

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la estabilización de la subrasante en
suelos arcillosos en la Circunvalación a Moyocorral, Abancay, Apurímac, 2023**

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Barrios Villarroel, Brigitte Nayeli

Para optar el Título Profesional de: Ingeniero civil

Abancay – Apurímac – Perú

2025

Acta de sustentación



**Universidad
Tecnológica de los Andes**

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 051



En la ciudad de Abancay, a los **19** días del mes de **agosto del 2025**, siendo las **09:00 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **0690-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **14 de agosto del 2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	MS.c. Ing. Maldonado Mendivil, Angel
Dictaminante :	Mag. Roldan Juárez, Américo
Replicante :	Ing. Cayo Baca, Holguer

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Influencia de la adicción de ceniza de eucalipto en la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos en la Circunvalación a Moyocorral, Abancay- Apurímac 2023

Desarrollado por las (los) Bachilleres (es):

Br: Barrios Villarroel, Brigitte Nayeli

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

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

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Barrios Villarroel, Brigitte Nayeli	Aprobada

Siendo las **12:16m** horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: MS.c. Ing. Maldonado Mendivil, Angel

Dictaminante: Mag. Roldan Juárez, Américo

Replicante: Ing. Cayo Baca, Holguer

Abancay 21 de agosto del 2025

Se expide la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 346

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

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

Reporte de similitud






22% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 21%  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	: Barrios Villarroel Brigitte Nayeli
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 73231481
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0006-5737-9092
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: Ph.D. Vásquez Ramírez Abbon Álex
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	: 1 año
Fuente de financiamiento	: Centro de investigación
Porcentaje de similitud	: 22%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Mi trabajo está dedicado primeramente a Dios quien en el transcurso de vida me ha dado fortaleza en mi vida. Seguidamente a mi madre Lucy y a mi padre Orfilio por apoyarme incondicionalmente, también a mi abuela Viqui por su amor incondicional y por último a mis hermanitos que me brindaron ánimos. A mi papito Gregorio, quien pereció y desde el cielo vela por mí.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios que me acompaña y por ser mi soporte en los momentos complicados. A mi padre y madre que su presencia en las traspasadas de estudio que me brindaron soporte. A mi mamita y papito por el apoyo incondicional. A mi alma mater por la educación de alta competitividad para mi formación de calidad. Por último, al Ph. D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex por brindarme su apoyo en mi tesis.

Resumen

La investigación desarrollada tuvo como propósito principal evidenciar el efecto que produce la incorporación de ceniza de eucalipto en la estabilización de suelos con baja capacidad portante, específicamente en el tramo comprendido entre la ruta Circunvalación y Moyocorral. Se realizaron adiciones del material en proporciones de 5%, 7.5% y 10%, planteándose como una alternativa técnica frente a las deficiencias estructurales del suelo. El estudio adoptó un diseño experimental con enfoque cuantitativo y nivel explicativo. La población de análisis estuvo conformada por el tramo vial mencionado, mientras que la muestra se obtuvo a partir de dos calicatas seleccionadas mediante un muestreo por conveniencia. Las técnicas empleadas incluyeron la observación, aplicación de instrumentos de medición de laboratorio. Los resultados experimentales demostraron que la adición de ceniza de eucalipto en las proporciones señaladas actúa favorablemente como estabilizador de la subrasante. En las pruebas de laboratorio se observó que el índice plástico disminuyó a valores de 8.7% y 6.6%, significativamente inferiores al 10% del suelo sin modificación. Asimismo, la densidad seca máxima alcanzó valores de 2.12 g/cm³, evidenciando un incremento respecto a la muestra natural. En cuanto al índice de soporte California (CBR), se registró una mejora de hasta un 25% comparado con el suelo sin adición. En consecuencia, se concluye que la incorporación de ceniza de eucalipto (CE) en proporciones del 5%, 7.5% y 10% ejerce una influencia significativa sobre las propiedades mecánicas del suelo, contribuyendo de manera efectiva a la estabilización de la subrasante en terrenos de baja capacidad portante.

Palabras clave: Suelos arcillosos, ceniza de eucalipto, propiedad mecánica, estabilizar, subrasante.

Abstract

The research conducted aimed primarily to demonstrate the effect produced by the incorporation of eucalyptus ash in the stabilization of soils with low bearing capacity, specifically in the section between the Circunvalación route and Moyocorral. Additions of the material were made in proportions of 5%, 7.5%, and 10%, proposed as a technical alternative to the soil's structural deficiencies. The study adopted an experimental design with a quantitative approach and explanatory level. The population of analysis consisted of the aforementioned road section, while the sample was obtained from two test pits selected through convenience sampling. The techniques employed included observation and the application of laboratory measurement instruments. The experimental results demonstrated that the addition of eucalyptus ash in the specified proportions acts favorably as a subgrade stabilizer. Laboratory tests showed that the plasticity index decreased to values of 8.7% and 6.6%, significantly lower than the 10% recorded for the untreated soil. Likewise, the maximum dry density reached values of 2.12 g/cm³, showing an increase compared to the natural sample. Regarding the California Bearing Ratio (CBR), an improvement of up to 25% was recorded compared to the soil without addition. Consequently, it is concluded that the incorporation of eucalyptus ash (EA) in proportions of 5%, 7.5%, and 10% exerts a significant influence on the mechanical properties of the soil, effectively contributing to the stabilization of subgrade layers in terrains with low bearing capacity.

Keywords: Clay soils, eucalyptus ash, mechanical property, stabilising, subgrade.

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	xii
Índice de figuras.....	xiv
Índice de anexos	xv
I. Introducción	16
II. Planteamiento del problema.....	18
2.1. Descripción y formulación del problema	18
2.1.1. Descripción del Problema.....	18
2.1.2. Formulación del Problema.....	21
2.1.2.1. Problema general	21
2.1.2.2. Problemas específicos.....	21
2.2. Objetivos.....	21
2.2.1. Objetivo general	21
2.2.2. Objetivos específicos.....	21
2.3. Justificación e importancia	22
2.4. Hipótesis	23

2.4.1. Hipótesis general	23
2.4.2. Hipótesis específicas.....	23
2.5. Variables.....	23
III. Marco teórico	26
3.1 Antecedentes.....	26
3.2 Bases teóricas	33
3.2.1. Ceniza de eucalipto.....	33
3.2.2. Estabilización de suelos.....	35
3.2.2.1. Tipos para estabilizar los suelos	36
3.2.3. Estabilización de la Subrasante	37
3.2.4. Propiedades.....	40
3.2.4.1. Estabilidad Volumétrica	40
3.2.4.2. Densidad máxima seca	41
3.2.4.3. Capacidad de soporte de California.....	42
3.3 Definición de términos	44
IV. Metodología	49
4.1. Tipo y nivel de investigación.....	49
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	50
4.3. Población y muestra.....	50
4.3.1. Población	50
4.3.2. Muestra	51
4.4. Instrumentos	51
4.5. Procedimientos	52
4.5.1. Recopilación de datos.....	52
4.6. Análisis de datos.....	55

4.7.	Consideraciones éticas.....	55
V.	Resultados y discusión.....	56
5.1.	Resultados.....	56
5.1.1.	Ceniza de eucalipto.....	56
5.1.2.	Análisis de la variación de la MDS de la subrasante con CE.....	61
5.1.3.	Determinación de la variación de la CBR de la subrasante con CE.....	65
5.2.	Prueba de hipótesis	68
5.2.1.	Contrastación de hipótesis	68
5.2.1.1.	Hipótesis general	68
5.2.1.2.	Hipótesis específicas.....	68
5.3.	Discusión de resultados	80
5.3.1.	Discusión de resultados del objetivo general:	80
VI.	Conclusiones	82
VII.	Recomendaciones.....	83
VIII.	Referencias.....	84
IX.	Anexos	95

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables	24
Tabla 2 Diametros retenidos para pesos en gramos.....	35
Tabla 3 Factores químicos	35
Tabla 4 Número de calicatas de acuerdo al IMDA.....	38
Tabla 5 Mínimo tiempo de sumergido para diferentes claases de suelo	42
Tabla 6 Parámetros de la muestra patrón CBR.....	43
Tabla 7 Pruebas realizados bajo las siguientes normas	51
Tabla 8 Cuadro de ubicación de calicatas.....	54
Tabla 9 Características químicas	56
Tabla 10 Clasificación de las muestras de suelo	57
Tabla 11 Proctor modificado de C-01	61
Tabla 12 Proctor modificado de C-02	62
Tabla 13 Capacidad de soporte de California.....	65
Tabla 14 Resumen de resultados	67
Tabla 15 Datos estadísticos	69
Tabla 16 Análisis de varianza de la MDS de C-01.....	70

Tabla 17 Diferencia de medias de la MDS de C-01	71
Tabla 18 Datos estadísticos	72
Tabla 19 Análisis de varianza de la MDS de C-02.....	73
Tabla 20 Diferencia de medias de la MDS de C-01	73
Tabla 21 Datos estadísticos	75
Tabla 22 Análisis de varianza del CBR de C-01	76
Tabla 23 Diferencia de medias del CBR de C-01.....	77
Tabla 24 Datos estadísticos	78
Tabla 25 Análisis de varianza del CBR de C-02	79
Tabla 26 Diferencia de medias del CBR de C-02.....	79

Índice de figuras

Figura 1 Tramo en estudio.....	53
Figura 2 Localización de muestras extraídas.....	53
Figura 3 Resultados del ensayo de LQ.....	58
Figura 4 Resultados del límite plástico	58
Figura 5 Resultados del IP.....	59
Figura 6 Resultados del límite líquido.....	59
Figura 7 Resultados de límite plástico.....	60
Figura 8 Resultados del IP.....	60
Figura 9 Máxima densidad seca	62
Figura 10 Humedad óptima.....	62
Figura 11 Máxima densidad seca de C-02	64
Figura 12 Humedad óptima de C-02	64
Figura 13 Capacidad de soporte de C-01	66
Figura 14 Capacidad de soporte de C-02	67

Índice de anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia	96
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables	98
Anexo 3 Resultados de laboratorio de la C-01	100
Anexo 4 Resultados de laboratorio C-02	136
Anexo 5. Fichas de validez de instrumentos	172

I. Introducción

El Perú atraviesa una situación crítica en cuanto al déficit de infraestructura vial, lo que representa una limitante significativa para el desarrollo económico, la integración territorial y la conectividad entre las diferentes regiones del país. Esta problemática se acentúa especialmente en las zonas rurales y de difícil acceso, donde predominan las trochas carrozables conformadas por suelos arcillosos de baja capacidad portante. Dichas condiciones geotécnicas dificultan la transitabilidad vehicular, especialmente en épocas de lluvias, generando deterioro acelerado de las vías y mayores costos de mantenimiento. Frente a esta realidad, se hace necesario proponer metodologías innovadoras de estabilización que permitan mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, garantizando una infraestructura vial más durable, económica y sostenible. En este contexto, la investigación se orientó a evaluar la influencia de la ceniza de eucalipto (CE) como agente estabilizador de suelos arcillosos, bajo el cumplimiento de los criterios técnicos establecidos por la Norma E.050 “Suelos y Cimentaciones” y las especificaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). La ceniza de eucalipto, producto residual de la combustión de biomasa vegetal, posee un alto contenido de óxidos de calcio, silicio y aluminio, componentes que favorecen reacciones puzolánicas con las partículas finas del suelo, mejorando su comportamiento estructural y su resistencia mecánica. Por ello, su incorporación se plantea como una alternativa económica, ecológica y viable para la estabilización de subrasantes en vías no pavimentadas.

El objetivo principal del estudio consistió en analizar cómo la adición de CE influye en las propiedades geotécnicas del suelo, específicamente en la densidad seca máxima (MDS) y en el Índice de Soporte California (CBR), parámetros fundamentales para evaluar la capacidad de carga y el desempeño estructural de una subrasante. Para ello, se recolectaron muestras representativas en el tramo vial comprendido entre la ruta Circunvalación y

Moyocorral, mediante la apertura de dos calicatas ubicadas estratégicamente según la variabilidad del terreno. Posteriormente, se elaboraron mezclas con diferentes dosificaciones de ceniza de eucalipto (5%, 7.5% y 10%) y se realizaron ensayos de laboratorio comparativos entre las muestras tratadas y la muestra natural sin modificación. Los procedimientos experimentales incluyeron ensayos de granulometría, límites de consistencia, Proctor modificado y CBR, conforme a las normas técnicas del MTC y ASTM. Estos análisis permitieron determinar los cambios en la plasticidad, la compactación y la capacidad portante del suelo producto de la adición del material estabilizante. Se observó que la ceniza de eucalipto actúa positivamente reduciendo la plasticidad y aumentando la densidad seca máxima, además de mejorar notablemente los valores del CBR, evidenciando una mayor resistencia y estabilidad del suelo frente a cargas.

La tesis está estructurada en cuatro capítulos esenciales que abordan de manera secuencial y lógica el proceso investigativo. El primer capítulo presenta el planteamiento del problema, la formulación de objetivos y la justificación técnica y social del estudio, destacando la necesidad de soluciones sostenibles para las vías rurales. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico, los antecedentes nacionales e internacionales y los fundamentos científicos relacionados con la estabilización de suelos y el uso de aditivos naturales. El tercer capítulo detalla la metodología, precisando el diseño experimental, el enfoque cuantitativo, el nivel explicativo, la hipótesis planteada, los instrumentos utilizados y el tratamiento estadístico de los datos. Finalmente, el cuarto capítulo expone y analiza los resultados experimentales, contrasta la hipótesis y presenta las conclusiones y recomendaciones orientadas a futuras investigaciones, resaltando el potencial de la ceniza de eucalipto como un material alternativo y sostenible para la mejora de suelos con baja capacidad portante.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

2.1.1. Descripción del Problema

El país español cuenta con aproximadamente 166,000 kilómetros de carreteras, de las cuales el 89% corresponde a vías secundarias y convencionales. Estas se utilizan con frecuencia para acceder a zonas pobladas o áreas fuera del entorno urbano, aunque su uso es menor en comparación con las vías principales. Durante las dos últimas décadas, estas carreteras han mostrado cifras preocupantes de siniestralidad, lo que ha generado un intenso debate y preocupación entre las autoridades públicas y la sociedad. En estas vías ocurren el 23% de los accidentes, pero concentran el 53% de los casos de fallecimiento, además de un significativo porcentaje de heridos graves. Esto significa que 2 de cada 3 fallecimientos por accidentes de pavimentos, tres de cada cuatro motorizados, y la mitad de los arrollamientos tienen lugar en este tipo de carreteras. (Adrián, 2024).

Brasil posee un suelo que carece de atributos físicos, mecánicos y químicos que lo capaciten para resistir las repercusiones derivadas del tráfico y el clima. En consecuencia, es conveniente realizar modificaciones que permitan cumplir con los requisitos y especificaciones de los proyectos. Estas modificaciones, denominadas estabilización del suelo, se basan en la realización de cambios mecánicos o químicos para conseguir una base sólida y óptima para su utilización, siempre considerando su viabilidad tanto económica como práctica. (Romanelli, 2019).

La presencia de suelos con propiedades inadecuadas constituye una problemática de alcance global, dado que estos materiales suelen exhibir valores de CBR considerablemente bajos, lo que limita su capacidad de soporte y su idoneidad como subrasantes en proyectos de infraestructura vial. En el contexto colombiano, diversos estudios geotécnicos han evidenciado que ciertas muestras de suelo presentan variaciones mínimas en su capacidad

portante al 95% de la densidad máxima seca, registrando un valor de CBR de 2.2% antes del proceso de inmersión, el cual se redujo a 1.9% posteriormente. Asimismo, se determinó un Índice de Plasticidad (IP) de 12%, razón por la cual, según la clasificación establecida por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), dichos suelos se ubican en el grupo A-2-6, siendo considerados inapropiados para su utilización como subrasante dentro del rango evaluado.

De manera similar, en el municipio de Agua de Dios se identificaron suelos con características geotécnicas desfavorables, cuya capacidad de soporte, medida mediante el ensayo CBR, osciló entre 1% y el 95% de la densidad máxima seca, evidenciando un comportamiento deficiente ante cargas. En este caso, el Índice de Plasticidad alcanzó un valor de 24%, lo que, conforme a la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), corresponde a un material con predominancia de arcillas de baja plasticidad. Estos resultados reflejan la necesidad de aplicar técnicas de estabilización adecuadas que permitan mejorar la respuesta mecánica de los suelos y garantizar su desempeño en obras de infraestructura vial. (Barragan & Cuervo, 2019).

En el país ecuatoriano, las investigaciones de terreno mostraron la existencia de suelos inadecuados, particularmente en la ciudad de Macas. Se documentó un CBR que oscilaba entre el 4.1% y el 95% densidad máxima seca (MDS), así como un índice de plasticidad (IP) del 52.22%. Mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), este tipo de muestra está clasificada dentro del grupo A-7-5. Esta circunstancia reiterada genera dificultades en la subrasante, las cuales eventualmente tendrán repercusiones en la base y la subbase cuando se implementen intervenciones. (Castillo, 2017).

