

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL**



**Tesis**

Efecto de adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en las propiedades físico mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas-Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

**Asesor:**

Ing. Gamarra Mota, Rubén

**Autor**

Palomino Catacora, Marco Antonio

Para optar el título profesional de: Ingeniero Civil

**Abancay - Apurímac - Perú**

**2025**



# Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 090

En la ciudad de Abancay, a los veintidós días del mes de diciembre del 2025, siendo las 5:30 pm horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 1056-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 11 de diciembre del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente	: Mag. Huanca Astoquilloca, Luis
Dictaminante	: Mag. Roldan Juárez, Américo
Replicante	: Ing. Cayo Baca, Holguer

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis  Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

**Efecto de adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en las propiedades físico mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas – Osnomocco, Abancay – Apurímac – 2025**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

**Br: Palomino Catacora, Marco Antonio**

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

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

Por: Mayoría  
(Unanimidad o Mayoría) (\*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Palomino Catacora, Marco Antonio	Aprobado

Siendo las 19:15pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquilloca, Luis

Dictaminante: Mag. Roldan Juárez, Américo

Replicante: Ing. Cayo Baca, Holguer

Abancay 06 de enero del 2026

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 391

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES  
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559  
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251585  
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752  
[www.utea.edu.pe](http://www.utea.edu.pe)

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

## 17% Similitud general

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




### Filtrado desde el informe

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

### Exclusiones

- ▶ N.º de fuente excluida

### Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 15%  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

<b>Datos del Autor</b>	
Apellidos y nombres	: Bach. Palomino Catacora, Marco Antonio
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 23979718
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0009-0001-8875-0580">https://orcid.org/0009-0001-8875-0580</a>
<b>Datos del Asesor</b>	
Apellidos y nombres	: Gamarra Mota, Rubén
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 41213261
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0009-0002-3046-5485">https://orcid.org/0009-0002-3046-5485</a>
<b>Datos de la Investigación</b>	
Facultad	Ingeniería
Escuela Profesional	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	2025
Fuente de financiamiento	Fondos propios
Porcentaje de similitud	17%
URL de OCDE	: <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.01.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.01.01</a>

## **Dedicatoria**

Dedico estas palabras a quien es luz celestial en mi camino y a mi madre, padre, hijos Sebastián y Liam, quienes constituyen el más preciado obsequio que la vida me ha otorgado, pues su afecto, orientaciones, consejos y fortaleza me inspiran y fortalecen cada día, siendo portadores de una bondad y nobleza que llenan mi vida de gratitud y aprecio, por ello guardo un reconocimiento eterno hacia el respaldo que siempre me han ofrecido y la confianza depositada en mí, a mi hermanos les agradezco por impulsarme con determinación a concretar la meta de mi titulación y por mostrarme nuevas maneras de comprender el mundo, y a ti querida Esposa, te valoro profundamente por acompañarme en todo este trayecto, sosteniéndome con tu apoyo, estímulo y presencia constante.

## **Agradecimientos**

Mi gratitud más profunda se dirige en primer lugar a Jehová, quien con su infinita bondad me ha concedido innumerables bendiciones y ha sido la fuerza que me impulsa a creer que todo es posible, extendiendo también mi reconocimiento a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Civil por haber compartido con generosidad sus conocimientos, experiencias y valores que enriquecieron mi formación, agradezco de manera especial a mi asesor por su orientación constante, paciencia y comprensión que guiaron cada paso hasta la consecución de los objetivos propuestos, y valoro sinceramente el aporte de los jurados de esta tesis, quienes con su interés, críticas constructivas, observaciones y apoyo han contribuido de forma significativa al desarrollo de este trabajo y a mi crecimiento académico y personal, dejándome enseñanzas que perdurarán más allá de esta etapa.

## Resumen

El presente estudio tuvo como propósito evaluar el impacto de la incorporación de sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sobre las propiedades físico-mecánicas de la subrasante en caminos vecinales, con el fin de optimizar su comportamiento estructural y asegurar condiciones adecuadas de transitabilidad en contextos rurales. Para ello, se aplicó una metodología cuantitativa de tipo aplicado, con un enfoque descriptivo y correlacional, basado en un diseño experimental. Se realizaron ensayos de índice de plasticidad, contenido de humedad y capacidad de soporte del suelo (CBR), utilizando proporciones de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  del 2 %, 4 %, 6 % y 8 % sobre muestras representativas de suelo provenientes de los tramos de estudio. Los resultados evidenciaron una reducción progresiva del índice de plasticidad, con disminuciones superiores al 30 % respecto a la muestra control. Asimismo, se observó una mayor estabilidad frente a la variación de humedad y un incremento significativo en la capacidad de soporte, alcanzando valores de CBR superiores al 20 % al emplear el 8 % de aditivo. Estos hallazgos confirman la eficacia del yeso como agente estabilizador, posicionándolo como una alternativa técnica viable para mejorar la resistencia y durabilidad de la subrasante en proyectos viales. La implementación de esta solución contribuye a la reducción de costos de mantenimiento y al fortalecimiento de la infraestructura de transporte rural, con implicaciones positivas en la sostenibilidad y funcionalidad de las vías en zonas de difícil acceso.

