

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis:

**Mejoramiento del CBR con adición de savia de Maguey en la subrasante de la trocha
carrozable Kirkas a Punacancha, San Sebastián -Cusco**

Asesor:

Mg. Ing. Cuno Rojas, Eleazar

Autor:

Fuentes Chavez, Cinthya Lucero

Para Optar el Título Profesional de:

Ingeniero(a) Civil

Cusco – Cusco - Perú

2025



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 011

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 12 días del mes de Diciembre del 2025, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 538-2025-UTEA-FC-FI-EPIC de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mg. Alvarez Alvarez Javier Francisco
Dictaminante:	Mg. Chávarry Morvelí Daniel
Replicante :	Mg. Canal Apaza Jaime

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Mejoramiento del CBR con adición de savia de Maguey en la subrasante de la trocha carrozable Kirkas a Punacancha, San Sebastián - Cusco

Desarrollado por el (la) (los) Bachiller (es):

Br.: Fuentes Chávez Cinthya Lucero

(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniera Civil

(Denominación del Título)

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 (**)
Br. Fuentes Chávez Cinthya Lucero	Aprobado

Siendo las 10:30 a.m horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. Alvarez Alvarez Javier Francisco

(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Dictaminante: Mg. Chávarry Morvelí Daniel

(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Replicante: Mg. Canal Apaza Jaime

(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(*): 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.




6% 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 15 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 5%  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 de Autor	
Apellidos y nombres	: Fuentes Chavez, Cinthya Lucero
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 71749355
URL ORCID	:
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: Mgt. Ing. Cuno Rojas, Eleazar
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 47343522
URL ORCID	: https://orcid.org/0000-0001-6134-6871
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	: diciembre del 2024-setiembre del 2025
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 6%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Con el más profundo respeto, cariño y gratitud, deseo dedicar el presente trabajo de tesis a mis queridos padres y mi amada abuela Bertha Pantoja. Su constante esfuerzo, sacrificio y dedicación inquebrantable han sido el pilar fundamental que me ha sostenido a lo largo de este camino académico.

Gracias a su ejemplo de perseverancia, entrega y amor incondicional de mi querida abuela Bertha Pantoja, aprendí a valorar la importancia del estudio como herramienta de superación personal y profesional.

Este logro es reflejo de su apoyo incansable, de la confianza que siempre depositaron en mí. A ellos debo no solo mi formación, sino también la fuerza y esperanza que me han guiado hasta alcanzar esta meta.

Cinthya Lucero Fuentes Chavez

Agradecimiento

Culminar este proyecto de tesis representa para mí, no solo la concreción de una meta académica, sino también el reflejo del apoyo, guía y compañía de mi familia.

En primer lugar, expreso mi más sincero y profundo agradecimiento a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para superar cada obstáculo que surgió en el camino.

A mis padres y mi abuela, por ser el pilar más firme en mi vida, por su amor incondicional, sus consejos sabios y su ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y sacrificio.

Cinthya Lucero Fuentes Chavez

Resumen

La presente investigación titulada “Mejoramiento del CBR con adición de savia de Maguey en la subrasante de la trocha carrozable Kirkas a Punacancha, San Sebastián–Cusco” tiene como objetivo analizar el comportamiento del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) cuando se incorpora savia de maguey como aditivo natural, buscando optimizar las propiedades mecánicas del material de subrasante. El estudio se llevó a cabo en la vía rural que conecta las comunidades de Kirkas y Punacancha, a lo largo de un tramo de 6 km en el distrito de San Sebastián, provincia de Cusco.

La metodología corresponde a un enfoque experimental desarrollado durante un periodo de diez meses, donde se evaluaron diferentes porcentajes de adición de savia de maguey (10%, 15%, 20% y 25%). Los ensayos se ejecutaron en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de los Andes, comparando el desempeño del suelo tratado con el suelo natural sin aditivos. Asimismo, previo al análisis CBR, se aplicaron pruebas complementarias como granulometría, contenido de humedad, límites de consistencia y Proctor modificado.

Esta investigación propone el uso de un recurso natural accesible y económico, con el propósito de promover una alternativa sostenible de estabilización que incremente la calidad, resistencia y durabilidad de carreteras rurales de bajo tránsito. Con ello, se busca generar beneficios para las comunidades locales mediante la disponibilidad de vías más estables y seguras, contribuyendo a la reducción de costos de mantenimiento y favoreciendo un impacto positivo tanto ambiental como social.

Palabras claves: Maguey, CBR, suelos, subrasante, carreteras.

Abstract

The research entitled “Improvement of CBR with Addition of Maguey Sap in the Subgrade of the Kirkas–Punacancha Rural Road, San Sebastián–Cusco” aims to analyze the behavior of the California Bearing Ratio (CBR) test when incorporating maguey sap as a natural additive to enhance the mechanical properties of the subgrade material. The study was conducted along a 6 km section of the rural road linking the communities of Kirkas and Punacancha, located in the district of San Sebastián, Cusco Province.

The methodology corresponds to an experimental approach developed over a six-month period, in which different percentages of maguey sap (10%, 15%, 20%, and 25%) were evaluated. Laboratory tests were performed at the Universidad Tecnológica de los Andes, comparing the performance of treated soil with untreated natural soil. Prior to the CBR analysis, complementary tests such as grain size distribution, moisture content, consistency limits, and modified Proctor compaction were carried out.

This study proposes the use of an accessible and low-cost natural resource as a sustainable stabilization alternative to improve the quality, strength, and durability of low-traffic rural roads. The proposed technique seeks to benefit local communities by providing safer and more durable roadways, reducing maintenance costs, and generating a positive social and environmental impact.

Keywords: Maguey, CBR, soil, subgrade, roads.

Índice

Portada	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen.....	vii
Abstract	viii
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas.....	xiii
Índice de anexos.....	xiv
I. Introducción	15
II. Planteamiento del problema	20
2.1. Descripción y formulación del problema	20
2.2. Objetivos	27
2.2.1. Objetivo General	27
2.2.2. Objetivos Específicos	27
2.3. Justificación e importancia.....	27
2.4. Hipótesis	29
2.5. Variables.....	30
III. Marco teórico	36
3.1. Antecedentes.....	36
3.2. Bases Teóricas.....	47
3.3. Definición de términos	59

IV. Metodología	61
4.1. Tipo y nivel de investigación.....	61
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	62
4.3. Población y muestra	62
4.4. Instrumentos	63
4.5. Procedimientos	64
4.6. Análisis de datos.....	84
4.7. Consideraciones éticas	89
V. Resultados y discusión	90
VI. Conclusiones	108
VII. Recomendaciones	110
VIII. Referencias.....	112
IX. Anexos	114

Índice de figuras

Figura 1 Clasificación de la red vial departamental.....	16
Figura 2 Trocha carrozable Kirkas a Punacancha.....	25
Figura 3 Mecanismo Físico -Químico de estabilización del suelo	54
Figura 4 Vista de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha,2024....	55
Figura 5 Vista Aérea de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha.....	68
Figura 6 Vista área de la trocha Carrozable de Kirkas a Punacancha.....	70
Figura 7 Apertura de calicatas y obtención de muestras de suelo	71
Figura 8 Ubicación de la Calicata N°01	72
Figura 9 Ubicación de la Calicata N°02	73
Figura 10 Ubicación de la Calicata N°03	74
Figura 11 Ubicación de la Calicata N°04	75
Figura 12 Ubicación de la Calicata N°05	76
Figura 13 Ensayo de contenido de humedad	77
Figura 14 Análisis Granulométrico	78
Figura 15 Ensayo de Limite Liquido	81
Figura 16 Ensayo de Limite Plástico	83
Figura 17 Ensayo Proctor Modificado	88
Figura 18 Ensayo del CBR	90
Figura 19 Procedimiento de extracción de la Savia.....	91
Figura 20 Ubicación del mapa político y Distrito de San Sebastián.....	91
Figura 21 Mapa de la provincia de Cusco	92
Figura 22 Mapa distrital de San Sebastián.....	93
Figura 23 Ubicación de la trocha de Kirkas a Punacancha.....	95
Figura 24 Trocha carrozable de Kirkas a Punacancha	96

Figura 25 Relación del porcentaje de savia de maguey al 95 % correspondiente a la Calicata
N°0197

Figura 26 Relación del porcentaje de savia de maguey al 95% correspondiente a la Calicata
N°02.....98

Índice de tablas

Tabla 1 Fases de elaboración del proyecto	65
Tabla 2 Ubicación de las dentro de la trocha carrozable en estudio	67
Tabla 3 Cuadro de Índices de Plasticidad	79
Tabla 4 Cuadro de Clasificación de suelos	80
Tabla 5 Cuadro de resumen según su clasificación	80
Tabla 6 Categoría de Subrasante.....	83
Tabla 7 Clasificación de los suelos según SUCS y ASSTHO	84
Tabla 8 Resultado del ensayo de Proctor modificado para cada calicata	85
Tabla 9 Resultado del ensayo del CBR a diferentes porcentajes de savia de maguey	
Tabla 11 Clasificación de suelos y tipo de suelo.....	100

Índice de anexos

Anexo 01: Matriz de consistencia del proyecto de tesis.....	114
Anexo 02: Solicitud de autorización para hacer uso del laboratorio de la Universidad....	116
Anexo 03: Validación de instrumentos.....	117
Anexo 04: Certificado de calibración del equipo de laboratorio	120
Anexo 05: Análisis de Costos unitarios.....	122
Anexo 06: Ensayos de laboratorio realizados en la universidad.....	123
Anexo 07: Panel fotográfico.....	130

I. Introducción

La provincia del Cusco se caracteriza por poseer una amplia diversidad geográfica, social y económica, lo que se refleja también en la infraestructura vial existente. Dentro del territorio se encuentran distintos tipos de vías de comunicación que comprenden carreteras de carácter nacional, departamental y vecinal, cada una de ellas con funciones y niveles de servicio diferenciados. Esta variedad de caminos evidencia que la superficie de rodadura no es uniforme, ya que en algunos tramos se cuenta con vías asfaltadas que permiten un tránsito más fluido y seguro, mientras que en otros sectores predominan las denominadas trochas carrozables o caminos afirmados, que en muchos casos se encuentran en condiciones deficientes.

La realidad vial de estas trochas resulta preocupante, pues la mayoría presenta un estado de conservación que oscila entre regular y muy malo, generando dificultades tanto para la transitabilidad de vehículos como para el desarrollo socioeconómico de las comunidades que dependen de estas vías para el transporte de personas, productos agrícolas y bienes de primera necesidad.

Según lo dispuesto en el Decreto Supremo N° 044-2008-MTC, la red vial de la región Cusco cuenta con una extensión total de aproximadamente 6,733.81 kilómetros, conformada por rutas nacionales, departamentales y vecinales. De esta longitud, cerca de 2,027.70 kilómetros presentan pavimento asfáltico, 4,212.61 kilómetros poseen superficie afirmada, 139.01 kilómetros no cuentan con afirmado y 354.49 kilómetros corresponden a trochas carrozables. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2025).

Figura 1*Clasificación de la red vial departamental*

Ámbito / Red Vial	Longitudes por Tipo de Superficie de Rodadura									
	Asfaltado		Afirmado		Sin Afirmar		Trocha		Total	
	Km	%	Km	%	Km	%	Km	%	Km	%
Perú	10,189.0	13.0%	18,533.0	23.7%	13,809.0	17.7%	35,596.0	45.6%	78,127.00	100%
Nacional	8,141.0	10.40%	6,640.0	8.50%	1,860.0	2.40%	326.0	0.40%	16,967.00	22%
Departamental	1,106.0	1.40%	6,015.0	7.70%	4,291.0	5.50%	2,839.0	3.60%	14,251.00	18%
Vecinal	942.0	1.20%	5,878.0	7.50%	7,658.0	9.80%	32,431.0	41.50%	46,909.00	60%
Cusco	2,027.70	30.1%	4,212.61	62.6%	139.01	2.1%	354.49	5.3%	6,733.81	100%
Nacional	1,910.24	100.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	1,910.24	28%
Departamental	117.46	4.6%	1,952.37	76.2%	139.01	5.4%	354.49	13.8%	2,563.33	38%
Vecinal	0.0	0.0%	2,260.2	100.0%	0.0	0.0%	0.0	0.0%	2,260.24	34%

Nota: Inventario vial georreferenciado departamental de la Región Cusco 2011

La tabla de longitudes por tipo de superficie de rodadura presenta la distribución de la red vial a nivel nacional y en la región Cusco, diferenciada en tres ámbitos: nacional, departamental y vecinal.

En el caso del Perú, la red vial total alcanza los 78,127 km, de los cuales:

- El porcentaje más alto corresponde a las trochas carrozables, que abarcan el 45.6% (35,596 km) del total.

En cuanto a la región Cusco, la red vial suma 6,733.81 km, donde se observa la siguiente distribución:

- 30.1% (2,027.7 km) corresponde a vías asfaltadas.
- 62.6% (4,212.61 km) se encuentra afirmado.
- 2.1% (139.01 km) permanece sin afirmar.
- 5.3% (354.49 km) corresponde a trochas.

Se aprecia que, en el ámbito nacional dentro de Cusco, la totalidad de los caminos (1,910.24 km) se encuentran asfaltados, mientras que en el ámbito departamental predomina el afirmado (76.2%), seguido de trochas (13.8%). En el ámbito vecinal, la mayor extensión corresponde a caminos afirmados (100%).

En síntesis, la información revela que, si bien Cusco presenta un mayor porcentaje de vías afirmadas y asfaltadas en comparación con la media nacional, todavía persiste la existencia de trochas y caminos sin afirmar que limitan la transitabilidad y afectan el desarrollo de comunidades rurales.

Otro factor relevante es la limitada cultura de prevención, ya que las acciones de mantenimiento suelen realizarse solo cuando el daño ya es evidente, en lugar de llevar a cabo intervenciones preventivas que resultan más económicas y efectivas a largo plazo.

Este contexto refleja la importancia de buscar alternativas técnicas y sostenibles que permitan mejorar la resistencia, durabilidad y desempeño de las trochas carrozables, especialmente aquellas que cumplen un papel fundamental en la conexión de comunidades rurales y en la integración de zonas alejadas con los principales centros poblados de la provincia del Cusco.

Los mucílagos vegetales (como la savia de maguey) se definen como sustancias gelatinosas de alto peso molecular producidas por plantas, que incluyen polisacáridos heterogéneos, glucanos y polúridos, los cuales pueden formar películas o películas adherentes alrededor de las partículas del suelo. (Oades, 2020)

Estas sustancias presentan propiedades físicas que potencian la coherencia del suelo: entre ellas, alta viscosidad y capacidad adhesiva, lo que permite aumentar la resistencia al corte y mejorar la compactación del material. En suelos amendrados con mucílago vegetal,

se ha observado un aumento en la resistencia a la penetración y mayor estabilidad mecánica al secarse, comparado con suelos sin adición de mucílago. (Uteau, 2022).

En condiciones alternantes de humedad y sequedad, los mucílagos reducen la degradación estructural del suelo, moderan los ciclos de hinchamiento/contracción y ayudan a conservar la cohesión de los agregados del suelo. Por tanto, la capacidad adhesiva y viscosa de la savia vegetal podría aprovecharse como aditivo natural para mejorar la resistencia mecánica (como el índice CBR), así como la durabilidad y la resistencia frente a deformaciones en subrasantes de vías rurales.

Aplicado a la ingeniería vial, el principio es el mismo: la savia de maguey, por su capacidad de recubrimiento y adhesión, puede mejorar la compactación del material y reducir la movilidad de partículas finas, favoreciendo una menor permeabilidad y un aumento del Índice de Soporte de California (CBR) en la subrasante. Estudios y proyectos recientes realizados en contextos andinos han empezado a evaluar experimentalmente esta aplicación (investigaciones de grado y tesis que analizan la influencia de la savia de agave en suelos arcillosos y su efecto sobre Proctor modificado y CBR), aportando evidencia directa sobre su potencial como aditivo natural para estabilización. (Salvador, 2022)

En este contexto, la presente investigación propone evaluar de manera experimental el uso de la savia de maguey como aditivo estabilizante en el tratamiento de la subrasante de carreteras vecinales o rurales (de tercer orden). Este enfoque innovador busca contribuir a la ingeniería sostenible, aprovechando recursos naturales locales para mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo, aumentar su capacidad portante y prolongar la vida útil de las vías rurales, reduciendo el impacto ambiental y los costos asociados al mantenimiento convencional.

Para ello el presente trabajo de investigación contempla los siguientes componentes para la elaboración del trabajo de investigación:

El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos CBR demuestra que la adición de savia de maguey en diferentes proporciones influye directamente en la capacidad de soporte del suelo de la subrasante. Se observa que la proporción del 20% respecto al contenido óptimo de humedad produce el mayor valor del Índice CBR, superando significativamente a las demás dosificaciones evaluadas (10%, 15% y 25%). Este comportamiento se atribuye a que, en dicha proporción, la savia de maguey actúa como agente aglutinante y estabilizador natural, mejorando la cohesión de las partículas finas y optimizando la compactación del material, lo que se traduce en un incremento de la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado. Además, la estructura interna resultante favorece la resistencia al esfuerzo de penetración, evidenciado en el ensayo CBR, confirmando que el 20% constituye el porcentaje óptimo para el mejoramiento de la subrasante en las condiciones evaluadas.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

A nivel internacional, se tiene conocimiento las redes viales rurales y de bajo volumen de tránsito representan un componente esencial para la conectividad territorial, especialmente en países en desarrollo y regiones con geografías complejas. Según informes de organismos internacionales como el Banco Mundial y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), más del 60% de las carreteras rurales en América Latina no cuentan con pavimento, presentando condiciones de transitabilidad limitada que afectan directamente la competitividad, el acceso a mercados, a servicios básicos y, en general, el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales.

Estas vías no pavimentadas suelen construirse sobre suelos de baja capacidad de soporte, expuestos a factores climáticos adversos como lluvias intensas, variaciones térmicas extremas y procesos erosivos. Dichas condiciones incrementan la vulnerabilidad de las plataformas viales y generan deterioro prematuro en la superficie de rodadura, baches, deformaciones y pérdida de la estructura de soporte, afectando significativamente la seguridad vial y la calidad del servicio de transporte.

En la revista denominada Avances “Investigación en ingeniería” presenta un capítulo sobre la estabilización tradicional y no tradicional en suelos, en dicho capítulo esta metodología.

La estabilización de suelos es una práctica que se remonta a épocas muy antiguas, desde las comunidades nómadas que dependían de la caza hasta los primeros asentamientos en Mesopotamia. En esta región, pese a la alta fertilidad de sus tierras para el cultivo, los suelos presentaban baja capacidad de soporte, por lo que se recurrió a técnicas empíricas como la incorporación de madera, cenizas y distintos tipos de arcillas para mejorar su resistencia. (Hanafi & Ertug Aydi, 2020).

Los métodos convencionales de estabilización de suelos recurren principalmente a aditivos de origen industrial, como cemento Portland, cal o estabilizantes químicos sintéticos. Si bien estos métodos han demostrado ser efectivos en la mejora de la capacidad portante y la durabilidad de las subrasantes, presentan desventajas como el alto costo económico, la dependencia de materiales importados, el impacto ambiental asociado a su producción y aplicación, y la incompatibilidad con políticas de desarrollo sostenible que priorizan el uso de recursos locales.

Ante esta situación, surge el interés en investigar alternativas sostenibles basadas en el uso de materiales naturales y disponibles localmente, como extractos vegetales y biopolímeros, que puedan actuar como estabilizantes del suelo. Experiencias internacionales, aunque limitadas, reportan resultados promisorios en la mejora de la cohesión, reducción de la plasticidad y aumento del soporte del suelo mediante el uso de fibras vegetales, resinas naturales o derivados de plantas como el maguey, que destaca por su resistencia natural y características físico-químicas que favorecen la estabilización.

Sin embargo, la investigación sobre el empleo de la savia de maguey como estabilizante en el sector vial es aún incipiente a nivel global. No existe suficiente evidencia técnica que cuantifique de manera rigurosa su efecto sobre parámetros clave como el valor del CBR, la densidad máxima seca o el contenido óptimo de humedad en suelos de subrasante, particularmente en contextos de vías rurales de bajo volumen de tránsito.

Por tanto, se identifica la necesidad de desarrollar estudios experimentales que permitan validar la eficacia del uso de savia de maguey como aditivo estabilizante, contribuyendo así al conocimiento científico internacional y ofreciendo una alternativa sostenible y económica para la mejora de la infraestructura vial rural.

A nivel nacional, en el Perú, la red vial es fundamental para el desarrollo económico y social, especialmente para integrar zonas rurales, promover el comercio local y facilitar el

acceso a servicios básicos. Según datos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) al año 2023, la red vial nacional comprende aproximadamente 80 000 km, de los cuales más de 36 000 km corresponden a la red vial vecinal, que representa alrededor del 45% del total. Sin embargo, se estima que cerca del 94,4% de esta red vecinal, es decir, más de 34 000 km, permanece sin pavimentar, lo que refleja una alta vulnerabilidad frente a factores climáticos y de uso.

En particular, las carreteras vecinales ubicadas en zonas de sierra caracterizadas por suelos de baja capacidad portante ($\text{CBR} < 10\%$), tienen una topografía accidentada y fuertes precipitaciones estacionales presentan un deterioro acelerado. Estas condiciones provocan deformaciones, baches y pérdida de material granular en la superficie de rodadura, afectando de manera directa la transitabilidad y la seguridad de los usuarios. Se calcula que más de 10 000 km de estas vías se encuentran distribuidos en regiones andinas, lo que representa aproximadamente el 12% de la red vial nacional o el 28% de la red vial vecinal, zonas donde la afectación es mayor por las características geográficas y climáticas adversas.

Adicionalmente, las vías rurales de bajo volumen de tránsito, que suelen tener un flujo diario menor a 50 vehículos, representan un porcentaje significativo de la red nacional y cumplen un rol estratégico para conectar centros poblados, zonas agrícolas y mercados locales. El mal estado de estas carreteras limita el desarrollo de actividades productivas y reduce el acceso de la población a servicios esenciales como salud y educación, profundizando las brechas sociales entre las áreas urbanas y rurales.

Frente a este contexto, surge la necesidad de investigar y validar técnicas de estabilización que sean sostenibles, de bajo costo y basadas en recursos locales. Una de las alternativas poco exploradas a nivel nacional es el uso de la savia de maguey como aditivo estabilizante, considerando sus propiedades físico-químicas y su disponibilidad en distintas regiones del país, incluida la sierra. Sin embargo, hasta la fecha, existe escasa evidencia

técnica que demuestre su efectividad para mejorar parámetros clave como el valor de CBR, la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad en suelos de subrasante.

Por ello, el presente estudio busca aportar conocimientos científicos aplicados al contexto nacional, evaluando experimentalmente la viabilidad de emplear savia de maguey en el mejoramiento de subrasantes de carreteras vecinales, contribuyendo así a la construcción de vías más resistentes, sostenibles y duraderas en beneficio de las comunidades rurales del Perú.

