciales para determinar el porcentaje más adecuado de CaO, lo que permitió ajustar la proporción y mejorar la estabilidad del material.

Tabla 5

Resultados del ensayo Proctor modificado con adiciones de CaO para C-1

Calicata	Porcentaje de adición de CaO	Densidad máxima seca (pd máx)	Humedad óptima (wopt)	Peso unitario seco ($\gamma_d = \rho \times 9.81$)
C-1	Muestra patrón	2.010 g/cm ³	11.74%	19.72 kN/m ³
	+ 5 % CaO	1.993 g/cm ³	12.38%	19.55 kN/m ³
	+ 10 % CaO	1.973 g/cm ³	12.81%	19.36 kN/m ³
	+ 15 % CaO	1.938 g/cm ³	13.27%	19.01 kN/m ³

Nota. Los valores corresponden a la densidad máxima seca y humedad óptima C-1.

Tabla 6

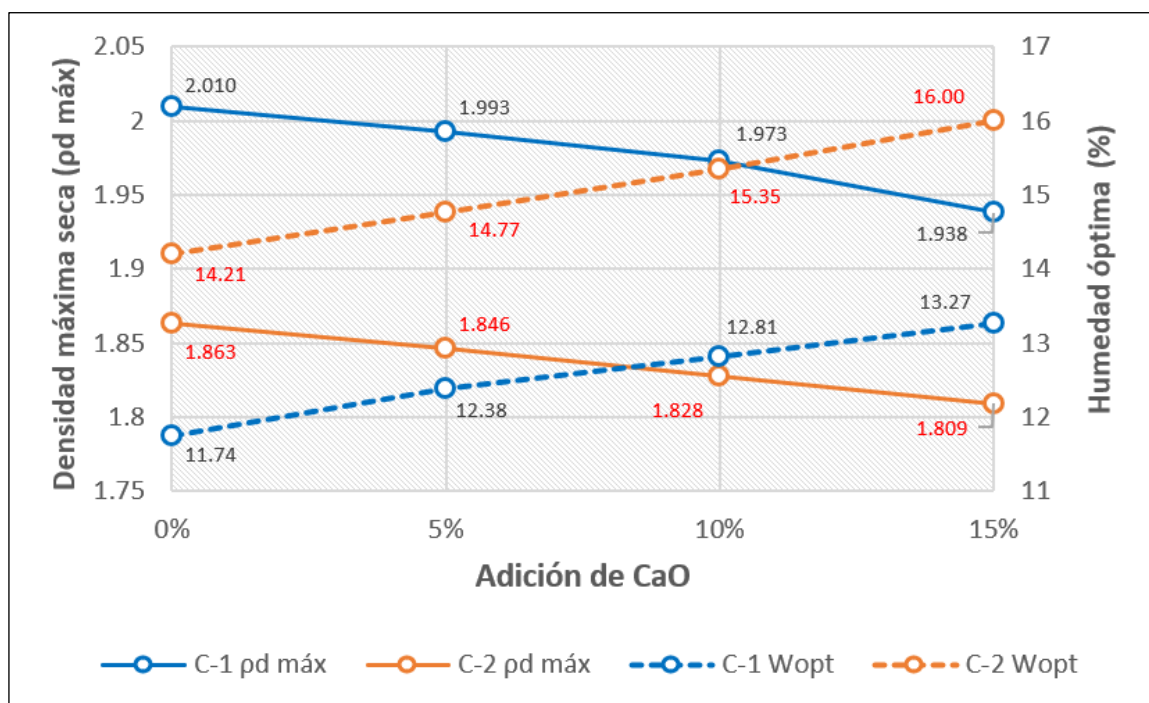
Resultados del ensayo Proctor modificado con adiciones de CaO para C-2

Calicata	Porcentaje de adición de CaO	Densidad máxima seca (pd máx)	Humedad óptima (wopt)	Peso unitario seco ($\gamma_d = \rho \times 9.81$)
C-2	Muestra patrón	1.863 g/cm ³	14.21%	18.28 kN/m ³
	+ 5 % CaO	1.846 g/cm ³	14.77%	18.11 kN/m ³
	+ 10 % CaO	1.828 g/cm ³	15.35%	17.93 kN/m ³
	+ 15 % CaO	1.809 g/cm ³	16.00%	17.75 kN/m ³

Nota. Se visualiza la densidad máxima seca y humedad óptima C-2 como también el peso unitario seco.

Figura 11

Resultados de % de adición VS pd Max.



Nota. Al incorporar de modo progresivo CaO se produjo una disminución de la densidad seca máxima y un incremento de la humedad óptima en las muestras de las calicatas C-1 y

C-2. La densidad seca máxima de la calicata C-1 disminuyó de 2.010 g/cm³ a 1.938 g/cm³, mientras que en la calicata C-2 pasó de 1.863 g/cm³ a 1.809 g/cm³. Asimismo, la humedad óptima aumentó de 11.74% a 13.27% en la calicata C-1 y de 14.21% a 16.00% en la calicata C-2, evidenciando el efecto del CaO sobre las características de compactación del suelo.

En la Calicata C-1 (arena arcillosa), la adición de CaO genera una ligera pérdida de compactación, debido a la reacción de floculación y aglomeración de partículas finas, aunque el material conserva una densidad relativamente alta (>1.90 g/cm³), mostrando buena respuesta a la estabilización.

En la Calicata C-02 (arcilla inorgánica), la adición de cal eleva la humedad óptima hasta 16.00%, reflejando la mayor capacidad de absorción de agua y reactividad de las arcillas. Sin embargo, la densidad seca se mantiene estable en torno a 1.809 g/cm³, indicando una mejor estructura y trabajabilidad del material tratado.

En conjunto, la adición de CaO mejora las propiedades plásticas y reduce la expansividad de los suelos, logrando una mezcla más estable y con mayor resistencia a la saturación, lo cual contribuye a la mejora del comportamiento del talud frente a la humedad y esfuerzos cortantes.

5.1.3 Propiedades Mecánicas y clasificación del suelo

Los resultados de las muestras describen cómo este responde frente a cargas, deformaciones y esfuerzos, definiendo su capacidad para resistir y mantenerse estable en obras como taludes. La adición CaO modificó estas propiedades, generando variaciones en la cohesión y ángulo de fricción, en general en la estabilidad del suelo.

Tabla 7*Parámetros de resistencia al corte*

Parámetro	Símbolo	Calicata C-1	Calicata C-2	Unidad
Profundidad de muestreo	—	2.00	2.00	m
Cohesión efectiva	c'	13.24	21.08	kPa
Ángulo de fricción interna	ϕ'	19.92	11.67	°
Clasificación del suelo (SUCS)	—	SC (arena arcillosa)	CL (arcilla inorgánica)	—
Clasificación AASHTO	—	A-2-4	A-6	—

Nota. Los valores de resistencia al corte de C-1 y C-2.

La Calicata C-01 presenta un suelo areno-arcilloso (SC) con baja cohesión y fricción moderada, lo que indica una condición inestable en estado natural. En cambio, la Calicata C-02, compuesta principalmente por arcillas inorgánicas (CL), evidencia mayor cohesión, pero menor fricción, lo que se traduce en una aparente buena estabilidad con reducida resistencia al corte total. En conjunto, ambos materiales reflejan una baja estabilidad del talud, por lo que se recomienda la aplicación de técnicas de refuerzo y estabilización para mejorar la resistencia al corte y reducir el riesgo de deslizamientos.

5.1.4 Adición de CaO en la resistencia al corte de suelo arcilloso

Se incorporaron adiciones de CaO en proporciones del 5 %, 10 % y 15 % a las muestras de las capas de suelo extraídas de las calicatas C-1 y C-2, con el objetivo de comprobar su influencia en la respuesta resistente del material. Las pruebas realizadas muestran cómo la estabilización con CaO condiciona la respuesta mecánica del suelo y los cambios producidos en cuanto a la capacidad portante y en cuanto a la estabilidad de las capas de suelo frente a esfuerzos cortantes.