El Perú contiene sus 146,010.00 km de carreteras sin pavimentar o que carecen de una conservación periódica permanente, lo que representa el 83.15% de todas las carreteras.

A lo largo del tiempo, estas vías presentan suelos inadecuados, lo que genera costos adicionales en su ejecución y mantenimiento. Se calcula que el 98% de estos trayectos escasean de cualquier todo tipo de trato aparente, ya sea en la base, subrasante, subbase u otras capas que constituyen un suelo. (SINAC, 2021).

Estudios realizados en la región de La Libertad, particularmente en la ciudad de Trujillo, han puesto en evidencia la existencia de suelos con propiedades geotécnicas desfavorables para su uso en obras de infraestructura vial. Los ensayos de laboratorio determinaron valores de Índice de Soporte California (CBR) de 1.88%, 1.84% y 1.73%, así como Índices de Plasticidad (IP) de 10.53%, 13.19% y 14.24%, respectivamente, lo que refleja una baja capacidad portante y una plasticidad moderada. De acuerdo con los criterios establecidos por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), estos materiales se clasifican como arcillas de baja plasticidad, lo que sugiere un comportamiento mecánico limitado ante cargas estructurales.

Por su parte, la clasificación según la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) los ubica dentro del grupo A-4, categoría que agrupa a suelos finos con pobre capacidad de soporte y alta susceptibilidad a la deformación bajo condiciones de humedad. Esta doble clasificación confirma que los suelos analizados no cumplen con las propiedades mínimas requeridas para su utilización directa en capas estructurales de pavimentos, por lo que se requiere la aplicación de técnicas de estabilización mecánica o química que mejoren su desempeño y garanticen su adecuación para fines viales. (Terrones, 2019).

El tramo evaluado se ubica en la ruta Circunvalación a Moyocorral, comprendido entre el km 0+000 y el km 3+000, con coordenadas aproximadas de 13°37'34" latitud sur y 72°35'29" longitud oeste, a una altitud de 2532 m s.n.m. Esta sección presenta una subrasante en mal estado, con baja capacidad portante y condiciones inadecuadas de transitabilidad. El

suelo, al encontrarse seco, genera una elevada emisión de polvo, afectando la visibilidad, la seguridad vial y la salud tanto de los conductores como de los pobladores cercanos. Además, exhibe hundimientos persistentes y encharcamientos durante periodos de precipitaciones pluviométricas, lo cual suscita un problema social. Habitualmente, este suelo no satisface las propiedades mecánicas contempladas en el manual de carreteras.

2.1.2. *Formulación del Problema*

2.1.2.1. Problema general

¿Cuál es la influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos en la ruta Circunvalación a Moyocorral, Abancay – Apurímac, 2023?

2.1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la densidad máxima seca de la subrasante en suelos arcillosos?
- b. ¿Cuál es la influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la capacidad de soporte de California de la subrasante en suelos arcillosos?

2.2. Objetivos

2.2.1. *Objetivo general*

Analizar la influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos en la ruta Circunvalación a Moyocorral, Abancay – Apurímac, 2023.

2.2.2. *Objetivos específicos*

- a. Demostrar la influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la densidad máxima seca de la subrasante en suelos arcillosos.
- b. Evaluar la influencia de la adición de ceniza de eucalipto en la capacidad de soporte de California de la subrasante en suelos arcillosos.

2.3. Justificación e importancia

El enfoque metodológico y estructurado fue la base de la tesis. Esta aproximación resulta ventajosa, dado que, mediante los efectos derivados de los correspondientes ensayos de laboratorio, se logró estimar qué características del suelo en estudio (estabilidad volumétrica y resistencia) pueden ser optimizadas. En consecuencia, se propuso una opción que consiguió estabilizar el suelo mediante el uso de CE, mejorando su capacidad como sustrato para vías, teniendo en cuenta sus criterios. La modificación de CE como alternativa para la estabilización es de gran relevancia, ya que contribuyó a mejorar las propiedades de resistencia de la carretera. Se tiene como alternativa contribuir significativamente en relación con investigaciones realizadas anteriormente, llevados a cabo hasta el presente.

La justificación tecnológica se fundamentó en la mejora de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la subrasante mediante la adición de ceniza de eucalipto. La innovación de una tecnología emergente implica la optimización de la estructura de un cemento vial. Desde una perspectiva económica, se justifica la medición del costo asociado a una demanda que contribuye a la resolución de una problemática originada tanto por factores climáticos como por la intervención humana. Se realizará un análisis a largo plazo para evitar gastos asociados al mantenimiento, lo que resulta viable. Desde una perspectiva social, se justifica dado que la modificación de CE en la subrasante como método de tratamiento previene la disgregación precoz, así como, los baches y/o hundimientos en la subrasante, contribuyendo así a la protección tanto de los vehículos como de sus conductores. La relevancia se enfoca en un desafío contemporáneo que son las vías que carecen de mantenimiento rutinario y periódico. Las vías en el Perú se encuentra desprovista de tempranas alternativas para solucionar en un lapso de tiempo corto.

2.4. Hipótesis

2.4.1. *Hipótesis general*

La adición de ceniza de eucalipto influye en la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos en la ruta Circunvalación a Moyocorral, Abancay – Apurímac, 2023.

2.4.2. *Hipótesis específicas*

- a. La adición de ceniza de eucalipto influye en la densidad máxima seca de la subrasante en suelos arcillosos.
- b. La adición de ceniza de eucalipto influye en la capacidad de soporte de California de la subrasante en suelos arcillosos.

2.5. Variables

- **Variable independiente:** Ceniza de Eucalipto
- **Variable dependiente:** Estabilización de la subrasante

Tabla1*Operacionalización de variables*

VARIABLES	Concepto científico (definición conceptual)	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Instrumento		
Variable independiente Ceniza de eucalipto	Ceniza de eucalipto: "estas incluyen establecer que, si estas se mezclan con cal, dejan sitio a composiciones persistentemente impenetrables y perdurables que actúan a manera de aglomerantes hidráulicos", eso nos menciona Salazar (pág. 3).	La ceniza de eucalipto se define operacionalmente mediante sus características principales, que incluyen la dosificación, granulometría y las propiedades cementantes. Cada una de estas características está compuesta por tres indicadores distintos.	Dosificación	5	%	Balanza		
		7.5	10	3(pulg.) - N°4	%			
		Granulometría	"N° 4 - N° 200"	%	Tamices			
						"< N° 200"	%	
						"Óxido de calcio"	%	
						"Dióxido de silicio"	%	Fichas de recopilación de datos
				Propiedades cementantes		"Trióxido de azufre"	%	
	Estabilización de la subrasante: según	La acción de estabilizar la	"Densidad máxima seca"	Alto Medio	"gr/cm ³ " "gr/cm ³ "	Formatos del MTC		

Variables	Concepto científico (definición conceptual)	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Instrumento
Variable dependiente Estabilización de la subrasante	Montejo (2002) nos dice que: “al estabilizar un estrato se refiere a la mejora de sus características (así como, durabilidad, resistencia, permeabilidad, plasticidad, densidad, etc.), mediante cualquier método”.	subrasante se define operacionalmente por medio de diversas magnitudes, que incluyen las distintas cualidades que tiene un suelo. Cada una de estas dimensiones está compuesta por tres indicadores distintos.	“Capacidad de soporte de California (CBR)”	Bajo	"gr/cm ³ "	
				Subrasante Bajo	%	
				“Subrasante medio”	%	
				“Subrasante bueno”	%	

Nota. Se muestra en la tabla 1 la operacionalización de la variable independiente y la variable dependiente donde se definen, así como se ponen sus dimensiones, indicadores, unidad e instrumento.

III. Marco teórico

3.1 Antecedentes

Rincón, (2020) En una investigación previa se evaluó el comportamiento de un suelo semicompactado sometido a procesos de estabilización mediante diferentes proporciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) combinadas con cal. El propósito fundamental del estudio fue analizar la respuesta del material ante esfuerzos de compresión confinada y determinar su capacidad portante a través del ensayo Índice de Soporte California (CBR). La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, que permitió medir de manera objetiva las variaciones en las propiedades mecánicas del suelo tratado. Se empleó un diseño experimental de tipo correlacional, aplicando métodos estadísticos sobre un conjunto de 13 muestras para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados.

Los resultados obtenidos demostraron un incremento significativo en la capacidad de carga del suelo al incorporar diferentes proporciones de CBCA. En particular, con una adición del 12% de ceniza, el valor del CBR aumentó de 23% a 65%, en comparación con la muestra sin estabilizar. De igual modo, al aplicar una mezcla compuesta por 11% de CBCA y 4% de cal, se alcanzó un valor de CBR del 87%, lo que representa una mejora del 33.4% respecto al suelo en su estado natural. Estos resultados evidencian la notable efectividad del uso combinado de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la cal como agentes estabilizadores, los cuales contribuyen de manera significativa al fortalecimiento estructural y la mejora de la capacidad portante del suelo, convirtiéndose en una alternativa viable y sostenible para la ingeniería vial.

Licuy, (2020). Una investigación previa analizó la mejoría del comportamiento de suelos arcillosos expansivos mediante la utilización de puzolanas naturales, obtenidas a partir de ceniza volcánica del Tungurahua y cascarilla de arroz. Se emplearon proporciones específicas de estos aditivos con el propósito de evaluar su efecto sobre las propiedades

físicas y mecánicas del suelo. El estudio se desarrolló bajo un enfoque teórico-experimental, combinando métodos cualitativos y cuantitativos que permitieron interpretar de manera integral los resultados de los ensayos de laboratorio. La muestra experimental estuvo conformada por siete unidades, de las cuales se seleccionaron tres suelos arcillosos con alta expansividad para el análisis principal, con el fin de representar distintos comportamientos geotécnicos dentro del mismo tipo de material.

Los resultados obtenidos revelaron una disminución significativa del índice de expansión del suelo al reemplazar el 20% del material natural por puzolanas. Las reducciones alcanzadas oscilaron entre 34% y 62%, evidenciando una mejora sustancial en la estabilidad volumétrica del material tratado. Estos hallazgos confirman que las puzolanas de origen natural constituyen una alternativa técnica eficiente y sostenible para la estabilización de suelos expansivos, al contribuir a la reducción de su comportamiento plástico y a la mejora de su resistencia mecánica. La conclusión de dicho estudio, sustentada en el análisis experimental, valida el potencial de estos materiales como agentes estabilizantes ecológicos dentro del ámbito de la ingeniería geotécnica y vial.

García, (2021). El objetivo central de la investigación consistió en analizar y comparar el efecto físico-mecánico generado por la incorporación de cáscara de huevo pulverizada y cal en un suelo arcilloso de comportamiento expansivo, empleando diversas proporciones de mezcla. El estudio se desarrolló bajo un diseño metodológico de tipo experimental, mediante el cual se recolectaron aproximadamente 300 kilogramos de material, destinados a su posterior caracterización y evaluación en laboratorio. Esta metodología permitió examinar de manera objetiva los cambios producidos en las propiedades mecánicas del suelo tras la aplicación de los aditivos seleccionados.

Los resultados obtenidos demostraron que la combinación óptima correspondió a la aplicación de 5% de yeso en conjunto con 1.0% de cáscara de huevo triturada, la cual

presentó un comportamiento significativamente favorable durante los ensayos realizados. Dicha mezcla logró reducir el índice de expansión del suelo a 1.73%, frente al 2.5% registrado en su estado natural, evidenciando una mejora sustancial en la estabilidad volumétrica del material. En consecuencia, se concluye que la utilización de aditivos alternativos de origen natural, como la cáscara de huevo y el yeso, incide positivamente en la disminución de la expansión volumétrica y, por ende, contribuye de manera efectiva a la estabilización de suelos arcillosos expansivos. Estos resultados refuerzan el potencial de tales materiales como opciones sostenibles y de bajo costo para el mejoramiento de suelos en proyectos de infraestructura vial y geotécnica.

Andaluz, (2022), dentro de un estudio enfocado en los efectos del cambio climático sobre la actividad agrícola en el sur de España, también se abordó el fortalecimiento de las propiedades físico-mecánicas de suelos finos utilizados como subrasante en proyectos viales, mediante la aplicación de ceniza de cáscara de arroz como agente estabilizante. El estudio, de carácter experimental, contempló el análisis de 15 muestras de suelo, cada una con un peso aproximado de 42 kg, recolectadas en diversas ubicaciones. A través de ensayos de laboratorio, se evidenció que el incremento gradual del aditivo generó mejoras notables en el comportamiento del material. En especial, con una dosificación del 8% de ceniza, se registró un valor CBR de 14.50%, evidenciando una mejora considerable frente al suelo sin estabilizar. Estos hallazgos respaldan el uso de este subproducto agroindustrial como una alternativa viable para fortalecer la subrasante en proyectos viales.

Canelo, (2021). la tesis tuvo objetivo evaluar el impacto de la estabilización de la subrasante en la deformación permanente de los pavimentos flexibles, utilizando ceniza volante como agente estabilizante. El procedimiento aplicado se basó en un enfoque documental, con un carácter expresivo y metódico. Uno de los hallazgos más relevantes fue que, al emplear una mezcla homogénea que contenía un 10% de los residuos ya

mencionados, se logró reducir en un 88.92% la desfiguración perpendicular en comparación con la subrasante desestabilizante. En conclusión, el estudio determinó que los restos ya mencionados son un aditivo altamente eficaz para la estabilización de subrasantes, ya que mejora notablemente el comportamiento frente a las deformaciones verticales, así como el rendimiento global de los pavimentos dinámicos tradicionales.

Huarcaya, (2021). En una investigación aplicada al mejoramiento de una vía rural de bajo tránsito, se analizó el desempeño de una subrasante arcillosa mediante la incorporación de ceniza como material estabilizante. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, empleando un diseño experimental de tipo longitudinal, lo que permitió evaluar de manera sistemática la evolución del comportamiento del suelo a lo largo del proceso de intervención. Los ensayos de laboratorio efectuados demostraron que la dosificación óptima correspondía al 15% de ceniza de cáscara de arroz (CCA), proporción que generó un aumento considerable en el valor del Índice de Soporte California (CBR). Este incremento reflejó una mejora sustancial en la capacidad portante del suelo, así como en sus propiedades de cohesión y resistencia al corte, factores determinantes para garantizar la estabilidad estructural de las capas inferiores del pavimento. los resultados obtenidos confirman que la aplicación de CCA constituye una alternativa técnica viable y eficiente para la estabilización de suelos arcillosos empleados en vías rurales de baja carga vehicular, contribuyendo no solo al fortalecimiento de la estructura vial, sino también a la sostenibilidad del proceso constructivo mediante el aprovechamiento de materiales residuales de origen agrícola.

Castillo, (2022). En un tramo vial rural con tránsito liviano, llevé a cabo un estudio enfocado en mejorar el rendimiento de una subrasante compuesta por suelo arcilloso. La investigación se enmarcó dentro de un enfoque experimental, con metodología cuantitativa y diseño longitudinal. A través de los ensayos de laboratorio, determiné que la dosificación más adecuada fue del 15% de CCA, lo cual se tradujo en un incremento notable del valor de

CBR, evidenciando un mejor desempeño en la capacidad de soporte del suelo, así como en su cohesión interna y resistencia al esfuerzo cortante. En resumen, comprobé que el uso de CCA constituye una solución técnica viable para estabilizar suelos arcillosos utilizados como subrasante en caminos rurales de baja circulación.

Quispe, (2022). en su trabajo de tesis, evaluó los efectos de añadir cal y ceniza de cáscara a la subrasante, con el propósito de optimizar su capacidad de soporte estructural. Para aquello, se aplicó un método de planteamiento cuantitativo, utilizando un diseño formativo y aplicado. Aquella investigación combinó tanto un esquema semi-experimental. La comunidad analizada abarcó los terrenos que componían la superficie de la vía estudiada, y se identificaron tres ubicaciones críticas a lo largo de la ruta para realizar calicatas representativas que permitieran un análisis más detallado. Los ensayos demostraron que al incorporar una combinación del 5% de cal y 20% de ceniza al suelo, se logró incrementar en un 25% el valor del CBR, lo que demostró un avance notable en la capacidad de soporte del suelo. Esta técnica contribuyó a mejorar las características mecánicas del terreno original, representando una opción viable para el mejoramiento de subrasantes. En consecuencia, se comprobó que dicha mezcla favorece notablemente el desempeño estructural del suelo, especialmente en contextos donde las condiciones geotécnicas son deficientes.

Mamani, (2022). En mi investigación analicé el efecto de estabilizar suelos empleados en obras viales mediante la aplicación de cal y ceniza de quinua. El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, siguiendo una metodología ordenada y rigurosa. El área de intervención comprendió toda la extensión del eje vial, focalizándose específicamente entre los kilómetros 19+000 y 20+250. Para obtener las muestras representativas, realicé tres calicatas aplicando un muestreo dirigido. Los resultados mostraron que al emplear un 100% de ceniza de quinua se logró un valor de CBR del 32.0%, mientras que al combinar 4% de cal con 10% de dicha ceniza se alcanzó un CBR de 26%,

valores considerablemente superiores al del suelo en estado natural. Esto demuestra que la interacción de ambos estabilizantes mejora notablemente la capacidad de soporte del terreno, contribuyendo así a una mayor estabilidad estructural en la vía analizada.