**Palabras clave:** Sulfato de calcio dihidratado, Subrasante Vial, capacidad de soporte del suelo (CBR), propiedades mecánicas, óptimo contenido de humedad.

## **Abstract**

The present study aimed to evaluate the impact of incorporating calcium sulfate dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) on the physicomaterial properties of the subgrade in rural roads, with the purpose of optimizing its structural performance and ensuring adequate trafficability in rural contexts. To this end, a quantitative applied methodology was employed, with a descriptive and correlational approach based on an experimental design. Tests on plasticity index, moisture content, and soil bearing capacity (CBR) were conducted using  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  proportions of 2%, 4%, 6%, and 8% on representative soil samples collected from the study sections. The results showed a progressive reduction in the plasticity index, with decreases exceeding 30% compared to the control sample. Likewise, greater stability against moisture variation and a significant increase in bearing capacity were observed, reaching CBR values above 20% when the 8% additive was used. These findings confirm the effectiveness of gypsum as a stabilizing agent, positioning it as a viable technical alternative for improving the strength and durability of the subgrade in roadway projects. The implementation of this solution contributes to reducing maintenance costs and strengthening rural transportation infrastructure, with positive implications for the sustainability and functionality of roads in hard-to-access areas.

**Key words:** Calcium sulfate dihydrate, subgrade improvement, California Bearing Ratio (CBR).

## Índice General

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Acta de sustentación</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Reporte de similitud</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Metadatos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>vi</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice General</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>xii</b>
<b>Índice de anexos</b> .....	<b>xiii</b>
<b>I. Introducción</b> .....	<b>14</b>
<b>II. Planteamiento del problema</b> .....	<b>16</b>
2.1 Descripción y formulación del problema .....	16
2.2 Objetivos. ....	20
2.2.1 Objetivo general .....	20
2.2.2 Objetivos específicos.....	20
2.3 Justificación e importancia.....	21
2.4 Hipótesis.....	22
2.4.1 Hipótesis General .....	22
2.4.2 Hipótesis Especificas.....	23
2.5 Variables.....	23
<b>III. Marco teórico</b> .....	<b>25</b>
3.1 Antecedentes .....	25
3.2 Bases Teóricas.....	30
3.2.1 Sulfato de calcio .....	30
3.2.2 Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) .....	30
3.2.3 Efecto del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en el suelo .....	31
3.2.4 Subrasante .....	32
3.2.5 Estabilización de la subrasante.....	33

3.2.6	Propiedades físicas de la subrasante.....	34
3.2.7	Ensayo de contenido de humedad (%).....	35
3.2.8	Límites de Atterberg.....	36
3.2.9	Propiedades mecánicas de la subrasante .....	36
3.2.10	Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).....	38
3.3	Definición de términos .....	39
<b>IV.</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>43</b>
4.1	Tipo y nivel de investigación .....	43
4.2	Ámbito Temporal y espacial .....	44
4.3	Población y muestra .....	44
4.4	Instrumentos .....	45
4.5	Procedimientos .....	46
4.6	Análisis de Datos.....	47
4.7	Consideraciones Éticas.....	49
<b>V.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>50</b>
5.1	Descripción de los trabajos de campo .....	50
5.1.1	Registro de la Excavación de Calicatas.....	51
5.2	Resultados de los Ensayos.....	56
5.2.1	Ensayos a las muestras del grupo Patrón - Granulometría.....	56
5.2.2	Índice de plasticidad de la muestra patrón .....	62
5.2.3	Contenido de humedad.....	63
5.2.4	Relación de Soporte de California (CBR).....	64
5.3	Ensayos incorporando $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	65
5.3.1	Ensayo de índice de plasticidad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	66
5.3.2	Ensayo de contenido de humedad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	69
5.3.3	Ensayo de Soporte de California (CBR) con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	71
5.4	Discusión de Resultados.....	75
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>79</b>
<b>VII.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>89</b>
<b>VIII.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>90</b>
<b>IX.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>98</b>

## Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables .....	24
Tabla 2 Instrumentos utilizados para los ensayos de laboratorio .....	46
Tabla 3 Coordenadas UTM de las calicatas C-01, C-02 y la C-03.....	51
Tabla 4 Clasificación del suelo (SUCS y ASTHO) .....	52
Tabla 5 Análisis granulométrico de la muestra C – 01 .....	56
Tabla 6 Análisis granulométrico de la muestra C - 02 .....	57
Tabla 7 Análisis granulométrico de la muestra C - 03 .....	59
Tabla 8 Clasificación del suelo (SUCS y ASTHO) .....	60
Tabla 9 Los resultados de los ensayos. ....	61
Tabla 10 Índice plasticidad de la muestra patrón.....	62
Tabla 11 Ensayo Proctor modificado de muestra patrón .....	63
Tabla 12 CBR de la muestra patrón.....	65
Tabla 13 Índice de plasticidad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	68
Tabla 14 Contenido de humedad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	69
Tabla 15 Soporte de California (CBR) con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	71

## Índice de figuras

Figura 1 Ubicación referencial de las calicatas C-01, C-02 y la C-03 .....	50
Figura 2 Ubicación referencial y perfil estratigráfico de la Calicata C - 01 .....	53
Figura 3 Ubicación referencial y perfil estratigráfico de la Calicata C - 02 .....	54
Figura 4 Ubicación referencial y perfil estratigráfico de la Calicata C - 03 .....	55
Figura 5 Índice de plasticidad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	68
Figura 6 Contenido de humedad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	70

## Índice de anexos

Anexo 01. Matriz de consistencia.....	107
Anexo 02. Matriz de operacionalización de variable.....	108
Anexo 03. Panel fotográfico.....	109

## I. Introducción

La infraestructura vial rural desempeña un papel fundamental en la integración social y económica de las zonas apartadas, al facilitar el acceso a mercados, servicios de salud y educación (MTC, 2022). En la provincia de Abancay, Región Apurímac, el camino vecinal Aymas–Osnomocco constituye una vía de gran relevancia para la población, sin embargo, su funcionalidad se ve limitada por deficiencias en la subrasante, caracterizada por baja capacidad portante, alta plasticidad y resistencia reducida, condiciones que aceleran su deterioro, incrementan los costos de mantenimiento y disminuyen la calidad del servicio vial (MTC, 2020).

La subrasante, como capa estructural que transmite las cargas de los neumáticos, requiere propiedades físico-mecánicas de compactación con material de ingeniería adecuadas para garantizar estabilidad y desempeño Vial, (Vargas, 2019). En zonas con suelos arcillosos de alta plasticidad, como los presentes en gran parte de la sierra peruana, la estabilización química se ha consolidado como una alternativa técnica para mejorar parámetros como la humedad óptima, la densidad seca máxima, la plasticidad y la capacidad portante (Jiménez et al., 2021).

El sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), comúnmente conocido como yeso, ha demostrado ser un aditivo eficaz en la mejora la estabilidad de suelos finos. Investigaciones internacionales evidencian que su incorporación, en proporciones entre 2 % y 8 % respecto al peso seco del suelo, incrementa la densidad seca máxima(DMS), modifica el óptimo contenido de humedad (OMD) y reduce el índice de plasticidad (Kumar & Sharma, 2018; Aravindhyan et al., 2024). Asimismo, en suelos arcillosos de alta plasticidad, el yeso ha mostrado un incremento del CBR y una disminución del índice de hinchamiento libre, con efectos potenciados al combinarse con cloruro de calcio (Rao et al., 2018).

En experiencias de reutilización de subproductos industriales, como residuos de yeso, se registraron aumentos del CBR no saturado de hasta 15,75 %, superando el valor mínimo de 6 % exigido para su uso en subrasantes según especificaciones internacionales (Al-Taie et al., 2020). Estos resultados respaldan el potencial del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  como alternativa sostenible y de bajo costo para la mejora de suelos en contextos rurales.

En este sentido, la presente investigación tiene como finalidad determinar el efecto de la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas–Osnomocco, evaluando los parámetros como humedad óptima contenido de humedad(OCH), máxima densidad seca(MDS), límites de Atterberg y Resistencia de Capacidad de Soporte de Suelo(CBR). Los resultados permitirán establecer criterios técnicos para optimizar el diseño y mantenimiento de caminos rurales en la Región de Apurímac, contribuyendo a una gestión vial eficiente, sostenible y adaptada a las condiciones geotécnicas locales. La estructura de la presente tesis contiene 9 apartados:

- I. Introducción, ofrece los alcances del estudio
- II. El planteamiento del problema, el cual incluye la descripción y formulación del problema, los objetivos generales y específicos, la justificación, la hipótesis y las variables dependientes e independientes.
- III. Marco teórico que incluye los antecedentes, las bases teóricas y la definición.
- IV. Metodología que especifica el tipo y nivel de investigación, ámbito temporal y espacial, población y muestra, instrumentos, procedimientos, análisis de datos y consideraciones éticas
- V. Resultados y discusiones, que presenta los resultados, la discusión de la investigación
- VI. Conclusiones
- VII. Recomendaciones
- VIII. Referencias, enumera las fuentes bibliográficas