Tabla 8

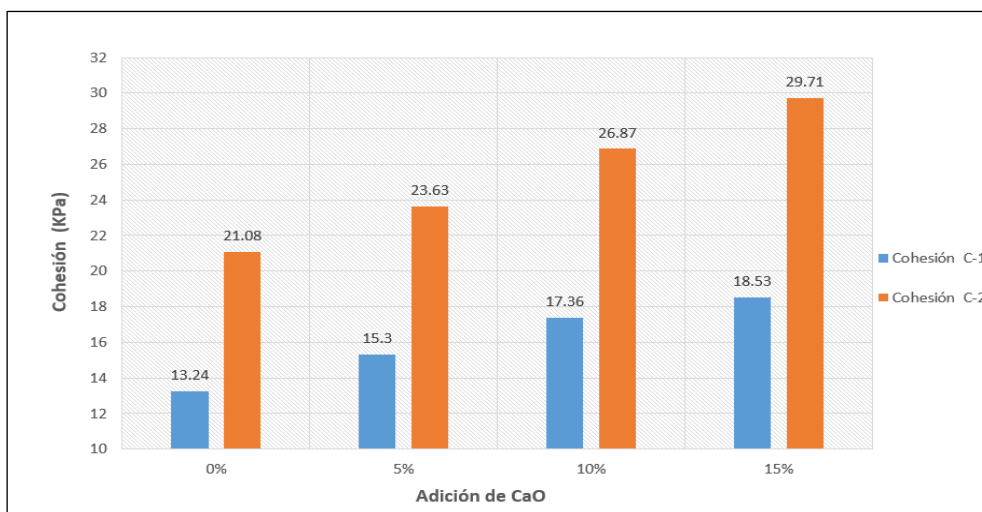
Resultados de la cohesión y ángulo de fricción en % de adición de CaO

Calicata	Adición CaO (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	observación
C-1	Muestra patrón	13.24	19.92	Ver anexo 4
	5%.	15.30	20.13	
	10%	17.36	21.75	
	15%	18.53	22.41	
C-2	Muestra patrón	21.08	11.67	Ver anexo 4
	5%	23.63	12.75	
	10%	26.87	14.74	
	15%	29.71	15.58	

Nota. En ambas calicatas se observa un incremento progresivo de los parámetros de resistencia al corte (c' y ϕ') conforme aumenta el porcentaje de CaO.

Figura 12

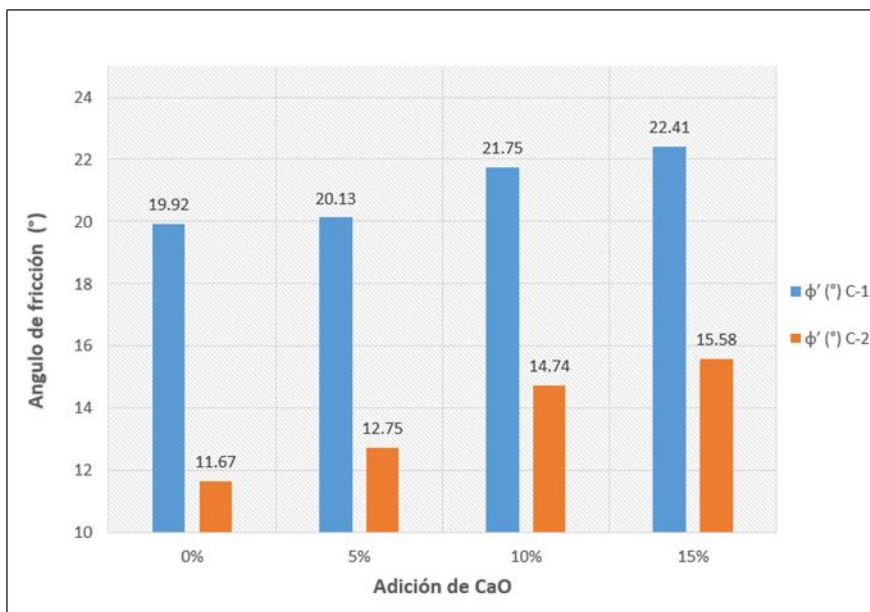
Resultados de la cohesión por calicata y en porcentaje de CaO



Nota. Cohesión de cada una de las muestras en porcentaje adición de CaO.

Figura 13

Resultados del ángulo de fricción por calicata y en porcentaje de CaO



Nota. Ángulo de fricción de cada una de las muestras en porcentaje de adición de CaO.

En la Calicata C-1 (arena arcillosa), la adición de CaO genera un aumento en la cohesión de 13.24 kPa a 18.53 kPa crecimiento de un 40% del valor patrón, similarmente el ángulo de fricción aumenta de 19.92° a 22.41° crecimiento de un 12%, se observa que el mayor salto ocurre entre 10% y 15% considerándose el punto óptimo de estabilización. El incremento de la cohesión refleja una cementación entre partículas y el incremento del ángulo de fricción indica una mejora en la estructura granular del suelo debido a su reacción con el CaO con las arcillas.

En la Calicata C-2 (arcilla inorgánica), la adición de CaO genera un aumento en la cohesión de 21.08 kPa a 29.71 kPa crecimiento de un 41% del valor patrón, similarmente el ángulo de fricción aumenta de 11.67° a 15.58° crecimiento de un 33%, se observa que el mayor salto ocurre entre 10% y 15% considerándose el punto óptimo de estabilización. Esta calicata presenta valores iniciales de cohesión menores, por su mayor contenido de finos.

En conclusión, la adición de CaO incrementa de manera progresiva y significativa tanto la cohesión como el ángulo de fricción. El comportamiento observado sugiere que el proceso de estabilización genera una mayor cementación interna y mejora la estructura del suelo. En ambas calicatas, el 10 % y 15 % de adición de CaO aparece como el porcentaje óptimo, donde se obtiene el mayor beneficio en resistencia al corte.

5.1.4 Factor de seguridad en la estabilización de suelos arcilloso

Los análisis de estabilidad se llevaron a cabo cada 20 m. en ambos subtramos, tomando en consideración la geometría particular de cada talud, así como de sus propiedades físicas y mecánicas: peso unitario, cohesión y ángulo de fricción en el estado natural. Posteriormente, estos parámetros se actualizaron con adiciones de 5%, 10% y 15% de CaO para evaluar su efecto en la resistencia al corte. Cada escenario se modeló con el programa de cálculo geotécnico GEO5 empleando sus distintos métodos de equilibrio límite, obteniendo los respectivos factores de seguridad. El FS de diseño se definió como el promedio de los valores obtenidos en cada subtramo. Lo cual permite representar el comportamiento global del talud estabilizado de forma global. A continuación, se describen los resultados obtenidos.

Tabla 9

Factor de seguridad en los dos subtramos en condiciones naturales de talud

N°	Km	Factor de seguridad				FS de diseño
		Bishop	Spencer	Janbu	Morgenster-Price	
Sub tramo -1	7+140- km 7+160	0.77	0.78	0.81	0.81	0.99
	7+160- km 7+180	0.99	0.99	0.99	0.99	
	7+180- km 7+200	1.07	1.06	1.06	1.06	
	7+200- km 7+220	1.11	1.11	1.11	1.11	
Sub tramo -2	7+220- km 7+240	0.71	0.71	0.71	0.72	0.76
	7+240- km 7+260	0.72	0.74	0.73	0.78	
	7+260- km 7+280	0.78	0.78	0.78	0.79	
	7+280- km 7+300	0.79	0.80	0.79	0.82	

Nota. Se observa los resultados de análisis con el software geotécnico GEO5 en sus distintos métodos, se promediaron y se tomó ese valor.