Quispe, (2023). La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos del uso de cenizas provenientes del café y del arroz en la estabilización de suelos arcillosos destinados a la subbase vial, aplicando una metodología de enfoque cuantitativo, carácter aplicado, diseño experimental y alcance explicativo, que permitió analizar detalladamente el comportamiento mecánico del suelo modificado. La muestra estuvo conformada por estratos arcillosos extraídos mediante calicatas, de los cuales se seleccionaron 12 unidades representativas para la realización de los ensayos de laboratorio. Los resultados demostraron que al incorporar un 5% de cenizas, el Índice de Soporte California (CBR) aumentó en 62.22%, mientras que con una proporción del 20%, el incremento alcanzó 97.07% en comparación con el suelo natural, lo que evidencia una mejora significativa en la capacidad portante y el desempeño estructural del material. De este modo, se determinó que una dosificación del 5% permite alcanzar condiciones adecuadas para su uso como subrasante, y que al aplicar porcentajes del 10% y 20%, el suelo exhibe un comportamiento mecánico notablemente superior. En síntesis, el empleo de cenizas de café y arroz constituye una alternativa técnica, económica y sostenible para optimizar las propiedades de los suelos arcillosos en proyectos viales, siempre que se utilicen proporciones controladas que garanticen estabilidad y eficiencia en el diseño de pavimentos.

López, (2018), La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el incremento de la resistencia de suelos arcillosos mediante la aplicación de cal, con el propósito de determinar su viabilidad técnica para ser utilizada en capas de subbase o base dentro de estructuras de pavimento. Para ello, se determinó la dosificación óptima del estabilizante mediante ensayos de laboratorio, empleando muestras de suelo recolectadas en diversos

sectores del distrito de Abancay. La proporción ideal de cal se estableció siguiendo el método de Eades y Grim, conforme a la norma ASTM D6276, que permite identificar la dosis de máxima eficiencia en la reacción entre el material estabilizador y el suelo. Los resultados mostraron que con una dosificación del 9% de cal, el Índice de Soporte California (CBR) alcanzó un valor de 15%, cumpliendo con los requerimientos técnicos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Sin embargo, el análisis de desempeño indicó que una dosificación del 8% de cal es suficiente para obtener una estabilización efectiva, mejorando la capacidad portante del suelo y optimizando los recursos empleados. En conclusión, el uso de cal como agente estabilizante constituye una alternativa técnica eficiente, económica y sostenible para el mejoramiento de suelos arcillosos destinados a infraestructuras viales, garantizando un comportamiento estructural adecuado y una mayor durabilidad del pavimento.

Zambrano, (2022). Este estudio evaluó el comportamiento físico de suelos arcillosos a partir de su estabilización con ceniza de bagazo de *Saccharum Officinarum* (CBCA), incorporando además soda cáustica (NaOH) como agente activador. La investigación, de tipo aplicada, se desarrolló bajo una metodología experimental con procedimientos estandarizados, lo que permitió garantizar los resultados obtenidos. Los datos revelaron que la combinación de CBCA con NaOH mejora significativamente el valor del CBR en comparación con el uso exclusivo de CBCA. De manera específica, con una dosificación del 11% de CBCA se obtuvo un CBR de 11.40%, mientras que al aplicar una mezcla del 6% de CBCA activada con NaOH, el CBR ascendió al 16%, superando el mínimo requerido para subrasantes según criterios técnicos de diseño vial. Adicionalmente, se evidenció una reducción en la variación volumétrica del suelo tratado. En conclusión, considero que la activación alcalina de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) utilizando hidróxido de sodio (NaOH) mejora notablemente sus propiedades como estabilizante, lo cual la

convierte en una opción técnica factible para optimizar la capacidad estructural de suelos arcillosos utilizados en plataformas viales.

Cano & Cardenas, (2021), en el transcurso de esta investigación, se estableció como finalidad principal optimizar las propiedades índice y mecánicas de suelos arcillosos mediante la incorporación de polvo derivado del bagazo de caña de azúcar (CBC). El estudio fue desarrollado bajo un enfoque cuantitativo, adoptando un diseño experimental de tipo explicativo y fundamentándose en un método de análisis hipotético-deductivo. Para la recolección de datos, utilicé un muestreo aleatorio probabilístico, complementado con observaciones directas y el uso de formatos técnicos debidamente estructurados. Los ensayos mostraron que con una incorporación del 5% de CBC se logró una disminución significativa tanto en el índice de plasticidad (IP) como en la máxima densidad seca (MDS), lo que a su vez generó un aumento importante en el valor del CBR. Asimismo, noté que al incrementar la proporción de CBC, el CBR aumentó en promedio un 52.96%, siendo este efecto más evidente al aplicar un 10% del aditivo. En base a estos resultados, concluí que el uso de CBC representa una opción técnica eficiente para mejorar las condiciones físicas y mecánicas del suelo, facilitando su estabilización y aumentando notablemente su capacidad portante.

3.2 Bases teóricas

3.2.1. Ceniza de eucalipto

Nogues (2010), los “Combustibles renovables de origen vegetal en estado sólido se obtienen esencialmente mediante restos agrícolas y madera generada por la industria. Estos materiales son sometidos a procesos termoquímicos, como la incineración, para transformarlos en energía útil. La ceniza que se produce proviene de la pulverización de hojas y tallos recabados, utilizando hornos industriales similares a los que se emplean en la producción de ladrillos. Pérez (2018), señala que la temperatura ideal para la incineración de hojas es de 400°C, manteniéndola durante dos horas para lograr los resultados mejorados.

Terminándose este proceso, se logra una reducción del volumen en aproximadamente un 63.78%.

Se debe tener en cuenta el detalle de las características del proceso, así como el análisis y los equipos comunes para alcanzar resultados deseados, (Márquez Sigua, 2014, pág. 48). El Perú es internacionalmente conocido por su vasta diversidad biológica y los retos biogeográficos y ecológicos que enfrenta. En la región andina del país, se han reforestado más de 725,000 hectáreas, especialmente con especies como el eucalipto y el pino. Dichas plantaciones fueron realizadas en departamentos como Ayacucho, Áncash, Apurímac, Cajamarca, Cusco y Junín. (FAO, 2010).

a) Dosificación

De acuerdo con lo expuesto por Atienza (2008), el saber dosificar es clave para el tratado eficaz de distintos recursos, asegurando que se cumplan las especificaciones requeridas. Este proceso implica calcular con precisión la cantidad óptima del líquido y la proporción necesaria de aglomerante a emplear.

b) Granulometría

Juárez, (2011). Señala que, al estudiar las características del suelo, se reconoció por primera vez en que cualidades mecánicas están vinculadas a la repartición de las partículas según su criba. En los gráficos granulométricos que analicé, los tamaños de partícula se ubican en el eje horizontal (eje X), mientras que los porcentajes correspondientes se sitúan en el eje vertical (eje Y). Según lo que señala Hernández (2016), el material que se empleará para estabilizar debe ser tamizado completamente a través de la malla número 4.

Tabla 2*Diámetros retenidos para pesos en gramos*

Malla N°	3" (76.2 mm)	2" (50.8 mm)	1 ½" (38.1 mm)	1" (25.4 mm)	¾" (19.0 mm)	⅜" (9.5 mm)
Masa aproximada (g)	5000	4000	3000	2000	1000	500

Nota. De acuerdo con lo indicado en la tabla, el peso mínimo necesario para realizar el análisis granulométrico depende tanto del tamaño de las aberturas como de la masa mínima exigida de la muestra, conforme a lo establecido en la normativa técnica. (Juárez, 2011).

c) Propiedades cementantes

Según Pérez (2018), la CE está constituida por diversos elementos químicos identificados a través de pruebas de fluorescencia de rayos X, técnica que permite determinar su composición. A continuación, se detallan sus componentes:

Tabla 3*Elementos químicos*

Componente químico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃
Porcentaje (%)	15.92	1.31	64.66	9.98

Nota. En la tabla se detallan los elementos químicos que desarrolla la ceniza de eucalipto una vez ha sido sometida al proceso de pulverización (Pérez, 2018).

3.2.2. Estabilización de suelos

Esto hace referencia a el procedimiento en el que se optimiza las cualidades físicas de la superficie, ya sea mediante método mecánico o mediante la adición de agregados químicos, que pueden ser de origen natural o sintético. Este tipo de estabilización se utiliza comúnmente en suelos con subrasantes que presentan deficiencias en sus propiedades de soporte. Además, mientras se busca estabilizar una subbase con el objetivo de optimizar la

calidad del material, el resultado se conoce como su estabilizada, logrando así una mayor durabilidad y resistencia en proyectos de infraestructura. (Arias, 2023).

A menudo, los suelos no poseen las características adecuadas para una obra en particular, por lo que es necesario tomar las siguientes decisiones:

- Aprobar el recurso en su estado presente, teniendo en cuenta los límites que su calidad impone en el diseño.
- Rechazar el material inadecuado o sustituirlo por uno con propiedades más apropiadas.
- Modificar las cualidades del recurso con la finalidad que logre obtener las expectativas esperada o en caso contrario que su calidad se encuentra en los estándares de aprobación.

3.2.2.1. Tipos para estabilizar los suelos

a) Estabilizar por la vía mecánica

La estabilización del suelo se lleva a cabo mediante procesos de compactación, los cuales son esenciales en todas aquellas obras donde el terreno constituye el principal material constructivo. Este procedimiento busca incrementar la densidad del suelo aplicando esfuerzo mecánico, para así sus propiedades físicas mejorarlas, sin modificar de forma considerable su estructura natural ni su composición original. En algunos casos, es común combinar diferentes tipos de suelos para optimizar sus características físicas, como la resistencia y la capacidad de soporte. (Arias, 2023).

b) Estabilización por alteración del suelo

Se refiere a realizar un mix de 2 a más tipos de suelos o materiales con el fin de obtener un compuesto con potenciadas propiedades mecánicas, adecuado para su uso en construcción. En este proceso, es fundamental que los materiales adicionales, como los provenientes de canteras o áreas de préstamo, jueguen un rol clave en la mejora de las características del suelo base. Estos materiales ayudan a optimizar las condiciones del

terreno, permitiendo que se logren los requisitos de resistencia y estabilidad necesarios para su aplicación en diversas obras de ingeniería civil. (Arias, 2023).

c) Estabilización por medios electrónicos

“Electro ósmosis y el empleo de pilotes electrometálicos son considerados dos de los métodos más aceptados y empleados en la estabilización de suelos”. (Arias, 2023, pág. 32).

d) Estabilizar por medios químicos

Este proceso se lleva a cabo, en esencia, a través del uso de materiales estabilizantes como la cal, el asfalto, el cemento o diversos productos químicos, con la finalidad de incrementar la capacidad resistente del suelo y acondicionarlo adecuadamente para su empleo en obras de infraestructura. No obstante, debido a la gran diversidad de suelos y las variaciones en sus propiedades, cada método de estabilización está diseñado para ser más eficaz en un tipo particular de suelo, es esencial elegir el método adecuado para asegurar que el tratamiento sea efectivo y se logre el nivel de estabilidad requerido. (Arias, 2023).

3.2.3. Estabilización de la Subrasante

El propósito principal en la estabilización del terreno es mejorar aquellas propiedades físicas no deseables del estrato, con el fin de crear una estructura más resistente al esfuerzo de cizallamiento y capaz de mantener un volumen de vacíos óptimo para garantizar su estabilidad. Este procedimiento es fundamental para garantizar que el suelo resista las cargas previstas en proyectos de edificación. Según el MTC, se debe realizar una cantidad específica de pozos de ensayo para evaluar sus condiciones, como se indica en la siguiente tabla. (Arias, 2023).

Tabla 4*Número de calicatas de acuerdo al IMDA*

Tipo de Vía	Profundidad (m)	Calicatas mínimas	Observación
Autopistas: vías con un IMDA superior a 6000 vehículos por día, que cuentan con calzadas separadas y al menos dos carriles en cada sentido.	1.50 m respecto desde el nivel de la sub rasante del proyecto.	2 carriles por calzada: 4 calicatas x km x sentido 3 carriles por calzada: 4 calicatas x km x sentido	Las calicatas se distribuirán en todo el terreno, alternando posiciones.
Carreteras Duales o Multicarril: son aquellas vías cuyo IMDA se encuentra entre 4001 y 6000 vehículos diarios, y que cuentan con una calzada conformada por dos carriles de circulación.	1.50 m respecto a nivel de la sub rasante del proyecto.	4 carriles por calzada: 6 calicatas x km x sentido 2 carriles por calzada: 4 calicatas x km x sentido 3 carriles por calzada: 4 calicatas x km x sentido 4 carriles por calzada: 6 calicatas x km x sentido	
Vías de Primera Clase: son aquellas que registran un IMDA entre 2001 y 4000 vehículos diarios, y cuentan con una calzada compuesta por dos carriles.	1.50 m respecto a nivel de la sub rasante del proyecto	04 calicatas x km	Las calicatas se distribuirán longitudinalmente en

Tipo de Vía	Profundidad (m)	Calicatas mínimas	Observación
Vías de Segunda Clase: se definen como aquellas rutas que presentan un IMDA entre 401 y 2000 vehículos por día, y disponen de una calzada con dos carriles.	1.50 m respecto a nivel de la sub rasante del proyecto	03 calicatas x km	el terreno, alternando posiciones.
Carreteras de Tercera Clase: son aquellas rutas que registran un IMDA entre 201 y 400 vehículos por día, y están conformadas por una calzada de dos carriles.	1.50 m respecto a nivel de la sub rasante del proyecto	02 calicatas x km	
Vías de Bajo Volumen de Tránsito: son aquellas carreteras que presentan un IMDA igual o inferior a 200 vehículos por día, y disponen de una calzada conformada por dos carriles.	1.50 m respecto a nivel de la sub rasante del proyecto	01 calicata x km	

Nota. La tabla muestra cómo se distribuyen las calicatas según el Índice Medio Diario Anual (IMDA), facilitando así el análisis en distintos tipos de vías. Esta categorización se basa en la intensidad del tráfico vehicular en cada zona, (MTC, 2014).

3.2.4. Propiedades

3.2.4.1. Estabilidad Volumétrica

Montejo (2002). Precisa en terrenos que pasan por un alteración cíclico de expandirse y contraerse cuando estos se afectan por transformaciones en su índice de saturación. La estabilización nace para convertirse en solución efectiva para mejorar estas condiciones, transformando suelos arcillosos en estructuras más rígidas y granuladas, lo que aumenta su estabilidad. Por su parte, Rojas y Angulo (2016) señalan que: “este suceso de expandir y contraer es común en diversos tipos de superficies, y es provocado principalmente por las fluctuaciones en los niveles de humedad. Este proceso puede manifestarse de manera abrupta o intervenciones relacionadas con la construcción e ingeniería” (p.87).

La plasticidad hace referencia a la capacidad de un material granular estabilizado para deformarse sin llegar a fracturarse. Sin embargo, la estabilidad del material puede verse afectada si no se cumplen ciertos parámetros clave que garanticen su durabilidad, especialmente en presencia de agua. Las partículas finas con estructura laminar pueden generar niveles elevados de estabilidad volumétrica, lo que influye en el comportamiento del suelo. Los suelos arcillosos, conocidos por su alta capacidad para retener humedad, tienden a sufrir cambios considerables en su estabilidad y densidad. Por esta razón, se recomienda mantener un control sobre la estabilización del volumen, estableciendo un porcentaje del veinticinco para el límite líquido (LL) y un porcentaje del seis para el índice de plasticidad (IP). La plasticidad, que implica una deformación viscosa en la superficie de las partículas minerales, se evalúa en función de la inclinación iónica. Dado su tamaño pequeño y estructura laminada, los suelos arcillosos presentan una I.P significativamente elevada. (MTC, 2014).

a) Proceso

- Para hallar el LL, se colocará la muestra en una copa metálica apoyada en su base y se distribuye uniformemente hasta formar un surco de 10 mm de profundidad.
- El acanalador traza una hendidura desde la parte superior de la muestra hasta la base.
- Antes de iniciar los golpes, se revisa la base de la copa. Esta se ajusta para operar a una frecuencia de 1.9 a 2.1 golpes por segundo, repitiendo el procedimiento hasta que la separación alcanzada sea, como mínimo, de ½ pulgada
- Luego, procedí a uniformizar la muestra incorporando una mayor cantidad de agua, con la finalidad de obtener la menor cantidad de golpes posibles dentro de los rangos establecidos en al menos tres repeticiones, los cuales oscilan entre 15 a 25, 20 a 30 y 25 a 35 golpe.
- Posteriormente, determiné el contenido de humedad siguiendo la norma NTP 339.127, asegurándome de realizarlo en un tiempo no mayor a 15 minutos después de culminar el ensayo, sin pausas durante el proceso.
- Para obtener el límite plástico, separé una porción de 20 gramos de la muestra, la moldeé manualmente sobre una superficie de vidrio dándole forma elipsoidal, y luego la extendí aplicando presión con los dedos, desplazándola hacia adelante y hacia atrás hasta lograr un hilo de espesor uniforme.
- El índice de plasticidad (IP) se calcula utilizando la fórmula correspondiente $IP = LL - LP$.