A nivel regional, La ciudad de Cusco, la red vial vecinal cumple un rol estratégico para la integración de zonas rurales, el transporte de productos agropecuarios y el acceso a servicios básicos para comunidades dispersas en territorios de difícil geografía. Según datos regionales y del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Cusco cuenta con aproximadamente 2 500 km de carreteras vecinales, de las cuales una parte significativa corresponde a vías no pavimentadas con tránsito diario menor a 50 vehículos, clasificadas como carreteras de bajo volumen de tránsito.

Estas vías atraviesan zonas montañosas, expuestas a intensas precipitaciones estacionales y asentadas mayoritariamente sobre suelos de baja capacidad portante (CBR < 10%). Como consecuencia, presentan un deterioro acelerado que se manifiesta en baches, pérdida de afirmado, deformaciones y erosiones, reduciendo notablemente la vida útil proyectada y afectando de manera directa la transitabilidad y seguridad.

Este problema tiene un impacto económico y social considerable, ya que las comunidades rurales dependen de estas vías para transportar productos agrícolas, acceder a centros de salud, instituciones educativas y mercados locales. El mal estado recurrente de la infraestructura incrementa los costos de transporte, limita la comercialización de productos y restringe el desarrollo de actividades económicas locales, perpetuando las brechas de desarrollo respecto a las zonas urbanas de la región.

En el ámbito de la investigación aplicada al mejoramiento de suelos, se plantea la necesidad de identificar alternativas innovadoras y sostenibles que permitan aprovechar los recursos naturales disponibles en la región del Cusco. En este sentido, el maguey (*Agave*) se presenta como una alternativa potencialmente viable, debido a su amplia presencia y adaptación en diversas provincias del territorio regional. La composición química de la savia de esta planta presenta variaciones que dependen de factores como la especie, las condiciones climáticas, las características edáficas y el método de extracción empleado. Sin embargo, de manera general, se ha determinado que sus principales componentes son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Estas dos últimas sustancias, presentes en las fibras naturales, actúan como elementos protectores de la celulosa frente a agentes externos, lo que evidencia el potencial de dichas composiciones para ser empleadas como aditivos estabilizantes en suelos de baja capacidad portante, contribuyendo al mejoramiento de sus propiedades mecánicas, estabilidad y durabilidad estructural.

Sin embargo, en la región Cusco no se dispone de estudios técnicos que cuantifiquen el efecto de la savia de maguey sobre parámetros claves como el CBR, densidad máxima seca y contenido óptimo de humedad en suelos de subrasante, particularmente en tramos rurales de bajo volumen de tránsito.

Por ello, resulta fundamental desarrollar investigaciones experimentales que permitan validar la viabilidad técnica de la savia de maguey como estabilizante natural, para contribuir a la construcción y mantenimiento de vías vecinales más duraderas, sostenibles y adaptadas a las condiciones geográficas y climáticas propias de la región Cusco.

El tramo de trocha carrozable que conecta a la comunidad de Kirkas y Punacancha, ubicado en el distrito de San Sebastián, provincia de Cusco, abarca 6 km y forma parte de la red vial vecinal de la región. Este camino, clasificado como vía de bajo volumen de tránsito

(menos de 50 vehículos diarios), presenta actualmente serias deficiencias funcionales y estructurales de la subrasante de dicha vía.

La combinación de factores climáticos adversos principalmente lluvias estacionales intensas y la limitada resistencia del suelo provoca un deterioro prematuro de la plataforma vial, generando baches, desprendimiento del afirmado y pérdida de la conformación original del camino. Este estado deficiente reduce considerablemente la transitabilidad y la seguridad, impactando de forma directa en los habitantes de las comunicades de Kirkas y Punacancha, puesto que dependen de esta vía para el transporte de productos agrícolas, el acceso a centros educativos, establecimientos de salud y mercados de la ciudad de Cusco.

Considerando lo expuesto, se evidencia la necesidad de efectuar una evaluación y alternativas sostenibles que utilicen recursos locales que se encuentren a disposición, como la savia de maguey, planta que crece en la zona y cuya propiedad es cohesionante y resistencia a la intemperie. Sin embargo, no existen estudios técnicos previos que midan y validen experimentalmente la eficacia de la savia de maguey en el mejoramiento de la capacidad portante (CBR), la densidad máxima seca y la reducción del contenido óptimo de humedad de la subrasante de este tramo en estudio.

Figura 2

Trocha carrozable Kirkas a Punacancha



Nota: Imagen tomada del estado situacional de la trocha carrozable

- ¿CUÁL ES EL PROBLEMA QUE SE VISUALIZA EN LA TROCHA CARROZABLE DE KIRKAS A PUNACANCHA?

Según lo establecido en el Manual de Carreteras del MTC, la aparición de baches se asocia a la permanencia de agua sobre la vía y a la limitada resistencia de la subrasante. Esta capa, al exhibir valores reducidos de CBR, no cumple adecuadamente con la función de soporte, acelerando el deterioro y favoreciendo la generación de huecos por fatiga y pérdida de materia.

- ¿QUÉ PASARÍA O CUALES SERÍAN LAS CONSECUENCIAS DE NO HACER UN ESTUDIO DE MEJORAMIENTO DEL SUELO EN LA TROCHA CARROZABLE KIRKAS A PUNACANCHA?

Sin un estudio que proponga técnicas de estabilización, la subrasante seguiría presentando baja capacidad de soporte, por lo que la trocha continuaría deteriorándose rápidamente tras las lluvias, generando baches, deformaciones, erosiones.

- ¿CUÁL SERÍA LA SOLUCIÓN?

Se plantea la estabilización de la subrasante mediante la incorporación del 20% de savia de maguey respecto a la humedad óptima, debido a que dicha dosificación genera los mayores valores de CBR y mejora la capacidad de soporte del suelo. De acuerdo con los criterios del Manual de Carreteras del MTC, esta mejora contribuye a incrementar el desempeño del pavimento, reducir la susceptibilidad a deformaciones permanentes y disminuir la frecuencia de intervenciones de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la vía.

2.1.1. Problema General

¿Cuál es el efecto de la adición de savia de maguey en sus diferentes porcentajes (10%, 15%, 20% y 25%) en el valor del índice del CBR de la subrasante en la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha?

2.1.2. Problemas Específicos

PE1: ¿Cómo influye la cantidad de savia de maguey (10% 15%, 20% y 25%) sobre el índice CBR de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha?

PE2: ¿Qué relación existe entre la granulometría y el Índice CBR al incorporar savia de maguey?

PE3: ¿De qué manera el contenido de humedad óptimo incrementa con la adición de savia de maguey para el mejoramiento del índice del CBR?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Determinar el efecto de la adición de diferentes cantidades de savia de maguey, en el valor del Índice del CBR de la subrasante del tramo en estudio.

2.2.2. Objetivos Específicos

OE1: Analizar la influencia de la cantidad de savia de maguey en el valor del Índice CBR.

OE2: Determinar mediante la clasificación de suelos que tipo de suelo reacciona de manera favorable el incremento del valor del CBR con la adición de la savia de maguey.

OE3: Analizar cómo influye el incremento del contenido de humedad óptimo, debido a la adición de savia de maguey, en el mejoramiento del valor del Índice CBR.

2.3. Justificación e importancia

La presente investigación posee una marcada relevancia técnica, social, de viabilidad y de pertinencia para el desarrollo sostenible de las vías rurales en la región Cusco en el Distrito de San Sebastián.

Desde el punto de vista técnico, el estudio se fundamenta en los conocimientos adquiridos en cursos especializados de tecnología de materiales, mecánica de suelos y pavimentos, aplicados a la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la capacidad

portante de la subrasante del suelo. Este enfoque permitirá validar experimentalmente el uso de la savia de maguey como aditivo natural, contribuyendo al desarrollo de técnicas más sostenibles y económicas en el ámbito de la ingeniería civil.

En el aspecto social, la investigación está orientada a beneficiar directamente a las comunidades rurales más alejadas del distrito de San Sebastián – Cusco, como son las comunidades de Kirkas y Punacancha, que dependen de la trocha carrozable para transportar productos agrícolas, acceder a servicios básicos y vincularse con los mercados urbanos. La mejora de la calidad de la subrasante, mediante el uso de un recurso local y gratuito como la savia de maguey, permitirá prolongar la vida útil de estas vías, mejorar la transitabilidad y reducir los costos de transporte, fortaleciendo así la competitividad y calidad de vida de los pobladores.

Respecto a la viabilidad, el proyecto propone la utilización de un material orgánico ampliamente disponible en la región, lo que facilita su recolección y aplicación sin generar costos adicionales significativos. La savia de maguey tiene propiedades físico-mecánicas que pueden incrementar la densidad máxima seca, disminuir el contenido óptimo de humedad y mejorar el CBR, optimizando así el comportamiento del suelo ante cargas y condiciones climáticas adversas.

En términos de relevancia, la investigación responde a la necesidad urgente de fortalecer las propiedades del suelo, las cuales suelen deteriorarse rápidamente por falta de estabilización adecuada y mantenimiento periódico. Al aplicar un aditivo natural y local, se contribuye a la construcción de caminos más resistentes y sostenibles, con impactos positivos en la seguridad vial y la integración territorial.

Además, la investigación se realizará bajo condiciones controladas en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes, lo que garantiza resultados confiables. Contará también con la supervisión de docentes especializados, asegurando un proceso

metodológicamente sólido y respaldado científicamente. En conjunto, estos factores justifican la importancia y pertinencia del proyecto para aportar soluciones innovadoras, sostenibles y adaptadas a la realidad geográfica del Cusco.

Desde el punto de vista técnico, la investigación tiene importancia porque propone evaluar experimentalmente el uso de un recurso natural y local como es la savia de maguey, para mejorar propiedades mecánicas del suelo como el CBR, la densidad y la humedad óptima, contribuyendo así al diseño de soluciones sostenibles y de bajo costo para caminos de bajo volumen de tránsito. Este proceso incluirá muestreos en campo, ensayos de laboratorio, análisis comparativos, este estudio se realizó durante un periodo de diez meses entre diciembre de 2024 y setiembre de 2025, garantizando resultados consistentes y contextualizados.

Asimismo, el uso de la savia de maguey representa una alternativa viable técnica y ambientalmente, ya que se trata de un recurso abundante, renovable y de bajo impacto ambiental, cuyo aprovechamiento no implica altos costos ni afecta significativamente el ecosistema local.

Finalmente, la delimitación conceptual y metodológica garantiza que el estudio se realice bajo condiciones controladas, asegurando la validez de los resultados obtenidos y aportando evidencia científica para futuras investigaciones y proyectos de estabilización de suelos en otras vías rurales de características similares.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

La adición de savia de maguey en diferentes proporciones, considerando la granulometría, los límites de consistencia y la compactación mediante Proctor Modificado, incrementa significativamente el valor del Índice CBR de la subrasante del tramo en estudio.

2.4.2. Hipótesis Específicas

HE1: La adición de savia de maguey incrementa el valor del Índice de CBR del suelo en estudio.

HE2: La adición de savia de maguey mejora el índice CBR en suelos arcillosos de baja plasticidad.

HE3: El incremento del contenido de humedad óptimo, generado por la adición de savia de maguey, mejora significativamente el valor el Índice del CBR del suelo.

2.5. Variables

- Variable Independiente: “Cantidad de savia de Maguey”

Definición conceptual: La savia de maguey, también conocida como aguamiel, es el líquido azucarado que se obtiene al raspar la cavidad central del agave (género Agave). Constituye un fluido pegajoso, rico en azúcares, minerales y compuestos bioactivos, que cumple funciones fisiológicas de reserva y transporte en la planta. (Área Académica de Nutrición, 2022).

Definición operacional: Se refiere a la proporción de savia de maguey incorporada al material del suelo en distintos porcentajes (0 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %), con el propósito de evaluar su influencia en el incremento del valor del CBR en condición seca, así como en la reducción del contenido de humedad presente en la subrasante del tramo analizar.

- Variable Independiente: “Granulometría”

Definición conceptual: Hace referencia a la proporción y distribución relativa de las diferentes partículas que constituyen un suelo, tales como gravas, arenas, limos y arcillas, las cuales determinan su estructura y comportamiento mecánico. Permite clasificar los suelos según la proporción relativa de cada fracción y constituye un parámetro fundamental en la

mecánica de suelos, ya que influye en propiedades como la permeabilidad, la compactación y la resistencia al corte. (ASTMD422-63, 2007).

Definición operacional: Se determina mediante ensayos de análisis por tamizado, Se expresa como el porcentaje en peso (%) retenido y que pasa por cada tamiz estándar, así como mediante la curva granulométrica correspondiente.

Los ensayos correspondientes se realizarán en la Universidad Tecnológica de los Andes, registrando el porcentaje de material que pasa por cada tamiz según normativa “Manual de ensayo de materiales “-MTC107, elaborando curvas granulométricas para caracterizar y clasificación de suelo.

•Variable Independiente: “Limite de Consistencia”

Definición conceptual: Se entiende como el rango de valores de humedad mediante el cual es posible identificar los distintos estados de consistencia que puede presentar un suelo fino, ya sea de naturaleza arcillosa o limosa. Estos límites establecen los puntos críticos en los que el material pasa progresivamente de un estado sólido a semisólido, luego a plástico y finalmente a líquido. Los parámetros fundamentales que se determinan son el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (IP), los cuales resultan esenciales para la clasificación geotécnica del suelo y para el análisis de su comportamiento en proyectos de ingeniería civil (ASTM D4318-17, 2017).

Definición operacional: Corresponde a la medición experimental de los valores de humedad que determinan los límites de comportamiento del suelo fino, obtenidos mediante ensayos de laboratorio según el procedimiento establecido en la norma ASTM D4318-17. A partir de estos resultados se identifican el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (IP), los cuales permiten clasificar el tipo de suelo y evaluar su respuesta frente a variaciones de humedad, estableciendo así su idoneidad para fines constructivos.

•Variable Independiente: “Proctor Modificado”

Definición conceptual: Se define como un ensayo de compactación del suelo que permite establecer la relación existente entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima alcanzable bajo una energía de compactación elevada y estandarizada. El objetivo principal de esta prueba es determinar la humedad óptima de compactación y la densidad seca máxima, parámetros fundamentales para asegurar la estabilidad, durabilidad y capacidad estructural de los suelos utilizados en obras de ingeniería civil, tales como cimentaciones, terraplenes y estructuras de pavimento (ASTM D1557-12, 2012).

Definición operacional: Corresponde al procedimiento experimental mediante el cual se determina la densidad seca máxima y la humedad óptima de un suelo, a través del ensayo de compactación Proctor Modificado, realizado según la norma ASTM D1557-12. Este ensayo se ejecuta aplicando una energía de compactación estandarizada, con el fin de evaluar la capacidad del suelo para alcanzar una densidad adecuada bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del material frente a variaciones de humedad y su aptitud para ser empleado en estructuras de pavimento y obras de ingeniería civil.

•Variable Dependiente: “Índice CBR (California Bearing Ratio)”

Definición conceptual: Se define como un parámetro que mide la resistencia y la capacidad de soporte de un suelo, expresado en forma de porcentaje con respecto a la presión necesaria para lograr la penetración de una muestra patrón de material granular. Este índice es de uso frecuente en el diseño y la evaluación de estructuras de pavimento, ya que permite determinar la resistencia de capas como la subrasante, la subbase o la base, bajo condiciones controladas de compactación y contenido de humedad (ASTM D1883-16, 2016).

Definición operacional: Corresponde al valor obtenido experimentalmente mediante el ensayo CBR, ejecutado conforme a los procedimientos establecidos en la norma

ASTM D1883-16. Este ensayo permite determinar el porcentaje de resistencia que presenta un suelo frente a la penetración de un pistón estándar, comparado con un material de referencia granular.

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MEDIDA
CANTIDAD DE SAVIA DE MAGUEY	La savia de maguey, también conocida como aguamiel, es el líquido azucarado que se obtiene al raspar la cavidad central del agave (género Agave). Constituye un fluido pegajoso, rico en azúcares, minerales y compuestos bioactivos, que cumple funciones fisiológicas de reserva y transporte en la planta. (Área Académica de Nutrición, 2022).	Se refiere a la proporción de savia de maguey incorporada al material del suelo en distintos porcentajes (0 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %), con el propósito de evaluar su influencia en el incremento del valor del CBR en condición seca, así como en la reducción del contenido de humedad presente en la subrasante del tramo analizar.	% de savia de maguey con respecto al contenido óptimo de humedad	10 % de savia adicionada 15 % de savia adicionada 20 % de savia adicionada 25 % de savia adicionada	% porcentaje
GRANULOMETRIA	Hace referencia a la proporción y distribución relativa de las diferentes partículas que constituyen un suelo, tales como gravas, arenas, limos y arcillas, las cuales determinan su estructura y comportamiento mecánico. Permite clasificar los suelos según la proporción relativa de cada fracción y constituye un parámetro fundamental en la mecánica de suelos, ya que influye en propiedades como la permeabilidad, la compactación y la resistencia al corte. (ASTMD422-63, 2007).	Se determina mediante ensayos de análisis por tamizado, Se expresa como el porcentaje en peso (%) retenido y que pasa por cada tamiz estándar, así como mediante la curva granulométrica correspondiente. Los ensayos correspondientes se realizarán en la Universidad Tecnológica de los Andes, registrando el porcentaje de material que pasa por cada tamiz según normativa "Manual de ensayo de materiales"-MTC107, elaborando curvas granulométricas para caracterizar y clasificación de suelo.		% de distribución de suelos retenidos	% porcentaje
LIMITES DE CONSISTENCIA	Se entiende como el rango de valores de humedad mediante el cual es posible identificar los distintos estados de consistencia que puede presentar un suelo fino, ya sea de naturaleza arcillosa o limosa. Estos límites establecen los puntos críticos en los que el material pasa progresivamente de un estado sólido a semisólido, luego a plástico y finalmente a líquido. Los parámetros fundamentales que se determinan son el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (IP), los cuales resultan esenciales para la clasificación geotécnica del suelo y para el análisis de su comportamiento en proyectos de ingeniería civil (ASTMD4318-17, 2017).	Corresponde a la medición experimental de los valores de humedad que determinan los límites de comportamiento del suelo fino, obtenidos mediante ensayos de laboratorio según el procedimiento establecido en la norma ASTM D4318-17. A partir de estos resultados se identifican el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (IP), los cuales permiten clasificar el tipo de suelo y evaluar su respuesta frente a variaciones de humedad, estableciendo así su idoneidad para fines constructivos.	Clasificación de suelos según: AASTHO y SUCS	LI LP IP	% porcentaje

PROCTOR MODIFICADO	<p>Se define como un ensayo de compactación del suelo que permite establecer la relación existente entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima alcanzable bajo una energía de compactación elevada y estandarizada. El objetivo principal de esta prueba es determinar la humedad óptima de compactación y la densidad seca máxima, parámetros fundamentales para asegurar la estabilidad, durabilidad y capacidad estructural de los suelos utilizados en obras de ingeniería civil, tales como cimentaciones, terraplenes y estructuras de pavimento (ASTM D1557-12, 2012).</p>	<p>Corresponde al procedimiento experimental mediante el cual se determina la densidad seca máxima y la humedad óptima de un suelo, a través del ensayo de compactación Proctor Modificado, realizado según la norma ASTM D1557-12. Este ensayo se ejecuta aplicando una energía de compactación estandarizada, con el fin de evaluar la capacidad del suelo para alcanzar una densidad adecuada bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del material frente a variaciones de humedad y su aptitud para ser empleado en estructuras de pavimento y obras de ingeniería civil.</p>	Densidad máxima seca	<p>Porcentajes de agua según la muestra correspondiente a la calicata C-01</p> <p>Porcentajes de agua según la muestra correspondiente a la calicata C-02</p> <p>Porcentajes de agua según la muestra correspondiente a la calicata C-03</p> <p>Porcentajes de agua según la muestra correspondiente a la calicata C-04</p> <p>Porcentajes de agua según la muestra correspondiente a la calicata C-05</p>	% porcentaje
INDICE CBR	<p>Se define como un parámetro que mide la resistencia y la capacidad de soporte de un suelo, expresado en forma de porcentaje con respecto a la presión necesaria para lograr la penetración de una muestra patrón de material granular. Este índice es de uso frecuente en el diseño y la evaluación de estructuras de pavimento, ya que permite determinar la resistencia de capas como la subrasante, la subbase o la base, bajo condiciones controladas de compactación y contenido de humedad (ASTM D1883-16, 2016).</p>	<p>Corresponde al valor obtenido experimentalmente mediante el ensayo CBR, ejecutado conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM D1883-16. Este ensayo permite determinar el porcentaje de resistencia que presenta un suelo frente a la penetración de un pistón estándar, comparado con un material de referencia granular.</p>	Proctor modificado	<p>Densidad máxima con 0% de savia</p> <p>Densidad máxima con % de savia óptima</p>	% porcentaje

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel internacional

De acuerdo con (Junco del Pino, 2021) planteó como objetivo principal explorar y analizar la efectividad del uso de sales cuaternarias como aditivo químico para mejorar las características físicas y mecánicas de suelos arcillosos empleados como subrasante en carreteras. La metodología consistió en preparar mezclas de suelo natural con distintas proporciones de sales cuaternarias, para luego someterlas a ensayos de laboratorio que permitieran evaluar cambios en parámetros clave, tales como la resistencia, la cohesión y la permeabilidad del material. Los resultados obtenidos mostraron una evolución favorable en el comportamiento del suelo tratado, destacando un incremento significativo de su resistencia y una notable reducción en su permeabilidad, factores que son determinantes para prolongar la vida útil y el buen desempeño estructural de las carreteras. Como conclusión, el autor resaltó que la estabilización química mediante el empleo de sales cuaternarias constituye una técnica eficaz, sostenible y económicamente viable, especialmente en regiones donde existe escasez de materiales pétreos de buena calidad para la construcción de capas de subrasante. Este estudio aporta evidencia sobre la importancia de buscar alternativas innovadoras y de bajo costo para mejorar las condiciones de las vías rurales, reforzando la necesidad de investigar el uso de aditivos locales o naturales para la estabilización de suelos.