Tabla 10

Factor de seguridad en los dos subtramos al 5% de adición de CaO

N°	Km	Factor de seguridad				FS de diseño
		Bishop	Spencer	Janbu	Morgenster-Price	
Sub tramo -1	7+140- km 7+160	1.01	1.01	1.01	1.01	1.11
	7+160- km 7+180	1.16	1.15	1.15	1.15	
	7+180- km 7+200	1.12	1.12	1.12	1.12	
	7+200- km 7+220	1.16	1.15	1.15	1.15	
Sub tramo -2	7+220- km 7+240	1.11	1.11	1.11	1.11	1.05
	7+240- km 7+260	1.03	1.03	1.03	1.04	
	7+260- km 7+280	0.97	0.97	0.96	0.98	
	7+280- km 7+300	1.07	1.07	1.06	1.08	

Nota. Se observa los resultados de análisis con el software geotécnico GEO5 en sus distintos métodos, se promediaron y se tomó ese valor.

Tabla 11

Factor de seguridad en los dos subtramos al 10% de adición de CaO

N°	Km	Factor de seguridad				FS de diseño
		Bishop	Spencer	Janbu	Morgenster-Price	
Sub tramo -1	7+140- km 7+160	1.05	1.05	1.04	1.05	1.20
	7+160- km 7+180	1.27	1.27	1.27	1.27	
	7+180- km 7+200	1.23	1.23	1.23	1.23	
	7+200- km 7+220	1.27	1.27	1.27	1.27	
Sub tramo -2	7+220- km 7+240	1.23	1.23	1.23	1.23	1.15
	7+240- km 7+260	1.13	1.13	1.13	1.14	
	7+260- km 7+280	1.07	1.07	1.06	1.08	
	7+280- km 7+300	1.17	1.17	1.17	1.18	

Nota. Se observa los resultados de análisis con el software geotécnico GEO5 en sus distintos métodos, se promediaron y se tomó ese valor.

Tabla 12

Factor de seguridad en los dos subtramos al 15% de adición de CaO

N°	Km	Factor de seguridad				FS de diseño
		Bishop	Spencer	Janbu	Morgenster-Price	
Sub tramo -1	7+140- km 7+160	1.10	1.10	1.10	1.10	1.26
	7+160- km 7+180	1.34	1.33	1.33	1.33	
	7+180- km 7+200	1.29	1.29	1.29	1.29	
	7+200- km 7+220	1.34	1.33	1.33	1.33	
Sub tramo -2	7+220- km 7+240	1.33	1.33	1.33	1.33	1.25
	7+240- km 7+260	1.23	1.23	1.22	1.23	
	7+260- km 7+280	1.16	1.16	1.15	1.17	
	7+280- km 7+300	1.27	1.27	1.26	1.28	

Nota. Se observa los resultados de análisis con el software geotécnico GEO5 en sus distintos métodos, se promediaron y se tomó ese valor.

Tabla 13*Resumen de resultados de la adición en % del CaO en el FS*

Calicata	Adición CaO (%)	FS de diseño
C-1	Muestra patrón	0.99
	5%.	1.11
	10%	1.20
	15%	1.26
C-2	Muestra patrón	0.76
	5%	1.05
	10%	1.15
	15%	1.25

Nota. La adición de CaO produce un incremento progresivo del FS en ambas calicatas evaluadas. En todos los casos, el FS aumenta conforme crece el porcentaje de CaO, evidenciando una mejoría directa en la estabilidad del talud.

Los resultados en la C-1 sin estabilización, el FS es de 0.99, valor que se encuentra en condición crítica. Al incorporar 5% de CaO, el FS aumenta a 1.11, mostrando una primera mejora de la estabilidad. Esta tendencia continúa con porcentajes mayores, alcanzando un FS de 1.20 con 10% de CaO y hasta 1.26 con 15%, lo que demuestra un aumento total del 12% al 27% respecto al estado natural del suelo. Estos resultados permiten afirmar que la estabilización con CaO tiene un efecto directo y favorable sobre la resistencia al deslizamiento del talud, siendo los porcentajes entre 10% y 15% los que generan las condiciones más estables.

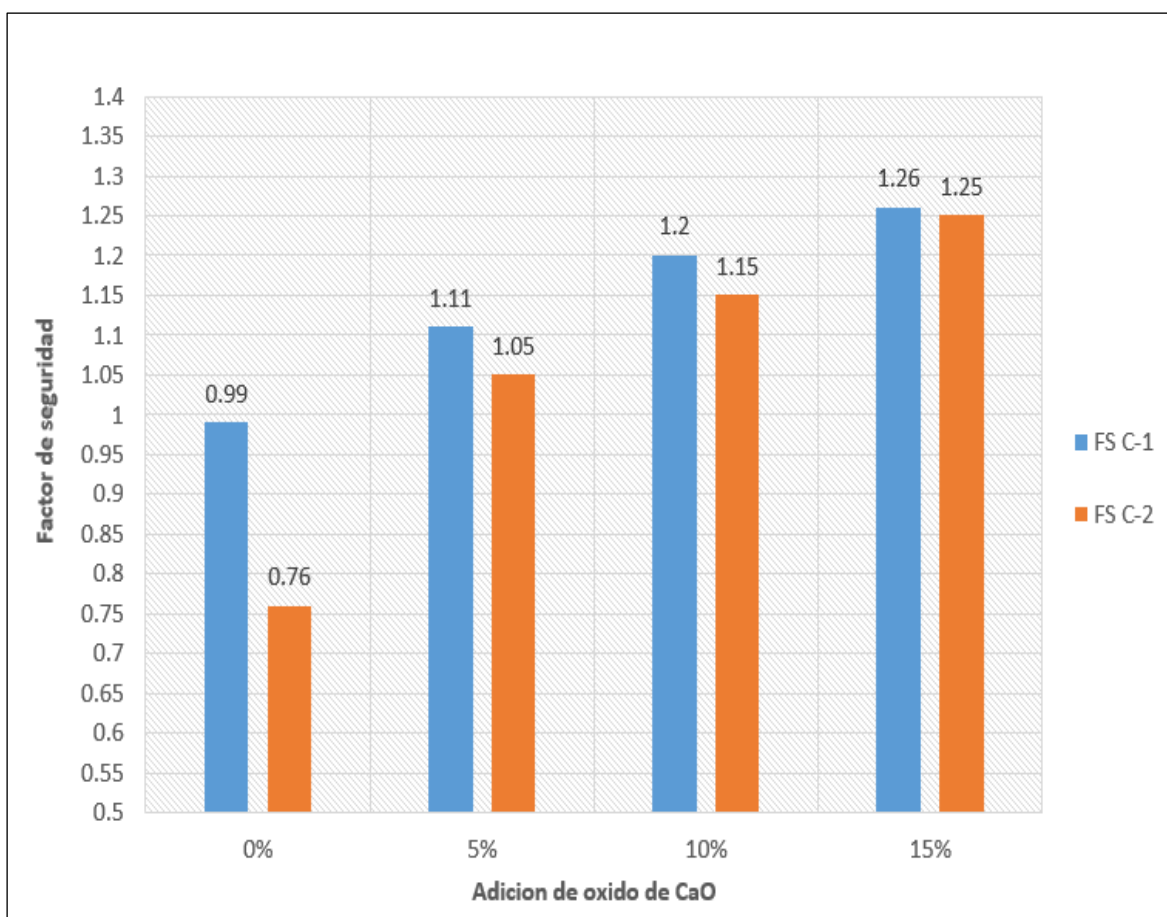
Los resultados en la C-2 sin estabilización, el FS es de 0.76, valor que se encuentra en condición crítica. Al incorporar 5% de CaO, el FS aumenta a 1.05, mostrando una primera mejora de la estabilidad. Esta tendencia continúa con porcentajes mayores, alcanzando un FS de 1.15 con 10% de CaO y hasta 1.25 con 15%, lo que demuestra un aumento total del 38% al 64% respecto al estado natural del suelo. Estos resultados permiten afirmar que la estabilización con CaO tiene un efecto directo y favorable sobre la

resistencia al deslizamiento del talud, siendo los porcentajes entre 10% y 15% los que generan las condiciones más estables.