3.2.4.2. Densidad máxima seca

Montejo (2002), indica que el empuje de expansión del terreno se eleva cuando la densidad seca es más alta, manteniéndose una filtración permanente. Esto se debe a la acumulo de partículas arcillosas p “unidad de volumen” y a una mayor interacción entre las

partículas. Además, destaca que, para lograr una compactación eficiente, es fundamental alcanzar una alta densidad seca.

a) Proceso

- Los ejemplares de terreno se tamizan a través del tamiz N°4 o $\frac{3}{4}$ ".
- Luego, se dividen en 4 secciones y se humedecen hasta alcanzar un porcentaje de filtración óptima con variación del 2%.
- En los métodos A y B, se utilizan 2.3 kg o 5.9 kg, respectivamente, y se debe permitir un tiempo de reposo antes de proceder con la compactación, como se detalla a continuación:

Tabla 5

Mínimo tiempo de sumergido para diferentes clases de suelo

N°	Clasificación del suelo (SUCS)	Descripción del material	Tiempo mínimo de permanencia (h)	Observaciones
1	GW, GP, SW o SP	Gravas y arenas limpias	No se requiere	Baja retención de humedad
2	GM o SM	Gravas o arenas con limo	3	Requiere saturación parcial
3	CL, CH, ML, MH, OL, OH, PT	Suelos cohesivos o con alta plasticidad	16	Requiere saturación prolongada para alcanzar equilibrio higroscópico

Nota. La tabla presenta el tiempo mínimo necesario para alcanzar un contenido de humedad óptimo en función de cada clasificación de suelos, considerando las variaciones en sus propiedades y comportamiento al retener humedad, adaptado de (MTC, 2014).

3.2.4.3. Capacidad de soporte de California

La prueba CBR permite evaluar la capacidad de soporte del suelo frente a cargas aplicadas, considerando como referencia el 95% de su densidad seca máxima. Para ello, se emplea una penetración estándar de 2.54 mm durante el procedimiento. (MTC, 2014).

El MTC establece que, utilizando muestras del laboratorio, es necesario controlar los índices de densidad, saturación y calcular la capacidad portante del terreno. Además, indica que el ensayo CBR se refiere al nivel de potencia aplicada por un pistón encima del ejemplar del terreno, con el objetivo de causar una inserción específica, comparándola con la potencia para generar un patron referencial. (MTC, 2014).

Tabla 6

Parámetros de la muestra patrón CBR

Nº	Profundidad de penetración	Equivalencia (plg)	Presión (MN/m ²)	Presión (Kgf/cm ²)	Presión (Lb/plg ²)	Interpretación técnica
1	2.54 mm	0.1	6.90	70.31	1.000	Nivel inicial de referencia del pistón estándar del ensayo CBR.
2	5.08 mm	0.2	10.35	105.46	1.500	Valor máximo utilizado como criterio de comparación para determinar el porcentaje CBR.

Nota. La tabla presenta los niveles de penetración y las presiones necesarias que deben alcanzar las muestras analizadas durante la evaluación, (MTC, 2014).

a) Proceso

- La muestra se sumerge durante 96 horas, habiendo sido compactada al 75% de su capacidad según las indicaciones para ajustar la energía. Si el material pasa por el tamiz de ¾", se utiliza únicamente el material que lo atraviesa.
- Se requieren 5 kg de muestra para ejecutar el ensayo CBR.
- Asimismo, se determinan el peso unitario, la humedad presente en el suelo preparado y la humedad óptima correspondiente.
- La compactación se efectúa en cuatro capas, y el número de golpes aplicados por capa depende del tipo de suelo analizado. En el caso de suelos granulares, se realizan

entre 3 y 9 pruebas, utilizando 44, 26 o 12 golpes por capa, conforme a lo establecido en la Norma Técnica Peruana NTP 339.127.

- Posteriormente, se procede con la etapa de inmersión, retirando el molde, volteándolo y colocando un papel filtro entre su parte.
- Finalmente, la penetración se mide con una sobrecarga similar a la que soportará la capa de rodadura, aplicando una carga de entre ± 2.28 kg y no mayor a 4.55 kg. La muestra se ubica centrada, y la carga se aplica con una velocidad constante de 0.05 pulgadas por minuto.

3.3 Definición de términos

- **Análisis granulométrico**

El propósito fundamental de este procedimiento es determinar de forma indirecta la distribución y proporción de los diferentes tamaños de partículas que integran la composición del suelo, lo cual permite caracterizar su estructura granulométrica y comprender su comportamiento físico y mecánico frente a diversas condiciones de carga y humedad. A través de este análisis, es posible identificar la relación existente entre las fracciones gruesas y finas, así como evaluar la uniformidad y gradación del material, factores determinantes para predecir su capacidad de compactación, permeabilidad y estabilidad estructural. Esta información resulta esencial en los estudios geotécnicos, ya que proporciona una base técnica confiable para la clasificación del suelo según los sistemas SUCS (Unified Soil Classification System) y AASHTO, además de contribuir al diseño y control de obras de infraestructura vial y civil, garantizando un desempeño adecuado de las capas que conforman el pavimento o las cimentaciones. (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Arcilla**

Es un tipo de material formado por minerales de naturaleza arcillosa, cuyas partículas presentan dimensiones inferiores a los 2. (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Capacidad de soporte**

La capacidad portante del suelo se entiende como la aptitud que posee un terreno para resistir y transmitir las cargas aplicadas sobre su superficie, evitando que se produzcan deformaciones excesivas, asentamientos diferenciales o fallas estructurales que comprometan la estabilidad de las obras construidas sobre él. Este parámetro representa uno de los factores más relevantes en la ingeniería geotécnica y estructural, pues permite evaluar la idoneidad del suelo como medio de soporte y su comportamiento ante diferentes condiciones de carga, humedad y esfuerzo.

La determinación de esta propiedad implica analizar la interacción entre el suelo y las cargas externas, considerando su composición granulométrica, grado de compactación, cohesión, fricción interna y condiciones de drenaje, entre otros aspectos que influyen directamente en su resistencia. Un suelo con alta capacidad portante garantiza mayor estabilidad y durabilidad en infraestructuras como pavimentos, cimentaciones o terraplenes, mientras que aquellos con valores reducidos requieren procesos de mejoramiento o estabilización para alcanzar el desempeño estructural requerido. En síntesis, comprender y cuantificar la capacidad del suelo para soportar cargas constituye un paso esencial en el diseño geotécnico, ya que de ello depende la seguridad, funcionalidad y vida útil de las obras de ingeniería civil, (Ramos, 2011, p.53).

- **Estabilización de soporte**

Comparado con la compactación este es más extenso, ya que incluye cualquier método o procedimiento orientado a optimizar las características estructurales del suelo, tales como su cohesión y resistencia. (Castro & Castaño, 2020).

- **Puzolana**

Se consideran puzolanas a ciertos materiales de relleno utilizados en mezclas asfálticas por su capacidad de reaccionar químicamente y potenciar la acción del ligante

bituminoso. Las más comunes incluyen la cal hidratada, las cenizas volantes y el cemento portland. (Atienza, 2008).

- **Suelos expansivos**

Corresponden a materiales que se expanden o contraen notablemente al absorber o liberar agua, afectando su volumen. (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Aglomerante**

Se entiende por aglomerante o agente de unión a toda sustancia capaz de cohesionar partículas sólidas, actuando mediante reacciones químicas, procesos físicos o una combinación de ambos mecanismos, con el fin de conferir mayor estabilidad, resistencia y durabilidad al material resultante. En el ámbito de la ingeniería civil y la ciencia de los materiales, este tipo de compuestos cumple una función esencial, ya que permite modificar las propiedades estructurales y mecánicas de los suelos, concretos o mezclas utilizadas en obras de infraestructura.

Desde el punto de vista químico, estos materiales generan reacciones de hidratación o puzolanicidad, que dan lugar a la formación de compuestos cementantes capaces de unir las partículas del suelo o del agregado fino y grueso. Entre los aglomerantes más utilizados destacan la cal, el cemento Portland, el yeso y las cenizas puzolánicas, los cuales, dependiendo de sus características, pueden emplearse para reducir la plasticidad, aumentar la densidad seca máxima, mejorar la capacidad portante o disminuir la expansividad del terreno. Asimismo, desde una perspectiva física, el proceso de unión puede producirse por compactación, secado o cristalización, generando un entramado sólido y estable. En síntesis, los aglomerantes constituyen un componente clave en los procesos de estabilización y mejoramiento de suelos, garantizando un comportamiento estructural adecuado y contribuyendo a la sostenibilidad de las obras civiles al aprovechar recursos naturales o residuos industriales con propiedades cementantes. (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Altitud**

Corresponde a la altura que presenta un punto específico del terreno en relación con m s.n.m., (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **CBR (California Bearing Ratio)**

Se trata del parámetro utilizado para evaluar la capacidad del suelo para soportar cargas, mediante su comparación con la resistencia de un material patrón establecido (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Compactación**

Consiste en un procedimiento, manual o mecánico, que busca disminuir la cantidad de vacíos dentro de materiales como suelos, concretos frescos o mezclas bituminosas (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Contenido de humedad**

Corresponde al porcentaje de agua presente en un material, calculado en función de su peso total, lo que implica considerar tanto la humedad como la masa del material en estado seco (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Subrasante**

Constituye un elemento esencial dentro de la estructura del pavimento, cuya función principal es soportar y distribuir los esfuerzos generados por las cargas externas, garantizando así la estabilidad, durabilidad y adecuado desempeño estructural del sistema vial frente a las condiciones de servicio y a las acciones repetitivas del tránsito. (MTC, Glosario de terminos, 2018).

- **Máxima densidad seca**

Hace referencia a la máxima densidad o masa por unidad de volumen que un material puede alcanzar mediante el proceso de compactación, durante el cual se reduce el volumen de vacíos internos y se ajusta el contenido de humedad hasta un nivel óptimo que permita

obtener la máxima eficiencia en la disposición de las partículas. Este parámetro resulta fundamental en la ingeniería geotécnica y en el diseño de pavimentos, ya que determina la resistencia, estabilidad y durabilidad del suelo o material granular frente a las cargas aplicadas y las condiciones ambientales. (MTC, Glosario de terminos, 2018).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

- **Tipo de investigación aplicada**

“La investigación es aplicada porque se caracteriza como una práctica dinámica orientada a la expansión de los conocimientos preexistentes para su aplicación directa o, en ciertos casos, únicamente para la expansión de teorías existentes”. (Behar,2008, p.15).

- **Nivel de la investigación explicativo**

“El nivel es explicativa ya trasciende la mera articulación de criterios, persiguiendo la identificación de causas y sucesos vinculados al fenómeno en estudio, con la finalidad de elucidar la correlación entre dos variables”. (Hernández Sampieri, 2014).

- **Diseño de la investigación experimental**

“El diseño experimental es cuando el investigador al hacer una manipulación específica intenta identificar posibles efectos y luego analiza las consecuencias”. (Babbie, 2015).

- **Enfoque de la investigación cuantitativo**

“El enfoque adoptado es de carácter cuantitativo, dado que se fundamenta en la aplicación de métodos y técnicas estadísticas orientadas a la formulación de modelos explicativos del comportamiento de una población determinada. Este enfoque posibilita respaldar el análisis numérico, comprobar hipótesis y responder de manera objetiva a las interrogantes planteadas en la investigación, a través de la recolección sistemática, procesamiento y análisis riguroso de los datos obtenidos, garantizando así la validez y confiabilidad de los resultados”. (Hernández Sampieri, 2014).

4.2. **Ámbito temporal y espacial**

- Temporal

La elaboración de esta tesis se realizó a lo largo de un año, iniciando desde la validación oficial del proyecto.

- Espacial

La tesis centra en el tramo de Circunvalación hasta Moyocorral con una longitud total de 03 km.

4.3. **Población y muestra**

4.3.1. *Población*

La población está constituida por un grupo de muestras que comparten características homogéneas, las cuales fueron tomadas en cuenta durante la ejecución del presente estudio. Cabe resaltar que la información recolectada proviene directamente de dicha población elegida para el análisis (Sampieri, 2014).

En este caso, la población corresponde al tramo desde la Circunvalación hasta Moyocorral, ubicada en la ciudad de Abancay, en una extensión de 3 km.

- Ancho de vía (A): 4.10 m
- Extensión (L): 3000 m.
- De la subrasante la Altura (H): 0.60 m
- Volumen de control: 7380 m³

$$V. C = (A * L * H)$$

De acuerdo con el MTC del EG. 2013, la cantidad de repeticiones para el LQ y LP la consistencia se establece en 1 cada 1000 m³, mientras que en el CBR se establece en 1 por cada 2000 m³.

4.3.2. Muestra

Corresponde a una parte del conjunto poblacional que contiene elementos que reflejan las características del total. Si ciertos objetos no pertenecen al conjunto original, no se consideran parte de la muestra, (Behar, 2008, p.16).

La muestra fue elegida mediante un muestreo no probabilístico, también denominado muestreo por conveniencia, y se seleccionó conforme a los lineamientos técnicos establecidos por el MTC.

Los parámetros seleccionados para la visualización son:

- Precisión mínima: 1
- Precisión máxima: 1.5
- Por muestreo no probabilístico: A una profundidad de 1.50 m se realizará 2 calicatas.

4.4. Instrumentos

“Facilitan a la aplicación eficaz de los enfoques y posibilitan la consecución de los objetivos establecidos. La ficha de recolección fue el instrumento clave empleado para obtener la información fundamental del estudio. (Carrasco, 2006, p.26).

Para registrar los resultados obtenidos, se emplearon formatos estandarizados que forman parte del Manual del MTC, los cuales están alineados con normativas Tanto a nivel nacional como internacional, esta información facilitó la identificación precisa de las cualidades de la subrasante que se describen:

Tabla 7

Pruebas realizadas mediante las normas que se presentan

Nº	Ensayo de laboratorio	Norma técnica	Propósito del ensayo
1	Análisis granulométrico por tamizado	MTC E 107	Determinar la distribución de tamaños de partículas.
2	Límite líquido	MTC E 110	Establecer el contenido de humedad al cual el suelo pasa del estado plástico al líquido.

3	Límite plástico	MTC E 111	Determinar el contenido de humedad al cual el suelo pasa del estado semisólido al plástico.
4	Índice de plasticidad	ASTM D 4318	Evaluar la plasticidad y consistencia del suelo.
5	California Bearing Ratio (CBR)	ASTM D 1883	Medir la capacidad portante del suelo.
6	Proctor modificado	ASTM D 1557	Determinar la densidad seca máxima y humedad óptima.
7	Contenido de humedad	ASTM D 2216	Cuantificar la cantidad de agua contenida en el suelo.

Nota. La tabla presenta los diferentes análisis realizados para hallar las cualidades del suelo, los cuales se desarrollaron siguiendo las especificaciones contempladas en los manuales técnicos correspondientes.

4.5. Procedimientos

4.5.1. Recopilación de datos

a) Ubicación

El área de estudio comprende un tramo vial de aproximadamente 3 kilómetros, en el cual se realizaron extracciones de muestras de suelo a través de dos calicatas, cada una con una profundidad mínima de 1.50 metros, garantizando la representatividad del material analizado. Cabe destacar que este sector presenta un Índice Medio Diario Anual (IMDA) inferior a 200 vehículos por día, lo que clasifica la vía dentro del rango de bajo tránsito vehicular. En relación con los análisis efectuados, la tabla correspondiente detalla los ensayos de laboratorio ejecutados para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, los cuales fueron desarrollados siguiendo los procedimientos y especificaciones establecidas en los manuales técnicos vigentes, asegurando así la validez y precisión de los resultados obtenidos.

b) Características de la zona de estudio

Se trata de una zona de topografía predominantemente plana, que abarca una longitud aproximada de 3 kilómetros. La vía se encuentra en condiciones deficientes, principalmente debido a la falta de mantenimiento periódico, situación que se ve exacerbada por la

incidencia de las precipitaciones pluviales. Esta problemática genera dificultades en la transitabilidad, incomodidad para los usuarios y deterioro progresivo en los vehículos que circulan por el tramo, afectando de manera directa la calidad del servicio vial y la seguridad de la población usuaria.

Figura 1

Tramo en estudio



Nota. La imagen ilustra el recorrido de la vía mediante Google Earth, iniciando en la avenida Circunvalación y culminando en el sector de Moyocorral, con una extensión aproximada de 3 kilómetros.

c) Localización de muestras extraídas.

Figura 2

Muestras extraídas



Nota. La figura ilustra de manera precisa los puntos donde se realizaron las calicatas, ubicándose la primera en la progresiva 0+450, la segunda en el kilómetro 1+100 y la tercera en la progresiva 2+000.

d) Exploración de suelos

Se ha basado fundamentalmente en la E.050 con resolución de fecha el 11 de octubre del año 2018 y la MTC.

Para vías con tránsito reducido, es decir, aquellas con un IMDA inferior a 200 vehículos diarios como el tramo en estudio, excavando hasta una altura de 1.50 m para alcanzar de la subrasante el nivel requerido. En cuanto a los ensayos de límites de consistencia, se requiere una repetición por cada 1000 m³ de material, y para la prueba CBR, se establece una frecuencia de una muestra por cada 2000 m³.