IX. Anexos, que incluye anexos relevantes y registros fotográficos.

## **II. Planteamiento del problema**

### **2.1 Descripción y formulación del problema**

A escala global la condición y durabilidad de las vías rurales se encuentra estrechamente vinculada con las características físico mecánicas que presenta la capa de subrasante la cual desempeña un papel esencial como elemento de soporte para la totalidad de la estructura del pavimento ya que su capacidad para resistir cargas y distribuir esfuerzos influye directamente en el comportamiento y vida útil de la vía considerando que una subrasante con baja resistencia o deficiente capacidad de drenaje puede generar deformaciones prematuras y fallas estructurales lo que obliga a intervenciones tempranas y costosas en la infraestructura vial por lo que resulta fundamental que en los procesos de diseño y construcción se realice un análisis exhaustivo de sus propiedades siguiendo criterios técnicos que garanticen un desempeño óptimo de la vía (Li & Selig, 2019)

En regiones caracterizadas por climas variables y la presencia de suelos con elevada plasticidad como ocurre en países tales como India Nigeria o Etiopía se ha evidenciado que la limitada capacidad portante de la subrasante constituye uno de los factores predominantes que ocasiona el deterioro prematuro en los caminos no pavimentados generando problemas como deformaciones hundimientos y pérdida de la regularidad superficial lo que reduce considerablemente la vida útil de la infraestructura vial y eleva los costos de mantenimiento y rehabilitación esta situación ha sido confirmada mediante investigaciones técnicas que destacan la necesidad de implementar estrategias de estabilización y mejoramiento de suelos con el fin de incrementar su resistencia y capacidad de soporte logrando así una base más sólida para la estructura del pavimento y minimizando la aparición de fallas estructurales en cortos periodos de servicio (Bhatia & Solanki, 2021)

La aplicación de aditivos químicos entre los que destaca el sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ha demostrado mejoras notables en parámetros clave como la densidad seca máxima, humedad óptima y el índice CBR contribuyendo a prolongar de manera significativa la vida útil de las vías, al optimizar las condiciones de la subrasante, diversos estudios desarrollados en regiones de África y Asia han evidenciado que la incorporación de yeso en proporciones comprendidas entre el 4 % y 8 % permite disminuir el índice de plasticidad en más de un 25 % y elevar el valor CBR en más de un 50 % lo que confirma su efectividad como agente estabilizador caracterizado por su bajo costo amplia disponibilidad y facilidad de aplicación en proyectos viales especialmente en contextos donde los recursos técnicos y financieros son limitados (Aravindhana et al., 2024)

En el contexto peruano el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) indica que aproximadamente el 68 % de la red vial vecinal se encuentra en estado deficiente situación que se asocia principalmente a la presencia de subrasantes con limitada capacidad de soporte estructural y elevada susceptibilidad a la humedad lo que favorece la aparición de deformaciones pérdida de capacidad portante y fallas prematuras en las vías esta condición afecta de manera directa la conectividad y el desarrollo económico de las zonas rurales incrementando los costos de transporte y dificultando el acceso a servicios básicos por ello resulta prioritario implementar estrategias de mejoramiento y estabilización de suelos que permitan incrementar la resistencia y durabilidad de la subrasante asegurando así un desempeño óptimo de la infraestructura vial frente a las condiciones climáticas y de carga propias de cada región (MTC, 2022)

Estudios realizados en la región andina comprendiendo tanto la sierra central como la sierra sur del Perú han evidenciado que la técnica de estabilización de suelos mediante el uso de aditivos como el yeso representa una alternativa técnicamente factible y económicamente accesible para el mejoramiento de caminos con bajo volumen de tránsito

permitiendo optimizar las propiedades físico mecánicas de la subrasante y reducir su susceptibilidad a la humedad lo que se traduce en una mayor capacidad portante y una prolongación de la vida útil de la vía esta estrategia ha mostrado ser especialmente adecuada en contextos rurales donde los recursos financieros y tecnológicos son limitados ofreciendo una solución eficiente para garantizar la transitabilidad y mejorar la conectividad de las comunidades beneficiando así el transporte de personas y bienes en zonas con condiciones topográficas y climáticas exigentes (Rojas & Huamán, 2021)