En conclusión, la adición de CaO mejora significativamente el FS en ambas calicatas, pasando de condiciones críticas o inestables a valores mayores a 1.0, que indican estabilidad adecuada del talud. Los mejores resultados se encuentran entre 10% y 15% de CaO.

Figura 14

Resultados de % de adición VS Factor de Seguridad



Nota. Los resultados muestran que el 10 % y el 15 % de adición de CaO genera las condiciones más óptimas de resistencia y estabilidad, producto de las reacciones puzolánicas entre el CaO y las arcillas presentes, que favorecen la formación de compuestos cementantes y la reducción de plasticidad.

5.1.5 Prueba de hipótesis

5.1.5.1 Hipótesis general

H₀: La adición de óxido de calcio (5%, 10% y 15%) no influyen en la estabilidad de talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

H₁: La adición de óxido de calcio (5%, 10% y 15%) influyen en la estabilidad de talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

5.1.5.2 Prueba de hipótesis específica 1

H₀: La adición de óxido de calcio no influye en la cohesión y el ángulo de fricción interna en la estabilidad de talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay – Apurímac, 2025.

H₁: La adición de óxido de calcio influye en la cohesión y el ángulo de fricción interna en la estabilidad de talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay – Apurímac, 2025.

Paso 01: Recopilar los valores de la cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 14

Valores de la cohesión por calicata y en porcentaje de CaO

Calicata	Adición CaO (%)	Cohesión (kPa)	% de variación
C-1	Muestra patrón	13.24	--
	5 %	15.30	15.56 %
	10 %	17.36	31.12 %
	15 %	18.53	39.95 %
C-2	Muestra patrón	21.08	--
	5 %	23.63	12.10 %
	10 %	26.87	27.47 %
	15 %	29.71	40.94 %

Nota. La tabla presenta los valores de cohesión (en kPa) registrados en las calicatas C-1 y C-2 para diferentes porcentajes de adición de CaO (0%, 5%, 10% y 15%), incluyendo el

porcentaje de variación respecto al patrón sin adición. Se observa un incremento progresivo de la cohesión a medida que aumenta el contenido de óxido de calcio en ambas calicatas, alcanzando las mayores mejoras con el 15% de CaO (39.95% en C-1 y 40.94% en C-2).

Tabla 15

Valores del ángulo de fricción por calicata y en porcentaje de CaO

Calicata	Adición CaO (%)	Ángulo de fricción (°)	% de variación
C-1	Muestra patrón	19.92	--
	5 %	20.13	1.05 %
	10 %	21.75	9.19 %
	15%	22.41	12.50 %
C-2	Muestra patrón	11.67	--
	5 %	12.75	9.25 %
	10 %	14.74	26.31 %
	15 %	15.58	33.50 %

Nota: La tabla muestra los valores del ángulo de fricción interna obtenidos en las calicatas C-1 y C-2 según los distintos porcentajes de adición de CaO (0%, 5%, 10% y 15%), incluyendo el porcentaje de variación respecto al patrón. Se evidencia un incremento progresivo del ángulo de fricción a medida que aumenta la dosis de óxido de calcio, con las mayores mejoras en el tratamiento al 15% (12.50% en C-1 y 33.50% en C-2).

Paso 02: Análisis de normalidad de datos de Shapiro-Wilk

Tabla 16

Prueba de normalidad para la hipótesis específica 1

Variable	Calicata	Estadístico W	Valor-p	Distribución
Cohesión (c')	C-01	0.971	0.780	Normal
Ángulo de fricción (ϕ')	C-01	0.881	0.349	Normal
Cohesión (c')	C-02	0.986	0.905	Normal
Ángulo de fricción (ϕ')	C-02	0.975	0.590	Normal

Nota. Normalidad de variables cohesión y ángulo de fricción en ambas calicatas.

La prueba de normalidad aplicada a la hipótesis Específica 1 mostró que, para las muestras y porcentajes de adición de CaO en las calicatas, los valores p fueron superiores a 0.05. Este resultado confirma que no existe evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula de normalidad, por lo que se asume que los datos siguen una distribución normal.

En consecuencia, se establece que los valores de cohesión y ángulo de fricción presentan una distribución normal en cada combinación de calicata y porcentaje de CaO evaluado. Este cumplimiento del supuesto de normalidad respalda el uso de procedimientos estadísticos paramétricos para comparar las propiedades mecánicas del suelo.

Paso 03: Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)

Tabla 17

Prueba de homogeneidad para la hipótesis específica 1

Variable	Calicata	Estadístico Levene	Valor-p	Resultado
Cohesión (c')	C-1/C-2	1.486	0.23	Varianzas iguales
Ángulo de fricción (ϕ')	C-1/C-2	1.937	0.21	Varianzas iguales

Nota. Se visualiza prueba de Levene para la cohesión y el ángulo de fricción entre las calicatas C-1 y C-2. Los valores-p superiores a 0.05 confirman que las varianzas son iguales entre los grupos.

La prueba de Levene se aplicó para comprobar la homogeneidad de varianzas entre los distintos tratamientos de CaO para las dos calicatas. En todos los casos se obtuvieron valores de $p > 0.05$, lo que indica que las varianzas son iguales entre grupos.

Este resultado permite confirmar que los datos cumplen el segundo supuesto del ANOVA.

Paso 04: Prueba de ANOVA para la cohesión y ángulo de fricción

Tabla 18

Prueba de ANOVA de la cohesión para la hipótesis específica 1

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor-p
Entre grupos	169.832	3	169.832	17.324	0.004
Dentro de grupos	58.820	4	9.803	--	--
Total	228.653	7	--	--	--

Nota. Se visualiza el análisis de varianza (ANOVA) para la cohesión en función del porcentaje de CaO añadido. El valor-p de 0.004 (menor a 0.05) indica que la adición de óxido de calcio influye significativamente en la cohesión del suelo.

Tabla 19

Prueba de ANOVA del ángulo de fricción para la hipótesis específica 1

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor-p
Entre grupos	108.560	3	108.560	46.191	0.0003
Dentro de grupos	14.101	4	2.350	--	--
Total	122.661	7	--	--	--

Nota. Para el ángulo de fricción según el porcentaje de CaO añadido. El valor-p de 0.0003 (menor a 0.05) confirma que la adición de óxido de calcio influye significativamente en el ángulo de fricción interna del suelo.

El ANOVA favoreció en determinar si existen diferencias significativas entre los valores medios de cohesión y ángulo de fricción interna en función del porcentaje de CaO añadido. Los resultados muestran valores de $p < 0.05$ en todos los dos casos, lo que permite rechazar la hipótesis nula y afirmar que la adición de CaO influye significativamente en ambas variables. En conclusión, la adición de CaO tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia al corte del suelo, reflejada en los incrementos de cohesión y ángulo de fricción interna.

Paso 05: Prueba post-hoc de Tukey para la cohesión y ángulo de fricción

Tabla 20

Prueba post-hoc de Tukey de la cohesión para la hipótesis específica 1

Comparación (% CaO)	Diferencia de medias	Valor-p	Resultado
5 % – 0 %	2.55	< 5.54	No significativa
10 % – 0 %	5.79	> 5.54	Significativa
15 % – 0 %	8.63	> 5.54	Significativa
10 % – 5 %	3.24	< 5.54	No significativa

15 % – 5 %	6.08	< 5.54	Significativa
15 % – 10 %	2.84	< 5.54	No significativa

Nota. La tabla presenta las comparaciones por pares entre los distintos porcentajes de adición de CaO para la variable cohesión. Las diferencias significativas se observan al comparar el suelo patrón (0%) con los tratamientos al 10% y 15% de CaO.