Tabla 8

Ubicación de las calicatas

Elevación (ms.n.m.)	E	N	Descripción	Progresiva
2565	727746.00 m	8492638.00 m	C-01	0+450 km.
2572	727420.00 m	8492386.00 m	C-02	1+100 km.

Nota. La tabla muestra la localización georreferenciada de cada calicata, detallando la altitud y las coordenadas este y norte, las cuales sirvieron como referencia para la recolección de las muestras evaluadas.

e) Proceso de obtención de la ceniza de eucalipto

La ceniza de eucalipto proviene de la quema de hojas y ramas de este árbol en hornos de panadería, donde se expone a una temperatura aproximada de 200 °C al ser utilizada como cobertura durante el proceso de cocción del pan. Una vez obtenida, la ceniza pasa por la criba #4 para eliminar suciedad y luego se homogeniza con el material de suelo extraído.

f) Fases en laboratorio para obtener sus características

Se aplica el procedimiento indicado en las Especificaciones Técnicas Generales utilizadas en proyectos de construcción.

4.6. Análisis de datos

Para el análisis de los datos obtenidos en la presente investigación, se emplearon técnicas de estadística descriptiva e inferencial, con el propósito de interpretar de manera rigurosa el comportamiento de las variables estudiadas. Dentro de este marco metodológico, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) complementado con la prueba de comparación múltiple de Tukey, lo que permitió identificar diferencias significativas entre los grupos evaluados y validar la consistencia de los resultados. Para una comprensión más detallada de los procedimientos aplicados y de los hallazgos obtenidos, se recomienda revisar el capítulo correspondiente a los resultados, donde se expone de forma exhaustiva la interpretación estadística y su relación con los objetivos planteados en la investigación.

4.7. Consideraciones éticas

Los principios básicos, así como el respeto, la deontología, deberes y demás en base a la ética profesional se basa esta tesis como una investigación de mi propia autoría.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

El cuadro muestra la ubicación geográfica de cada calicata, detallando su altitud y las coordenadas este y norte, utilizadas como puntos de extracción de las muestras analizadas en laboratorio.

5.1.1. Ceniza de eucalipto

La ceniza de eucalipto se obtiene tras su trituración en hornos, y las características químicas resultantes se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 9

Características químicas

Nº	Propiedad química	Unidad	Valor (%)	Interpretación técnica
1	Humedad	%	1.16	Contenido mínimo asociado al secado previo a la calcinación.
2	Fósforo	%	1.13	Presente en forma de fosfatos, contribuye marginalmente a la reactividad.
3	Potasio	%	0.12	Mineral alcalino con baja incidencia en la plasticidad del suelo.
4	Calcio	%	26.6	Principal componente estabilizante, favorece la cementación.
5	Magnesio	%	4.2	Complementa la acción del calcio en la reacción pozolánica.
6	Azufre	%	0.02	Presencia mínima, sin influencia significativa.
7	Carbonatos	%	42.3	Elevado contenido que refuerza la capacidad de neutralización del material.
8	pH	—	12.86	Alto valor alcalino que mejora la interacción suelo-aditivo.
9	Incineración en mufla	°C	200	Temperatura empleada en el proceso de calcinación controlada.

Nota. En la tabla se detallan las propiedades de la ceniza de eucalipto, las cuales fueron determinadas mediante análisis en laboratorio químico, siguiendo lo señalado por los autores consultados (García & Ludeña, 2022).

a) Muestras de la subrasante

Se seleccionaron el material extraído del tramo de Circunvalación hasta Moyocorral para determinar sus propiedades. Las muestras fueron caracterizadas en el laboratorio, aplicando los estándares establecidos.

De acuerdo con las clasificaciones SUCS y AAHSTO, el material analizado se categoriza de la siguiente forma:

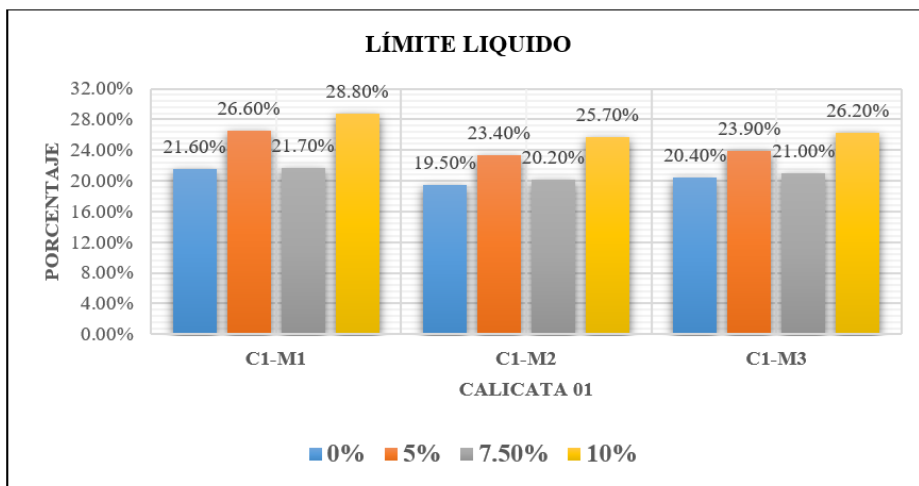
Tabla 10

Clasificación de las muestras de suelo

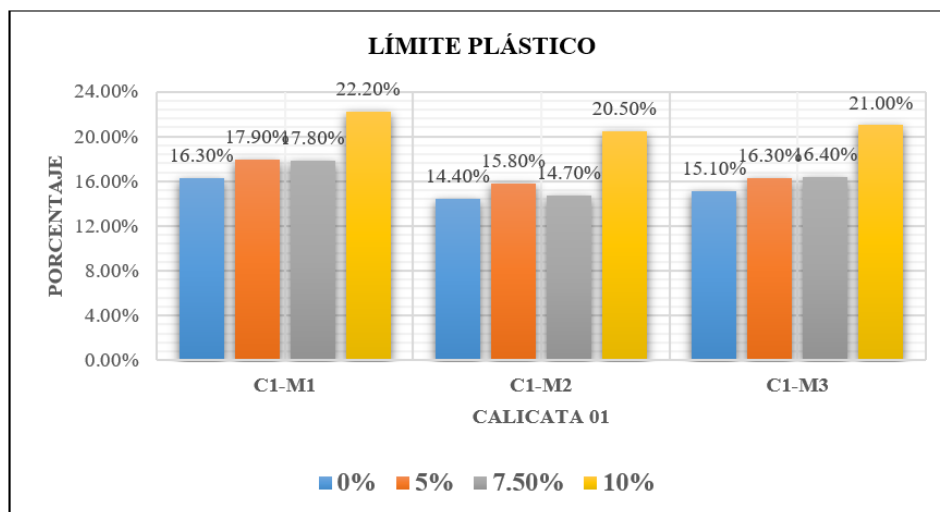
Nº	Identificación de muestra	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Descripción técnica
1	M-1	GC-GM	A-2-4	Grava arenosa con finos limosos; material granular de buena calidad.
2	M-2	SP-SC	A-2-6	Arena pobremente graduada con arcilla; comportamiento intermedio.
3	M-3	SM	A-2-6	Arena limosa; material con capacidad media de soporte y moderada plasticidad.

Nota. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 10, la primera muestra se clasificó como un suelo de tipo GC-GM, la segunda fue determinada como SP-SC, y la tercera correspondió a la categoría SM.

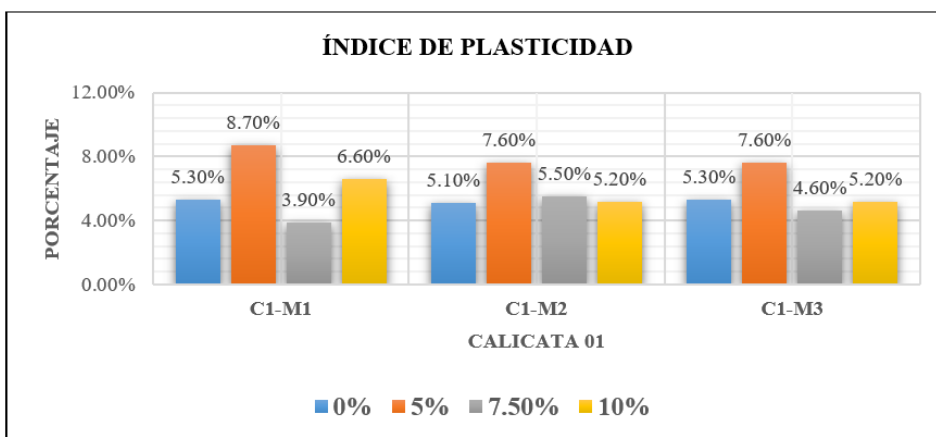
Se realizaron las pruebas de LP, LQ e IP en los cuatro materiales, incluyendo el sin alteración y las alteraciones de 5%, 7.5%, y 10% de CE.

Figura 3*Resultados del ensayo de LQ*

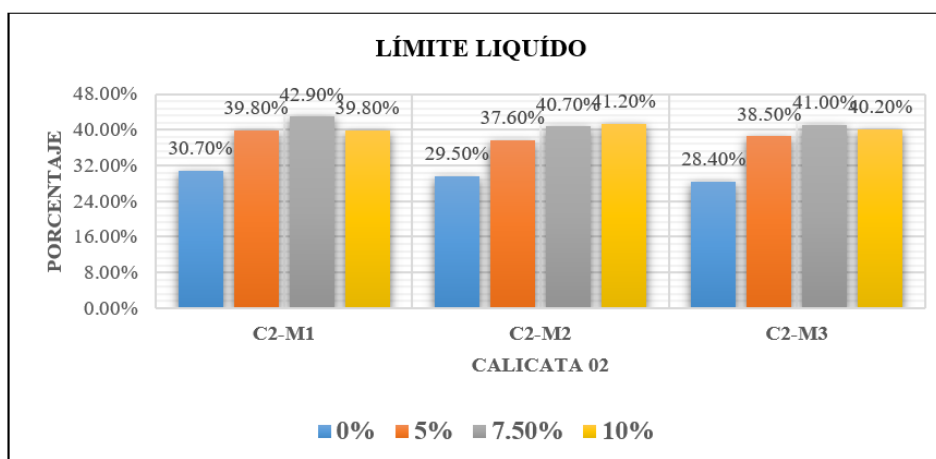
Nota. En la figura se visualiza una dispersión de valores entre las distintas muestras de suelo tratadas con diferentes proporciones de CE, evidenciando una tendencia al aumento especialmente con la adición del 10%, en relación con la muestra sin aditivo.

Figura 4*Resultados del límite plástico*

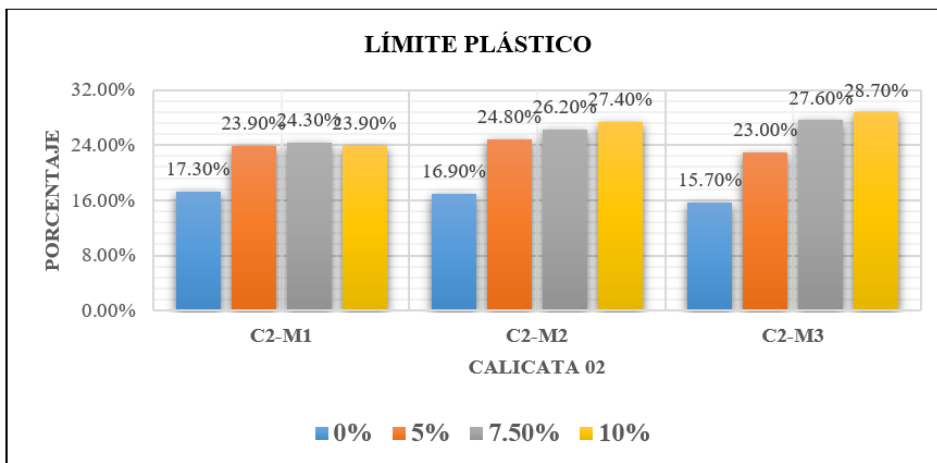
Nota. la figura indica una variabilidad en los valores obtenidos entre las distintas muestras de suelo con distintas proporciones de CE, observándose un incremento notable en los resultados cuando se aplicó una dosificación del 10%, en contraste con la muestra sin aditivo.

Figura 5*Resultados del IP*

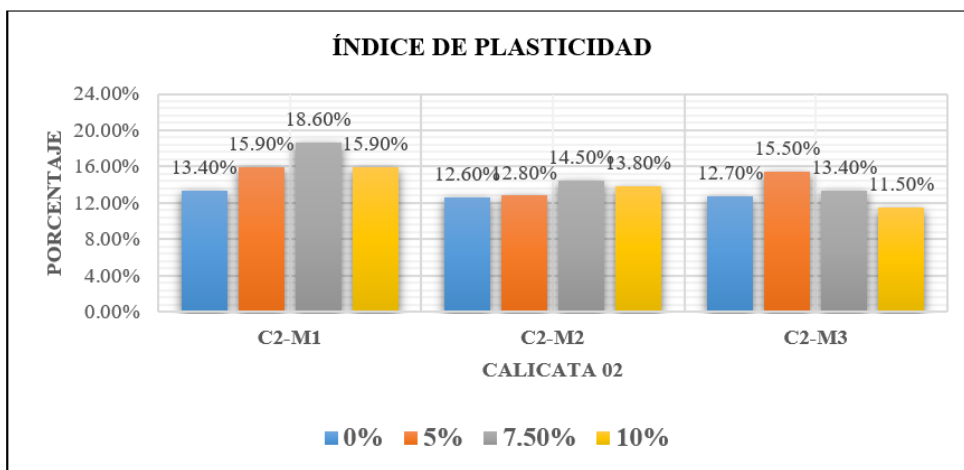
Nota. la figura evidencia que al añadir un 5% de CE, el IP experimenta un aumento en comparación con la muestra sin estabilizante, mientras que las demás proporciones analizadas presentan fluctuaciones leves, tanto al alta como a la baja de la subrasante.

Figura 6*Resultados del límite líquido*

Nota. La figura se aprecia una variación en los resultados obtenidos para las distintas muestras de suelo tratadas con diferentes porcentajes de ceniza de eucalipto (CE), destacándose que las dosificaciones del 5% y 7.5% muestran contrastes significativos respecto a la muestra sin aditivo.

Figura 7*Resultados de límite plástico*

Nota. En la figura se observa que las distintas proporciones de ceniza de eucalipto (CE) generan variaciones en las muestras analizadas, siendo notorio que la adición del 10% muestra un incremento respecto al comportamiento del suelo sin ningún tipo de aditivo.

Figura 8*Resultados del IP*

Nota. En la figura se observa que al incorporar un 5% de CE, el IP muestra un incremento respecto a la muestra sin aditivo, mientras que con otras dosificaciones se evidencian variaciones leves, reflejadas en pequeños aumentos y disminuciones.

5.1.2. Análisis de la variación de la MDS de la subrasante con CE.

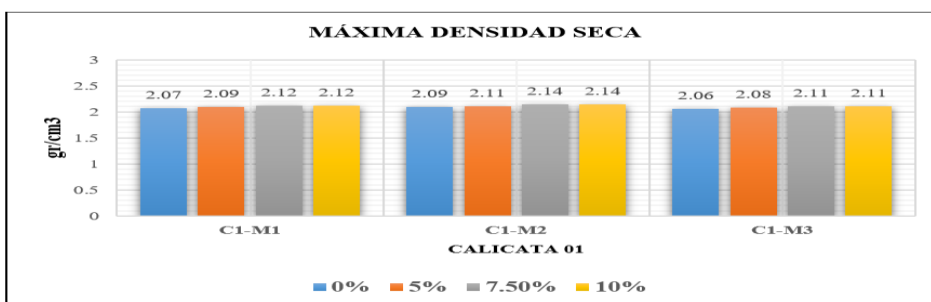
Para este análisis se empleó el Proctor modificado como ensayo de laboratorio en las dos calicatas, iniciando con la evaluación del suelo sin aditivos y posteriormente añadiendo ceniza de eucalipto a la mezcla para analizar su efecto. Seguidamente, se detallan los resultados obtenidos bajo ambas condiciones:

Tabla 11

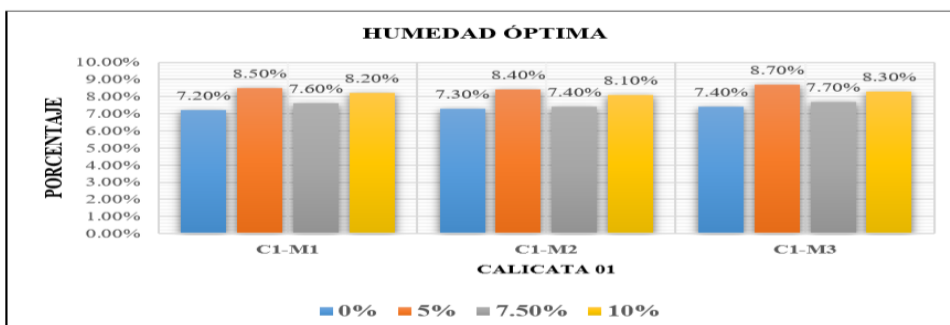
Proctor modificado de C-01

Nº	Identificación de muestra	% de ceniza	Densidad máxima (kg/cm ³)	Humedad óptima (%)	Interpretación técnica
1	C1-M1	0	2.07	7.2	Muestra base sin aditivo.
2	C1-M1	5	2.09	8.5	Aumento ligero de densidad por efecto del aglutinante.
3	C1-M1	7.5	2.12	7.6	Valor máximo de densidad alcanzado; buena compactación.
4	C1-M1	10	2.12	8.2	Estabilización estable sin incremento adicional.
5	C1-M2	0	2.09	7.3	Comportamiento inicial similar al material base.
6	C1-M2	5	2.11	8.4	Incremento moderado de densidad.
7	C1-M2	7.5	2.14	7.4	Densidad óptima obtenida.
8	C1-M2	10	2.14	8.1	Se mantiene estable, confirmando límite óptimo.
9	C1-M3	0	2.06	7.4	Valor base sin tratamiento.
10	C1-M3	5	2.08	8.7	Incremento de densidad con mayor absorción.
11	C1-M3	7.5	2.11	7.7	Condición más compacta.
12	C1-M3	10	2.11	8.3	Variación leve; condición estable.