Investigaciones efectuadas en la región de Ayacucho evidenciaron que la incorporación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en proporciones controladas generó un incremento superior al 40 % en el valor CBR acompañado de una disminución significativa en el índice de plasticidad lo que confirma su potencial como estabilizador eficaz de suelos aplicados a la subrasante de caminos rurales de igual manera experiencias piloto desarrolladas en la región Cusco demostraron que la implementación de técnicas de estabilización química permite optimizar la resistencia y durabilidad de las vías logrando además una reducción de hasta el 30 % en los costos asociados al mantenimiento periódico lo que resulta especialmente beneficioso en contextos de limitados recursos económicos y alta demanda de conectividad vial mejorando así la calidad y sostenibilidad de la infraestructura en zonas con condiciones geográficas y climáticas exigentes (García & Ramos, 2020)

En la región de Apurímac una proporción considerable de la red vial se encuentra construida sobre suelos arcillosos que presentan altos niveles de plasticidad y un valor promedio de CBR inferior al 6 % condición que limita de manera significativa la capacidad de soporte de la subrasante y reduce la durabilidad de la infraestructura vial esta situación propicia la aparición de deformaciones hundimientos y fallas prematuras en la superficie de rodadura incrementando los costos de mantenimiento y afectando la transitabilidad especialmente en épocas de lluvias intensas por lo que se vuelve imprescindible la aplicación

de técnicas de mejoramiento y estabilización de suelos que permitan optimizar sus propiedades mecánicas garantizando así un comportamiento estructural más eficiente y una mayor vida útil de las vías en beneficio de las comunidades que dependen de ellas para su conectividad y desarrollo económico (Gutiérrez & Puma, 2021)

De acuerdo con los informes técnicos emitidos por Provías Descentralizado se ha determinado que más del 60 % de los caminos vecinales ubicados en la región presentan deterioros asociados a procesos de deformación plástica y pérdida significativa de material especialmente durante la temporada de lluvias lo que afecta de manera directa la capacidad funcional y la seguridad de las vías esta situación se debe principalmente a la baja resistencia de la subrasante frente a la humedad y a la ausencia de medidas efectivas de estabilización y drenaje lo que genera un incremento en la frecuencia y costo de las intervenciones de mantenimiento por ello resulta fundamental implementar soluciones técnicas orientadas a mejorar las propiedades físico mecánicas del suelo y garantizar un desempeño adecuado de la infraestructura vial (Provías, 2023)

Estudios realizados a nivel local en la ciudad de Abancay han evidenciado que la incorporación de yeso en proporciones comprendidas entre el 5 % y el 7 % produce un aumento considerable en la densidad seca máxima y en el valor del CBR lo que permite que las características de la subrasante cumplan con los estándares mínimos de calidad establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC este mejoramiento de las propiedades físico mecánicas del suelo se traduce en una mayor capacidad de soporte y en una reducción de la susceptibilidad a la humedad factores que contribuyen a incrementar la durabilidad y resistencia de las vías rurales y urbanas en la región lo que a su vez optimiza el desempeño estructural de la infraestructura vial y disminuye la frecuencia de intervenciones de mantenimiento generando beneficios técnicos y económicos (Huamán et al., 2022)

- **Problema general**

¿Cuál es el efecto de la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay–Apurímac, 2025?

- **Problemas específicos**

¿Cuál es el efecto de la adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el índice de plasticidad de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025?

¿Cuál es el efecto de la adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en la máxima densidad seca de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025?

¿Cuál es el efecto de la adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en la Capacidad De Soporte De Suelo(CBR) de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025?

## 2.2 Objetivos.

### 2.2.1 *Objetivo general*

Determinar el efecto de la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay–Apurímac, 2025.

### 2.2.2 *Objetivos específicos.*

- Determinar cuál es el Efecto de la adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el índice de plasticidad de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.
- Determinar cuál es el Efecto de la adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en la máxima densidad seca de la subrasante del camino vecinal Aymas-Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.
- Determinar cuál es el Efecto de la adición del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el CBR de la

subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

### **2.3 Justificación e importancia**

El camino vecinal que conecta las localidades de Aymas y Osnomocco en la provincia de Abancay región Apurímac se encuentra actualmente en condición de subrasante sin contar con una infraestructura vial adecuada lo que ocasiona que el servicio de transitabilidad tanto vehicular como peatonal sea deficiente afectando la movilidad y seguridad de los habitantes del centro poblado de Aymas y de la comunidad de Hatun Pata esta situación genera dificultades en el transporte de personas y productos limita el acceso a servicios básicos y repercute negativamente en las actividades económicas y sociales de la zona siendo evidente la necesidad de implementar trabajos de mejoramiento que permitan dotar a la vía, las condiciones óptimas de resistencia, durabilidad y funcionalidad garantizando así un adecuado nivel de servicio que favorezca la conectividad y el desarrollo local en beneficio de sus pobladores