Tabla 21

Prueba post-hoc de Tukey del ángulo de fricción para la hipótesis específica 1

Comparación (% CaO)	Diferencia de medias	Valor-p	Resultado
5 % – 0 %	1.08	< 2.992	No significativa
10 % – 0 %	3.07	> 2.992	Significativa
15 % – 0 %	3.91	> 2.992	Significativa
10 % – 5 %	1.99	< 2.992	No significativa
15 % – 5 %	2.83	< 2.992	No significativa
15 % – 10 %	0.84	< 2.992	No significativa

Nota. Se muestra las comparaciones por pares de los porcentajes de CaO agregado en relación con el ángulo de fricción interna. Las únicas diferencias estadísticamente significativas son las que se observan entre el suelo de control (0 %) y los regímenes del 10 % y del 15 %.

Los tratamientos que mostraron diferencias estadísticamente significativas se identificaron mediante la prueba post hoc de Tukey. Los resultados indican que las diferencias más significativas se observan al contrastar el suelo natural (0 %) con los suelos estabilizados con 10 % y 15 % de CaO. Estos dos últimos logran los mayores aumentos en la cohesión y el ángulo de fricción interna.

En resumen, los tratamientos que contienen 10 % y 15 % de óxido de calcio presentan las diferencias más sustanciales en comparación con el suelo no estabilizado, lo que confirma que estas concentraciones dan lugar a la mejora más significativa de la resistencia al corte del suelo.

El ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo arcilloso, son fuertemente afectados por el incremento de óxido de calcio (CaO), prueba de ello son los resultados obtenidos en las pruebas estadísticamente realizadas (Shapiro- Wilk Levene, ANOVA y Tukey). Comenzamos a observar un incremento de proporcionalidad en ambos parámetros de resistencia al corte a medida que se van incrementando las proporciones de CaO, no obstante, incrementos más visibles se dieron en las concentraciones del 10 % y 15 %.

Se acepta H_1 , confirmando que la adición de óxido de calcio influye en la cohesión y el ángulo de fricción interna en la estabilidad de talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay – Apurímac, 2025.

5.1.5.3 Prueba de hipótesis específica 2

H_0 : La aplicación de óxido de calcio no influye en el factor de seguridad, en la estabilidad de talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

H_1 : La aplicación de óxido de calcio influye en el factor de seguridad, en la estabilidad de talud arcillosos en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

Paso 01: Recopilar los valores del FS

Tabla 22

Valores del FS por calicata y en porcentaje de CaO

Calicata	Adición CaO (%)	FS de diseño	% de variación
C-1	Muestra patrón	0.99	--
	5 %.	1.11	12.12 %
	10 %	1.20	21.21 %
	15 %	1.26	27.27 %

	Muestra patrón	0.76	--
C-2	5 %	1.05	38.16 %
	10 %	1.15	51.32 %
	15 %	1.25	64.47 %

Nota. Se presenta los factores de seguridad (FS) obtenidos en las calicatas C-1 y C-2 para diferentes porcentajes de adición de CaO (0%, 5%, 10% y 15%). Se observa un incremento progresivo del FS a medida que aumenta el contenido de óxido de calcio, con mejoras del 27.27% en C-1 y del 64.47% en C-2 al 15% de CaO.

Paso 02: Análisis de normalidad de datos de Shapiro-Wilk

Tabla 23

Prueba de normalidad para la hipótesis específica 2

Variable	Calicata	Estadístico W	Valor-p	Distribución
FS	C-01	0.972	0.787	Normal
FS	C-02	0.932	0.492	Normal

Nota. Los valores del factor de seguridad en ambos sitios de prueba se presentan como resultado de la prueba de normalidad. Los valores p superiores a 0,05 (0,787 en C-1 y 0,492 en C-2) sugieren que los datos se ajustan a una distribución normal.

Los valores p fueron mayores que 0,05 para todas las muestras y porcentajes de adición de CaO en ambos pozos de prueba, tal como lo indica la prueba de normalidad realizada para la hipótesis específica 2. Este resultado confirma que no hay evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula de normalidad; por lo tanto, se presume que los datos siguen una distribución normal.

De este modo, se acaba de confirmar que el hecho de que los valores de FS siguen una distribución normal en cada combinación de fosa de prueba y los porcentajes de CaO que estamos evaluando, hace posible el cumplimiento del supuesto de normalidad que nos

permite utilizar procedimientos de tipo paramétricos para poder realizar la comparación de las propiedades mecánicas del suelo a las distintas estabilizaciones con CaO.

Paso 03: Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)

Tabla 24

Prueba de homogeneidad para la hipótesis específica 2

Variable	Calicata	Estadístico Levene	Valor-p	Resultado
Factor de seguridad	C-1/C-2	0.601	0.468	Varianzas iguales

Nota. Se muestra el resultado de la prueba de Levene para el factor de seguridad entre las calicatas C-1 y C-2. El valor-p de 0.468 (mayor a 0.05) confirma que las varianzas son iguales entre los grupos, este resultado permite confirmar que los datos cumplen el segundo supuesto del ANOVA.

Paso 04: Prueba de ANOVA para el factor de seguridad

Tabla 25

Prueba de ANOVA de la cohesión para la hipótesis específica 2

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor-p
Entre grupos	0.161	3	0.053	6.25	0.049
Dentro de grupos	0.034	4	0.008	--	--
Total	0.195	7	--	--	--

Nota. El valor-p de 0.049 (menor a 0.05) indica que la adición de óxido de calcio influye significativamente en el factor de seguridad. En conclusión, la adición de CaO tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el FS, reflejada en los incrementos del factor de seguridad.

Paso 05: Prueba post-hoc de Tukey para el factor de seguridad

Tabla 26

Prueba post-hoc de Tukey del FS para la hipótesis específica 2

Comparación (% CaO)	Diferencia de medias	Valor-p	Resultado
5 % – 0 %	0.205	< 0.275	No significativa
10 % – 0 %	0.300	> 0.275	Significativa
15 % – 0 %	0.380	> 0.275	Significativa
10 % – 5 %	0.095	< 0.275	No significativa
15 % – 5 %	0.175	< 0.275	No significativa
15 % – 10 %	0.080	< 0.275	No significativa

Nota. La tabla muestra las comparaciones por pares entre los porcentajes de adición de CaO para el factor de seguridad. Las diferencias significativas se presentan al comparar el suelo patrón (0%) con los tratamientos al 10% y 15% de CaO.

La prueba post-hoc de Tukey permitió identificar entre los tratamientos que existen diferencias estadísticamente significativas. Los resultados permiten corroborar que las diferencias más significativas son las que se obtienen al contrastar el suelo natural (0 %) de los suelos estabilizados al 5 %, 10 % y 15 % de CaO, destacando los suelos estabilizados al 10 % y el 15 % de CaO que fueron los que incrementaron en mayor medida el incremento en el factor de seguridad.

En conclusión, los tratamientos con 10 % y 15 % de óxido de calcio presenta las diferencias más significativas respecto al suelo sin estabilizar, confirmando que esta dosificación genera la mayor mejora en la resistencia al corte del suelo.

De acuerdo con los resultados de las pruebas estadísticas (Shapiro–Wilk, Levene, ANOVA y Tukey) se establece que la adición de CaO tiene un efecto significativo en el

factor de seguridad del suelo arcilloso. Al aumentar la proporción de CaO se produce una tendencia creciente en el FS y se aprecia un aumento más notorio entre el 10% y el 15% de adición.

En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa (H_1), confirmando que la aplicación de óxido de calcio influye en el factor de seguridad, en la estabilidad de talud arcillosos en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

5.1.5.4 Prueba de hipótesis específica 3

H_0 : 3. No existe un porcentaje óptimo de óxido de calcio que mejora significativamente la estabilidad del talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

H_1 : 3. Existe un porcentaje óptimo de óxido de calcio que mejora significativamente la estabilidad del talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, 2025.