Nota. En la tabla se registran los resultados correspondientes a la (MDS) y al contenido de humedad, evidenciándose un leve incremento en ambos parámetros a medida que se incrementa la proporción del aditivo, en relación con la muestra original sin tratamiento.

Figura 9*Máxima densidad seca*

Nota. En la figura se aprecia que los valores obtenidos de la (MDS) presentan pequeñas variaciones respecto a la muestra original, aunque en términos generales se observa una tendencia al incremento.

Figura 10*Humedad óptima*

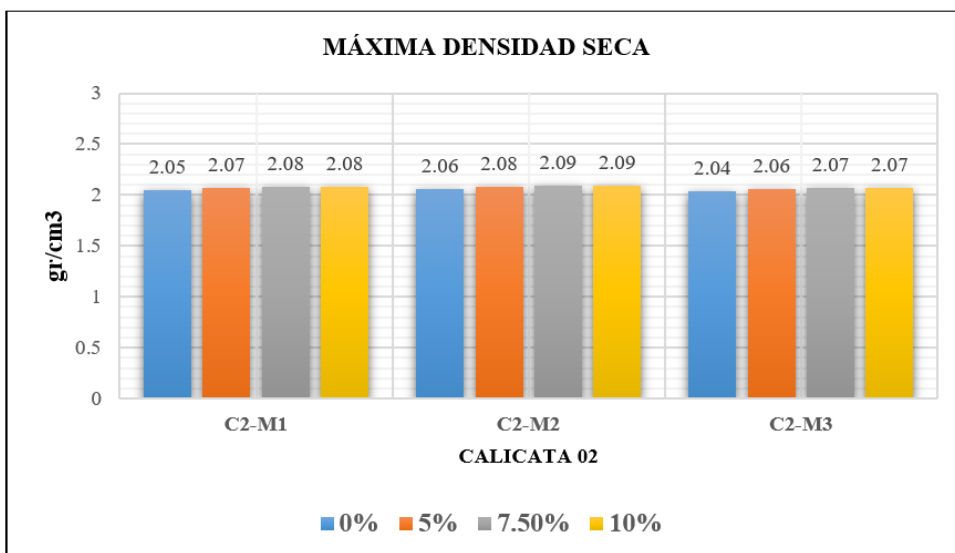
Nota. La figura evidencia que los valores de la máxima densidad seca presentan ligeras variaciones al aplicar proporciones del 5% y 10%, en comparación con la muestra patrón, manteniendo una tendencia creciente.

Tabla 12*Proctor modificado de C-02*

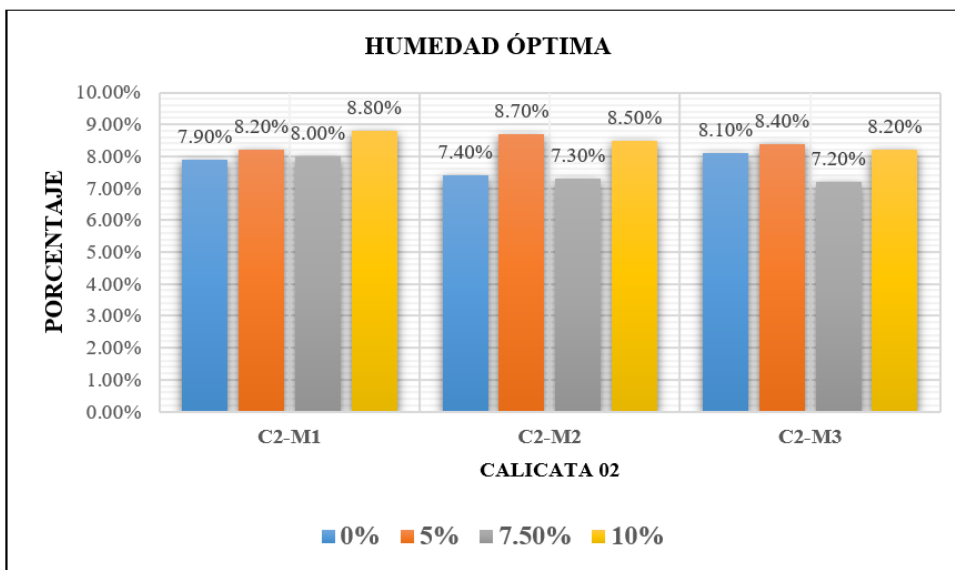
Nº	Identificación de muestra	% de ceniza	Densidad máxima (kg/cm³)	Humedad óptima (%)	Interpretación técnica
1	C2-M1	0	2.05	7.9	Valor base de referencia sin aditivo.

2	C2-M1	5	2.07	8.2	Aumento leve de densidad; mejora la compactación.
3	C2-M1	7.5	2.08	8.0	Densificación óptima; se mantiene la estabilidad estructural.
4	C2-M1	10	2.08	8.8	Se alcanza el límite de saturación; sin incremento adicional apreciable.
5	C2-M2	0	2.06	7.4	Muestra inicial sin adición de ceniza.
6	C2-M2	5	2.08	8.7	Incremento en densidad y retención de humedad; buena compactación.
7	C2-M2	7.5	2.09	7.3	Mayor densidad observada; contenido de humedad estable.
8	C2-M2	10	2.09	8.5	Condición de equilibrio; sin ganancia significativa posterior.
9	C2-M3	0	2.04	8.1	Valor de referencia natural del suelo.
10	C2-M3	5	2.06	8.4	Incremento moderado de densidad.
11	C2-M3	7.5	2.07	7.2	Nivel óptimo de compactación alcanzado.
12	C2-M3	10	2.07	8.2	Variación mínima; comportamiento estable del material.

Nota. Los resultados muestran una tendencia de incremento en la densidad máxima seca (MDS) con adiciones de ceniza entre 5 % y 7.5 %, alcanzándose el punto óptimo de compactación sin aumento significativo a partir del 10 %. Este comportamiento indica que la ceniza actúa como agente estabilizante que mejora la estructura y la resistencia del suelo tratado, en concordancia con la norma MTC E-132 (2014).

Figura 11*Máxima densidad seca de C-02*

Nota. El gráfico refleja que los valores de la MDS presentan leves variaciones en comparación con la muestra patrón, manteniéndose una tendencia ascendente.

Figura 12*Humedad óptima de C-02*

Nota. La figura evidencia que los valores de la MDS muestran una variación aproximada del 10% en relación con la muestra patrón, destacando una tendencia positiva en los resultados.

5.1.3. Determinación de la variación de la CBR de la subrasante con CE.

Las muestras obtenidas de las calicatas C-01 y C-02 fueron sometidas a análisis en su estado original y también tras la incorporación de CE. Seguidamente, se exponen los resultados obtenidos en ambas condiciones evaluadas:

Tabla 13

Capacidad de soporte de California

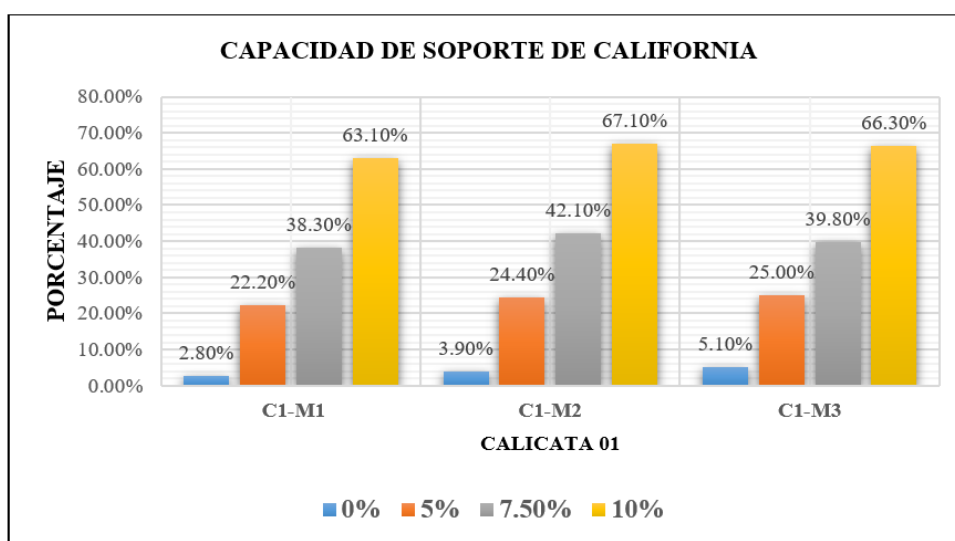
Nº	Muestra	Tipo	Suelo natural	+5 % de CE	+7.5 % de CE	+10 % de CE	Interpretación técnica
1	C1-M1	CBR al 100 %	2.8	22.2	38.3	63.1	Se observa un incremento progresivo del CBR conforme aumenta la adición de ceniza de eucalipto, alcanzando una mejora de más del 60 % con el 10 %.
2	C1-M2	CBR al 100 %	3.9	24.4	42.1	67.1	El comportamiento indica una ganancia significativa de resistencia, especialmente entre 7.5 % y 10 % de CE, rango donde se alcanza la mayor capacidad de soporte.
3	C1-M3	CBR al 100 %	5.1	25.0	39.8	66.3	El incremento del CBR es notable; el 7.5 % constituye el rango óptimo antes de alcanzar la saturación con el 10 %.
4	C2-M1	CBR al 100 %	4.9	24.5	44.6	63.4	La adición de CE mejora la cohesión del suelo, incrementando su soporte de forma estable hasta alcanzar el 10 %.
5	C2-M2	CBR al 100 %	5.3	26.4	42.4	64.5	La mejora es evidente en todos los niveles de adición, con un comportamiento más homogéneo en la compactación.

6	C2-M3	CBR al 100 %	6.3	29.2	43.7	66.3	Se evidencia el mayor rendimiento con 7.5 % de CE; el 10 % mantiene la mejora sin cambios significativos.
---	-------	--------------	-----	------	------	------	---

Nota. La tabla presenta los resultados comparativos con la adición de ceniza de eucalipto (CE), evidenciando que, a mayor porcentaje de CE, se observan mejorías significativas. Por ejemplo, con un 0% se obtuvo un valor de 2.8%, mientras que con un 10% se observó una mejoría hasta en un 25%, mostrando una diferencia considerable.

Figura 13

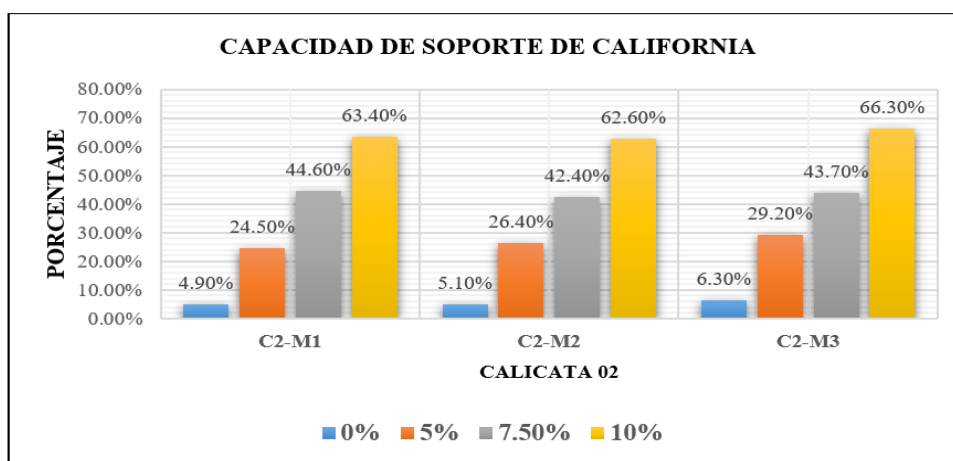
Capacidad de soporte de C-01



Nota. El gráfico muestra una mejora considerable al incrementar la proporción de ceniza de eucalipto (CE) con las diferentes adiciones, observándose una mejoría hasta en un 25% con respecto al valor del CBR del suelo sin adición de CE (suelo natural) para las tres muestras de la calicata C-01.

Figura 14

Capacidad de soporte de C-02



Nota. El gráfico muestra una mejora considerable al incrementar la proporción de ceniza de eucalipto (CE) con las diferentes adiciones, observándose una mejoría hasta en un 21% con respecto al valor del CBR del suelo sin adición de CE (suelo natural) para las tres muestras de la calicata C-02.

Tabla 14

Resumen de resultados

Estabilización de la subrasante					
Muestra	Tipo	Suelo natural	+5% de CE	+ 7.5% de CE	+ 10% de CE
C1	DMS (gr/cm^3)	2.07	2.09	2.12	2.12
	IP(%)	5.3 %	8.7 %	3.9 %	6.6 %
	CBR (%)	3.9 %	24.4 %	42.1 %	67.1 %
C2	DMS (gr/cm^3)	2.05	2.07	2.08	2.08
	IP (%)	13.4 %	15.8 %	18.6 %	15.8 %
	CBR (%)	6.3 %	29.2 %	43.7 %	66.3 %

Nota. En la Tabla 14 se condensan los resultados obtenidos mediante los ensayos efectuados sobre las muestras recolectadas.

En campo, evidenciando que la adición del 7.5% presenta los valores más óptimos para la estabilización, superando tanto a las demás proporciones como a la muestra sin ninguna adición.

5.2. Prueba de hipótesis

5.2.1. Contrastación de hipótesis

5.2.1.1. Hipótesis general

- La adición de ceniza de eucalipto influye en la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos en la ruta Circunvalación a Moyocorral, Abancay – Apurímac, 2023.

5.2.1.2. Hipótesis específicas

a. Hipótesis específica 01

- H_0 : La incorporación de ceniza de eucalipto no ejerce influencia significativa sobre la máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos.
- H_1 : La incorporación de ceniza de eucalipto sí ejerce influencia significativa sobre la máxima densidad seca de la subrasante en suelos arcillosos.

Para el análisis estadístico mediante ANOVA, se establecieron los siguientes criterios de decisión:

- Si el valor calculado de F es mayor que el valor crítico de F, se rechaza la hipótesis nula (H_0), aceptando la hipótesis alternativa.
- Si el valor calculado de F es menor que el valor crítico de F, se acepta la hipótesis nula (H_0), al no encontrarse evidencia suficiente para rechazarla.

Asimismo, al aplicar la prueba de comparación múltiple de Tukey, se consideraron los siguientes parámetros:

- Cuando el valor de p es menor a 0.05 ($p < 0.05$), se rechaza la hipótesis nula, indicando diferencias estadísticamente significativas entre los grupos.

- Cuando el valor de p es mayor a 0.05 ($p > 0.05$), se acepta la hipótesis nula, concluyéndose que no existen diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Este procedimiento permitió determinar con rigurosidad el efecto de la ceniza de eucalipto sobre las propiedades mecánicas del suelo, en particular su densidad seca máxima, dentro del marco de un análisis estadístico confiable y replicable.

- **Estadística descriptiva**

Tabla 15

Datos estadísticos

Grupo (%)	n	Media (Mean)	Varianza	SS	Intervalo de confianza al 95 % (Inferior – Superior)	Interpretación técnica
0.0	3	2.073	0.00	0.00	2.05 – 2.09	Valor de referencia del suelo natural sin adición de ceniza; se observa una media constante y baja dispersión, lo que refleja estabilidad inicial.
5.0	3	2.093	0.00	0.00	2.07 – 2.11	Se aprecia un ligero incremento de la media, indicando que la adición de 5 % de ceniza mejora la densidad del suelo, aunque de forma moderada.
7.5	3	2.123	0.00	0.00	2.10 – 2.14	La media alcanza su valor más alto, evidenciando un comportamiento óptimo del material estabilizado y una compactación más eficiente.
10.0	3	2.123	0.00	0.00	2.10 – 2.14	No se evidencian incrementos adicionales respecto al 7.5 %, confirmando que la mezcla alcanza su punto de equilibrio a partir de este porcentaje.