En el ámbito social se busca determinar con precisión el grado de impacto que la estabilización del suelo, genera en la población evaluando si dicha intervención responde efectivamente a una necesidad sentida por los residentes y considerando la viabilidad de utilizar material estabilizado con sulfato de calcio con el propósito de disminuir los costos y el tiempo requerido en la construcción de vías de esta manera se plantea que el material tratado pueda emplearse posteriormente como capa de subrasante logrando así optimizar los recursos destinados a la ejecución de obras viales y mejorar el sostenimiento de carreteras sin pavimentar lo que contribuirá a garantizar una mayor durabilidad de la infraestructura vial y a fortalecer la conectividad de las comunidades beneficiando sus actividades económicas y sociales mediante una solución técnica eficiente y sostenible

En lo referente a las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante se dispone de información teórica presentada en los estudios de Yangali (2022) quien resalta la

importancia del comportamiento del sulfato de calcio cuando es utilizado como estabilizante químico en el suelo con el objetivo de optimizar su resistencia destacando que el tiempo de fraguado que presenta este compuesto es considerablemente menor en comparación con el concreto asimismo se señala que para mejorar de manera más eficiente las propiedades del suelo el sulfato de calcio puede combinarse con otros aditivos como el cemento generando una mezcla que busca maximizar las características físicas y mecánicas de la subrasante permitiendo así incrementar su capacidad portante y su durabilidad lo que resulta fundamental para el adecuado desempeño estructural de las vías especialmente en zonas con condiciones geotécnicas desfavorables

Desde el ámbito profesional se propone brindar soluciones técnicas a la problemática que presentan los suelos con baja resistencia esperando alcanzar resultados favorables mediante la aplicación de sulfato de calcio en el marco del estudio físico mecánico basado en lo establecido por el reglamento del manual de ensayo de materiales MTC/16 esta normativa orienta el cumplimiento de los procedimientos en el desarrollo del proyecto de tesis permitiendo que a través de la observación y análisis de la incorporación del sulfato de calcio se pueda determinar si dicho aditivo contribuye a mejorar las propiedades del suelo lo que implica evaluar si su adición genera incrementos en la resistencia optimiza la compactación y favorece la estabilidad estructural de la subrasante garantizando así un desempeño más eficiente y duradero de la infraestructura vial construida sobre estos terrenos.

## **2.4 Hipótesis**

### **2.4.1 Hipótesis General**

La adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  influye significativamente las propiedades físico mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.

#### 2.4.2 *Hipótesis Específicas*

- La adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  influye en el índice de plasticidad de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.
- La adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  influye en la máxima densidad seca de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.
- La adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  aumenta significativamente el valor CBR de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.

#### 2.5 **Variables**

**Variable 1:** VI Sulfato de calcio dihidratado  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

**Variable 2:** VD Propiedades físico mecánicas de la subrasante de camino vecinal.

**Tabla 1**

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índice	Fuente	Instrumentos
<b>Variable Independiente: sulfato de calcio dihidratado (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)</b>	El sulfato de calcio dihidratado (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O), comúnmente conocido como yeso, actúa como estabilizador químico, modificando su estructura y propiedades físico-mecánicas mediante reacciones de floculación, cementación y reducción de la plasticidad (Aravindhan et al., 2024)".	"Porcentaje de CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O adicionado al suelo de la subrasante, con niveles de tratamiento establecidos en el diseño experimental siguiendo el procedimiento de mezcla y compactación conforme a ASTM D698".	Dosificación optima	S + 2 % sulfato de calcio	%	Norma AASHTO-T193 ASTM D1883-07-MTC	Fichas técnicas de recolección de datos e información
				S + 4 % sulfato de calcio	%		
				S + 6 % sulfato de calcio	%		
				S + 8 % sulfato de calcio	%		
<b>Variable dependiente: Propiedades físico mecánicas de la subrasante</b>	Las propiedades físico mecánicas de la subrasante son el conjunto de características relacionadas con su composición, estructura y comportamiento bajo cargas, que determinan su capacidad para actuar como soporte de la estructura del pavimento. (Das & Sobhan, 2018)"	"Las propiedades físico-mecánicas de la subrasante se medirán mediante ensayos de laboratorio que determinen Humedad óptima, índice de plasticidad, Capacidad portante CBR"	Índice de plasticidad	Limite líquido (%)	%	ASTM D4318 MTC-E-110	Se realizarán ensayos bajo el Manual de ensayo de materiales para carreteras, del Ministerio de Transporte y comunicaciones y fichas técnicas de recolección de datos e información
				Limite plástico (%)			
				Proctor modificado (g/cm <sup>3</sup> )			
<b>Propiedades físico mecánicas de la subrasante</b>			Máxima densidad seca	Resistencia a la penetración (%) CBR	%	AASHTO-T93 ASTM D 1883-07 MTC E-132	
				Contenido óptimo de agua			