Según (Charles, 2025), el objetivo es evaluar el potencial del *Costus chartaceus* mass ash (CCMA), un residuo agrícola, como material estabilizador de suelos expansivos lateríticos y arcillosos de Nigeria, con el propósito de mejorar sus propiedades geotécnicas y su desempeño como subrasante de pavimento. Para ello, se elaboraron mezclas de suelo con diferentes proporciones de CCMA (2.5%, 5%, 7.5% y 10%) y una proporción fija de

5% de cemento, determinándose propiedades como la densidad seca máxima, el contenido óptimo de humedad, los límites de consistencia, el CBR, la resistencia a la compresión simple y el índice de expansión libre. Los resultados mostraron que la densidad seca máxima tendió a disminuir con mayores porcentajes de CCMA, aunque con un 2.5% se evidenció un leve incremento debido a reacciones puzolánicas beneficiosas. El contenido óptimo de humedad aumentó por la naturaleza hidrofílica del material, mientras que los límites de consistencia mejoraron significativamente: el límite líquido y el índice de plasticidad disminuyeron, y el límite plástico aumentó, lo cual indicó una reducción en la capacidad de absorción de agua del suelo. Asimismo, los valores del CBR y la resistencia a la compresión simple (UCS) se incrementaron de manera notable hasta el 7.5% de CCMA, reflejando un fortalecimiento de los enlaces Inter particulares y una mejora general en la capacidad portante del suelo. Se determinó que la combinación óptima fue de 7.5% de CCMA con 5% de cemento, logrando un equilibrio adecuado entre ganancia puzolánica y efectos de dilución. El estudio concluyó que el uso combinado de CCMA y cemento mejora de forma significativa la resistencia, estabilidad y control de la expansión en suelos problemáticos, demostrando su viabilidad como una alternativa económica y ecológica frente a los estabilizadores tradicionales. Los autores recomiendan continuar con investigaciones que integren el CCMA con otros activadores químicos para maximizar su eficacia en la estabilización de suelos expansivos.

Según, (Elizondo, 2021) el objetivo principal fue evaluar la influencia de dos tipos de cal (de primera y segunda calidad) sobre las propiedades de un suelo de alta plasticidad utilizado como subrasante en Costa Rica, con el fin de determinar su eficacia como material estabilizante conforme a la normativa vigente.

La metodología consistió en la incorporación controlada de ambos tipos de cal en muestras de suelo, para luego realizar ensayos de laboratorio orientados a analizar cambios en características físicas y mecánicas clave, como la plasticidad y la capacidad portante.

Como resultado, se obtuvieron mejoras notables en las propiedades del suelo tratado, evidenciándose que ambos tipos de cal lograron cumplir con las especificaciones técnicas establecidas, especialmente en términos de reducción de plasticidad y aumento de resistencia.

En conclusión, el estudio confirmó que el uso de cal es una alternativa técnica viable y efectiva para la estabilización de suelos de alta plasticidad, contribuyendo significativamente a mejorar el comportamiento estructural de las subrasantes y resaltando su aplicabilidad en proyectos viales en Costa Rica.

Según, (Guevara, 2023) el objetivo principal fue comparar la efectividad de ambos aditivos químicos en el incremento de la capacidad portante de un suelo arcilloso utilizado como subrasante. La metodología consistió en aplicar diferentes dosificaciones de Consolid 444 y Con-Aid a muestras de suelo, para posteriormente someterlas a ensayos de laboratorio que midieran el valor de CBR antes y después de la estabilización. Los resultados evidenciaron un aumento considerable en el CBR: de un valor inicial de 5.49% se incrementó a 28.65% con Consolid 444 y a 24.32% con Con-Aid, demostrando la eficacia de ambos productos en la mejora del suelo. Como conclusión, el estudio verificó que la incorporación de aditivos químicos logra mejorar de forma significativa la capacidad portante, la resistencia y la estabilidad de los suelos arcillosos empleados como subrasante en proyectos viales.

De acuerdo (Suarez, 2023) En la investigación desarrollada con el propósito de optimizar los procedimientos de evaluación de la capacidad portante de los suelos, se planteó como objetivo determinar ecuaciones que permitan estimar el valor del California Bearing

Ratio (CBR) a partir de la correlación con las propiedades índice del suelo y evaluar el nivel de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2). El estudio consideró treinta muestras de suelo procedentes de los distritos de Surco, Comas, Miraflores y Lurigancho- Chosica, en las cuales se analizaron parámetros como el porcentaje de gravas, arenas y finos, los límites líquido y plástico, la densidad seca máxima, el contenido óptimo de humedad y el valor de CBR. Mediante el uso de análisis de regresión lineal simple y múltiple, se observó que el porcentaje de finos, la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad presentaron una correlación aceptable con el CBR, alcanzando un R^2 máximo de 0.5174 en el modelo lineal simple. No obstante, el modelo de regresión lineal múltiple mostró una predicción más precisa, con un R^2 de 0.9707 y un R^2 ajustado de 0.9291, evidenciando un excelente nivel de ajuste. Los resultados permitieron concluir que el uso de modelos de regresión lineal múltiple constituye una herramienta eficaz para predecir el valor del CBR a partir de las propiedades físicas del suelo, reduciendo significativamente el tiempo y el esfuerzo que implica la ejecución del ensayo CBR tradicional. De esta manera, el empleo de correlaciones estadísticas se presenta como una alternativa confiable, práctica y económica para estimar la capacidad portante de los suelos en proyectos de ingeniería vial y geotécnica

3.1.2. A nivel nacional

Según (Salvador & Medaliz, 2022) Con la investigación titulada "Influencia de la savia de agave en las propiedades físico-mecánicas de suelos arcillosos para estabilización de sub rasante, jirón Francisco Huaraz – 2022" tuvo como objetivo analizar el impacto de la savia de agave en el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos empleados como material de subrasante. La metodología utilizada consistió en reemplazar progresivamente el agua por savia de agave durante la preparación de las mezclas de suelo, para luego realizar los ensayos de laboratorio correspondientes, mediante los cuales se determinaron parámetros como el Índice CBR, la densidad seca máxima y la expansión

del material. Los resultados obtenidos mostraron que, al sustituir completamente el agua por savia de agave, el valor del CBR se incrementó hasta un 95 %, la densidad seca máxima alcanzó 2.049 g/cm³ y la expansión del suelo disminuyó de 1.82 % a 1.73 %. En síntesis, el estudio concluyó que la incorporación de savia de agave mejora de forma significativa las características físico-mecánicas del suelo arcilloso, proporcionando una subrasante más estable, resistente y con menor grado de expansión, lo que la posiciona como una alternativa viable y sostenible en aplicaciones geotécnicas

Por otro lado, (Espíritu, 2020) con el proyecto titulado "mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante mediante la aplicación de savia de sábila en la carretera la esperanza malconga, km 5 matamarca" llevó a cabo una investigación orientada a optimizar las condiciones de la subrasante de una vía mediante la utilización de savia de sábila como agente cohesivo natural. La metodología empleada consistió en incorporar la savia de sábila al suelo base y efectuar una serie de ensayos de laboratorio con el propósito de analizar la variación en la capacidad de soporte del material, evaluada a través del Índice CBR. Los resultados evidenciaron que el suelo de referencia, cuyo CBR inicial era de aproximadamente 3%, considerado insuficiente según las especificaciones técnicas, incrementó su valor promedio hasta 10 % tras la aplicación del aditivo vegetal. En conclusión, el estudio confirmó que la adición de savia de sábila mejora de manera significativa las propiedades mecánicas de la subrasante, demostrando su viabilidad en la construcción y conservación de carreteras al favorecer su resistencia y estabilidad estructural

Según, (Abanto & Salinas, 2021) con el proyecto denominado "Análisis de la estabilización de subrasantes con uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal en el Perú" desarrolló un estudio con el fin de analizar los efectos de aplicar ceniza vegetal para estabilizar la subrasante. La metodología consistió en realizar ensayos de laboratorio incorporando diferentes porcentajes de ceniza vegetal (15%, 25% y 35%) al suelo, evaluando

principalmente el incremento de la resistencia a través del ensayo CBR. Como resultado, se determinó que la dosificación óptima correspondía al 35% de ceniza vegetal, logrando valores de CBR de 24.7% y 23.7%, superiores al 20% establecido como referencia, clasificando al material como “muy bueno” para su uso en subrasante. En conclusión, el estudio evidenció que la adición de ceniza vegetal al 35% mejora significativamente la capacidad portante del suelo, cumpliendo con los parámetros exigidos para el diseño y construcción de vías.

Según (Galarza, 2022).en el proyecto titulado “Aplicación de Ceniza Orgánica en la Estabilización de Sub-Rasantes Arcillosas” tuvo como objetivo determinar el efecto de la aplicación de ceniza orgánica en la estabilización de subrasantes arcillosas, a fin de evaluar su influencia como material estabilizante y establecer el porcentaje óptimo para mejorar las propiedades mecánicas del suelo. El estudio se desarrolló bajo el método científico, con un enfoque cualitativo, de tipo aplicado y tecnológico, y de nivel descriptivo–explicativo, utilizando un diseño cuasiexperimental que permitió analizar los cambios en el comportamiento del suelo tras la incorporación de diferentes proporciones de ceniza orgánica. La investigación se aplicó a suelos provenientes de vías del distrito de Lircay, provincia de Angaraes, región Huancavelica, donde se realizaron ensayos de mecánica de suelos conforme a las normas del MTC y ambientales vigentes. Para ello, se efectuó una calicata a cielo abierto con el propósito de extraer, analizar y experimentar con muestras del suelo, incorporando distintos porcentajes de ceniza orgánica como aditivo estabilizador.

Los resultados obtenidos demostraron que la adición de ceniza orgánica genera mejoras significativas en las propiedades geotécnicas de las subrasantes arcillosas, contribuyendo al incremento de la resistencia y la estabilidad del suelo, lo que confirma que su aplicación tiene un efecto positivo y aceptable dentro del proceso de estabilización. Se concluye que el uso de este material representa una alternativa eficiente, económica y

ambientalmente sostenible para la mejora de suelos de baja capacidad portante, favoreciendo su aprovechamiento en proyectos viales y reduciendo el impacto ambiental asociado al uso de estabilizantes tradicionales.

Según (Mamani & De La Cruz Vega, 2023), llevaron a cabo una investigación titulada "Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la carretera Lago Sagrado, Puno" orientada a evaluar la efectividad de la combinación de ceniza de quinua y cal como materiales estabilizantes en suelos arcillosos empleados para la conformación de subrasantes en estructuras viales. La metodología implementada consistió en incorporar diferentes proporciones de ceniza de quinua (5 %, 7% y 9%) junto con una dosificación constante del 5 % de cal, aplicadas directamente sobre el suelo previamente caracterizado. Posteriormente, se analizaron parámetros geotécnicos relevantes, tales como el índice de plasticidad, la densidad seca máxima y la capacidad de soporte CBR, con el propósito de determinar el desempeño del material modificado. Los resultados experimentales mostraron una disminución progresiva del índice de plasticidad, que se redujo de 13,89 % a 9,6 % con la mayor dosificación aplicada. Asimismo, la densidad seca máxima aumentó de 1,833 g/cm³ en el suelo natural a 1,902 g/cm³ tras el tratamiento. En relación con la capacidad de soporte, el CBR alcanzó valores de 32,0 % al 100 % de compactación y 25,6 % al 95 %, demostrando una mejora significativa respecto al material sin estabilizar.

De acuerdo (Harcaya, 2022) en su proyecto denominado "Estabilización de subrasante en suelos arcillosos con la adición de cenizas de cáscara de nuez, Ayacucho – 2022" tuvo como objetivo determinar la influencia de las cenizas de cáscara de nuez en la estabilización de subrasantes arcillosas. Se aplicaron porcentajes de 5%, 10% y 15% en muestras obtenidas de tres calicatas en un tramo de carretera de Acus Vinchos – Ayacucho. Los resultados mostraron que el CBR aumentó de 5% (suelo natural) hasta 8.2% con 15% de ceniza al 95% de compactación, y hasta 10.3% al 100% de compactación, mientras que

el índice de plasticidad disminuyó de 18.4% a 9.7% con 10% de adición. Se concluye que la ceniza de cáscara de nuez mejora la resistencia y reduce la plasticidad del suelo, siendo óptimo el 10% de incorporación, por su eficiencia técnica y económica.

De acuerdo a (Cusihuaman & Quispe, 2020) realizaron el proyecto de tesis denominado "Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la estabilización química con aditivos líquidos compuestos por biopolímeros de la subrasante en la carretera Huila-Huila – Piuray, distrito de Chinchero, provincia de Urubamba, departamento Cusco" una investigación enfocada en analizar el efecto de dos estabilizantes químicos elaborados a base de biopolímeros —denominados Neo Soil Dust y Rocamix Líquido— en el mejoramiento de la subrasante de una vía, con el propósito de comparar su desempeño respecto a un suelo sin tratamiento. La metodología aplicada consistió en la dosificación controlada de ambos aditivos sobre muestras representativas del terreno, seguida de la ejecución de ensayos de laboratorio orientados a determinar parámetros geotécnicos relevantes, tales como la expansión del material, la absorción de humedad, la capacidad de soporte CBR y la resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos demostraron que tanto el Neo Soil Dust como el Rocamix Líquido generaron mejoras notables en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, evidenciadas en la disminución de la expansión y de la absorción de humedad, así como en el incremento significativo de los valores de CBR y de resistencia a la compresión. En síntesis, los hallazgos confirmaron la eficacia de los biopolímeros como estabilizadores del suelo, al incrementar su cohesión, reducir su susceptibilidad al agua y mejorar su capacidad portante.

Según, (Figuerola, 2020) Adición de mucilago de penca de tuna como aditivo natural para estabilizar unidades de adobe convencional, San Jerónimo, Cusco 2022" El objetivo principal de la investigación fue evaluar la influencia del mucílago de penca de tuna como aditivo natural en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, con la finalidad

de optimizar el comportamiento del terreno y reducir los costos en el diseño de zapatas. Para ello, se aplicó una metodología experimental, realizando ensayos de CBR, Proctor Modificado y Límites de Atterberg tanto en el suelo natural como en muestras tratadas con mucílago de penca de tuna en proporciones del 30%, 45% y 70%. Los resultados demostraron que la incorporación del aditivo mejoró significativamente las características geotécnicas del suelo, incrementando su resistencia y capacidad de compactación en comparación con el material sin tratamiento. En consecuencia, se concluye que el uso del mucílago de penca de tuna representa una alternativa técnica, económica y sostenible para la estabilización de suelos destinados a cimentaciones, ya que permite reducir los costos constructivos sin comprometer la calidad del terreno. Asimismo, se recomienda continuar con investigaciones complementarias que respalden su aplicación práctica en obras civiles y su incorporación como un estabilizante natural eficiente dentro del campo de la ingeniería geotécnica.

3.1.3. A nivel regional y local

De acuerdo con (Pizarro & Huallpa, 2020) llevaron a cabo un estudio denominado "Mejoramiento de la capacidad de soporte (CBR) del terreno de fundación con la aplicación de pegamento sintético en base a poliacetato de vinilo en el distrito de San Sebastian-provincia, departamento del Cusco 2018" orientado a evaluar los efectos de la incorporación de un pegamento sintético elaborado a base de poliacetato de vinilo en el mejoramiento de la subrasante de una carretera rural, específicamente en el tramo que une Agua Buena con la comunidad de Huicarpay. La metodología desarrollada consistió en adicionar el pegamento al suelo natural y analizar sus propiedades físico-mecánicas mediante ensayos de laboratorio, con énfasis en la prueba CBR, a fin de observar el comportamiento del material tras su compactación. Los resultados obtenidos evidenciaron que la adición del pegamento sintético favoreció una mejor cohesión entre las partículas del suelo, facilitó el proceso de

compactación y aumentó significativamente la capacidad portante del material, reflejada en el incremento de los valores de CBR en comparación con el suelo sin tratamiento. En síntesis, el empleo del poliacetato de vinilo se presenta como una alternativa viable para la estabilización de subrasantes en vías rurales, contribuyendo al fortalecimiento estructural y la durabilidad del pavimento; sin embargo, el estudio recomienda realizar investigaciones complementarias, especialmente en capas de subbase y en el análisis químico del aditivo, con el propósito de comprender de manera más precisa su interacción con el suelo.

Según (Santos & Sarmiento, 2020) desarrolló un estudio denominado "Incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de suelo arcilloso, propuesto como material de subrasante de la vía Molleray, San Sebastián" orientado a analizar la influencia de distintas proporciones de ceniza de cascarilla de arroz 5%, 10% y 15% en la estabilización de suelos arcillosos, con el propósito de determinar la dosificación óptima que mejore las propiedades del material empleado como subrasante. La metodología empleada consistió en preparar y ensayar muestras de suelo tratadas con las diferentes proporciones de ceniza, evaluando principalmente el Índice CBR para determinar el comportamiento del material frente a cada tratamiento. Los resultados mostraron que la incorporación del 5% de ceniza de cascarilla de arroz generó un incremento considerable en el CBR, mejorando la capacidad portante y la durabilidad potencial del pavimento. No obstante, porcentajes superiores al 5% produjeron efectos adversos sobre las propiedades del suelo. En conclusión, la investigación demostró que la aplicación controlada de ceniza de cascarilla de arroz constituye una alternativa eficaz para la estabilización de subrasantes, siempre que se mantenga una dosificación adecuada que garantice la calidad y desempeño de la materia

Según (Vidal, 2021) en el proyecto denominado "Mejoramiento de las propiedades de la subrasante de un suelo arcilloso adicionando ceniza de cáscara de huevo" tuvo como objetivo evaluar la influencia de la ceniza de cáscara de huevo en la estabilización de suelos

arcillosos, empleando porcentajes de 5%, 10% y 15% con el propósito de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. El estudio buscó sustituir materiales tradicionales por un aditivo alternativo y económico, capaz de optimizar el comportamiento del suelo en obras de construcción. Los resultados mostraron que la adición de ceniza de cáscara de huevo produjo un notable incremento en las propiedades mecánicas del suelo, evidenciando mejoras en su resistencia y estabilidad. Se concluye que este material constituye una alternativa eficiente, sostenible y de bajo costo para el mejoramiento de suelos arcillosos, siendo una opción viable para reemplazar estabilizantes convencionales.

Según (Haro Marchera Luis Miguel, 2021) La investigación titulada “Efecto de la adición de vidrio reciclado en la estabilización de suelo arenoso en el A.H. Villa Hermosa, Nuevo Chimbote” tuvo como objetivo determinar el efecto de la incorporación de vidrio reciclado en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso utilizado como subrasante. El estudio se desarrolló mediante ensayos de laboratorio e inspección in situ, evaluando cuatro calicatas: una muestra patrón y dos muestras experimentales con adición de 6% y 8% de vidrio reciclado. Los resultados mostraron que, al incorporar vidrio reciclado, la máxima densidad seca alcanzó valores entre 1.92 y 1.969 g/cm³, con humedades óptimas entre 10.20% y 11.25%, mientras que los valores de CBR al 95% de compactación se incrementaron en más del 50% respecto al suelo natural. Se concluye que la adición de vidrio reciclado mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso, aumentando su capacidad portante y estabilidad. El porcentaje óptimo de incorporación fue del 6%, ya que proporcionó los mejores resultados de densidad, humedad y resistencia, constituyendo así una alternativa viable, sostenible y económica para la estabilización de subrasantes en proyectos viales.

Según (Huaman & Reaño, 2021) “Efecto del mucilago de cactus san Pedro echipsis pachanoi, en estabilización de suelos: carretera Huilcarpay,2021” El objetivo de la

investigación fue evaluar el efecto estabilizador del mucílago de cactus San Pedro en suelos de la subrasante de la carretera Huilcarpay, determinando cómo influye su adición en diferentes proporciones (0%, 30%, 60% y 90%) sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Los resultados indicaron que la densidad seca máxima disminuyó ligeramente al incorporar el mucílago (de 1.55 g/cm³ en el suelo natural a valores entre 1.45 y 1.54 g/cm³), mientras que los límites de consistencia mostraron mejoras notables, reduciendo el índice de plasticidad de 36.05% a valores entre 27.84% y 30.87%. En cuanto al CBR, se evidenció un incremento progresivo desde 2.18% (suelo natural) hasta 7.89% al 90% de adición, clasificándose como subrasante regular según el MTC. En conclusión, la adición de mucílago de cactus San Pedro mejora las propiedades físicas y mecánicas del suelo, destacando especialmente la reducción de plasticidad y el aumento de la capacidad de soporte, por lo que se considera una alternativa natural y sostenible para la estabilización de suelos en obras viales.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Maguey

El maguey, perteneciente al género *Agave* y conocido en distintas regiones del país como pacpa, cabuya, o penca, es una planta originaria del continente americano. En el Perú, se encuentra distribuida principalmente de manera silvestre en los valles de la sierra, donde prospera gracias a su adaptación a climas áridos y suelos de baja fertilidad, aunque también se cultiva con fines ornamentales en parques y jardines debido a su porte robusto y su follaje de gran atractivo visual. (Agave, s.f.).

A lo largo del territorio nacional, la diversidad de nombres populares atribuidos al maguey refleja su fuerte vínculo con la identidad cultural y las costumbres locales, pues durante siglos ha cumplido un rol importante no solo en el paisaje natural, sino también en actividades cotidianas y productivas. Tradicionalmente, el maguey ha sido utilizado para la

elaboración de cuerdas, tejidos, techos rústicos y cercos, gracias a la resistencia de sus fibras; asimismo, la savia de algunas especies se ha aprovechado en prácticas agrícolas y, más recientemente, se investiga su uso como estabilizante natural de suelos, contribuyendo a la mejora de subrasantes en proyectos de infraestructura vial.

Su aplicación más común se da en la formación de cercos naturales para marcar los límites de propiedades rurales, además de emplearse como planta ornamental debido a su forma y dimensiones características. Sin embargo, el maguey también tiene potencial para ser integrado en sistemas agroforestales, gracias a su capacidad de crecer en suelos de baja fertilidad, pedregosos y arenosos, donde otras especies agrícolas presentan limitaciones productivas. Una característica importante del maguey es su ciclo de vida, muchas especies son monocárpicas, es decir, florecen solo una vez al final de su vida vegetativa, luego producen un tallo floral y tras la floración la planta suele morir.

En cuanto a la morfología, las plantas de maguey presentan hojas suculentas, dispuestas en rosetas, con márgenes espinosos en muchas especies y entre las partes aprovechadas están las pencas (hoja gruesa), el corazón (donde se acumula la savia)

Así mismo la gomosidad del maguey no solo es una característica organoléptica perceptible, sino que está directamente vinculada a la naturaleza polisacarídica. (RURAL, 2011).

COMPOSICIÓN FÍSICO - QUÍMICA DEL MAGUEY

La savia de maguey, contiene principalmente fructanos, que son polisacáridos compuestos por cadenas de fructosas con enlaces $\beta(2 \rightarrow 1)\beta(2 \rightarrow 6)$, además de pequeñas cantidades de proteínas, minerales y compuestos fenólicos. La savia de maguey es altamente hidrofílica y forman soluciones viscosas capaces de retener agua y generar estructuras tipo gel. (Peralta, 2020).