Tabla 27

Resumen de los indicadores geotécnicos y de estabilidad según porcentaje de óxido de calcio.

CaO (%)	Cohesión C-1	Cohesión C-2	ϕ C-1	ϕ C-2	FS C-1	FS C-2
Muestra patrón	13.24	21.08	19.92	11.67	0.99	0.76
5	15.87	24.82	20.94	13.42	1.11	1.05
10	17.34	27.46	21.76	14.61	1.20	1.15
15	18.53	29.71	22.41	15.58	1.26	1.25

Nota. Resultados de cohesión, el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad en las calicatas C-1 y C-2, considerando los porcentajes de adición de óxido de calcio evaluados. Se observa una tendencia creciente en todos los indicadores conforme aumenta la dosificación de CaO, alcanzándose los valores máximos con la adición del 15 %.

Tabla 28

Variación porcentual de los indicadores geotécnicos y de estabilidad para el tratamiento óptimo (15 % CaO)

Indicador	C-1	C-2
Cohesión	+39.95%	+40.94%
Ángulo de fricción	+12.50%	+33.50%
FS	+27.27%	+64.47%

Nota. La variación porcentual se calculó tomando como referencia el suelo patrón (0 % de CaO). La dosificación del 15 % de óxido de calcio genera los mayores incrementos en los parámetros de resistencia al corte y en el factor de seguridad del talud.

Los resultados que se han consignado muestran que la adición de óxido de calcio mejora progresivamente la cohesión, el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad del talud. En el caso de una dosificación del 15 % de CaO, se obtuvieron los resultados más elevados en todos los parámetros de las dos calicatas, lográndose incrementos de cohesión de hasta un 40.94 %, en el ángulo de fricción interna de un 33.50 % y en el factor de seguridad de un 64.47 % respecto al suelo patrón.

Asimismo, se observa que ningún otro tratamiento evaluado (5 % y 10 % de CaO) superó simultáneamente los resultados obtenidos con la dosificación del 15 %, lo que permite identificarla como la alternativa de mejor desempeño para la estabilización del talud arcilloso estudiado.

En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa (H_1) y se rechaza la hipótesis nula (H_0), determinándose que existe un porcentaje óptimo de óxido de calcio que mejora significativamente la estabilidad del talud arcilloso del sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac, siendo el 15 % de CaO la dosificación que presenta el mejor comportamiento geotécnico y de estabilidad dentro de las condiciones evaluadas.

5.2 Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de CaO en (5 %, 10 % y 15 %), resulta efectiva para la estabilización de talud arcilloso en el sector de Umaccata Baja, Abancay, Apurímac. Mostrando un comportamiento coherente con investigaciones previas que reportan mejoras significativas en las propiedades mecánicas de suelos arcillosos tratados con CaO.

En relación a la hipótesis específica H₁ (La adición de óxido de calcio influye en la cohesión y el ángulo de fricción interna en la estabilidad de talud arcilloso), los resultados de la presente tesis evidencian una tendencia clara de mejora progresiva de los parámetros de resistencia al corte conforme aumenta la dosificación del CaO.

En las muestras patrón, la cohesión inicial fue de 13.24 KPa para la calicata C-1 y 21.08 KPa para la C-2. Tras la incorporación de CaO en diferentes proporciones, se registraron incrementos graduales de la cohesión, alcanzando valores de 18.53 KPa en la C-1 y 29.71 kPa en la C-2. Este comportamiento refleja una mejora significativa de la resistencia cohesiva del suelo arcilloso, atribuible a las reacciones químicas de floculación, aglomeración y cementación inducidas por la cal viva.

De manera similar, el ángulo de fricción interna mostró una evolución positiva frente a la adición de CaO. En las muestras sin estabilizar, los valores iniciales fueron de 19.92° para la C-1 y 11.67° para la C-2; sin embargo, tras la aplicación del aditivo, se obtuvieron incrementos hasta 22.41° en la C-1 y 15.58° en la C-2. Este aumento del ángulo de fricción evidencia una mejora en la interacción entre partículas del suelo, favoreciendo un comportamiento más resistente frente a esfuerzos cortantes, lo cual incide directamente en el incremento del factor de seguridad del talud.

En la investigación desarrollada por Silva (2019), se evaluó el efecto de la estabilización con CaO mediante combinaciones en distintas dosificaciones (15 % y 18 %). Los resultados obtenidos evidencian que la muestra patrón presentó una cohesión de 7.54 kPa y un ángulo de fricción interna de 16.34°, mientras que, tras la adición de CaO, dichos parámetros se incrementaron hasta 9.58 kPa y 20.75°, respectivamente. En ese sentido, el autor concluye que la incorporación de óxido de calcio genera un incremento significativo en la resistencia al corte del suelo, confirmando su eficacia como agente estabilizador.

En relación a la hipótesis específica H₂ (La aplicación de óxido de calcio influye significativamente en el factor de seguridad, al interactuar con la geometría del talud, generando un incremento en la estabilidad de talud arcilloso), los resultados obtenidos demuestran una tendencia consistente de incremento progresivo del FS a medida que aumenta la dosificación de CaO.

En las muestras patrón, el FS inicial fue de 0.99 para el subtramo-1 y 0.76 para el subtramo-2. Tras la incorporación de CaO en diferentes proporciones, se registraron incrementos graduales del FS, alcanzando valores de 1.26 y 1.25 respectivamente. Si bien los valores finales de FS no superan ampliamente el mínimo normativo, el incremento observado confirma la efectividad del CaO como agente estabilizador, reduciendo el riesgo de falla y mejorando el comportamiento mecánico del suelo arcilloso.

En el estudio realizado por Rivera (2023), se examinó la optimización tanto de la geometría como de las propiedades geotécnicas del suelo a través del uso de CaO en diferentes dosis (1%, 2% y 3%). Los resultados demostraron que el testigo de la muestra marcó un FS de 0,79 y una vez aplicada la dosificación de CaO, la muestra obtuvo un FS de 1,05. En este sentido, el autor determina que, por el hecho de aplicar CaO, se genera un aumento considerable en lo que es el factor de seguridad, contribuyendo así a la optimización de la estabilidad del talud.

Los resultados que aporta Sánchez (2019) demuestran que la utilización de las técnicas de bioingeniería mediante las raíces de pasto vetiver y la mejora de la geometría del talud permite que se obtenga un FS de 0.91 a 1.51, es decir, que se pase de una condición inestable a una estable. Dicha tendencia es semejante a la del presente estudio, donde la estabilización del suelo arcilloso mediante la adición de CaO muestra notables mejoras de los parámetros de resistencia al corte, teniendo estos como resultado incrementos progresivos del FS. Es de hacer notar que, si bien ambas investigaciones siguen metodologías algo diferentes, coinciden en dar cuenta de que el cambio positivo de las propiedades mecánicas del suelo y las condiciones geométricas del talud constituyen un factor determinante para la mejora de la estabilidad total.

En relación a la hipótesis específica H₃. Existe un porcentaje óptimo de CaO que produce una mejora significativa en la estabilidad del talud arcilloso refiere que el aumento de la dosificación de CaO producirá también un incremento gradual en los parámetros geotécnicos del suelo, así como en el factor de seguridad del talud. Se encontró que la adición del 15 % de CaO era la dosificación óptima de entre los porcentajes que se evaluaron, alcanzando incrementos de hasta el 40.94 % en la cohesión, 33.50 % en el ángulo de fricción interna y 64.47 % en el factor de seguridad del talud, haciendo referencia al suelo patrón. También se encontró que los mayores valores de cohesión, de ángulo de fricción y del factor de seguridad se obtuvieron en la dosificación del 15 % y eso es una indicación de un comportamiento geotécnico y de estabilidad del talud estudiado.