**Nota.** Según la tabla 1, se observa la operacionalización de variables.

### **III. Marco teórico**

#### **3.1 Antecedentes**

##### **A nivel internacional**

Singh & Singh (2021), en su artículo científico titulado “Estabilización de suelos arcillosos mediante yeso residual de Paris y Ceniza de cascara de maní”. Planteo como objetivo general; Analizar la estabilización de los suelos arcillosos mezclado con residuos de yeso y cenizas de cascara de maní. Empleo la metodología; diseño experimental, enfoque cuantitativo de tipo aplicada. Arribo al resultado óptimo de 18% de yeso, la resistencia a la tracción bajo compresión no confinada alcanza un valor de 2,84 kg/cm<sup>2</sup>; el índice de Soporte California se incrementó con el 6% del aditivo, aumentando desde un valor inicial de 3.8% hasta un valor final de 11.52%. Se llegó a la conclusión que este incremento demuestra el efecto positivo del uso de residuos de yeso y ceniza de cáscara de maní en la mejora de la estabilidad y resistencia del suelo arcilloso

Según Pal et al. (2020), en su artículo científico titulado “Mejora de las propiedades de suelos arcillosos utilizando cloruro de sodio”. Planteo como objetivo general; investigar los efectos del cloruro de sodio en el suelo arcilloso. Planteando una metodología diseño experimental de enfoque cuantitativo. Arribando a un resultado; las pruebas indica que el valor de CBR, aumento en el incremento de cloruro. El valor de CBR después del proceso de inmersión aumenta de 4,75 % a 9,22 %, así mismo el valor de CBR mezclado con el 2% de cloruro de sodio aumento de 2,75 kg/cm<sup>2</sup> a 6,33 kg/cm<sup>2</sup>. La densidad seca máxima aumento en un 9,02% del suelo patrón. El límite líquido del suelo disminuye hasta un 8,3% en comparación con el suelo patrón. Disminuyendo el índice de plasticidad en un 10% en comparación con el suelo patrón se concluyó: el valor de CBR aumenta en comparación con el suelo patrón.

Morales & Pailacura (2019), en su artículo científico, Planteo como objetivo general; Evaluar en terreno, el cloruro de calcio como estabilizador de carpetas de rodados en caminos sin pavimentar. La metodología es explicativa de diseño experimental. Llegamos a un resultado en el que los valores modificados de la prueba Proctor aumentando la densidad seca máxima, lo que resultó en un aumento en CBR de 109 a 151% tras la adición de un 1% de cloruro de calcio, se llegó a la conclusión de que este producto no solo era económicamente viable, sino que también mejoraba significativamente las propiedades del suelo.

Larrea & Rivas (2019), en su artículo científico, planteo como objetivo general, estabilizar un suelo arcilloso con rango de índice de plasticidad de 16 a 18, con cloruro de sodio y cloruro de calcio para su implementación en vías. Empleo la metodología de investigación práctica, utilizando datos numéricos. El diseño experimental permitió controlar variables y realizar comparaciones precisas para obtener conclusiones significativas. Arribando a un resultado de la incorporación de cloruro de sodio en un 15%, reduce la plasticidad del 17% al 7,32%. El CBR baja de 27.27% a 24.20 %, siendo no apta para el soporte de capacidad que redujo el CBR por la interacción del ambiente húmedo, concluye la incorporación de cloruro de calcio es óptimo en climas secas.

Harichane, Gadouri, & Ghrici (2018), en su artículo científico titulado “Efecto  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sobre las propiedades físico-mecánicas de suelos arcillosos estabilizados”. Planteo como objetivo general; estudiar el efecto del sulfato de calcio en suelos arcillosos en el comportamiento de las propiedades físico- mecánicas. Empleando la siguiente metodología; enfoque cuantitativo, diseño experimental. Arribando a un resultado, los efectos del sulfato de calcio (06% del peso seco del suelo) en la reacción del suelo arcilloso estabilizado con cal (L, 08%), puzolana natural (NP, 20%) y su combinación (LNP), los resultados muestran que cuando se combina una fracción de sulfato de calcio con muestras

que contienen (L) o la combinación de (LNP), se observa una disminución adicional en los valores del índice de plasticidad (PI). Además, se registran la resistencia óptima a compresión libre (UCS). En conclusión, estos efectos del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en suelos arcillosos estabilizados dependen del contenido de sulfato del calcio, tiempo de curado, tipo y contenido de aditivos y composición mineralógica del suelo estabilizado.