La composición varía por especie, edad de la planta y método de extracción:

- Fructanos: Constituyen una fracción importante de los carbohidratos totales, en plantas maduras los fructanos pueden representar gran parte del contenido de carbohidratos. (Metagenomics)
- Polisacáridos Mucilaginosos: Mezcla de polisacáridos solubles que incluye pectinas y otros heteropolisacáridos responsables de la viscosidad. (SageJournals, 2025)

Tabla 1*Componente de la savia*

Componente	% - rango reportado	Función e importancia
Humedad	84-90%	Medio acuoso de la savia, Transparente de solutos.
Fructosa	12-33%	Azúcar reductor, contribuye a la viscosidad.
Fructanos	20-80%	Polímeros solubles que generan viscosidad.
Mucilago (polisacáridos)	15-20%	Componente viscoso, aporta pegajosidad y capacidad aglutinante.

¿QUÉ COMPONENTE DE LA SAVIA ES CLAVE PARA LA ADHERENCIA?

- La estabilización no es una reacción química (como la formación de cementos con cal), sino un conjunto de procesos físico-químicos basados en adsorción.
- La fracción mucilaginosa, es decir, el *mucílago* formado por fructanos y otros polisacáridos (incluyendo pectinas y heteropolisacáridos), es la responsable principal de la viscosidad y capacidad adhesiva de la savia de maguey. Estos polímeros retienen agua, forman redes viscosas y actúan como aglutinantes físico-químicos cuando se mezclan con partículas del suelo, aumentando cohesión y reducción de lixiviación/erosión. Estudios sobre mucílagos vegetales y trabajos aplicados con mucílagos de agave muestran mejoras en propiedades mecánicas y cohesivas de

materiales terrosos al añadir bajas concentraciones de mucílago de agave.

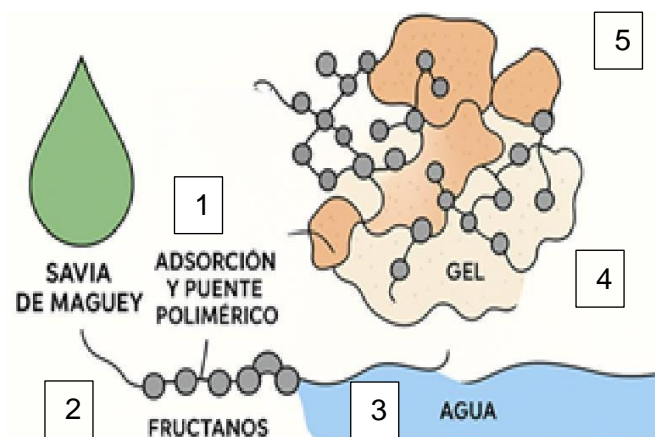
(SageJournals 2. , 2025).

¿COMO INTERACTUAN ESPECIFICAMENTE LOS FRUCTANOS DE LA SAVIA DE MAGUEY EN EL SUELO?

- Estabilización del suelo, actúa como compresión y reducción de agua requerida, lo que indica que el mucilago actúa como aditivo aglutinante natural. (Baca)

Figura 3

Mecanismo Físico -Químico de estabilización del suelo



Nota: La figura evidencia el proceso de interacción físico-química que ocurre entre la savia de maguey y el material del suelo al ser combinados. Seguidamente, se detalla la explicación correspondiente:

- 1) Absorción De Polisacáridos (Fructanos) sobre las partículas del suelo: Los fructanos presentan múltiples grupos hidroxilo (OH), capaces de formar puentes de hidrogeno
- 2) Punteo polimétrico: Al adsorberse parcialmente, las cadenas de polisacáridos quedan segmentados libres formando estructuras.
- 3) Gelificación de fructanos y formación de matriz Viscoelástica: A concentraciones suficientes, los fructanos del maguey forman geles y redes viscoelásticas que ocupan poros entre partículas.

4) Reducción de la doble capa difusa: La presencia de polisacáridos adsorbidos y la disminución del agua libre reduce el espesor, esto provoca menor hinchamiento, mayor agregación y mejor comportamiento.

5) Efectos de secado – humectación: Los fructanos pierden agua, se forma una película sólida que cementa la savia de maguey con las partículas del suelo.

3.2.2. Trocha Carrozable

Las trochas carrozables se consideran vías destinadas al tránsito vehicular que permiten la circulación, pero no satisfacen plenamente los requerimientos geométricos y estructurales establecidos para una carretera convencional. Según el Manual de Carreteras del MTC (2018), este tipo de vía registra un IMDA inferior a 200 vehículos por día y puede contar con una superficie de rodadura afirmada o sin afirmado, dependiendo de las condiciones del terreno y del nivel de mantenimiento efectuado.

Su presencia es fundamental en áreas rurales, ya que representan el principal medio de acceso a servicios básicos como educación, salud, comercio y transporte de productos agrícolas. La intervención y conservación adecuada de estas vías incide de manera directa en el bienestar de las poblaciones, favoreciendo la integración territorial, el crecimiento económico local y una movilidad más eficiente de bienes y personas. Del mismo modo, un correcto tratamiento técnico permite disminuir costos de transporte, reducir tiempos de viaje y optimizar la conexión entre zonas productivas y centros de comercialización urbanos.

La trocha carrozable suele tener un ancho mínimo de calzada de 4.00 m, permitiendo un vehículo. Al no estar pavimentadas, las trochas carrozables sufren mayor degradación por lluvias, escorrentía, erosión y tránsito pesado ocasional.

Las trochas generalmente se apoyan sobre suelos con limitada capacidad de soporte, por lo que es habitual recurrir a procedimientos de estabilización que permitan incrementar su resistencia y prolongar su vida útil. En este contexto, la incorporación de estabilizantes

de origen natural, como la savia de maguey, se presenta como una opción viable desde el punto de vista económico y ambiental

El presente proyecto de investigación adquiere relevancia dentro del campo de la ingeniería geotécnica y vial, ya que tiene como objetivo principal optimizar las características físico-mecánicas de la subrasante perteneciente a la trocha carrozable que conecta las comunidades de Kirkas y Punacancha, ubicadas en el distrito de San Sebastián, provincia del Cusco

El propósito central de esta investigación es incrementar los valores obtenidos en el ensayo CBR, mejorar la densidad seca máxima del suelo y disminuir el contenido de humedad óptima. Estos parámetros resultan esenciales para la resistencia, la durabilidad y el desempeño estructural de un pavimento. Lograr dichas mejoras permitirá aumentar la capacidad portante de la subrasante y fortalecer la estabilidad global de la vía, garantizando un adecuado comportamiento frente al tránsito vehicular y a las condiciones climáticas propias de la región andina

La mejora de las propiedades físico-mecánicas de la subrasante no solo contribuye a incrementar la durabilidad y el desempeño estructural de la vía, sino que también responde a los lineamientos contemplados en el Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC. Dicho documento resalta la necesidad de contar con subrasantes que cumplan con parámetros adecuados para el diseño de pavimentos, tanto flexibles como rígidos, con el propósito de garantizar un sistema vial seguro y eficiente.

En este contexto, la presente investigación pretende proporcionar alternativas prácticas, sostenibles y de bajo costo, orientadas a solucionar problemas comunes en las vías rurales, tales como la deformación plástica, los asentamientos diferenciales y el deterioro prematuro de la calzada. La finalidad de esta propuesta es asegurar un flujo vehicular estable, seguro y sin interrupciones, principalmente en zonas rurales o de difícil conectividad.

Para lograr el análisis integral y el posterior mejoramiento de la subrasante, resulta indispensable caracterizar exhaustivamente las propiedades físico-mecánicas del suelo. Este procedimiento incluye la determinación de parámetros esenciales como la granulometría, los límites de Atterberg, el contenido de humedad natural y el índice de soporte CBR. La identificación y evaluación precisa de estos parámetros proporciona la base científica necesaria para diseñar estrategias de estabilización o refuerzo del terreno, las cuales constituyen el núcleo metodológico del presente proyecto de investigación.

La trocha carrozable presenta un evidente deterioro, caracterizado por la formación de charcos y baches producto de la acumulación de agua de lluvia, lo cual evidencia una deficiente capacidad de drenaje y baja compactación del terreno. La superficie muestra huellas de rodadura marcadas e irregularidades longitudinales, que afectan negativamente el tránsito vehicular, especialmente en épocas de precipitaciones. Estas condiciones reflejan la insuficiente resistencia y baja capacidad de soporte de la subrasante, lo que ocasiona deformaciones plásticas permanentes y limita la funcionalidad de la vía.

Adicionalmente, el suelo de la trocha, compuesto principalmente por material limo-arcilloso, tiende a saturarse rápidamente, generando una disminución del valor del CBR y pérdida de estabilidad estructural. Esta problemática compromete la transitabilidad continua, incrementa los costos de mantenimiento y dificulta la conectividad de las comunidades rurales, afectando así las condiciones de calidad de vida y el desarrollo socioeconómico del sector.

La situación descrita genera malestar y dificultades constantes entre los pobladores de la zona, quienes dependen de esta trocha carrozable como principal medio de conexión para realizar sus actividades cotidianas. Las deficiencias funcionales de la vía no solo repercuten en la comodidad y seguridad del tránsito vehicular, sino que además aumentan los tiempos de desplazamiento y los costos operativos de los vehículos que circulan por el

tramo, afectando de manera directa la economía familiar y local. En consecuencia, esta problemática constituye un reto técnico relevante y urgente desde la perspectiva de la ingeniería geotécnica y del desarrollo vial rural.

Es por eso que, el presente estudio se plantea como una propuesta de investigación aplicada que busca analizar detalladamente el comportamiento del suelo natural y evaluar la influencia del maguey (Agave) como aditivo estabilizante en la mejora de sus propiedades físico-mecánicas, con la finalidad principal es incrementar el valor del CBR, optimizar la densidad máxima seca y reducir el contenido de humedad óptimo, logrando así un suelo de fundación más resistente y estable.

Figura 4

Vista de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha, 2024



Nota: Imagen tomada de la trocha, 2024. Se muestra el estado de la trocha carrozable que conecta Kirkas con Punacancha, ubicado en el Distrito de San Sebastian-Cusco.

Figura 5

Vista Aérea de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha



Nota: Imagen de la plataforma de la Municipalidad Distrital de San Sebastián

3.2.3. Cantidad de savia de maguey

Hace referencia a la proporción controlada de savia extraída del maguey, incorporada como aditivo natural en suelos con la finalidad de mejorar la subrasante de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha. Esta dosificación consiste en la proporción específica de savia añadida al suelo, y se expresa generalmente en porcentaje como son (10%,15%,20% y 25%)

La dosificación es un parámetro clave que permite establecer relaciones cuantitativas entre la cantidad de savia de maguey aplicada y el comportamiento resultante del suelo. Su ajuste se determina mediante ensayos experimentales, considerando variables como el tipo de suelo, el contenido de humedad, la granulometría. Una dosificación adecuada favorece la cohesión interna del suelo, disminuye la plasticidad, mejora la compactación y aumenta su capacidad portante, evaluada comúnmente mediante el Índice CBR.

3.2.4. Granulometría

La distribución de partículas en un suelo hace referencia a la forma en que se reparten los distintos tamaños de los granos (gravas, arenas, limos y arcillas) dentro de una muestra,

y constituye uno de los principales parámetros para evaluar su comportamiento físico y mecánico. Este análisis permite clasificar los suelos, estimar sus propiedades físicas. Este análisis se conoce comúnmente como granulometría.

La granulometría permite clasificar un suelo según el porcentaje de partículas retenidas en una serie de tamices normalizados (ensayo de análisis granulométrico seco), o mediante el método de hidrómetro para partículas más finas. Esta distribución influye directamente en la densidad seca máxima, el contenido óptimo de humedad, la capacidad de compactación, la permeabilidad y la resistencia al corte del suelo. (Palomino Zegarra liz Margot, 2023)

El objetivo de realizar este ensayo es clasificar los suelos según sistemas estandarizados como el SUCS y el AASHTO.

El tamaño y distribución de partículas afectan la densidad relativa, la resistencia al corte, la capacidad portante y la permeabilidad del suelo.

Los suelos con granulometría bien graduada (mezcla equilibrada de tamaños) presentan mayor estabilidad y densidad.

Los suelos uniformes o mal graduados tienden a presentar vacíos grandes, menor densidad y menor resistencia.

3.2.5. Límites de consistencia

Estos parámetros constituyen indicadores esenciales que describen los diferentes estados de plasticidad presentes en los suelos finos, como los arcillosos o limosos, en función de su contenido de humedad. Los valores obtenidos mediante los ensayos de límite líquido y límite plástico permiten analizar y anticipar el comportamiento mecánico del suelo ante los cambios de humedad, además de facilitar su clasificación según los criterios del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema AASHTO (Manual de ensayo, 2016)

El intervalo comprendido entre ambos límites recibe el nombre de IP, el cual constituye un indicador esencial para evaluar la trabajabilidad, la expansividad y la capacidad de soporte del material. Entre sus componentes tenemos:

- LL: se refiere al porcentaje de humedad a partir del cual el suelo cambia de un estado plástico a uno líquido, perdiendo su forma y resistencia al corte.
- LP: corresponde al contenido de humedad en el cual el suelo pasa del estado semisólido al estado plástico, adquiriendo cierta maleabilidad sin llegar a fluir.
- IP: se obtiene como la diferencia entre el $IP = LL - LP$, y representa el rango de humedad en el que el suelo se comporta plásticamente, es decir, conserva su cohesión y puede moldearse sin fracturarse.
- Indicador de compresibilidad y expansividad:
Arcillas con alto IP tienden a tener mayor compresibilidad, expansividad y menor resistencia al corte.
- Relación con el comportamiento mecánico:
Un alto límite líquido indica suelos más compresibles, con menor capacidad portante.
Un bajo límite líquido se asocia a suelos más firmes y estables.

3.2.6. Proctor modificado

Este ensayo determina la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima de un suelo, aplicando una energía de compactación específica mediante un pisón. De acuerdo con la norma ASTM D1557, el procedimiento se ejecuta utilizando un molde cilíndrico y un pisón de 4,54 kg que se deja caer desde una altura de 457 mm. Esta metodología permite simular condiciones de compactación más exigentes y similares a las que se presentan en la construcción de pavimentos, terraplenes y subrasantes expuestas a cargas elevadas (Manual de ensayo, 2016)

Utilizando los porcentajes de agua según la cantidad de muestra de suelo a usar, para poder determinar la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad del suelo.

Los fundamentos de dicho ensayo son:

- Compactación del suelo: consiste en reducir los vacíos de aire mediante aplicación de energía mecánica, aumentando la densidad seca y mejorando las propiedades del suelo.
- Humedad óptima: existe un contenido de agua ideal que lubrica las partículas, facilitando su reacomodo y logrando la densidad máxima seca.
- Exceso de agua: si se sobrepasa la humedad óptima, la densidad disminuye porque el agua ocupa los espacios de aire y actúa como separador de partículas.

3.2.7. Índice de CBR

Se trata de un parámetro utilizado para evaluar la capacidad de soporte de un suelo, siendo de especial importancia en el diseño de pavimentos y plataformas. Este índice se obtiene a través de un ensayo de penetración realizado en laboratorio, donde se compara la resistencia del suelo con la de un material estándar bajo condiciones controladas de humedad y compactación. El resultado se expresa como un porcentaje que representa el esfuerzo necesario para alcanzar una penetración determinada en relación con el material de referencia (Manual de ensayo, 2016)

La importancia de realizar el ensayo es:

- Diseño de pavimentos: El CBR es uno de los parámetros más usados para identificar el espesor de capas en carreteras, trochas carrozables.
- Clasificación de suelos: Permite diferenciar suelos aptos o no aptos como subrasante.
- Control de calidad: Se utiliza en campo para verificar la compactación lograda respecto a los valores de laboratorio.

- Relación con el Proctor: El ensayo CBR se realiza en muestras compactadas a densidad máxima seca y humedad óptima obtenidas en el ensayo Proctor.

Esto asegura que los resultados representen las condiciones más realistas de servicio.

3.3. Definición de términos

3.3.1. Subrasante: La subrasante se entiende como la capa de terreno natural o tratada que actúa como base de apoyo para las estructuras del pavimento, incluyendo la subbase, la base y la capa de rodadura (asfáltica o afirmada). Su propósito principal es recibir y distribuir las cargas generadas por el tránsito y las capas superiores hacia los estratos inferiores del suelo, contribuyendo a la estabilidad y resistencia del conjunto estructural. La durabilidad y el desempeño del pavimento dependen en gran medida de la calidad y capacidad portante de esta capa. (Manual de ensayo, 2016)

3.3.2. Estabilización de Suelos: Supone un conjunto de procedimientos técnicos orientados a mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo, con el objetivo de hacerlo más apto para el uso en obras de ingeniería, especialmente en pavimentos, plataformas y cimentaciones. Este proceso puede realizarse mediante métodos mecánicos, químicos u orgánicos, incorporando materiales estabilizantes como cal, cemento, polímeros o aditivos naturales como la savia de maguey. “El mejoramiento de las características del suelo a través de procesos físicos o químicos, a fin de aumentar su resistencia, durabilidad y capacidad de soporte”. (Manual de ensayo, 2016)

3.3.3. Calicata: Es una excavación que se realiza al terreno, las medidas que se toman para hacer dicha excavación son de: 1.00 x 1.00 x 1.00, esto permite ver el perfil del suelo y tomar muestras inalterables de las diferentes estratigrafías que se puede encontrar. El proceso que se suele seguir es:

- Elegir el lugar adecuado.

- Excavar la profundidad necesaria para realizar el estudio.
- Extraer la muestra.
- Rellenar el pozo abierto.

VENTAJAS DE LOS MÉTODOS ORGÁNICOS:

- **Sostenibilidad:** Al ser materiales renovables y biodegradables, tienen un menor impacto ambiental en comparación con los estabilizantes químicos.
- **Disponibilidad local:** En muchas regiones, los materiales orgánicos están fácilmente disponibles, lo que reduce los costos de transporte y adquisición.
- **Costo económico:** Los materiales orgánicos, al ser subproductos de la agricultura o recursos locales, pueden ser más económicos que los estabilizantes convencionales.

DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS ORGÁNICOS:

- **Durabilidad:** Algunos materiales orgánicos, al ser biodegradables, pueden tener una menor durabilidad que los métodos tradicionales de estabilización.
- **Disponibilidad limitada:** En algunas regiones, la disponibilidad de estos recursos puede ser limitada, lo que restringe su uso a ciertas áreas geográficas.
- **Menor conocimiento técnico:** Aún se necesita más investigación para estandarizar el uso de estos estabilizadores y asegurar su eficacia en diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas.

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo:

El estudio desarrollado corresponde a un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la recopilación, procesamiento y examen de información numérica para determinar el efecto de la savia de maguey en el comportamiento físico y mecánico del suelo. Para ello, se consideran parámetros como el CBR, la densidad seca máxima, el contenido óptimo de humedad y el índice de plasticidad. Según Hernández y Fernández (2014), las investigaciones de este tipo utilizan datos medibles y procedimientos estadísticos con el fin de verificar hipótesis, reconocer tendencias y sustentar teorías.

Nivel:

Este trabajo se clasifica dentro del nivel explicativo, puesto que su propósito es analizar cómo la adición de savia de maguey incide directamente sobre las propiedades geotécnicas del suelo. El estudio se orienta a comprender de qué manera esta intervención modifica indicadores relevantes, tales como el índice CBR, la densidad seca máxima, la humedad óptima y el grado de plasticidad.

Este enfoque busca identificar relaciones de causa y efecto entre la dosificación del aditivo natural (savia) y las propiedades del suelo, con el fin de proponer mejoras en la estabilización de la subrasante. “entender cómo las modificaciones introducidas en el suelo mediante aditivos afectan directamente sus características físicas y mecánicas, permitiendo mejorar su comportamiento estructural en obras viales” (Castañeda,2016)

Diseño: Se tiene un diseño experimental.

Esto se debe a que se manipula deliberadamente las variables independientes, que en este caso son: la cantidad de savia de maguey, granulometría, límites de consistencia, para observar su efecto sobre la variable dependiente, como es el índice CBR.

Este diseño permite aplicar diferentes dosificaciones del aditivo natural al suelo, evaluar el comportamiento de las mezclas mediante ensayos de laboratorio estandarizados, y así establecer relaciones causa-efecto de forma objetiva y controlada.

4.2. Ámbito temporal y espacial

Temporal: Se dio durante el periodo diciembre del 2024 y setiembre del 2025, incluyendo las etapas de recolección de muestras, realización de ensayos en el laboratorio de la Universidad tecnológica de los Andes, procesamiento de datos y análisis de resultados.

Espacial: La investigación fue realizada en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Tecnológica de los Andes, lugar en el que se llevaron a cabo los ensayos requeridos. En complemento, las muestras de suelo se extrajeron de la trocha carrozable que enlaza las comunidades de Kirkas y Punacancha, situada en el distrito de San Sebastián, perteneciente a la provincia y región del Cusco, cuya longitud de 6 kilómetros

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población en una investigación se entiende como el conjunto total de elementos que poseen características comunes y sobre los cuales el investigador pretende desarrollar conclusiones. Este grupo representa el universo completo de estudio y constituye la fuente de donde se puede obtener información para responder al problema planteado. (hernandez & Fernandez, 2014)

Está constituida por todo el tramo desde Kirkas a Punacancha, con un total de 06 kilómetros, ubicado en el Distrito de San Sebastián, Cusco.

4.3.2. Muestra

La muestra se define como una porción representativa de la población, seleccionada con el propósito de obtener información que permita describir o explicar las características del universo estudiado. (Hernandez & Fernandez, 2014)

En el presente proyecto de investigación se realizó 05 calicatas extraídas de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha. Estas muestras fueron preparadas en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes para ser sometidas en los ensayos respectivos, tanto en su estado natural como con diferentes porcentajes de savia de maguey (0%,10%,15%,20% y 25%) en relación al contenido óptimo de humedad.

4.4. Instrumentos

Constituyen los recursos materiales y conceptuales empleados para obtener información relevante y precisa que permita dar respuesta a los objetivos planteados en una investigación.

Para llevar a cabo la recolección de información se utilizaron los siguientes instrumentos:

Equipos:

- ✓ Moldes CBR
- ✓ Balanza electrónica
- ✓ Estufa de secado
- ✓ Tamices normados
- ✓ Límites de Atterberg
- ✓ Compactador Proctor

Herramientas:

- ✓ Flexómetro y Herramientas manuales

Softwares:

- ✓ Programa Microsoft Excel.
- ✓ Programa Microsoft Word.

Normativas vigentes aplicables en la investigación:

- ✓ M.T.C.-DG-2018.
- ✓ NTP 339.127.2001-Ensayo de CBR.
- ✓ NTP 339.128-Metodos para determinar la densidad y el contenido de humedad.
- ✓ NTP 334.144-Metodo para la determinación de límites de Atterberg.
- ✓ NTP339.129-Analisis granulométrico

4.4.1. Validez y confiabilidad de instrumentos

Alude a la facultad que posee el instrumento para realizar mediciones de manera adecuada y precisa la variable que se desea evaluar, garantizando que los datos obtenidos reflejen fielmente la realidad del fenómeno estudiado (Narvaez, 2025)

La cual se establecerá mediante la evaluación por juicio de expertos, quienes verificarán la pertinencia y coherencia de los procedimientos e instrumentos empleados.