Estos resultados guardan concordancia con la investigación desarrollada por Rivera (2023), quien evaluó la optimización de la estabilidad de taludes mediante la incorporación de óxido de calcio en distintas dosificaciones. Los resultados mostraron que el factor de seguridad aumentó de 0.79 a 1.05 después del tratamiento con CaO, concluyendo que la

mejora de las propiedades geotécnicas del suelo contribuye directamente al incremento de la estabilidad del talud. De manera similar, en la presente investigación se observó un incremento progresivo del factor de seguridad conforme aumentó la dosificación de CaO, alcanzándose los mayores valores con el tratamiento al 15 %.

Asimismo, los resultados presentan similitud con lo reportado por Sánchez (2019), quien evaluó la estabilidad de taludes mediante técnicas de bioingeniería y optimización geométrica. El autor determinó que el factor de seguridad aumentó de 0.91 a 1.51, demostrando que la mejora de las condiciones geotécnicas y estructurales del talud repercute favorablemente en su estabilidad global. Aunque la metodología empleada difiere de la presente investigación, ambas coinciden en que el incremento de los parámetros geotécnicos se refleja en una mejora del factor de seguridad y, por consiguiente, de la estabilidad del talud.

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis alternativa H_3 y rechazar la hipótesis nula, determinándose que el 15 % de óxido de calcio constituye la dosificación óptima dentro de los porcentajes evaluados para mejorar la estabilidad del talud arcilloso del sector Umaccata Baja, Abancay, Apurímac.

VI. Conclusiones

Conclusión del objetivo general

Se determinó, que la adición de CaO, influye de manera significativa y positiva en la estabilidad de los taludes arcillosos del sector Umaccata Baja, Abancay-Apurímac, 2025. Los resultados experimentales y las pruebas estadísticas (ANOVA y Shapiro-Wilk) evidenciaron que el CaO mejora progresivamente las propiedades mecánicas del suelo, expresadas en los valores de cohesión (c'), ángulo de fricción interna (ϕ') y factor de seguridad (FS).

Asimismo, se observó que la estabilidad global de los taludes mejoró de manera sostenida conforme se incrementó la proporción de CaO, alcanzando los mejores resultados con una adición del 15 %, donde el suelo presentó las mayores resistencias al corte y FS. Este comportamiento evidencia que el CaO no solo mejora las propiedades individuales del suelo, sino que actúa como un agente de estabilización integral, reduciendo el riesgo de deslizamientos y deformaciones superficiales.

En consecuencia, se establece que el tratamiento de los suelos arcillosos con óxido de calcio es una alternativa técnica, económico y ambientalmente sostenible para el mejoramiento de los taludes en los espacios andinos, así como su aplicación puede prolongar el ciclo de vida en las obras de infraestructura vial y de contención, garantizando mayores niveles de seguridad y eficiencia en la infraestructura del sector.

Conclusión del objetivo específico 1

A partir de los cálculos realizados, se determinó que la adición de óxido de calcio influye significativamente en la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo arcilloso del sector Umaccata Baja. Los resultados de laboratorio mostraron un incremento constante en ambos parámetros a medida que aumentó la dosificación de CaO. En la calicata C-1, la cohesión se elevó de 13.24 KPa a 18.53 KPa, mientras que el ángulo de

fricción interna aumentó de 19.92° a 22.41° ; en la C-2, la cohesión se incrementó de 21.08 KPa a 9.71 KPa y el ángulo de fricción de 11.67° a 15.58° .

Por lo tanto, se valida la Hipótesis Específica 1, al comprobar que la adición de CaO mejora de forma estadísticamente significativa los parámetros de resistencia del suelo, otorgándole un comportamiento más estable y resistente frente a los esfuerzos de corte y las variaciones de humedad.

Conclusión del objetivo específico 2

En función a los cálculos realizados, se determinó que la adición de CaO influye directamente en el FS de los taludes arcillosos evaluados. En la calicata C-1, el FS aumentó de 0.99 (suelo natural) a 1.26 con la adición del 15 % de CaO, mientras que en la C-2 se incrementó de 0.76 a 1.25.

Este incremento refleja que la mejora de la cohesión y el ángulo de fricción interna generada por el CaO se traduce en un mayor equilibrio global del talud, disminuyendo la probabilidad de falla o desplazamiento. De acuerdo con las pruebas estadísticas, las diferencias entre las dosificaciones fueron significativas ($p < 0.05$), lo que confirma el efecto directo del CaO sobre la estabilidad estructural del suelo.

Conforme a lo que se necesitan las condiciones inestables del manual de carreteras - Estabilidad de Taludes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014), los valores obtenidos en el presente estudio se consideran unos valores de inestabilidad, ya que son menores al FS mínimo recomendado de 1.30 para taludes en condiciones permanentes. Sin embargo, al considerar la inclusión de CaO en distintas proporciones, se Notó un aumento progresivo del FS, y que las cifras se aproximan al umbral estipulado, indicando que la estabilización con CaO contribuye de manera importante a la mejora de la estabilidad del talud para validar la Hipótesis Específica 2.

Conclusión del objetivo específico 3

Con base en los cálculos realizados, del análisis comparativo entre las diferentes proporciones de CaO (5%, 10% y 15%), se determinó que el 15 % es el porcentaje óptimo de adición para lograr una mejora significativa y optima en las propiedades de resistencia al corte y estabilidad de los taludes. En esta proporción, los suelos alcanzaron los valores más altos de cohesión, ángulo de fricción interna y factor de seguridad, con diferencias estadísticamente comprobadas respecto a los porcentajes menores.

Este comportamiento se explica porque, al 15 % de CaO, las reacciones químicas de hidratación y carbonatación alcanzan su punto máximo de eficiencia, generando una cantidad óptima de compuestos cementantes activos que fortalecen la estructura del suelo sin producir excesiva rigidez. A dosis menores, las reacciones no son completas, mientras que un exceso de CaO puede dejar residuos no hidratados que reducen la uniformidad del material.

Por tanto, se concluye que el 15 % de CaO constituye la dosificación técnica más eficiente y estable, pues garantiza el equilibrio entre reacciones químicas activas, compactación, resistencia al corte y durabilidad estructural. Este porcentaje representa una referencia práctica y sustentable para futuros proyectos de estabilización de suelos arcillosos y control de deslizamientos en regiones con condiciones geotécnicas similares a la Umaccata Baja, Abancay.

VII. Recomendaciones

Recomendación 1

Se recomienda considerar el uso de CaO como material estabilizador en proyectos de mejoramiento y control de estabilidad de taludes arcillosos en la región de Apurímac y otras zonas con características geotécnicas similares. La investigación demostró que la adición del CaO mejora significativamente la cohesión, el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad, por lo que su aplicación práctica puede contribuir a reducir el riesgo de deslizamientos, incrementar la durabilidad de las estructuras viales y optimizar los costos de mantenimiento. Se considera necesario realizar análisis previos de caracterización geotécnica detallada antes de aplicar el aditivo. Esto permitirá definir con precisión la dosificación óptima de CaO.

Recomendación 2

Puesto que se evidenció un incremento notable del factor de seguridad (FS) con el uso del CaO, se recomienda aplicar esta técnica en taludes con condiciones marginales de estabilidad o con valores de FS inferiores a 1.0. En estos casos, el CaO puede actuar como un complemento eficaz a los métodos de estabilización tradicionales, como drenajes superficiales, muros de contención o geomallas. Así mismo se sugiere que los proyectos de estabilización con CaO consideren un control de calidad estricto durante la mezcla, compactación y curado del material, ya que estos factores influyen directamente en el rendimiento geotécnico del suelo tratado.

Recomendación 3

Dado que el 15 % de CaO resultó ser el porcentaje óptimo de estabilización, se recomienda que esta dosificación se adopte como valor de referencia inicial en la planificación de futuros proyectos de mejora de suelos arcillosos. No obstante, se enfatiza la necesidad de ajustar este valor mediante ensayos de laboratorio específicos para cada

caso, ya que las condiciones mineralógicas y climáticas pueden modificar el comportamiento del estabilizante.