Nota. La tabla muestra los resultados estadísticos previos al análisis de varianza, detallando los límites inferior y superior dentro de un intervalo de confianza del 95 %. Los datos confirman una tendencia ascendente en la media de densidad conforme aumenta el

porcentaje de ceniza de eucalipto (CE), estabilizándose entre el 7.5 % y el 10 %, rango donde el suelo alcanza su máxima densificación sin generar variaciones significativas.

- **Análisis de varianza**

Tabla 16

Análisis de varianza de la MDS de C-01

Fuente de variación (Sources)	SS	df	MS	F	P	F crítico	Interpretación técnica
Between groups	0.01	3	0.002	7.71	0.009	4.066	Se evidencia una diferencia significativa entre los grupos evaluados, lo que sugiere que el contenido de ceniza influye directamente en la variación de la densidad seca máxima.
Within groups	0.00	8	0.000	—	—	—	La varianza interna es prácticamente nula, lo que demuestra la homogeneidad de los valores dentro de cada grupo experimental.
Total	0.01	11	0.001	—	—	—	Refleja la consistencia general del conjunto de datos y la validez del análisis estadístico realizado.

Nota. Se constata que el valor de F calculado (7.71) supera el umbral crítico de F crítico = 4.066, lo cual justifica la aceptación de la hipótesis alternativa y la exclusión de la hipótesis nula. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos con distintos porcentajes de ceniza de eucalipto (CE), bajo un nivel de confianza del 95 %. En consecuencia, la adición de CE tiene un efecto real sobre la densidad seca máxima (MDS) del suelo compactado.

- **Tukey**

Tabla 17*Diferencia de medias de la MDS de C-01*

		Tukey				
	CE	mean	std err	p - value	95 % trust	
					Lower	Upper
	5.0 %	0.02	0.01	0.43	-0.02	0.06
0.0 %	7.5%	0.05	0.01	0.02	0.01	0.09
	10 %	0.05	0.01	0.02	0.01	0.09
	0.0 %	0.02	0.01	0.43	-0.02	0.06
5.0 %	7.5 %	0.03	0.01	0.15	-0.01	0.07
	10.0 %	0.03	0.01	0.15	-0.01	0.07
	0.0%	0.05	0.01	0.02	0.01	0.09
7.5%	5.0%	0.03	0.01	0.15	-0.01	0.07
	10.0%	0.00	0.01	1.00	-0.04	0.04
	0.0%	0.05	0.01	0.02	0.01	0.09
10.0 %	5.0%	0.03	0.01	0.15	-0.01	0.07
	7.5%	0.00	0.01	1.00	-0.04	0.04

Nota. Se verifica que el valor p es inferior a 0.05, lo que respalda, con un 95% de confianza, la decisión de rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa.

- **Estadística descriptiva**

Tabla 18*Datos estadísticos*

Group (%)	Count	Mean	Variance	SS	95 % Confidence		Interpretación técnica
					Interval (Lower	– Upper)	
0.0	3	2.05	0.000	0.000	2.037	– 2.063	Corresponde al suelo natural sin aditivo; los valores muestran baja dispersión y consistencia en la densidad.
5.0	3	2.07	0.000	0.000	2.057	– 2.083	Se observa un leve incremento de la media, lo cual evidencia el efecto inicial de la adición del 5 % de ceniza de eucalipto.
7.5	3	2.08	0.000	0.000	2.067	– 2.093	El aumento de la media indica una mejor compactación del suelo; el 7.5 % presenta el comportamiento más homogéneo.
10.0	3	2.08	0.000	0.000	2.067	– 2.093	No se registran incrementos significativos respecto al 7.5 %, lo que sugiere que el material alcanza su punto de estabilización.

Nota. En la tabla se muestran los resultados estadísticos previos al análisis de varianza, incluyendo los rangos mínimo y máximo dentro de un intervalo de confianza del 95 %. Los datos reflejan una tendencia de incremento en la densidad media a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de eucalipto (CE), estabilizándose entre 7.5 % y 10 %, donde la varianza es mínima y el comportamiento del material más uniforme.

- **Análisis de varianza**

Tabla 19

Análisis de varianza de la MDS de C-02

Fuente de variación (Sources)	SS	df	MS	F	P	F crítico	Interpretación técnica
Between groups	0.002	3	0.001	6.0	0.02	4.066	El valor de F calculado es superior al F crítico, lo que indica diferencias significativas entre los grupos. Esto evidencia que la adición de ceniza influye en la variación de la densidad seca máxima.
Within groups	0.001	8	0.000	—	—	—	La varianza interna es mínima, lo que demuestra uniformidad de los valores dentro de cada grupo experimental y consistencia en los resultados.
Total	0.003	11	0.000	—	—	—	Refleja el comportamiento general del conjunto de datos y confirma la confiabilidad del análisis estadístico realizado.

Nota. Debido a que el valor de F calculado (6.0) supera el valor F crítico (4.066), se opta por rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, bajo un nivel de confianza del 95 %. Esto implica que los distintos porcentajes de ceniza de eucalipto (CE) generan efectos estadísticamente significativos en la densidad seca máxima (MDS) del suelo, confirmando su influencia positiva en el proceso de estabilización.

- **Tukey**

Tabla 20

Diferencia de medias de la MDS de C-02

CE	Tukey				
	mean	std err	p - value	95 % trust	
				Lower	Upper
5.0 %	0.02	0.01	0.14	-0.01	0.05
7.5%	0.03	0.01	0.03	0.00	0.06

0.0 %	10 %	0.03	0.01	0.03	0.00	0.06
	0.0 %	0.02	0.01	0.14	-0.01	0.05
5.0 %	7.5 %	0.01	0.01	0.63	-0.02	0.04
	10.0 %	0.01	0.01	0.63	-0.02	0.04
	0.0%	0.00	0.01	1.00	-0.03	0.03
7.5%	5.0%	0.01	0.01	0.63	-0.02	0.04
	10.0%	0.00	0.01	1.00	-0.03	0.03
	0.0%	0.03	0.01	0.03	0.00	0.06
10.0 %	5.0%	0.01	0.01	0.63	-0.02	0.04
	7.5%	0.00	0.01	1.00	-0.03	0.03

Nota. Se verifica que el valor p es inferior a 0.05, lo que respalda, con un 95% de confianza, la decisión de rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa.

b. Hipótesis específica 02

- H_0 : La incorporación de ceniza de eucalipto no tiene un efecto significativo sobre la capacidad de soporte California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos.
- H_1 : La incorporación de ceniza de eucalipto tiene un efecto significativo sobre la capacidad de soporte California (CBR) de la subrasante en suelos arcillosos.

Para el análisis estadístico mediante el método ANOVA, se adoptaron los siguientes criterios de decisión:

- Cuando el valor de F calculado es mayor que el valor crítico de F, se rechaza la hipótesis nula (H_0), aceptándose la hipótesis alternativa (H_1).
- Cuando el valor de F calculado es menor que el valor crítico de F, se acepta la hipótesis nula (H_0), al no encontrarse evidencia suficiente para rechazarla.

De igual modo, al aplicar la prueba de comparación múltiple de Tukey, se establecieron los siguientes parámetros:

- Si el valor de p es menor a 0.05 ($p < 0.05$), se rechaza la hipótesis nula, lo que indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados.
- Si el valor de p es mayor a 0.05 ($p > 0.05$), se acepta la hipótesis nula, concluyéndose que no existen diferencias significativas entre los grupos comparados.

Este procedimiento permitió determinar con precisión si la ceniza de eucalipto ejerce un efecto relevante sobre la capacidad portante del suelo, medida a través del Índice de Soporte California (CBR), proporcionando así una base estadística sólida para la interpretación de los resultados experimentales.

- **Estadística descriptiva**

Tabla 21

Datos estadísticos

Group (%)	Count	Mean	Variance	SS	95 % Confidence Interval (Lower – Upper)	Interpretación técnica
0.0	3	3.93	1.32	2.65	1.66 – 6.20	Representa la condición natural del suelo sin aditivo, con valores bajos de media y varianza moderada, evidenciando menor capacidad de soporte.
5.0	3	23.87	2.17	4.35	21.60 – 26.14	Se observa un incremento significativo en la media, indicando mejora en la resistencia con la adición del 5 % de ceniza de eucalipto (CE). La media alcanza su punto óptimo, evidenciando una alta compactación y mayor capacidad de soporte del suelo estabilizado.
7.5	3	40.07	3.66	7.33	37.80 – 42.34	Se consolida el máximo valor medio, mostrando que el incremento del CE genera una mejora sustancial en el
10.0	3	65.50	4.48	8.96	63.23 – 67.77	

comportamiento estructural del material.

Nota. En la tabla se describen los datos estadísticos previos al análisis de varianza, señalando los límites inferior y superior dentro de un intervalo de confianza del 95 %. Los resultados evidencian un incremento progresivo de la media conforme aumenta el porcentaje de ceniza de eucalipto (CE), alcanzando su punto máximo con el 10 %, donde el suelo presenta la mejor respuesta mecánica en términos de capacidad de soporte (CBR).

- **Análisis de varianza**

Tabla 22

Análisis de varianza del CBR de C-01

Fuente de variación (Sources)	SS	df	MS	F	P	F crítico	Interpretación técnica
Between groups	6102.03	3	2034.01	698.97	0.00	4.066	El valor de F calculado supera ampliamente al F crítico, evidenciando diferencias significativas entre los grupos. La variación se debe principalmente al efecto de la adición de ceniza de eucalipto sobre el CBR. La varianza interna es mínima, lo que demuestra consistencia y
Within groups	23.28	8	2.91	—	—	—	homogeneidad de los resultados obtenidos dentro de cada grupo experimental.
Total	6125.31	11	556.85	—	—	—	Representa la suma total de la variabilidad del conjunto de datos, validando la confiabilidad del análisis estadístico.

Nota. Considerando que el valor de F obtenido (698.97) excede el valor crítico establecido (F crítico = 4.066) y aplicando un nivel de confianza del 95 %, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos con distintos porcentajes de ceniza de eucalipto (CE),

demostrando que su incorporación incrementa de manera significativa la capacidad de soporte (CBR) del suelo tratado.

- **Tukey**

Tabla 23

Diferencia de medias del CBR de C-01

CE (%)	Mean	Std. Err	p-value	95 % Confidence Interval (Lower – Upper)	Interpretación técnica
0.0 vs 5.0	19.93	0.98	0.00	15.47 – 24.39	El incremento de 5 % de ceniza de eucalipto genera una diferencia significativa en el CBR respecto al suelo natural.
0.0 vs 7.5	36.13	0.98	0.00	31.67 – 40.59	Se observa un aumento sustancial en la capacidad de soporte; el 7.5 % marca una mejora notable en la resistencia del suelo.
0.0 vs 10.0	61.57	0.98	0.00	57.11 – 66.03	La diferencia es altamente significativa; el 10 % de CE representa la máxima mejora estructural en el comportamiento del CBR.
5.0 vs 7.5	16.20	0.98	0.00	11.74 – 20.66	El paso del 5 % al 7.5 % continúa aumentando la resistencia, confirmando un rango óptimo de estabilización.
5.0 vs 10.0	41.63	0.98	0.00	37.17 – 46.09	Se observa una mejora progresiva con un efecto altamente significativo; el incremento en la ceniza potencia la rigidez del material.
7.5 vs 10.0	25.43	0.98	0.00	20.97 – 29.89	La diferencia entre ambos niveles indica que el 10 % mantiene la tendencia de mejora, aunque con menor pendiente de incremento.

Nota. Al trabajar con un nivel de confianza del 95 % y registrarse un valor p menor a 0.05, se concluye que existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Esto confirma que la adición de ceniza de eucalipto (CE) produce diferencias significativas en la capacidad de soporte del suelo (CBR), siendo los porcentajes entre 7.5 % y 10 % los que logran el comportamiento más eficiente y estable.

- **Estadística descriptiva**

Tabla 24*Datos estadísticos*

Group (%)	Count	Mean	Variance	SS	95 %		Interpretación técnica
					Confidence Interval (Lower – Upper)		
0.0	3	5.43	0.57	1.15	3.21 – 7.66		Representa la condición natural del suelo sin adición de ceniza de eucalipto; los valores bajos reflejan una resistencia inicial limitada.
5.0	3	26.70	5.59	11.18	24.47 – 28.93		Se observa un aumento considerable en la media, evidenciando la influencia positiva del 5 % de CE sobre la capacidad de soporte.
7.5	3	43.57	1.22	2.45	41.34 – 45.79		La media continúa incrementándose, mostrando un comportamiento más homogéneo y eficiente; el 7.5 % se aproxima al rango óptimo de mejora.
10.0	3	64.10	3.79	7.58	61.87 – 66.33		La media alcanza su valor máximo; el incremento de CE al 10 % genera la mayor densificación y capacidad estructural del material.

Nota. La tabla expone los resultados estadísticos previos al análisis de varianza, en los que, con un nivel de confianza del 95 %, se detallan los límites inferiores (lower) y superior (upper) del intervalo de confianza. Los resultados evidencian un incremento progresivo en la media a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de eucalipto (CE), alcanzando su punto máximo con el 10 %, lo que confirma una mejora sustancial en el comportamiento mecánico del suelo.

- **Análisis de varianza**

Tabla 25*Análisis de varianza del CBR de C-02*

Sources	SS	df	MS	F	P	F critical
Between groups	5589.80	3.00	1863.27	666.84	0.00	4.066
Within groups	22.35	8.00	2.79			
Total	5612.15	11.00	510.20			

Nota. Al verificarse que el valor de F obtenido excede el valor crítico, y bajo un nivel de confianza del 95%, se determina que la hipótesis nula debe ser rechazada, dando sustento a la hipótesis alternativa.

- **Tukey**

Tabla 26*Diferencia de medias del CBR de C-02*

CE	Tukey					
	mean	std err	p - value	95 % trust		
				Lower	Upper	
0.0 %	5.0 %	21.27	0.97	0.00	16.90	25.64
	7.5%	38.13	0.97	0.00	33.76	42.50
	10 %	58.67	0.97	0.00	54.30	63.04
5.0 %	0.0 %	21.27	0.97	0.00	16.90	25.64
	7.5 %	16.87	0.97	0.00	12.50	21.24
	10.0 %	37.40	0.97	0.00	33.03	41.77
7.5%	0.0%	20.53	0.97	0.00	16.16	24.90
	5.0%	16.87	0.97	0.00	12.50	21.24
	10.0%	20.53	0.97	0.00	16.16	24.90
	0.0%	58.67	0.97	0.00	54.30	63.04
	5.0%	37.40	0.97	0.00	33.03	41.77

Tukey						
CE	mean	std err	p - value	95 % trust		
				Lower	Upper	
10.0 %	7.5%	20.53	0.97	0.00	16.16	24.90

Nota. Se concluye que, al obtener un valor p inferior a 0.05, existe evidencia estadística significativa que permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, considerando un nivel de confianza del 95%.

5.3. Discusión de resultados

5.3.1. Discusión de resultados del objetivo general:

El análisis del objetivo revela mediante la alteración de CE contribuye para estabilizar la subrasante en suelos arcillosos, mediante una modificación al 5% en comparación con la muestra de referencia.

a) Discusión de resultados del objetivo específico 01:

Los valores de la Máxima Densidad Seca (MDS) varían entre las muestras tratadas, registrándose 2.09 g/cm³, 2.12 g/cm³ y 2.12 g/cm³ para proporciones de 5%, 7.5% y 10% de ceniza de eucalipto (CE), respectivamente, siendo el valor más bajo 2.09 g/cm³ correspondiente al 5% de CE. En comparación, el suelo sin aditivo presentó valores de 2.07 g/cm³, 2.08 g/cm³ y 2.08 g/cm³, destacando como mínimo 2.07 g/cm³. Según lo expuesto por Cristóbal & Quinte (2021), la incorporación de un 10% de CE permite incrementar la MDS en un 10.45% respecto a la muestra original sin estabilizante.

Mollo (2021) Se señala que los resultados obtenidos con adiciones del 3%, 7% y 11% oscilan entre 1.76 gr/cm³ y 1.99 gr/cm³ respectivamente, siendo estos valores comparables a los alcanzados en la presente investigación, con diferencias mínimas dentro de rangos estrechos. Sin embargo, la CE optimiza la trabajabilidad del suelo arcilloso como resultado de una compactación más eficiente.

b) Discusión de resultados del objetivo específico 02:

La capacidad de soporte de California de la calicata 01 presenta valores porcentuales de mejoría de 21%, 22%, 25% de las adiciones de 5%, 7.5%, 10% respectivamente donde el mayor valor porcentual de mejoría es de 25% para un 10% de CE. Con respecto a la calicata 02 presenta valores porcentuales de mejoría de 18%, 19%, 21% de las adiciones de 5%, 7.5%, 10% respectivamente donde el mayor valor porcentual de mejoría es de 21% para un 10% de CE. Según Cristobal & Quinte (2021), indica que sus datos alcanzados muestran un 4.36%, 15.67% y 7.54% correspondientes a las proporciones de 5%, 10% y 15%. Finalmente en comparación nuestra tesis revela incrementos considerables en función de la adición de CE.