Por otro lado, la confiabilidad implica que las mediciones realizadas con el instrumento mantengan estabilidad y consistencia en el tiempo, incluso cuando son aplicadas por diferentes personas, produciendo resultados similares en condiciones equivalentes (Ñaupas, 2020), la cual se garantizará a través de la verificación de los certificados de precisión y calibración de los equipos utilizados para la toma de datos, los cuales serán revisados y validados por especialistas.

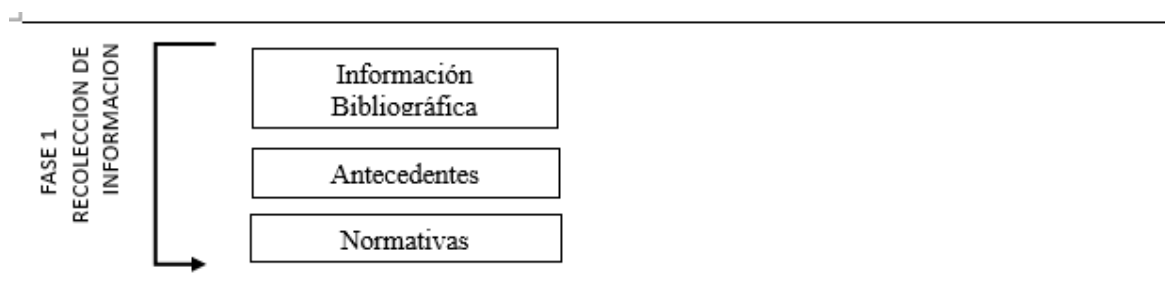
4.5. Procedimientos

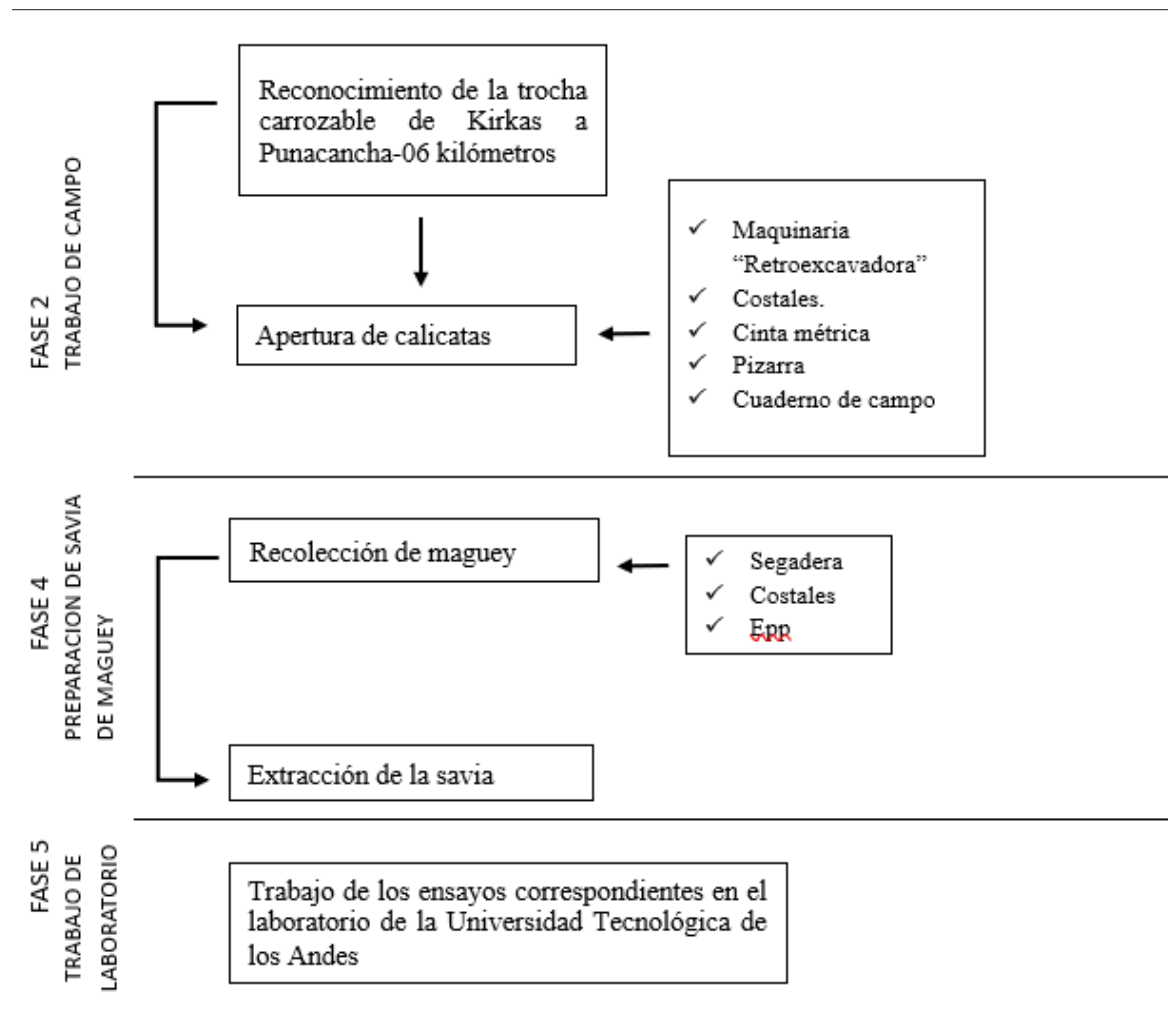
Para realizar el mejoramiento de la subrasante de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha adicionando savia de maguey, se realizó de la siguiente manera con el fin de cumplir con los objetivos planteados:

- ✓ Recolección de información: Se recopiló información, bibliográfica, normativas antecedentes científicos.
- ✓ Trabajo de Campo: Se realizó la apertura de 05 calicatas a lo largo de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha, dicha trocha tiene una distancia de 06 km.
- ✓ Preparación de la savia de maguey: Se recolectó el maguey maduro con ayuda de la segadera y se procedió a retirar la savia con ayuda de un mortero y almacenar en condiciones óptimas, posterior se prepararon diferentes porciones (10%,15%,20% y25%).
- ✓ Caracterización del suelo: Las propiedades físicas y mecánicas del material fueron establecidas a partir de los ensayos específicos desarrollados en el laboratorio de Mecánica de Suelos perteneciente a la Universidad Tecnológica de los Andes, donde se ejecutó el proceso de análisis correspondiente.
- ✓ Ensayo del índice de CBR en el laboratorio: Se realizó el ensayo de soporte CBR para cada calicata en estudio, y se añadió el porcentaje de adición, y fueron comparados con el suelo.
- ✓ Análisis de los resultados: Los datos fueron procesados en hojas Excel, y se determinó la porción óptima de savia para mejorar el índice CBR.

Tabla 2

Fases de elaboración del proyecto





Nota: fases de la investigación elaborado en Word, 2024

4.5.1. Obtención de muestras para estudio de suelos

La obtención de muestras se realizó de manera mecánica que permitió la observación directa del perfil del suelo, con el fin de identificar los estratos, y realizar la extracción de las muestras inalteradas, la excavación se realizó con ayuda de la retroexcavadora manteniendo el ancho mínimo de 1.00 x 1.00 con una profundidad de 1.50m.

Dicha obtención de muestras se realizó en el tramo de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha, ubicada en el Distrito de San Sebastián, provincia de Cusco con una longitud de 6km. La selección de las muestras se realizó considerando las zonas representativas de la trocha.

Figura 6

Vista área de la trocha Carrozable de Kirkas a Punacancha



Nota: En la imagen se muestra el recorrido de la trocha carrozable en estudio.

En la imagen se muestra la vista satelital del trazo de la trocha carrozable de Kirkas a Punacancha, donde se señala el punto de inicio de la trocha, mientras que el punto final se ubica en el sector de Huanacaure.

Tabla 3

Ubicación de las dentro de la trocha carrozable en estudio.

NOMBRE DE LA CALICATA	COORDENADAS GEOGRAFICAS UTM	
	ESTE	NORTE
Calicata N°01	185728.00 m	8495819.00 m
Calicata N°02	185937.00 m	8495396.00 m
Calicata N°03	186050.00 m	8494980.00 m
Calicata N°04	185504.00 m	8494853.00 m
Calicata N°05	184912.00 m	8494926.00 m

Nota: En la tabla se presentan las coordenadas y localización de las calicatas aperturadas para realizar el estudio correspondiente.

La cantidad de calicatas a ejecutar depende del tipo de carretera. En el caso de una trocha carrozable con un IMDA ≤ 200 veh/día y una sola calzada, el Manual de Carreteras del MTC establece que debe realizarse un ensayo CBR cada 3 km.

No obstante, dado que este es un estudio de investigación, se decidió abrir cinco calicatas para investigar las características físicas del suelo en su estado natural. Esto permitió observar la estratigrafía, el tipo de material, el color y la presencia de materia orgánica, elementos fundamentales para el análisis geotécnico.

Después de abrir las calicatas, se recolectaron las muestras del suelo en sacos limpios y debidamente rotulados según el punto de muestreo. Posteriormente, estas fueron trasladadas al laboratorio para realizar los ensayos correspondientes, conforme a lo establecido en el Manual de Carreteras del MTC que exige la ejecución de pruebas en laboratorio con equipos calibrados.

Una vez obtenida la muestra, se procedió a rellenar la calicata para evitar accidentes.

También incorpora la definición de turba, entendida como un tipo de suelo constituido en gran proporción por restos vegetales en diferentes grados de descomposición, con tonalidad oscura y una textura blanda o esponjosa

Figura 7

Apertura de calicatas y obtención de muestras de suelo.





Nota: En la imagen se muestra la apertura de las calicatas de la trocha de estudio.

• CALICATA N°01

La profundidad de la calicata N°01 alcanzo una profundidad de 1.50 m excavada de manera mecánica con ayuda de una retroexcavadora, bajo condiciones climáticas favorables, durante la excavación se identificaron los siguientes estratos:

Estrato 1° de 0.00 – 0.30: Suelo color marrón, textura del suelo es suelta, se puede observar la presencia de raíces y materia orgánica, esto corresponde al horizonte superficial.

Estrato 2° de 0.30 – 0.90: Suelo de color marro rojizo, se observa menor cantidad de presencia de materia orgánica, la estructura es más consistente.

Estrato 3° 0.90 –1.50: Suelo de color marrón oscuro, la textura de este estrato es más denso.

Entre el estrato 2° y 3° está conformado por arcilla, de acuerdo a la clasificación unificada de suelos SUCS, corresponde a un suelo arcilloso de baja plasticidad.

No se encontró nivel freático.

Figura 8

Ubicación de la Calicata N°01



Nota: En la imagen se muestra la ubicación de la Calicata N°01, y las medidas de: 1.00 x 1.00 x 1.50

- CALICATA N°02

La profundidad de la calicata N°02 alcanzó una profundidad de 1.50 m excavada de manera mecánica con ayuda de una retroexcavadora, bajo condiciones climáticas favorables, durante la excavación se identificaron los siguientes estratos:

Estrato 1° de 0.00 – 0.30: Suelo color marrón con presencia negra turba, textura del suelo es suelta, se puede observar la presencia de raíces y materia orgánica, esto corresponde al horizonte superficial.

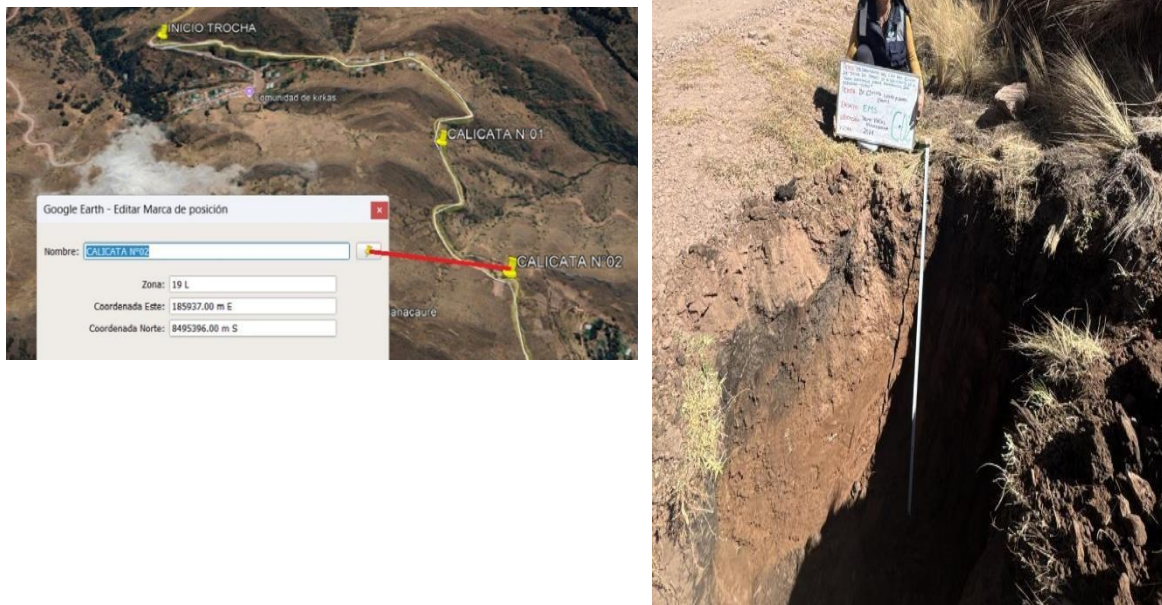
Estrato 2° de 0.30 – 0.90: Suelo de color marrón, se observa menor cantidad de presencia de materia orgánica, la estructura es más consistente, se observa una textura tipo arcillosa.

Estrato 3° 0.90 – 1.50: Suelo de color marrón oscuro con presencia negra turba, la textura de este estrato es más suelta.

No se encontró nivel freático.

Figura 9

Ubicación de la Calicata N°02



Nota: En la imagen se muestra la ubicación de la Calicata N°02, y las medidas de: 1.00 x 1.00 x 1.50m

• CALICATA N°03

La profundidad de la calicata N°03 alcanzo una profundidad de 1.50 m excavada de manera mecánica con ayuda de una retroexcavadora, bajo condiciones climáticas favorables, durante la excavación se identificaron los siguientes estratos:

Estrato 1° de 0.00 – 0.30: Suelo color negro plomo, textura del suelo es suelta, se puede observar la presencia de raíces y materia orgánica, esto corresponde al horizonte superficial.

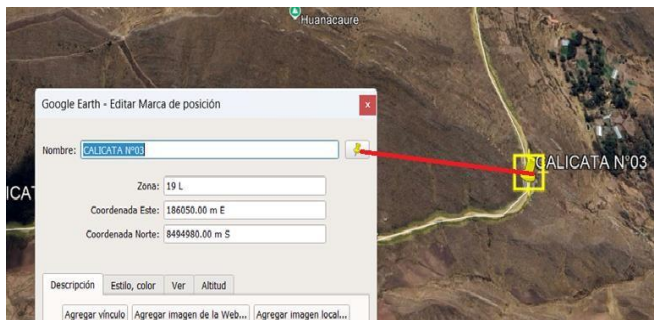
Estrato 2° de 0.30 – 0.90: Suelo de color plomo, se observa menor cantidad de presencia de materia orgánica, la estructura es más consistente, se observa una textura tipo arcillosa.

Estrato 3° 0.90 –1.50: Suelo de color negro oscuro con presencia negra turba, la textura de este estrato es más suelta, se observa la presencia de raíces.

No se encontró nivel freático.

Figura 10

Ubicación de la Calicata N°03



Nota: En la imagen se muestra la ubicación de la Calicata N°03, y las medidas de: 1.00 x 1.00 x 1.50m.

• CALICATA N°04

La profundidad de la calicata N°04 alcanzo una profundidad de 1.50 m excavada de manera mecánica con ayuda de una retroexcavadora, bajo condiciones climáticas favorables con el cielo despejado, durante la excavación se identificaron los siguientes estratos:

Estrato 1° de 0.00 – 0.30: Suelo color marrón, textura del suelo es suelta, esto corresponde al horizonte superficial.

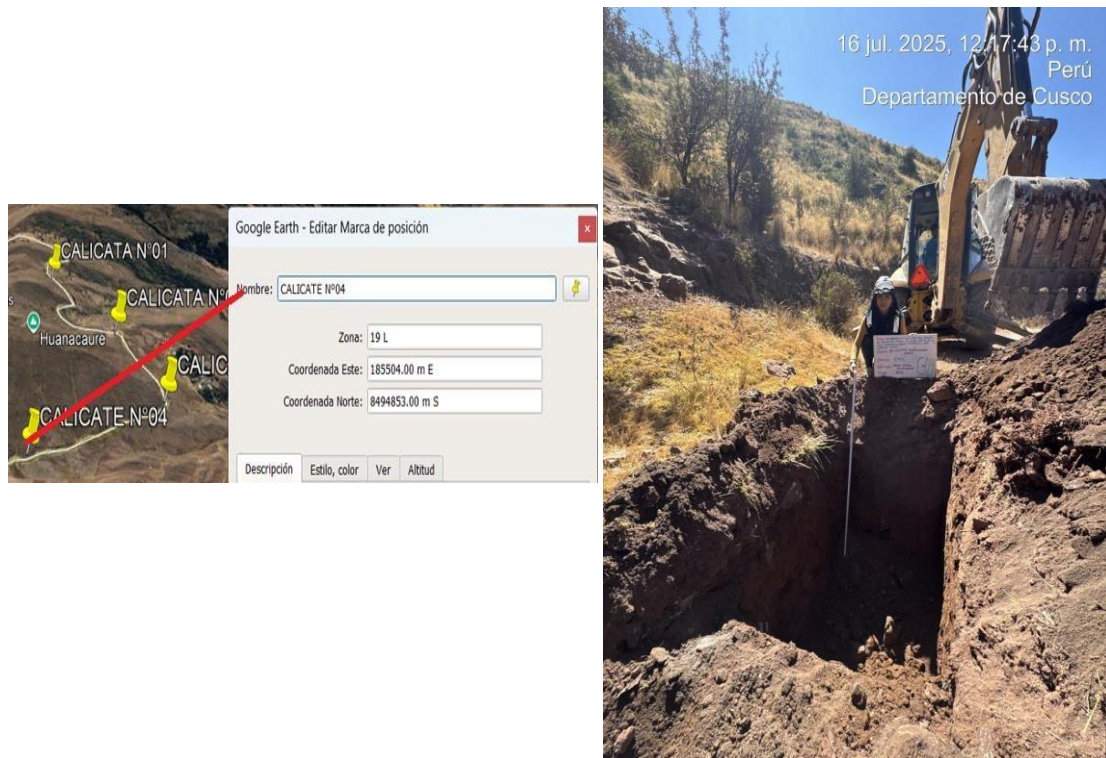
Estrato 2° de 0.30 – 0.90: Suelo color marrón, la estructura es más consistente, se observa una textura tipo arcillosa.

Estrato 3° 0.90 – 1.50: Suelo de color marrón oscuro, la textura del suelo es más suelta

No se encontró nivel freático.

Figura 11

Ubicación de la Calicata N°04



Nota: En la imagen se muestra la ubicación de la Calicata N°04, y las medidas de: 1.00 x 1.00 x 1.50m

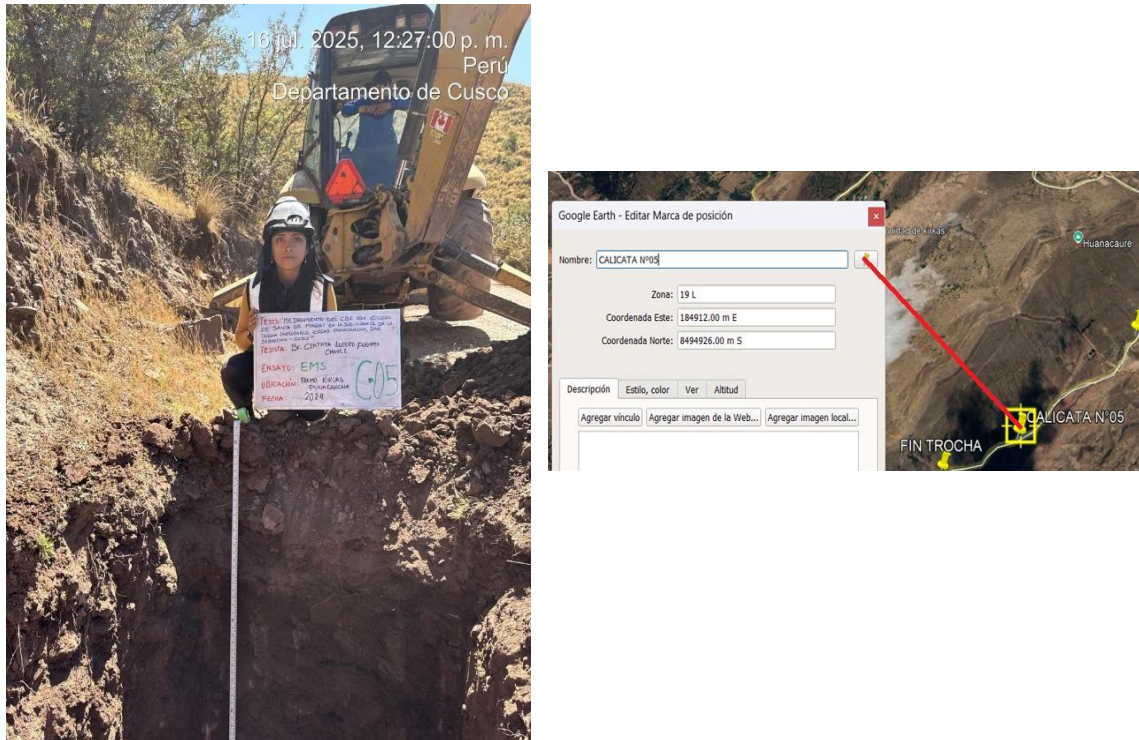
• CALICATA N°05

La profundidad de la calicata N°05 alcanzó una profundidad de 1.50 m excavada de manera mecánica con ayuda de una retroexcavadora, bajo condiciones climáticas favorables con el cielo despejado, durante la excavación se identificaron los siguientes estratos:

Estrato 1° de 0.00 – 0.30: Suelo color marrón, textura del suelo es suelta, esto corresponde al horizonte superficial.

Estrato 2° de 0.30 – 0.90: Suelo color marrón, la estructura es más consistente, se observa una textura tipo arcillosa.

Estrato 3° 0.90 – 1.50: Suelo de color marrón oscuro, la textura del suelo es más suelta
No se encontró nivel freático.