Recomendación 4

Se recomienda profundizar en investigaciones complementarias orientadas a:

- Evaluar la influencia del tiempo de curado en la evolución de la resistencia del suelo estabilizado con CaO.
- Analizar el efecto combinado del CaO con otros materiales naturales como la ceniza volcánica, fibras vegetales o geotextiles, para mejorar la sostenibilidad del tratamiento.
- Estudiar el comportamiento a largo plazo del suelo estabilizado frente a ciclos de humedad y temperatura, asegurando su desempeño estructural y ambiental.

Estas líneas de investigación contribuirán al desarrollo de tecnologías de estabilización más sostenibles, duraderas y adaptadas al contexto geotécnico andino, fortaleciendo la gestión de riesgos y la resiliencia de la infraestructura vial peruana.

VIII. Referencias

- Alcantara, D. (2014). *Topografía y sus aplicaciones* (Vol. 1). México: Compañía Editorial Continental.
- Aqel, R. A., & El-Emam, M. (2024). Piping stabilization of clay soil using lime. *Geosciences*, 5(122), 14. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050122>
- Beltrán, S. (2025). *Diseño físico y modelación numérica en el comportamiento de taludes con patrones de lluvia y desecación extrema*. [Tesis de Maestría - Universidad de los andes Colombia]. <https://hdl.handle.net/1992/75579>
- Coliente, A. (2010). *Inestabilidad en laderas y taludes*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México] México. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3903>
- Craig, R. (2022). *Fundamentos de mecánica de suelos*. McGraw-Hill Education.
- Diniz, B. C., Fedrigo, W., Kleinert, T. R., Batista, G. S., & Núñez, W. P. (2024). Lime stabilization of tropical soil for resilient pavements: Mechanical, microscopic and mineralogical characteristics. *Materials*, 19(4720), 17. <https://doi.org/10.3390/ma17194720>
- Driss, A. A., Harichane, K., & Ghrici, M. (2021). Assessing the effect of moulding water content on the behaviour of lime-stabilised an expansive soil. *Geomechanics and Geoengineering*, 3(896-908), 17. <https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1903092>
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2021). *Soil strength and slope stability*. Wiley.

- Harichane, K., & Ghrici, M. (2022). *Effect of lime on the stabilization of an expansive clay soil in Algeria*. Journal of Geotechnical and Geological Engineering.
- Hasan, M. F., Utama, I. Z., & Agung, P. A. (2023). Clayshale stabilization using active natural lime to increase the shear strength of soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1(12025), 1173. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1173/1/012025>
- Hernández S., R., & Mendoza T., P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutascuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Huamán, B., & De la Cruz, F. (2019). *Inestabilidad de taludes por el método de elementos finitos en el sector Puka Puka Huaycco – Acoria – Huancavelica*. [tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/3100>
- Huamán, R. (2023). *Diseño y análisis de taludes en suelos cohesivos mediante métodos de equilibrio límite*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://doi.org/10.12345/huaman.2023>
- Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (2021). *Lime stabilization of fine-grained soils: Principles and applications*. Taylor y Francis.
- Jimenez, G. (2007). *TOPOGRAFIA PARA INGENIEROS CIVILES*. Armenia.
- Juárez, E. (2005). *Mecánica de suelos - Tomo I*. Fundamentos de la Mecánica de suelos.
- Lime stabilization of tropical soil for resilient pavements. Lime stabilization of tropical soil for resilient pavements. (2023). *Federal Highwaychnical Series Report No. 84*. U.S. Department of Transportation. <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/19/4720>

- López, J., & Ortiz, G. (2018). . *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 pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes].
<https://hdl.handle.net/20.500.14512/152>
- Manzoor, S. O., & Yousuf, A. (2020). Stabilisation of soils with lime: A review. *Journal of Materials and Enviromental Sciences*, 9(1538-1551), 11.
https://www.researchgate.net/publication/344330410_Stabilisationof_Soils_with_Lime_A_Review
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones Tecnicas Generales para Construcción*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4441297-10-2014-mtc-14>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *anual de Manual de Ensayo de materiales*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de Carreteras: DiseñoGeométrico*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_1%20DG-2018.pdf

- Okeke, C. A. (2021). Appropriate use of lime in the study of the physicochemical behaviour of stabilised lateritic soil under continuous water ingress. *Sustainability*, 1(257), 13. <https://doi.org/10.3390/su13010257>
- Pillaca Alvares Kodaly, S. S. (2012). : “*Aplicación de la metodología BIM, para la optimización del diseño geométrico de la vía evitamiento de Abancay – Apurímac, 2022*”. ABANCAY.
- Quispe, J., & Tarifa, W. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos con cal y cenizas de cáscara de castaña para la subrasante en la Av. Circunvalación, Tambopata 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/86568>
- Quispe, M. L., & Roldán, H. T. (2022). *Estabilización de suelo con Cloruro de Sodio (NaCl) y Cal para mejorar sus propiedades físico-mecánicas, Lima-2022*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/119376>
- Quispe, M. (2023). *Comportamiento mecánico de suelos arcillosos reforzados con aditivos químicos*. [Tesis pregrado, Universidad Tecnológica del Perú,] Archivo digital Universidad Tecnológica del Perú <https://doi.org/10.12345/quispe.2023>
- Ríos, H. A., & Solano, B. A. (2021). *Estudio exploratorio de estabilización de una subrasante de suelo arcilloso con cal viva como material estabilizante en el A.A.H.H. Las Colinas, calle Lagunas - San Juan Bautista – 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Científica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.14503/1379>

- Rivera, N. (2023). *Suelos arcillosos de depósitos marinos estabilizados con cal, para optimización de estructuras de contención mecánicamente estabilizadas con eosintéticos en proyectos de infraestructura vial*. [Tesis de maestría, Universidad de Medellín].
<https://repository.udemedellin.edu.co/server/api/core/bitstreams/eb7e682b-b64c-455f-b2f4-eedf304f909e/content>
- Ruiz, C. B., & Valenzuela, M. R. (2022). *Metodología de la investigación*. Fondo Editorial. <https://fondoeditorial.unat.edu.pe/index.php/EdiUnat/catalog/view/4/5/13>
- Sánchez, J. (2019). *Estabilización de taludes mediante la técnica de bioingeniería con cultivo de pastos vetiver en zonas tropicales*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/item/85c89124-c745-4f4f-9490-96a906bf4adb>
- Silva, J. (2019). *Influencia de la adición de la mezcla ceniza volante de cascarilla de cebada con cal en las propiedades físicas y mecánicas en el suelo de buenos aires*. [Tesis pregrado, Universidad Privada de Trujillo].
<https://repositorio.uprit.edu.pe/handle/UPRIT/180>
- Suárez Díaz, J. (2013). *Cálculo del Factor de Seguridad de un Talud*. Ingeniería de Suelos Ltda.
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Ingeniería de Suelos Ltda.
- Suárez Díaz, J. (2009). *Análisis geotécnico*. Universidad Industrial de Santander.

- Tacca, 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 César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/58189>
- Tarazona, A. M. (2024). *Efectividad del uso del cloruro de calcio en la estabilización de los suelos arcillosos de la subrasante en el tramo Nueva Requena – Campo Verde, Ucayali, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali] Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali. <https://hdl.handle.net/20.500.14621/7279>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (2020). *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley.
- Toro, J. (2014). *Evaluación de la inestabilidad de taludes en la carretera las Pirias – cruce Lambayeque, San Ignacio*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/476>
- Venegas. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de cal para carreteras no pavimentadas*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/92981>
- Vintimilla, M. B. (2009). *Estudio comparativo de la influencia de los parámetros de resistencia, la presión de poro y el método de análisis de estabilidad, en el factor de seguridad de un talud*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7490>

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.