Mollo (2021). Indica que los valores alcanzados de proporciones de 3%, 7% fueron 8.2% y 10.1%, notablemente es contrastable con los valores en nuestra tesis. Se evidencia el aumento considerable por la incorporación de CE en función de la muestra de suelo natural.

VI. Conclusiones

- **Conclusión del objetivo general**

Los ensayos de laboratorio realizados con la adición de ceniza de eucalipto (CE) en suelos arcillosos del tramo Circunvalación – Moyocorral evidencian un efecto favorable cuando se aplican dosis superiores al 5% de CE (ver Tabla N°14), es decir que si influye por lo que permite considerar su uso como subrasante en capas de rodadura.

- **Conclusión del objetivo específico 01**

Se comprobó la densidad máxima seca, obteniéndose valores de 2.09 g/cm³, 2.12 g/cm³ y 2.12 g/cm³ para adiciones de 5%, 7.5% y 10% de ceniza de eucalipto (CE), respectivamente, y de 2.07 g/cm³, 2.08 g/cm³ y 2.08 g/cm³ en las muestras sin adición (ver figuras N°13 y N°17). Estas variaciones con respecto a la muestra patrón son mínimas, destacando un valor máximo de 2.12 g/cm³. Esto indica que la CE puede ser utilizada como aditivo en suelos donde se busque mejorar la compactación, lo que a su vez incrementaría la resistencia al corte y ofrecería un buen desempeño frente a esfuerzos y deformaciones.

- **Conclusión del objetivo específico 02**

Se realizó la evaluación del CBR, obteniéndose resultados que alcanzan una mejoría en un 21%, 22%,25% para adiciones de 5%,7.5%,10% de CE respectivamente (C-01) y 18%,19%,21% para adiciones de 5%,7.5%,10% de CE (C-02) (ver figuras N°13 y N°14), donde con respecto a la muestra patrón los incrementos que se presentan son regularmente buenos a medida que se adiciona más porcentaje de CE. Sin embargo, solo las adiciones de 7.5% y 10% alcanzaron una mejoría que van desde un 22% hasta un 25% con respecto al suelo natural. Los cuales están dentro del umbral del 30%, valor mínimo requerido para que un suelo sea considerado apto como material de relleno en la subrasante.

VII. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones relacionadas con esta tesis, se sugiere realizar análisis fisicoquímicos entre el suelo y la ceniza de eucalipto. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la CE genera mejoras significativas, por lo que sería recomendable aplicar este estabilizante en un tramo real y evaluar su viabilidad a través de un estudio de costo-beneficio. Esta propuesta será factible siempre que los próximos investigadores cuenten con los recursos necesarios.
- Respecto al ensayo de máxima densidad seca, se sugiere efectuar incrementos de ceniza de eucalipto (CE) en proporciones del 1% en relación con la muestra de referencia, dado que los resultados revelan fluctuaciones poco significativas, sin evidenciar aumentos sustanciales en los valores obtenidos .
- Para el ensayo CBR, también se sugiere trabajar con incrementos de 2% respecto a la muestra patrón, debido a que los resultados muestran una alta variabilidad. Esto permitiría comprender con mayor precisión el comportamiento del suelo frente a la adición progresiva de ceniza.

VIII. Referencias

Adrián, L. (18 de Agosto de 2024). *Motor*. Obtenido de <https://www.motor.es/noticias/espana-problema-seguridad-carreteras-secundarias-solucion-autovias-baratas-2024103749.html>

Andaluz López, R. S. (2022). Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante. *Obtención del título de Ingeniero Civil*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/34106>

Angulo Roldan, D. y. (2016). "Ensayo de fiabilidad con aditivo PROES para la estabilización del suelo en el AA.HH el Milagro, 2016". *Tesis de grado*. Universidad Científica del Perú, Iquitos, Loreto. Obtenido de <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/142>

Arias, J. (1 de setiembre de 2023). *CONAR*. Obtenido de <https://conarsac.com/blog/estabilizacion-de-suelo/>

Atienza, M. D.-B. (2008). *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal*. Madrid: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Obtenido de <http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf>

Babbie, E. (2015). *Manual para la práctica de la investigación social* (1ª ed., 4ª imp. ed.). México: Desclée De Brouwer. Obtenido de https://campusacademica.rec.uba.ar/pluginfile.php?file=%2F138220%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2FBabbie_1996_Cap%204_Dise%C3%B1o%20de%20investigaci%C3%B3n.pdf

- Barragan, G., & Cuervo, C. (2019). *Análisis del comportamiento físico mecánico de la adición de ceniza de cascarilla de arroz de la variedad blanco a un suelo arenoso-arcilloso*. [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6488>
- Behar, R. (2008). *Metología de la Investigación*. Obtenido de <http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20investigacion%20este.pdf>
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Mexico: Libros McGraw-Hill. Obtenido de <https://stehven.files.wordpress.com/2015/08/josephe-e-bowles-manual-de-laboratorio-de-suelos.pdf>
- Camelo Rojas, A. S. (2021). Propiedades resilientes de subrasantes granulares estabilizadas con ceniza volante para diseño de pavimentos flexibles. *Trabajo de Grado*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/cdc6582f-9345-4581-b324-ee1d2fada0c5/content>
- Cano, R., & Cardenas, T. (2021). *Análisis comparativo de la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui – Aymaraes – Apurímac, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Obtenido de <https://repositorio.utea.edu.pe/items/c1ad9cfa-2a1d-463b-ab45-ed6a4311b75d>
- Carrasco Díaz, S. (2006). *Metodología de la Investigación Científica*. Lima, Perú: San Marcos. Obtenido de

https://www.academia.edu/26909781/Metodologia_de_La_Investigacion_Cientifica_Carrasco_Diaz_1_

Carrillo Vera, R. R. (2018). Sustitución del cemento por 8% y 16% en combinación del molusco *trachy cardium procerum* (pata de mula) y hoja de eucalipto en mortero y determinar su resistencia. *Tesis de Grado*. Universidad San Pedro, Chimbote, Perú.

Obtenido de

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/USPE_33a2da4600375d5b064030595820d7b9/Details

Castillo Velarde, R. C. (2022). Uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar para la estabilización de base en la carretera Santiago de Cao – Huanchaco, 2021. *Grado Académico de Maestro en Ingeniería Vial con mención en Carreteras, Puentes y Túneles*. Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Obtenido de

<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5564>

Castillo, F. (2017). *Estabilizacion de suelos arcillosos de Macas con valores CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100%, para utilizarlos como subrasantes en carreteras*. [Tesis de posgrado, Universidad de Cuenca].

Obtenido de

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26917>

Castro, A., & Castaño, Á. (2020). *Estabilidad de agregados de suelos de la zona cafetera de Colombia*. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/publications/6-Estabilidad.pdf>

Chocontá Osuna, A. C. (2021). Estabilización de un suelo arcilloso de la zona occidental sabana de Bogotá con adición de cal hidratada comparando métodos de elementos finitos y semi-empíricos. *Trabajo de Grado*. Universidad Católica de Colombia,

Bogotá, Colombia. Obtenido de

<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5868fb5d-708d-4823-94ea-cdfce85f4124/content>

Cristobal, F., & Quinte, M. (2021). *Estabilización de subrasante con cenizas de eucalipto, paraje turístico Piedra Parada, Concepcion, Junín, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Obtenido de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11362>

Duque Escobar, G. y. (2002). *Mecanica de los Suelos*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://dokumen.tips/documents/mecanica-de-suelos-55993a2aed8af.html?page=1>

FAO. (2010). *Bioenergía y seguridad alimentaria "BEFS"*. Roma, Italia: Oficina de Intercambio de Conocimientos, Investigación y Extensión. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i1712s/i1712s.pdf>

FAO y SERFOR. (2017). *Nuestros bosques en números* (1 ed.). Lima, Perú: Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (INFFS). Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1269105/Nuestros%20Bosques%20en%20N%C3%BAmeros.pdf>

Fernández Egúsqüiza, A. F. (2011). Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de papel a partir del eucalipto. *Para optar el título de ingeniero Industrial*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/1029>

García Araujo, B. J. (2021). Análisis de la estabilidad de un suelo arcilloso con cáscaras de huevo pulverizadas añadidas. *Trabajo de Grado*. Universidad de La Salle, Bogotá

D.C. Obtenido de
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1964&context=ing_civil

García, A., & Ludeña, W. (2022). *Adición del terrasil y ceniza de hojas de eucalipto para mejorar la subrasante del camino vecinal Socos – Yanayacu, Ayacucho, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Obtenido de file:///C:/Users/jaime/Downloads/Garcia_CAM-Lude%C3%B1a_CWF-SD.pdf

Gómez Bastar, S. (2012). *Metodología de la investigación* (Primera ed.). Mexico: Red Tercer Milenio. doi:ISBN: 978-607-733-149-0

Gómez López, R. (2004). *Evolución científica y metodológica de la Economía*. Guadalajara: Facultad de Económicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido de Recuperado de <http://www.eumed.net/cursecon/libreria/rgl-evol/index.html>

Hernández Lara, J. A. (2016). Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la facultad multidisciplinaria oriental de la Universidad de El Salvador. *Título de Ingeniero Civil*. Universidad de El Salvador, El Salvador. Obtenido de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14342/1/50108285.pdf>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta edición ed.). México: Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736. Obtenido de <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

Huarcaya Quiquia, R. B. (2021). Estabilización de una subrasante arcillosa de baja plasticidad con cenizas de cáscara de arroz. *Grado académico de bachillera en ciencias con mención en ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú,

Lima, Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18221#:~:text=La%20investigaci%C3%B3n%20concluye%20que%20el,de%20fricci%C3%B3n%20y%20la%20cohesi%C3%B3n.>

ICG, I. (2018). *Norma Técnica - E.050 Suelos y Cimentaciones*. Lima: El Peruano. Obtenido de https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/02_E/2018_E050_RM-406-2018-VIVIENDA.pdf

INVIAS. (2016). *Manual de mantenimiento de carreteras - volumen II*. Instituto nacional de vías, Colombia. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7714-manual-de-mantenimiento-de-carreteras-2016-v2/file>

Juárez Badillo, E. y. (2011). *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (1 ed., Vol. I). México: Limusa. Obtenido de https://suelos.milaulas.com/pluginfile.php/128/mod_resource/content/1/Mecanica%20de%20suelos%20-%20Juarez%20Badillo.pdf

Junco del Pino, J. M. (2011). Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. *Revista Arquitectura e Ingeniería*, 5(2). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3711821>

Licuy Ordóñez, C. A. (2020). Estudio de la estabilización de arcillas expansivas utilizando el 10,20 y 30% en peso, de puzolanas de ceniza del volcán Tungurahua y ceniza de la cascarilla de arroz en composiciones iguales. *Obtención del título de Ingeniero*

Civil. Escuela politécnica nacional, Quito, Ecuador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20630>

López Sumarriva, J. J. (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. *Para optar el título de Ingeniero Civil*. Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay, Perú. Obtenido de [https://repositorio.utea.edu.pe/bitstream/utea/152/1/Tesis-Estabilizaci%
c3%b3n%20de%20suelos%20arcillosos%20con%20cal.pdf](https://repositorio.utea.edu.pe/bitstream/utea/152/1/Tesis-Estabilizaci%c3%b3n%20de%20suelos%20arcillosos%20con%20cal.pdf)

Mamani Gonzalo, G. (2022). Estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de quinua y cal en la carretera Lago Sagrado Tramo Putini-Jayujayu, Puno, 2022. *Para obtener el título profesional de Ingeniero Civil*. Universidad César Vallejo, Callao, Perú. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/106147>

Márquez Siguan, B. M. (2014). *"Teoría de muestreo - Refrigeración y congelación de alimentos: terminología, definiciones y explicaciones"*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e8bd5b97-f205-4b7e-bcd6-b34d7ab4fbe2/content>

Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y muestreo* (Décima tercera ed.). Bogotá: ECOE Ediciones. Obtenido de https://www.academia.edu/39626329/Estad%C3%ADstica_y_muestreo_Ciro_Mart%C3%ADnez_Bencardino_13ED

Matías Quispe, S. (2019). Resistencia de un concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ sustituyendo el 10% y 16% de cemento por una combinación de cáscara de huevo y ceniza de hoja de

- eucalipto. *Para optar el título profesional de ingeniero civil*. Universidad San Pedro, Huaraz, Perú. Obtenido de <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/8015>
- McMillan, J. H. (2005). *Investigación educativa* (5ta edición ed.). Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S. A. Obtenido de https://desfor.infed.edu.ar/sitio/upload/McMillan_J._H._Schumacher_S._2005._Investigacion_educativa_5_ed..pdf
- Ministerio de Transportes y, C. (2014). *Manual de carreteras - suelos geología, geotecnia y pavimentos - sección suelos y pavimentos - R.D.N°10*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- Mollo, V. (2021). *Incorporación de ceniza de hojas de eucalipto para la estabilización de la subrasante en la calle Luceros de Francia, Cusco - 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91150>
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Segunda reimpresión de la segunda edición ed.). Bogotá: Stella Valbuena de Fierro. Obtenido de <https://samustuto.files.wordpress.com/2014/09/ingenieric3ada-de-pavimentos-para-carreteras-tomo-i-ed-3ra-alfonso-montejo-fonseca.pdf>
- MTC. (2013). *Manual de carreteras - suelos geología, geotecnia y pavimentos - sección suelos y pavimentos*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Obtenido de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf

MTC. (2018). *Glosario de terminos*. Lima: MTC. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/10338-002-2018-mtc-14>

MTC, M. d. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales* (Mayo ed.). Lima: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf

Nogués, F. S.-G. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)* (Primera edición ed.). España: Prensas Universitarias de Zaragoza. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=P58rcPu5O90C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Perez Mantilla, Y. (2018). Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm² sustituyendo al cemento en 4% y 8% por la ceniza de tronco de Eucalipto (*Eucaliptus Globulus*). *Titulo de Ingeniero Civil*. Universidad San Pedro, Chimbote. Obtenido de <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/7975>

Quispe Cáceres, J. y. (2022). Estabilización de suelos arcillosos con cal y cenizas de cáscara de castaña para la subrasante en la Av. Circunvalación, Tambopata 2022. *Tesis para obtener el titulo profesional de Ingeniero Civil*. Universidad César Vallejo, Lima. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/86568>

Quispe Chuquicusma, H. y. (2023). Estabilización de suelos arcillosos de subrasante adicionando ceniza de arroz y café para obras viales en Jaén 2022. *Para obtener el titulo profesional de Ingeniero Civil*. Universidad César Vallejo, Trujillo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/110943>

- Ramos, J. (2011). *Capacidad de Soporte de los Suelos*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/59596724/Capacidad-de-Soporte-de-Un-Suelo>
- Rincón Hernández, L. P. (2020). Análisis de la resistencia a la compresión inconfina y CBR de un afirmado estabilizado con ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal. *Trabajo de grado - Pregrado*. Universidad de la Salle, Bogotá D.C. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1881&context=ing_civil
- Romanelli. (07 de Agosto de 2019). *La viabilidad de la estabilización de suelos con cemento*. Recuperado el 28 de Abril de 2023, de <https://www.romanelli.com.br/pt/noticias/a-viabilidade-da-estabilizacao-de-solos-com-cimento->
- Salazar, A. (2002). *“Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos”* (3 ed.). Cali: Corporación Construir. Obtenido de https://www.academia.edu/24569108/Puzolonas_Texto_elaborado_por_Alejandro_Salazar_J
- Sánchez Carlessi, H., & Reyes Romero, C. y. (2018). *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística* (Primera edición ed.). Lima: Universidad Ricardo Palma. Obtenido de <https://www.urp.edu.pe/pdf/id/13350/n/libro-manual-de-terminos-en-investigacion.pdf>
- SINAC. (2021). *Estadística - Infraestructura de Transportes - Infraestructura Vial*. Sistema Nacional de Carreteras y Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344790-estadistica-infraestructura-de-transportes-infraestructura-vial>

Talavera, J. O. (2011). *Diseños de Investigación* (Investigación clínica I. ed.). México: Instituto Mexicano del Seguro Social. Obtenido de <https://www.medigraphic.com/pdfs/imss/im-2011/im111k.pdf>

Terrones, Á. (2019). *Estabilizacion de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de la subrasante en el sector Barraza, Trujillo - 2018*. [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/14971>

Vásquez Ramírez, A., Guanuchi Orellana , L., Cahuana Tapia, R., Vera Teves, R., & Holgado Tisoc, J. (2023). *Métodos de investigación científica* (Primera ed.). Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. doi: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.094>

Zambrano Sierra, F. G. (2022). Análisis comparativo de la capacidad de soporte a nivel de subrasante en suelos arcillosos incorporando ceniza de *Saccharum Officinarum* y activador alcalino en la trocha carrozable Sahuanay - Umaccata Tamburco Abancay 2021. *Para optar el título profesional de Ingeniero Civil*. Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay, Apurímac, Perú. Obtenido de <https://repositorio.utea.edu.pe/bitstream/utea/478/1/An%c3%a1lisis%20comparativ%20de%20la%20capacidad-Zambrano%20Sierra%2c%20Fredy%20G..pdf>

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