Figura 12*Ubicación de la Calicata N°05*

Nota: En la imagen se muestra la ubicación de la Calicata N°05, y las medidas de: 1.00 x 1.00 x 1.50m

4.5.2. Ensayo de contenido de humedad

Representa la relación entre el peso del agua presente en una muestra de suelo y su peso seco, expresada en porcentaje.

Una vez recolectadas las muestras, se trasladaron al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Tecnológica de los Andes- UTEA para la ejecución del ensayo correspondiente.

El método aplicado consistió en ubicar una muestra representativa del material en un recipiente previamente tarado y registrar su masa inicial con humedad. Luego, dicha muestra fue sometida a secado en horno a una temperatura constante de 110 °C durante al menos 24 horas, con el propósito de evaporar totalmente el agua presente. Finalizado este proceso, se efectuó nuevamente el pesaje del suelo ya seco

La variación obtenida entre la masa húmeda y la masa seca permitió cuantificar el volumen de agua presente en el material, lo que posibilitó calcular su porcentaje de humedad siguiendo los métodos establecidos en las normas técnicas aplicables

Figura 13

Ensayo de contenido de humedad



Nota: La imagen muestra el proceso del ensayo realizando en el laboratorio de la Institución.

4.5.3. Ensayo granulométrico

Identificar cual es la distribución que tienen las distintas medidas de las partículas que se encuentran en el suelo, por lo que en este estudio se realizó siguiendo el Manual de Ensayo de Materiales del MTC, Norma MTC E-107, en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes.

Seleccionar una muestra representativa pesar el material seco, se procede a homogeneizar la muestra mediante el cuarteo, posterior realizar el lavado de la muestra en

el tamiz N°200, llevar al horno a una temperatura de 100°C por 24 horas, posterior pasar por los tamices (3", 2", 1 ½ ", 1", ¾ ", 3/8", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100 y N°200) con la bandeja inferior, para realizar el cálculo del porcentaje retenido en cada tamiz.

Agitar la muestra mecánicamente durante 10 min, pesar el material retenido en cada tamiz, calcular el porcentaje retenido.

Figura 14

Análisis Granulométrico



Nota: La imagen muestra el procedimiento del ensayo realizado en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes.

4.5.4. Ensayo de límites de consistencia

Este procedimiento constituye un elemento fundamental dentro de los métodos de clasificación empleados en la ingeniería geotécnica, debido a que permite identificar el comportamiento de las fracciones finas del suelo y establecer requisitos para los materiales destinados a obras de construcción. Los parámetros obtenidos —como el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad— son ampliamente aplicados, ya sea de forma individual o en combinación con otras propiedades del terreno, para generar relaciones con su desempeño ingenieril, considerando características como su compresibilidad, permeabilidad, capacidad de compactación, potencial de contracción–expansión y resistencia al corte. (Manual de Ensayo de Materiales – MTC E 111).

4.5.5. Limite líquido

Es el contenido de humedad, expresado como porcentaje del peso seco del suelo, en el cual este pasa del estado plástico al estado líquido, perdiendo su resistencia al corte y comportándose como una suspensión viscosa. Se determina siguiendo el procedimiento de la ASTM D4318 o la NTP 339.129, que consiste en colocar una muestra de suelo en la copa de Casagrande y contar el número de golpes necesarios para cerrar una ranura estándar en una longitud determinada.

Figura 15

Ensayo de Limite Liquido



Ensayo de Limite Liquido



Nota: La imagen muestra el procedimiento del ensayo realizado en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes.

4.5.6. Limite plástico

En cuanto a la humedad que contiene la muestra, se expresará en % de peso en seco, lo cual se encuentra semisólido casi como el plástico, de lo cual se determina conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM D4318 o la norma peruana NTP 339.129, que consiste en amasar el suelo y formar cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro hasta que estos comienzan a desmoronarse. Este valor es clave para la clasificación de suelos y para el cálculo del Índice de Plasticidad, indicador de la capacidad de deformación del material sin agrietarse.

Figura 16

Ensayo de Limite Plástico



Ensayo de Limite Plástico



Nota: La imagen muestra el procedimiento del ensayo realizado en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes.

4.5.7. Índice de plasticidad

Representa la diferencia porcentual entre el límite líquido y el límite plástico de un material, y define el rango de humedad en el cual el suelo presenta propiedades plásticas.

Este indicador se obtiene aplicando la siguiente expresión

$$IP = LL - LP$$

Donde LL es el límite líquido y LP el límite plástico. Este parámetro, determinado conforme a la ASTM D4318 o la NTP 339.129, permite evaluar la cohesión y la compresibilidad de los suelos finos, siendo un criterio fundamental en la clasificación de suelos y en el análisis de su comportamiento en proyectos de ingeniería geotécnica.

Permite clasificar los suelos finos (arcilla y limos) dentro de los sistemas SUCS y AASHTO.

Tabla 4

Cuadro de Índices de Plasticidad

IP (%)	CLASIFICACION DEL SUELO	COMPORTAMIENTO
IP = 0 %	No plástico	Arenas y limos sin cohesión
IP = 1-5 %	Baja plasticidad	Limos arenosos o suelos con poca arcilla
IP = 5-15 %	Plasticidad baja a media	Arcillas de baja compresibilidad

IP = 15-30 %	Plasticidad media	Arcillas comunes, trabajables pero compresibles
IP > 30 %	Alta plasticidad	Arcillas expansivas, fuerte contracción, poco aptas como subrasante

Nota: Edición propia, en el cuadro se muestra el resumen del Índice de Plasticidad y su clasificación.

Tabla 5

Cuadro de Clasificación de suelos

CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

Nota: En el cuadro se muestra la clasificación de suelos según AASHTO y SUCS

Se tiene el siguiente resultado de los ensayos realizados en el laboratorio:

Tabla 6

Cuadro de resumen según su clasificación

CALICATA	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	IP %
Calicata N°01	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (3)	10.7
Calicata N°02	CL- arcilla de baja plasticidad	A-4 (2)	9.85
Calicata N°03	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (5)	15.18
Calicata N°04	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (3)	11.25
Calicata N°05	CL- arcilla de baja plasticidad	A -6 (4)	14.19

Nota: En el cuadro se muestra los resultados obtenidos posterior a los ensayos del laboratorio según su clasificación.

4.5.8. Proctor modificado

Es un ensayo de laboratorio que tiene como finalidad determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de un suelo. Para su ejecución, se utiliza un molde cilíndrico en el que el material se compacta en capas mediante la aplicación de una energía de impacto controlada, empleando un pisón estandarizado. A partir de este procedimiento se obtiene la humedad óptima y la densidad seca máxima, parámetros esenciales para el diseño y control de los procesos de compactación de suelos utilizados en obras de infraestructura vial. (ASTM D1557 & 339.141, 2018)

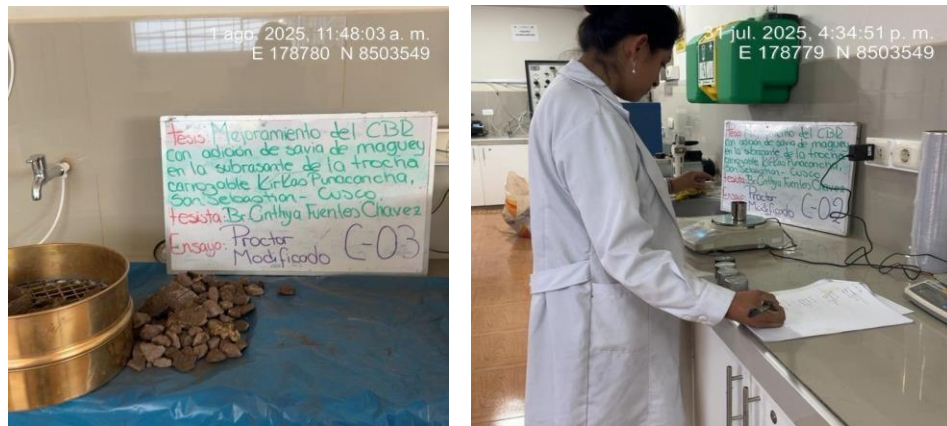
El ensayo se ejecutó empleando el “Método C” indicado por la normativa, aplicable en casos donde más del 20% del material, en masa, queda retenido en el tamiz de 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") y menos del 30% se retiene en el tamiz de 19,0 mm ($\frac{3}{4}$ "), lo que asegura que la muestra evaluada refleje adecuadamente la distribución real del tamaño de partículas.

Figura 17

Ensayo Proctor Modificado



Ensayo Proctor Modificado



Nota: La imagen muestra el procedimiento del ensayo realizado en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes.

4.5.9. Ensayo CBR

El objetivo del ensayo es cuantificar la capacidad portante o resistencia de un suelo, expresándola como un porcentaje que compara la presión requerida para penetrar la muestra con la necesaria para un material patrón. Este parámetro, denominado Índice CBR, es ampliamente utilizado en el diseño, verificación y análisis de pavimentos, ya que facilita la estimación del desempeño estructural de la subrasante o de las capas granulares sometidas a cargas controladas

En el marco del presente estudio, los resultados obtenidos posibilitaron analizar el incremento del valor del CBR al incorporar diferentes porcentajes de savia de maguey al suelo natural, así como su interrelación con otras propiedades físico-mecánicas, entre ellas la granulometría, los límites de consistencia y la densidad máxima seca.

Después de clasificar los materiales de acuerdo con los sistemas AASHTO y SUCS, es necesario elaborar el perfil estratigráfico correspondiente a cada sector homogéneo de la vía. A partir de esta representación del subsuelo, se establece el plan de ensayos de laboratorio con el propósito de determinar el valor del CBR, parámetro que refleja la capacidad de soporte del terreno bajo una densidad equivalente al 95% de la MDS y con una penetración estándar de 2,54 mm (Manual de Carreteras – Suelos, 2014).

Tabla 7*Categoría de Subrasante*

CATEGORÍA DE SUBRASANTE	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Insuficiente	De CBR ≥ 3 % a CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6 % a CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10 % a CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy buena	De CBR ≥ 20 % a CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	De CBR ≥ 30 %

Nota: En el cuadro se observa las categorías de subrasante según MTC

Figura 18*Ensayo del CBR*

Nota: En las imágenes se muestran la realización del ensayo del CBR

4.6. Análisis de datos

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, como límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, análisis granulométrico, CBR y demás propiedades geotécnicas, fueron sistematizados y representados mediante tablas y gráficos, utilizando hojas de cálculo en Excel con el propósito de facilitar su análisis e interpretación. El procesamiento de la información se realizó mediante métodos estadísticos descriptivos, calculando promedios, desviaciones estándar y rangos, a fin de identificar tendencias y variaciones significativas en los resultados. Los datos recolectados se organizaron en matrices y hojas de cálculo, permitiendo el procesamiento y sistematización de los resultados de las distintas proporciones de savia de maguey añadidas al suelo tales como son. (10%,15%, 20% y 25%).

Tabla 8

Clasificación de los suelos según SUCS y AASHTO

CALICATA	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	IP %	CBR al 95%
Calicata N°01	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (3)	10.7	6.17 %
Calicata N°02	CL- arcilla de baja plasticidad	A-4 (2)	9.85	4.61 %
Calicata N°03	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (5)	15.18	3.19 %
Calicata N°04	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (3)	11.25	5.23 %
Calicata N°05	CL- arcilla de baja plasticidad	A -6 (4)	14.19	4.22 %

Nota: En la imagen se muestra el resultado de la clasificación de los suelos

- Partiendo de lo obtenido, se observa que los suelos de las cinco calicatas presentan una clasificación SUCS uniforme, lo cual indica que predominan materiales arcillosos con cierta fracción limosa y con un índice de plasticidad bajo a medio.
- En cuanto al sistema AASHTO, se aprecia una variación entre los grupos A-4 y A-6, siendo mayoritariamente A-6. Los suelos clasificados como A-6 corresponden a

arcillas y limos arcillosos con comportamiento regular a malo como subrasante, debido a su sensibilidad a la humedad y baja capacidad portante.

- Según la clasificación de categoría de la subrasante se tiene que las calicatas que se vienen realizando el estudio se encuentran en S₁: “Subrasantes insuficientes”, ya que el valor del CBR se encuentra entre: $CBR \geq 3 \%$ a $CBR < 6\%$, esto quiere decir que se requiere mejoramiento mediante estabilización mecánica o química, de modo que cumpla con los parámetros mínimos exigidos.

Tabla 9

Resultado del ensayo de Proctor modificado para cada calicata

N° DE CALICATA	DENSIDAD MAXIMA	HUMEDAD OPTIMA
CALICATA N°01	2.071gr/cm ³	12.49%
CALICATA N°02	1.999gr/cm ³	13.74%
CALICATA N°03	1.78gr/cm ³	17.80%
CALICATA N°04	2.088gr/cm ³	11.81%
CALICATA N°05	1.88gr/cm ³	14.14%

Nota: En la tabla se muestra los resultados de la densidad máxima y contenido óptimo de humedad de las diferentes calicatas en estudio.

Tabla 10

Resultado del ensayo del CBR a diferentes porcentajes de savia de maguey

CALICATA N°01	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	95 %	100%
SAVIA 0 %	2.071 g/cm ³	12.6 %	6.17	8.50
SAVIA 10%	2.085 g/cm ³	12.6 %	6.47	8.80
SAVIA 15 %	2.086 g/cm ³	12.9 %	6.57	9.20
SAVIA 20 %	2.102 g/cm ³	13.1%	7.06	9.60

SAVIA 25 %	2.028 g/cm ³	14.2 %	6.40	8.10
<hr/>				
CALICATA N°02	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	95%	100%
SAVIA 0 %	1.983 g/cm ³	13.1 %	4.61	7.30
SAVIA 10%	1.986 g/cm ³	13.3 %	4.83	8.10
SAVIA 15 %	1.998 g/cm ³	13.7 %	4.95	9.40
SAVIA 20 %	2.013 g/cm ³	13.9%	5.16	9.90
SAVIA 25 %	2.0158 g/cm ³	13.9 %	4.92	9.40
<hr/>				
CALICATA N°03	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	95%	100%
SAVIA 0 %	1.794 g/cm ³	17.8 %	3.19	6.60
SAVIA 10%	1.786 g/cm ³	17.9 %	3.22	7.00
SAVIA 15 %	1.801 g/cm ³	18.00 %	3.24	7.10
SAVIA 20 %	1.810 g/cm ³	18.1%	3.67	7.30
SAVIA 25 %	1.821 g/cm ³	19.00 %	3.61	7.10
<hr/>				
CALICATA N°04	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	95%	100%
SAVIA 0 %	2.074 g/cm ³	10.5 %	5.23	8.30
SAVIA 10%	2.083 g/cm ³	10.8 %	5.58	8.50
SAVIA 15 %	2.086 g/cm ³	11.0 %	5.83	8.60
SAVIA 20 %	2.087 g/cm ³	11.1%	5.95	9.20
SAVIA 25 %	2.059 g/cm ³	11.2 %	4.86	7.50

Resultado del ensayo del CBR a diferentes porcentajes de savia de maguey

CALICATA N°05	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	95%	100%
SAVIA 0 %	2.074 g/cm ³	10.5 %	4.22	7.50
SAVIA 10%	1.893 g/cm ³	14.3 %	4.38	7.50
SAVIA 15 %	1.879 g/cm ³	14.4 %	4.57	7.70
SAVIA 20 %	1.892 g/cm ³	14.7%	4.96	8.10
SAVIA 25 %	1.839 g/cm ³	14.8 %	4	7.40

Nota: En la tabla se presentan los resultados del ensayo CBR correspondiente a los distintos porcentajes de savia añadida, obtenidos para cada una de las calicatas evaluadas en el estudio.

EXTRACCION DE LA SAVIA DE MAGUEY

Para realizar la extracción y recolección de savia del maguey es un procedimiento que requiere cuidado y precisión para obtener un producto de calidad sin dañar la planta.

En primer lugar, se seleccionan las plantas maduras, cuando el maguey ha alcanzado su pleno desarrollo fisiológico y presenta una alta concentración de compuestos mucilaginosos. La elección se basa en el tamaño, sanidad y contenido de humedad del tallo.

Posteriormente, se realiza una incisión en la base o en el tallo central del maguey, retirando parcialmente las hojas externas para exponer la parte central. Con la ayuda de un instrumento cortante, como un machete o cuchillo, se efectúa un corte en forma de “V” o canal, por donde comienza a fluir la savia viscosa. En algunos casos, se realiza una ligera presión manual o con herramientas artesanales para favorecer el goteo.

La extracción de la savia de maguey se deposita en envases plásticos previamente limpios por un lapso aproximado de 12 a 24 horas. Durante este proceso, se procura evitar su exposición a la luz solar directa, puesto que el calor puede modificar su composición química y disminuir sus propiedades adhesivas.

Una vez obtenida la cantidad deseada, la savia se filtra y almacena en envases herméticos, conservándola en un ambiente fresco y seco para prevenir la fermentación. En algunos estudios experimentales, la savia se utiliza de manera inmediata para la preparación de mezclas o aditivos en ensayos de laboratorio, como los relacionados con estabilización de suelos, debido a su capacidad ligante y su contenido de polisacáridos naturales.

Finalmente, el área de extracción se cubre con hojas secas o material vegetal para permitir la regeneración parcial de la planta y reducir la pérdida de humedad. Este procedimiento busca mantener el equilibrio ecológico y asegurar la sostenibilidad del uso del maguey como recurso natural.

Figura 19

Procedimiento de extracción de la Savia



Procedimiento de extracción de la Savia



Nota: En las imágenes se puede apreciar el proceso de extracción de la savia de maguey.

4.7. Consideraciones éticas

Para este estudio fue importante respetar una serie de lineamiento éticos, lo cuales rigen la mayoría de actividades científicas, asegurando el cumplimiento de normas técnicas, ambientales y sociales establecidas por las autoridades competentes.

Se respetaron los derechos de propiedad de las fuentes de información, citando adecuadamente a los autores y normas utilizadas, conforme a las pautas del estilo APA.

Durante la obtención de muestras de suelo y el trabajo de campo en el tramo de la trocha carrozable Kirkas a Punacancha, se solicitó la autorización correspondiente a las autoridades locales y propietarios de los terrenos intervenidos, garantizando en todo momento el respeto a la propiedad privada y al entorno natural.

Asimismo, se aseguraron las siguientes condiciones éticas:

- No se causó daño al medio ambiente ni se generaron alteraciones irreversibles en el terreno de muestreo.

- El uso de savia de maguey en la experimentación fue debidamente evaluado, cuidando no afectar el equilibrio ecológico ni la sostenibilidad de la especie vegetal.

V. Resultados y discusión

5.1. Ubicación política y geográfica

5.1.1. Ubicación política

Se desarrolló en la siguiente ubicación:

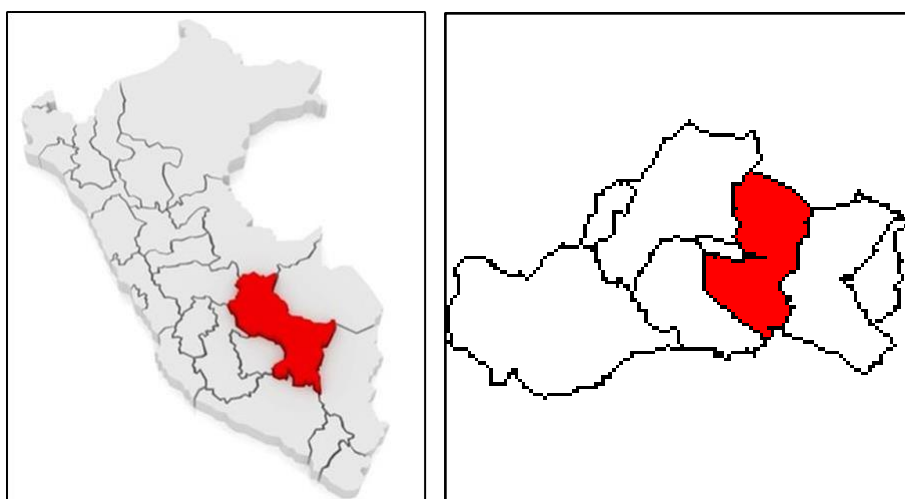
Departamento : Cusco

Provincia : Cusco

Distrito : San Sebastián

Figura 20

Ubicación del mapa político y Distrito de San Sebastián

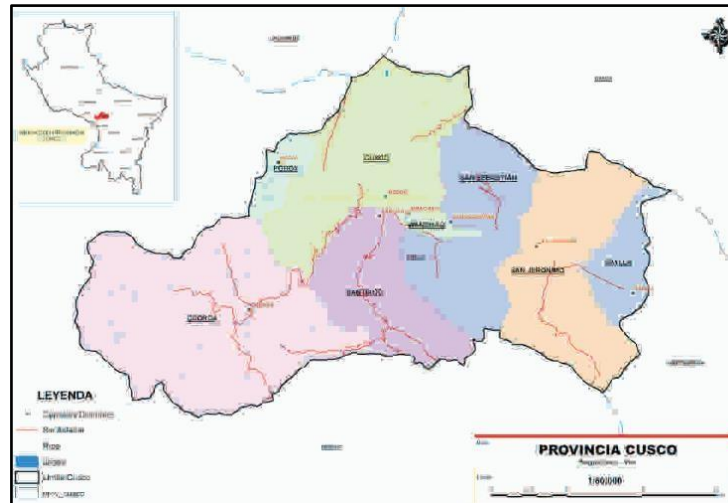
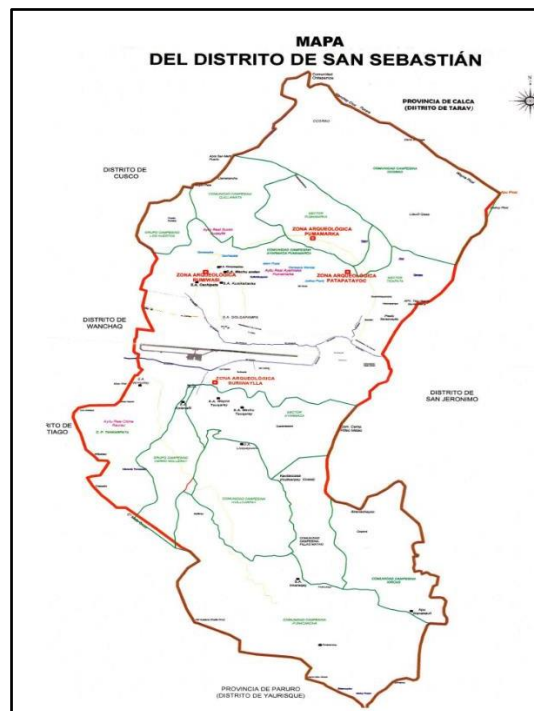


Nota: página web, generador de imágenes- 2024

5.1.2. Ubicación geográfica

El distrito de San Sebastián, se ubica en la provincia del Cusco, Departamento del Cusco, se caracteriza por un acelerado proceso de urbanización en los últimos años.

- Altitud: 3,250 m.s.n.m.

Figura 21*Mapa de la provincia de Cusco**Nota: Página web de la provincia de Cusco***Figura 22***Mapa distrital de San Sebastián**Nota: página web municipalidad distrital de San Sebastian, 2024*

5.1.3. Descripción de la zona de estudio y ubicación

La trocha que conecta las comunidades de Kirkas y Punacancha, ubicada en la parte alta del Distrito de San Sebastián, provincia de Cusco, cumple una función fundamental en la accesibilidad rural y en la integración de comunidades altoandinas.

Esta vía presenta un trazo de tipo rural, no afirmado con presencia de pendientes pronunciadas, secciones angostas.

La trocha es vital para el transporte de productos agropecuarios, movilización de los pobladores y acceso a los servicios básicos, por lo que su mejoramiento representa una necesidad prioritaria para el desarrollo socioeconómico.

Figura 23

Ubicación de la trocha de Kirkas a Punacancha



Nota: Imagen de la página web de la municipalidad distrital de San Sebastian

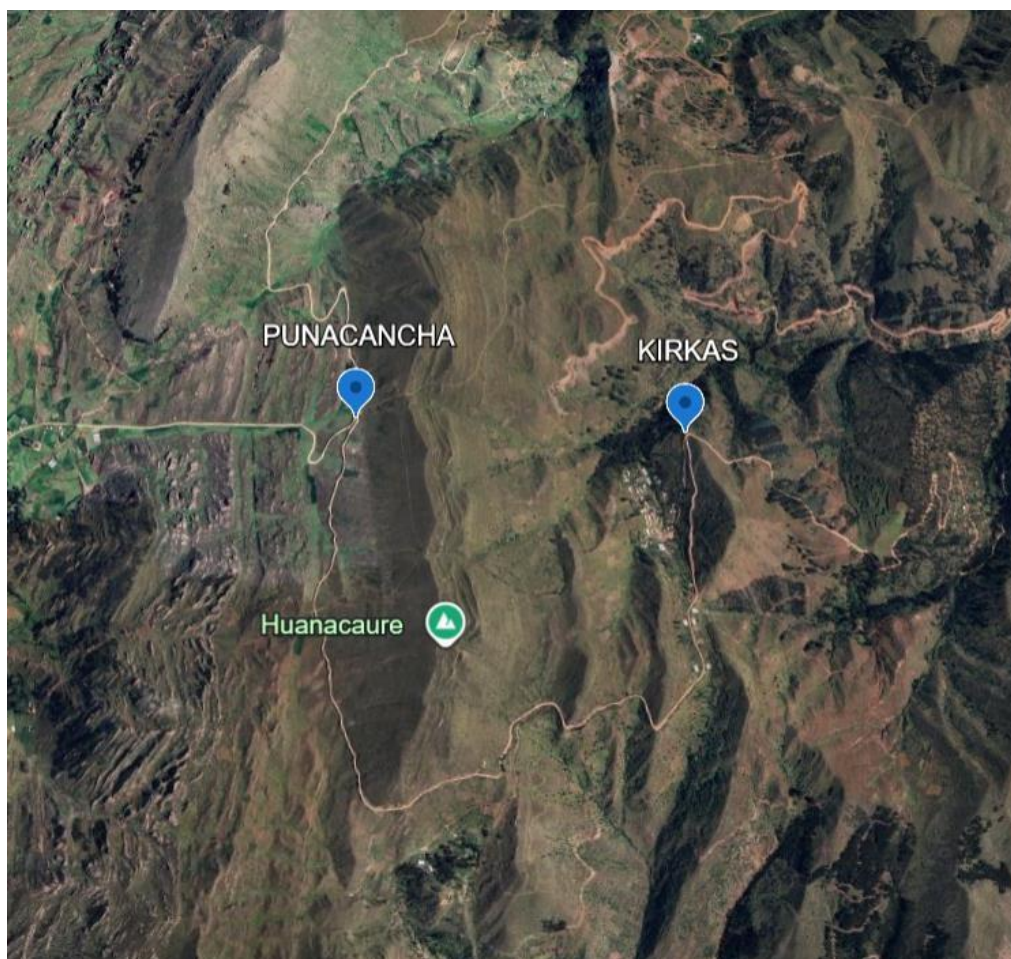
5.1.4. Referencia Histórica

Aunque no se cuenta con una amplia referencia histórica sobre el uso de la savia de maguey en el mejoramiento de trochas, en los últimos años se han desarrollado investigaciones a nivel experimental que evalúan las propiedades estabilizantes de este recurso natural. (Rivera y Sanches, 2020)

El maguey (*Agave americana*) ha sido tradicionalmente utilizado en la construcción rural por sus propiedades adhesivas y aglutinantes, especialmente en zonas altoandinas. Diversos estudios recientes han evidenciado que la incorporación de savia de maguey a suelos arcillosos mejora parámetros como la plasticidad, la cohesión y, en algunos casos, el índice CBR, lo cual sugiere su potencial como estabilizante orgánico alternativo, ecológico y de bajo costo en caminos rurales no pavimentadas. (Pérez Lopez,2018)

Figura 24

Trocha carrozable de Kirkas a Punacancha



Nota: Imagen de Google Earth

5.2. Resultados

OE1: Analizar la influencia de la cantidad de savia de maguey en el valor del Índice CBR

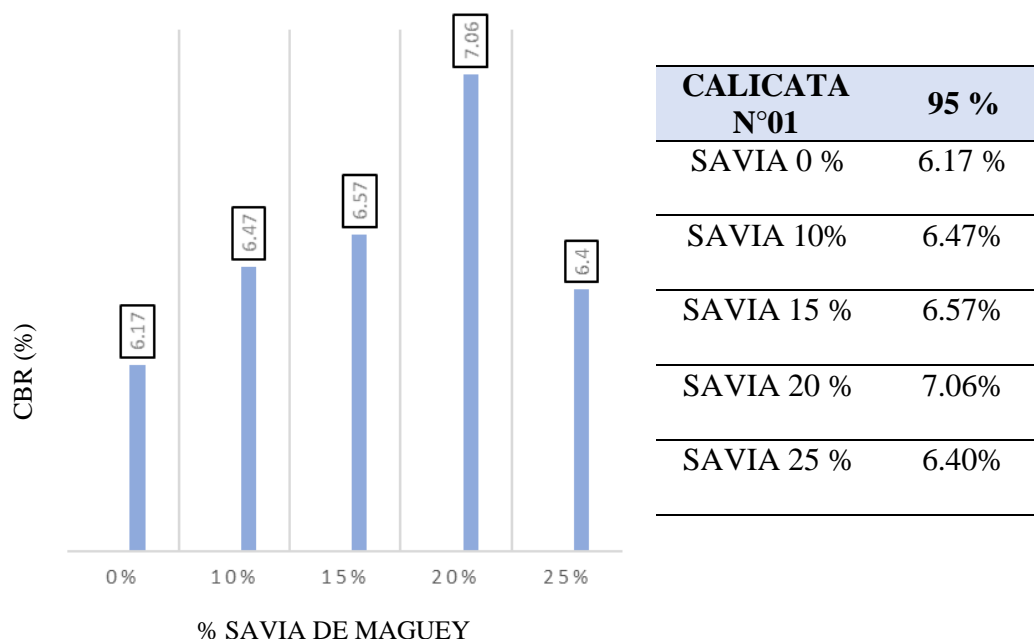
En cumplimiento del objetivo de analizar la influencia de la cantidad de savia de maguey en el valor del Índice CBR, se llevaron a cabo cinco calicatas distribuidas en la trocha carrozable. Para cada calicata se realizaron los ensayos de laboratorio correspondientes, mediante los cuales el suelo fue preparado con diferentes proporciones de savia de maguey: 0%, 10%, 15%, 20% y 25%. La ejecución de los ensayos siguió estrictamente los procedimientos establecidos en la norma ASTM D1883.

Durante el proceso experimental se registraron sistemáticamente los valores de CBR resultantes para cada porcentaje de adición de savia de maguey, con el fin de desarrollar un análisis estadístico y comparativo que evidencie la forma en que este aditivo natural modifica la capacidad portante del suelo. A partir de esta información se elaboró un cuadro comparativo que contrasta el comportamiento del suelo en condición natural (0% de savia) con el presentado por las muestras estabilizadas con los porcentajes de adición propuestos.

Este procedimiento analítico permite examinar de manera detallada la relación entre la cantidad de savia aplicada y el nivel de mejora alcanzado en el CBR. A través de esta evaluación, se busca no solo identificar tendencias de incremento o disminución en la resistencia del suelo, sino también determinar el porcentaje óptimo que genere una mejora significativa y técnicamente justificable. De esta forma, los resultados obtenidos aportan fundamentos sólidos para valorar la viabilidad del uso de la savia de maguey como una alternativa sostenible y eficiente para la estabilización de suelos, contribuyendo a la optimización de los procesos constructivos y a la reducción del uso de estabilizantes químicos convencionales.

Figura 25

Relación del porcentaje de savia de maguey al 95 % correspondiente a la Calicata N01



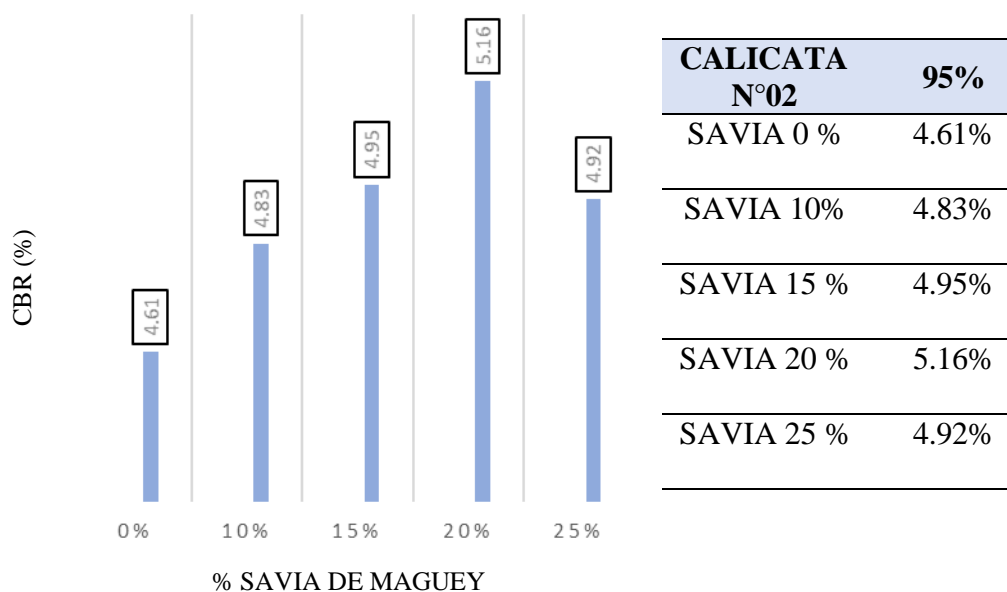
Del análisis de los valores obtenidos se aprecia una tendencia creciente en el Índice CBR conforme aumenta la proporción de savia de maguey incorporada al suelo. Este comportamiento positivo se mantiene hasta el 20% de adición, punto en el cual se registra el valor máximo de CBR, equivalente a 7.06%. Este resultado evidencia una mejora significativa de aproximadamente 14.4% respecto al CBR del suelo en estado natural, lo que confirma que, hasta ese nivel de dosificación, la savia de maguey actúa favorablemente en la capacidad portante del material.

No obstante, al incrementar la proporción de savia al 25%, se observa una disminución del CBR hasta 6.40%, reflejando una pérdida. Esta reducción sugiere que el exceso de aditivo genera un efecto contraproducente, asociado principalmente a la saturación del suelo y al aumento del contenido de humedad, factores que afectan directamente la resistencia a la penetración. En consecuencia, este comportamiento indica que dosis

superiores al 20% no contribuyen a mejorar la capacidad portante y, por el contrario, pueden debilitar la estructura del material tratado.

Figura 26

Relación del porcentaje de savia de maguey al 95% correspondiente a la Calicata N°02

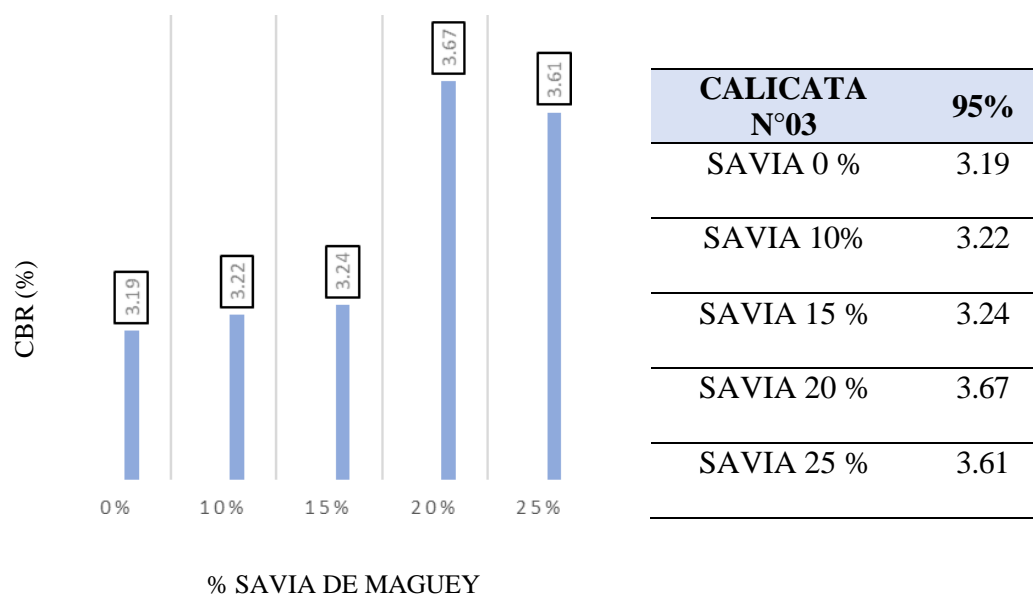


El Índice CBR presenta un incremento progresivo conforme se incrementa la proporción de savia de maguey en la mezcla, alcanzando su valor máximo con la dosificación del 20%. En este punto, el CBR registra un valor de 5.16%, lo que representa una mejora aproximada del 11.9% en comparación con el comportamiento del suelo sin adición de savia.

No obstante, cuando la dosificación se incrementa al 25%, se observa una ligera disminución del CBR, reduciéndose a 4.92%. Una dosificación superior al 20% puede producir saturación parcial del suelo, alterando su densificación y reduciendo su resistencia a la penetración. Por lo tanto, estos resultados señalan que el 20% constituye el límite óptimo de adición antes de que la savia de maguey comience a generar efectos contraproducentes en la respuesta mecánica del suelo.

Figura 27

Relación del porcentaje de savia de maguey al 95 % correspondiente a la Calicata N°03

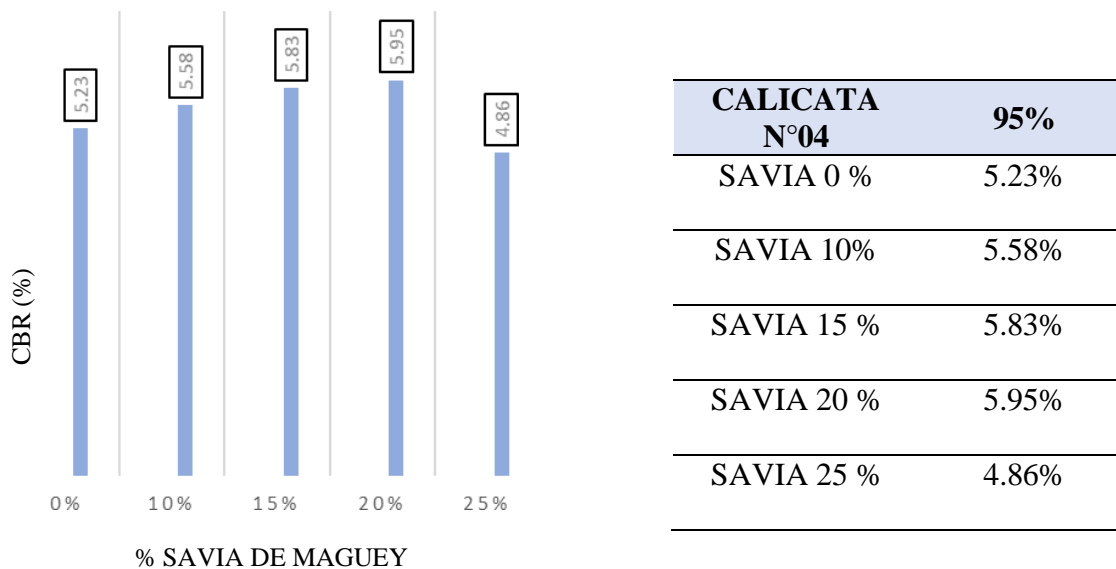


El comportamiento del suelo tratado evidencia una tendencia ascendente en el Índice CBR a medida que se incrementa la proporción de savia de maguey incorporada en la mezcla. Esta mejora progresiva se mantiene hasta alcanzar una dosificación del 20%, punto en el cual se obtiene el valor máximo registrado, equivalente a 3.67%. Este resultado representa un incremento aproximado del 15% en relación con el CBR del suelo natural, lo que demuestra que, hasta dicho nivel, la savia de maguey contribuye de manera efectiva al fortalecimiento de la capacidad portante del material.

Sin embargo, al superar la dosificación del 20%, se observa una leve disminución en el valor del CBR, reduciéndose a 3.61% cuando se aplica una proporción mayor de savia. Esta ligera reducción sugiere que un exceso de aditivo ocasiona un incremento del contenido de humedad dentro del suelo, lo cual influye negativamente en su resistencia a la penetración. Este comportamiento indica que la adición de savia por encima del 20% genera efectos contraproducentes en el proceso de estabilización, debido a que el suelo tiende a saturarse, afectando su compactación y su desempeño mecánico.

Figura 28

Relación del porcentaje de savia de maguey al 95 % correspondiente a la Calicata N°04

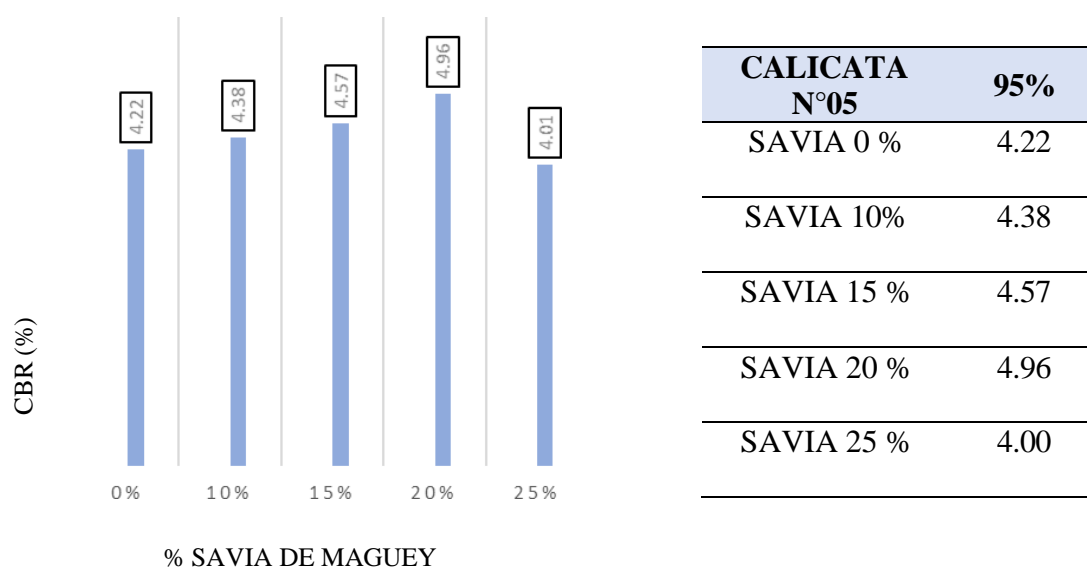


El análisis de los valores obtenidos muestra una tendencia favorable en el Índice CBR conforme se incrementa la proporción de savia de maguey incorporada al suelo. La mejora es más notable cuando la dosificación alcanza el 20%, nivel en el cual se registra el valor máximo de 5.95%. Este resultado representa un incremento aproximado del 13.7% respecto al comportamiento del suelo en su condición natural, evidenciando que la savia de maguey contribuye de manera efectiva al fortalecimiento de la capacidad portante. Este efecto positivo puede asociarse a las propiedades inherentes del maguey, particularmente su capacidad de generar mayor cohesión y adherencia entre las partículas del suelo, lo que favorece su resistencia a la penetración.

No obstante, cuando la dosificación supera el 20% y se incrementa al 25%, se observa una disminución en el valor del CBR. Esta reducción indica que una mayor cantidad de savia no necesariamente se traduce en una mejora adicional; por el contrario, generar un exceso de humedad y un estado de saturación en el suelo.

Figura 29

Relación de savia de maguey al 95% correspondiente a la Calicata N°5



Se observa que hay un incremento del CBR conforme aumenta la cantidad de savia de maguey, hasta alcanzar el valor máximo de 4.96% con el 20% de adición de savia de maguey, lo que representa un aumento del 17.5% respecto al suelo natural.

Este comportamiento evidencia que la savia de maguey actúa como estabilizante natural, mejorando la cohesión del suelo al favorecer la unión entre partículas.

Sin embargo, al aumentar la dosificación al 25% el valor del CBR disminuye al 4% esto indica que la proporción excesiva de savia aumenta el contenido de humedad.

Se tiene el siguiente cuadro donde evidencian que la adición de savia de maguey incrementa los valores del CBR en todas las calicatas que se está estudiando. Esta mejora se atribuye a las propiedades del maguey, tales como son: adhesivas y ligantes naturales, que actúan reduciendo la plasticidad y aumentando la cohesión ente las partículas del suelo.

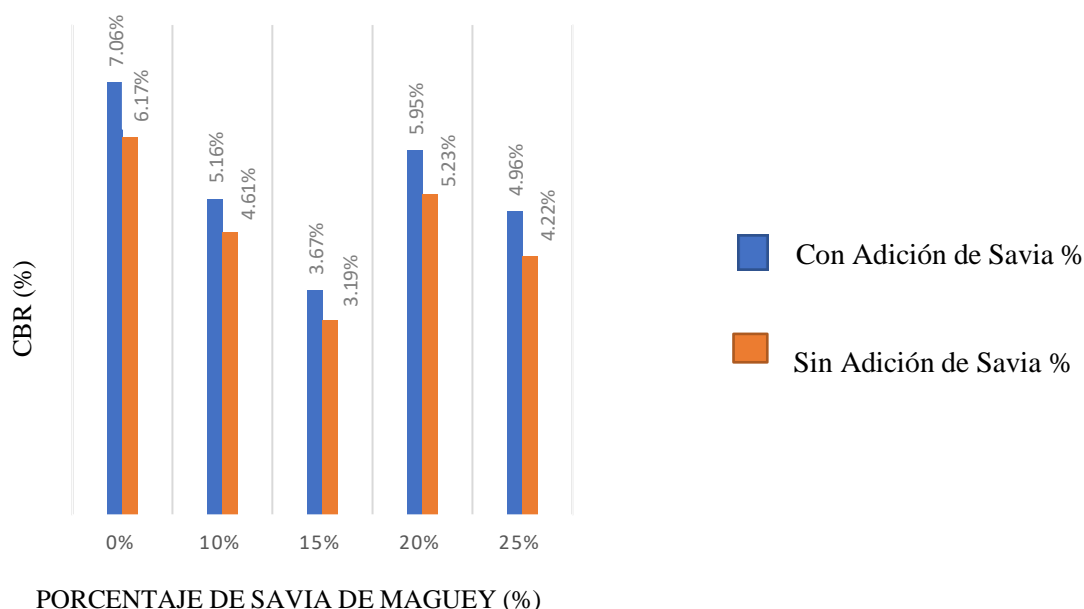
Los resultados del CBR demostraron una incorporación del 20% de savia de maguey en los suelos de las calicatas analizadas generando una mejora significativa.

Este comportamiento se atribuye a las propiedades ligantes y viscosas de la savia de maguey los cuales favorecen la cohesión entre las partículas. En consecuencia, los suelos tratados mostraron un mejor desempeño pasando de la categoría de “Subrasante Insuficiente” (S_1) a Subrasante Regular (S_2) e incluso a Subrasante buena (S_3) conforme a la clasificación del Manual de Carreteras.

Tabla 11

Cuadro resumen de las calicatas en estudio.

CALICATAS	CBR AL 95 % (SIN ADICION)	CBR AL 95 % (CON EL 20% DE ADICION DE SAVIA)	INCREMENTO
CALICATA N°01	6.17 %	7.06 %	14.42%
CALICATA N°02	4.61 %	5.16 %	11.93%
CALICATA N°03	3.19 %	3.67 %	15.05%
CALICATA N°04	5.23 %	5.95 %	13.77%
CALICATA N°05	4.22 %	4.96 %	17.54%



OE2: Determinar mediante la clasificación de suelos que tipo de suelo reacciona de manera favorable al incremento del valor del CBR con la adición de savia de maguey.

El análisis granulométrico se realizó de acuerdo con la norma MTC E-107, lo que permitió clasificar el tipo de suelo y construir su curva de distribución de tamaños de partículas. Posteriormente, dicha información se relacionó con los valores de CBR obtenidos para cada dosificación de savia de maguey, con el fin de reconocer tendencias o comportamientos vinculados a la textura y composición del material

Tabla 12

Clasificación de suelos y tipo de suelo

CALICATA	CLASIFICACION SUCS	CLASIFICACION ASSTHO	CBR SIN ADICION	CBR CON ADICION
CALICATA N°01	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (2)	6.17%	7.06%
CALICATA N°02	CL- arcilla de baja plasticidad	A-4(3)	4.61%	5.16%
CALICATA N°03	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6(5)	3.19%	3.67%
CALICATA N°04	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (3)	5.23%	5.95%
CALICATA N°05	CL- arcilla de baja plasticidad	A-6 (4)	4.22%	4.96%

Nota: En la tabla se presenta la clasificación de los suelos correspondientes a cada una de las calicatas analizadas, indicando el tipo de material identificado y su respectiva comparación con los valores de CBR obtenidos

Al comparar los resultados del índice California Bearing Ratio (CBR) obtenidos en estado natural con aquellos registrados tras la incorporación de savia de maguey, se evidenció un incremento global en la capacidad de soporte de los suelos analizados.

Las cinco calicatas estudiadas corresponden a materiales clasificados como CL de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Los resultados muestran que, tras la incorporación de la savia de maguey, los valores de CBR aumentaron en todos los casos, aunque con diferente magnitud. La Calicata N°01, clasificada como A-6 (2), presentó el incremento más significativo, pasando de 6.17% a 7.06%, lo que representa una mejora de 14.42%. Este resultado evidencia que el suelo de esta calicata reaccionó de manera más favorable a la adición del estabilizante natural, mostrando un mayor grado de cohesión y resistencia bajo carga.

En las demás calicatas, los incrementos fueron menores, pero igualmente positivos. La Calicata N°02 (A-4(3)) aumentó de 4.61% a 5.16% (11.93% de incremento), la Calicata N°03 (A-6(5)) pasó de 3.19% a 3.67% (15.05%), la Calicata N°04 (A-6(3)) de 5.23% a 5.95% (13.77%), y la Calicata N°05 (A-6(4)) de 4.22% a 4.96% (17.54%). Si bien las mejoras en estos casos fueron más moderadas, se confirma que la savia de maguey produce un efecto estabilizador en los suelos arcillosos al incrementar su resistencia al esfuerzo y disminuir su deformabilidad.

En términos generales, los resultados evidencian que la aplicación de savia de maguey contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos de baja plasticidad, siendo su efecto más notorio en los suelos de tipo A-6, caracterizados por un mayor contenido de finos y una estructura más susceptible a variaciones de humedad. La Calicata N°01 evidenció la reacción más favorable, lo que sugiere que este tipo de suelo posee condiciones físico-químicas más compatibles con los compuestos orgánicos presentes en la savia, generando una mejor interacción entre las partículas del suelo y el estabilizante.

Por tanto, se puede afirmar que la adición de savia de maguey resulta efectiva como alternativa natural y ecológica de estabilización de subrasantes, especialmente en suelos arcillosos de baja plasticidad, donde se logra una mejora apreciable en la capacidad de soporte y en la estabilidad estructural del terreno.

OE3: Analizar cómo influye el incremento del contenido de humedad óptimo, debido a la adición de savia de maguey, en el mejoramiento del valor del Índice CBR.

Se realizó el ensayo Proctor Modificado siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1557, obteniéndose para cada dosificación de savia el valor de la humedad óptima y la densidad seca máxima. Posteriormente, dichos parámetros se contrastaron con los resultados del CBR, con el propósito de evaluar cómo el grado de compactación influye en la capacidad portante del suelo.

Figura 30

Cuadro resumen del contenido de humedad de las calicatas en estudio.

CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD CALICATA -01		CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD CALICATA -02	
Muestra Natural 0%	12.60%	Muestra Natural 0%	13.10%
Savia - 10%	12.60%	Savia - 10%	13.30%
Savia - 15%	12.90%	Savia - 15%	13.70%
Savia - 20%	13.10%	Savia - 20%	13.90%
Savia - 25%	14.20%	Savia - 25%	13.90%

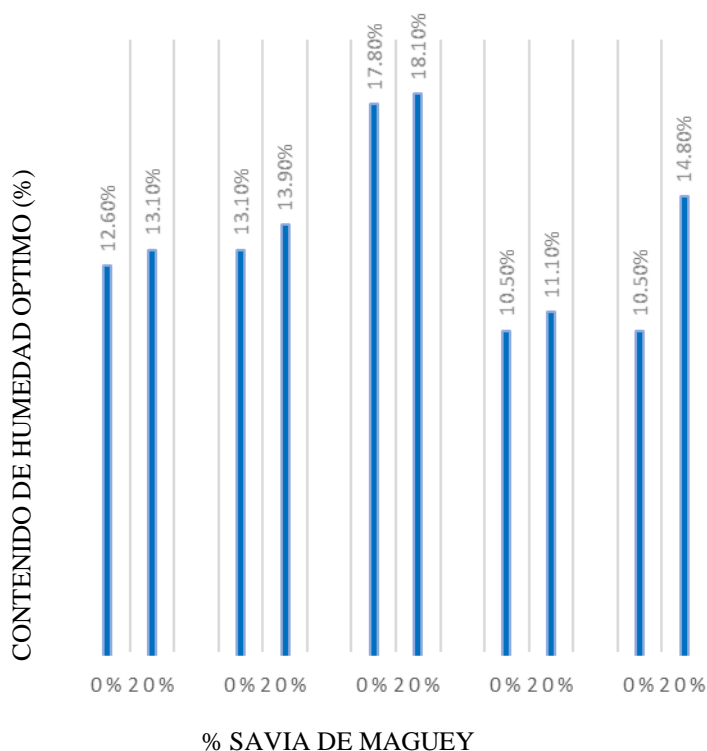
CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD CALICATA -03		CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD CALICATA -04	
Muestra Natural 0%	17.80%	Muestra Natural 0%	10.50%
Savia - 10%	17.90%	Savia - 10%	10.80%
Savia - 15%	18.00%	Savia - 15%	11.00%
Savia - 20%	18.10%	Savia - 20%	11.10%
Savia - 25%	19.00%	Savia - 25%	11.20%

CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD CALICATA -05	
Muestra Natural 0%	10.50%
Savia - 10%	14.30%
Savia - 15%	14.40%
Savia - 20%	14.70%
Savia - 25%	14.80%

Nota: En los cuadros se muestra el resumen del contenido de humedad óptimo de cada calicata en estudio.

Figura 31

Relación del contenido de humedad óptima respecto al incremento de savia de maguey



Nota: En la imagen se muestra la relación que existe entre el contenido óptimo de humedad del CBR realizando una comparativa entre el suelo natural y el suelo con adición del 20% de savia de maguey.

El estudio comparativo de los resultados obtenidos en las cinco calicatas (C-01 a C-05) muestra que la incorporación del 20% de savia de maguey produce un aumento generalizado del contenido de humedad óptimo respecto al suelo sin aditivo. Este comportamiento sugiere que la savia de maguey modifica de manera notable la capacidad del terreno para retener agua, lo cual se atribuye a la presencia de compuestos orgánicos que facilitan su absorción y almacenamiento dentro de la matriz del suelo.

En el caso de la calicata C-01, el contenido de humedad óptima se incrementó de 12.60% a 13.10%; mientras que en la C-02 dicho valor pasó de 13.10% a 13.90%. Para la C-03, el aumento registrado fue de 17.80% a 18.10%, y en la C-04 la variación se extendió

de 10.50% a 11.10%. Finalmente, la C-05 evidenció el incremento más significativo, elevándose de 10.50% a 14.70%, lo que equivale a un aumento de 4.20 puntos porcentuales respecto al material sin adición.

Los resultados indican que la adición del 20% de savia de maguey incrementa la cantidad de agua requerida para que el material alcance su máxima compactación, lo cual está asociado a la acción del estabilizante natural sobre la estructura y la cohesión del suelo. Debido a que la savia contiene compuestos viscosos e higroscópicos, el material adquiere mayor afinidad por el agua, permitiendo una distribución más uniforme de la humedad y favoreciendo el proceso de compactación.

En síntesis, se concluye que la incorporación de savia de maguey genera un efecto positivo sobre la humedad óptima de los suelos analizados, siendo este impacto más notable en materiales de textura más suelta y con baja plasticidad inicial, como en el caso de la Calicata C-05. Dicho comportamiento ratifica el potencial de la savia de maguey como estabilizante natural, capaz de mejorar las condiciones de compactación y el rendimiento del suelo en proyectos de infraestructura vial.

5.2. Discusión

A pesar de las limitaciones, el estudio demuestra el potencial de la savia de maguey como un estabilizante natural. Esto podría incentivar la exploración de otros estabilizantes naturales que contribuyan a la sostenibilidad y a la reducción de costos en la infraestructura vial.

Para realizar la clasificación del material se emplearon los métodos estandarizados establecidos en las normas técnicas pertinentes, asegurando así la validez, precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos en la caracterización del suelo. De acuerdo con la clasificación del sistema SUCS, el tipo de suelo identificado corresponde a una arcilla de baja plasticidad (CL). En contraste, con la investigación desarrollada por (Salvador León y Elsa Medaliz, 2022), el suelo fue clasificado como arena arcillosa (SC), considerando únicamente tres calicatas durante su estudio. Dicho trabajo propuso la incorporación de savia de agave en proporciones del 60%, 80% y 100%, obteniendo resultados positivos. Sin embargo, en el presente estudio se planteó la adición de savia de maguey en proporciones menores del 10%, 15%, 20% y 25%, alcanzando resultados óptimos en el 20%, donde se evidenció una mejora significativa, estos porcentajes varían dependiendo al tipo de suelo en estudio.

Según lo señalado por (Jesús y Reaño Quispe Marco Antonio, 2021), en su estudio orientado a la mejora y estabilización de suelos mediante la adición de mucílago de cactus San Pedro se evaluaron diferentes porcentajes de incorporación del aditivo (0%, 30%, 60% y 90%) y se aplicaron los métodos de clasificación estandarizada de suelos, obteniéndose como resultado un material compuesto por arcilla y limo plástico. En dicho estudio se registró un aumento progresivo del CBR, alcanzando un valor máximo de 7.89%, lo que demuestra un efecto positivo del mucílago sobre la capacidad de soporte del suelo. En comparación, el presente proyecto de investigación logró un mayor incremento del CBR,

alcanzando el 14.54%, lo que refleja una eficiencia superior del agente estabilizador empleado y una mejor respuesta del suelo ante el proceso de compactación, consolidando así la eficacia del tratamiento aplicado.

Según (Espíritu, 2020) en el proyecto denominado "Mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante mediante la aplicación de sabila en la carreta la esperanza-Malcongá, km5 Matamarca" confirmo que la adición de savia de sabila mejora con un 10% de incremento a comparación de este proyecto que al adicionar savia de maguey a un 20% los resultados son óptimos.

La adición de un 20% de savia de maguey a la subrasante para mejorar el Índice CBR (California Bearing Ratio) y la resistencia a la penetración es una alternativa viable para la construcción de carreteras. Los resultados de esta investigación son coherentes con otros estudios que sugieren que el uso de materiales naturales y locales puede mejorar las propiedades de los suelos. A diferencia de estabilizantes químicos, la savia de maguey ofrece una solución más ecológica y económica, especialmente en zonas rurales donde el acceso a materiales tradicionales es limitado.

No obstante, la investigación presenta ciertas restricciones que deben considerarse. La investigación se centró en un tipo de suelo específico de la zona de Kirkas a Punacancha. Por lo tanto, los resultados no son necesariamente aplicables a todos los tipos de suelos. Se requieren más estudios para determinar cómo reacciona la savia de maguey con diferentes composiciones de suelo y en diversas condiciones climáticas.

VI. Conclusiones

1. En cuanto al **OE1**, los resultados obtenidos en los ensayos indican que la incorporación de savia de maguey genera cambios relevantes en las características de compactación del suelo, modificando tanto la densidad seca máxima como la humedad óptima. Estas alteraciones repercuten de forma directa en el valor del Índice CBR. De esta manera, se valida la hipótesis **HE1**, comprobándose que el uso de savia de maguey eleva el CBR en comparación con el material en estado natural.

2. La dosificación del 20% de savia de maguey, considerando la humedad óptima del suelo, generó el mayor valor del Índice CBR entre todas las proporciones estudiadas. Este porcentaje se identifica como el más eficiente para mejorar la resistencia a la penetración, cumpliendo lo establecido en el **OE1** y **OE3**, y respaldando la afirmación planteada en la hipótesis **HE3**, ya que el incremento del contenido de humedad óptimo producido por la savia contribuyó directamente al aumento del CBR.

3. El estudio físico-químico realizado a la savia de maguey evidencia que este material actúa como un estabilizante y agente aglomerante de origen natural, incrementando la unión entre las partículas finas del suelo y favoreciendo su proceso de compactación. Como resultado, se obtiene una mayor densidad seca máxima y un incremento en la resistencia frente a la penetración. Estos efectos permiten determinar que una proporción del 20% constituye la dosificación más adecuada para optimizar las propiedades físico-mecánicas de la subrasante.

4. Respecto al **OE2**, se determinó que la eficiencia de la savia de maguey depende de la granulometría y plasticidad del suelo. Los mejores incrementos de CBR se registraron en suelos arcillosos de baja plasticidad, donde la interacción entre los compuestos de la savia y las partículas finas genera mayor estabilidad. Estos hallazgos validan la hipótesis **HE2**,

demostrando que este tipo de suelo es el que reacciona de manera más favorable al estabilizante.

5. El proyecto beneficia a comunidades rurales al mejorar la calidad de las vías, lo que prolonga su vida útil, mejora la transitabilidad y reduce los costos de transporte.

6. La savia de maguey es una alternativa sostenible, de bajo costo y disponible localmente para mejorar las propiedades del suelo, con potencial para la estabilización parcial de suelos, siempre que se determine previamente el tipo de suelo.

7. El aumento promedio del valor CBR al incorporar savia de maguey alcanzó el 14.51%, lo que demuestra que este aditivo natural produce una mejora notable y constante en la resistencia a la penetración de los suelos analizados.

8. El incremento del contenido de humedad óptima se relaciona directamente con una compactación más eficiente, ya que la savia favorece la distribución uniforme del agua y actúa como medio lubricante y aglutinante, facilitando la reorganización de las partículas y generando estructuras más densas. Este efecto explica el aumento del CBR en todos los suelos tratados.

9. Del análisis de costos unitarios de la partida se concluye que existe un incremento de 238.11, el cual está directamente asociado a la incorporación de savia de maguey en diferentes proporciones (10%, 15%, 20% y 25%) aplicadas en las cinco (05) calicatas objeto de estudio. Asimismo, dicho incremento contempla la inclusión de los equipos de protección personal, necesarios para garantizar condiciones adecuadas de seguridad durante la ejecución de los trabajos de investigación.

VII. Recomendaciones

1. Implementar el tratamiento de la subrasante con una adición del 20% de savia de maguey para mejorar el Índice CBR y optimizar el comportamiento mecánico de la vía.
2. Se recomienda investigar y validar técnicas de estabilización sostenibles, de bajo costo y basadas en recursos locales para la construcción y mantenimiento de vías vecinales.
3. Es fundamental desarrollar investigaciones experimentales para validar la viabilidad técnica de la savia de maguey como estabilizante natural para contribuir a la construcción y mantenimiento de vías más duraderas.
4. Dado que la savia es un recurso natural, es crucial investigar y proponer métodos sostenibles para su extracción, almacenamiento y procesamiento que no impacten negativamente el ecosistema local ni las comunidades productoras.
5. Promover el uso de savia de maguey como alternativa sostenible, siempre que los resultados técnicos lo respalden, considerando su bajo costo, disponibilidad local y contribución ambiental frente a estabilizantes químicos.
6. Se recomienda realizar estudios piloto a escala real en tramos de carretera, con monitoreo periódico del CBR in situ, asentamientos, comportamiento ante precipitaciones e impacto del tránsito. Esto permitirá validar la aplicabilidad de la savia de maguey en escenarios operativos.
7. Se recomienda evaluar diferentes métodos de extracción y purificación de la savia de maguey, con el fin de identificar procesos que permitan aumentar su concentración de polisacáridos y mejorar su desempeño como estabilizante natural.

8. Ampliar el estudio a otros tipos de suelos, como arcillas de alta plasticidad, limos orgánicos y suelos arenosos con diferentes proporciones de finos, para determinar los límites de aplicabilidad de la savia y establecer curvas de eficiencia por tipo de suelo.

9. Explorar combinaciones entre la savia de maguey y otros estabilizantes naturales o tradicionales (cal, cemento, cenizas, fibras vegetales), con el objetivo de determinar si existen sinergias que permitan mejorar la capacidad de soporte del suelo.

10. Se recomienda considerar, en futuros estudios y aplicaciones prácticas, el incremento de costos identificado en el análisis de costos unitarios, derivado de la adición de savia de maguey en porcentajes de 10%, 15%, 20% y 25% en las cinco (05) calicatas evaluadas. Asimismo, es indispensable incorporar desde la etapa de planificación los equipos de protección personal, a fin de garantizar la seguridad del personal y una adecuada ejecución de los trabajos, evitando sobrecostos no previstos durante la investigación o implementación en campo.

VIII. Referencias

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (09 abril de 2014). Manual de Carreteras:Suelos,Geología,Geotecnia y Pavimentos. Manual de Carreteras: Suelos,Geología,Geotecnia Y Pavimentos. Lima, Perú. Obtenido de Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

Cusihuaman Ccolqque Darwin, Q. U. (2020). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la estabilización química con aditivos líquidos compuestos por biopolímeros de la subrasante en la carretera Huila-Huila-Piuray, Distrito de Chinchero (Tesis Para Optar El Título Profesional, Unsaac). Repositorio Digital, Cusco. Obtenido De [Http://Hdl.Handle.Net/20.500.12918/4373](http://hdl.handle.net/20.500.12918/4373)

Elizondo Arrieta Fabian, N. C. (2017). Efecto de la cal en la estabilización de Subrasantes (Tesis Para Obtener El Grado De Título, Universidad De Costa Rica). Repositorio Digital, Costa Rica.

Espíritu Huaman, A. M. (2020). Mejoramiento De La Capacidad De Soporte De La Subrasante Mediante La Aplicación De Savia De Sábila En La Carretera La Esperanza-Malgon, Km 5 Matamarca -2018 (Tesis Para Obtener El Título Profesional, Universidad De Huánuco). Repositorio Digital, Huánuco. Obtenido De [Http://Repositorio.Udh.Edu.Pe/123456789/1819](http://Repositorio.Udh.Edu.Pe/123456789/1819)

León, S. (2022). Influencia De La Savia De Agave En Las Propiedades Fisico-Mecanicas De Suelos Para Estabilización De Subrasante(Tesis Para Obtener Título Profesional, Universidad Cesar Vallejo). Repositorio Digital, Huaraz. Obtenido De [Https://Hdl.Handle.Net/20.500.12692/111336](https://hdl.handle.net/20.500.12692/111336)

Mamani Gonzalo, G., De La Cruz Vega, S. A., Vega Neyra, P. M., & Rea Olivares, W. M. (2023). Estabilización De La Subrasante Con Ceniza De Quinoa Y Cal En La Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú. Infraestructura Vial.

Mendoza Gonzales, L. G., & Mendoza Villalobos, F. A. (2022). Efecto de Incorporación de desperdicio avícola en las propiedades Físicas y Mecánicas, En Suelo Limo-Arcilloso De La Subrasante, Calle Ciro, San Sebastian,Cusco(Tesis Para Obtener El Título Profesional, Universidad Andina Del Cusco). Cusco. Obtenido De [Https://Hdl.Handle.Net/20.500.12557/5480](https://hdl.handle.net/20.500.12557/5480)

Pizarro Yañac Jhon, H. C. (2020). Mejoramiento De La Capacidad De Soporte (Cbr) Del Terreno De Fundación Con La Aplicación De Pegamento Sintético En Base A Poliaceta De Vinilo En El Distrito De San Sebastian-Provincia,Departamento Del Cusco(Tesis Para Obtener El Título Profesional, Unsaac). Repositorio Digital, Cusco. Obtenido De [Http://Hdl.Handle.Net/20.500.12918/5037](http://hdl.handle.net/20.500.12918/5037).

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