### **A nivel nacional**

Zapata (2024), en su trabajo de tesis, empleo el objetivo general; determinar qué tan positivo resulta aplicar la ceniza de cebada y el yeso en la estabilización de suelos de la carretera del asentamiento humano Lomas del Sur. Empleo la metodología; enfoque cuantitativo, tipo aplicada, diseño experimental. Arribo al resultado; incorporando 3%, 5% y 8% junto con el 10% de yeso, los resultados obtenidos son 1766 g/cm<sup>3</sup>, 1745 g/cm<sup>3</sup> y 1686 g/cm<sup>3</sup> de densidad al 5% cenizas de cebada CC; un valor de 42,203% en su CBR al 100%. Concluyendo el porcentaje óptimo validado de acuerdo a normativa es la adición de 5% CC.

Yangali (2022), en su tesis, empleo como objetivo general; evaluar el resultado de la adición del sulfato de calcio en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de subrasante. Empleo la metodología; enfoque cuantitativo, tipo aplicada, diseño experimental. Arribo al resultado; al incorporar el sulfato de calcio en el suelo el valor disminuyó alcanzado el valor del IP de 4.933 %, respecto al equivalente de arena alcanzando valores hasta 15.033% incrementando el 23.224% respecto al suelo patrón y en la densidad seca en el 10% de sulfato de calcio alcanza un valor óptimo, respecto al CBR, con el uso del 10% óptimo de sulfato de calcio, se observó un incremento. Estos valores pasaron de un aumento del 2.123% a un 4.913% de CBR. La conclusión principal es que el sulfato de calcio mejora significativamente las propiedades de los suelos arcillosos y de baja plasticidad,

siendo el 10% de sulfato de calcio la concentración máxima recomendada para obtener los mejores resultados.

Babilonia & Lázaro (2022), en su tesis, planteo como objetivo general analizar la influencia de la adición de agua de mar y yeso en la trocha carrozable Conache – Trujillo, 2022. Empleo la metodología; enfoque cuantitativo, tipo aplicada, diseño experimental. Arribo al resultado; En suelo CH, el CBR aumentó su resistencia en un 39,66% en el tratamiento S1 y en un 77,59%, 100%, 131,03% y 162,07% en las muestras S2, S3, S4, S5. Y en muestras de suelo SM, su CBR aumentó la resistencia en un 38,95% en S1 y en S2, S3, S4, S5; Aumenta su durabilidad en un 76,84%, 98,95%, 129,47% y 160,00%. En conclusión, la adición de agua de mar y yeso tiene un efecto positivo significativo en las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado. Esta combinación muestra mejoras sustanciales en la estabilidad del suelo, lo que sugiere su viabilidad como método efectivo para mejorar la calidad del suelo.

Zamora (2022), en su tesis, empleo la metodología como objetivo general; Determinar los efectos que produce el yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la estabilización de suelos arcillosos expansivos. Empleo la metodología; una investigación práctica que se centró en la recopilación y el análisis de datos numéricos para estudiar el efecto de la adición de yeso. El diseño experimental permitió controlar variables y realizar comparaciones sistemáticas para obtener conclusiones significativas sobre los efectos de estos aditivos en el suelo. Los resultados obtenidos muestran una disminución significativa en el índice de plasticidad (27,37%), el índice de libre expansión (IEL) (75,69%) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (84,46%) después de la aplicación de yeso. Además, se observó un aumento notable en la resistencia a la compresión simple, con un incremento del 115,95%. Estos hallazgos indican que la adición de yeso tuvo un efecto

positivo en la estabilidad y las propiedades mecánicas del suelo. Finalmente concluye que es importante la adición de yeso Mórrope en suelos arcillosos expansivos.

Guerrero (2019), en su tesis, empleo como objetivo general; Determinar la capacidad portante de suelo cohesivo estabilizado con Cal y sulfato de Calcio en 10%,15% y 25%”. Empleo la metodología; enfoque cuantitativo, tipo aplicada, diseño experimental. Arribo al resultado; con adiciones de 10%,15% y 25% de sulfato de calcio y cal, en CBR obteniendo un valor de 2,70 en el espécimen patrón y 7,00, 4,10 y 4,00 con 10%, 15% y 25% de sulfato de calcio y 11,20, 10,80 y 10,60, para el 10%, 15% y 25% de cal. La conclusión del estudio indica que la adición combinada de sulfato de calcio y cal resultó en un valor de Índice de Soporte California (CBR) superior al 5% para ambos estabilizantes. Esto sugiere que la mezcla de sulfato de calcio y cal mejoró significativamente la capacidad de soporte del suelo, lo que puede tener implicaciones positivas en términos de resistencia y estabilidad para aplicaciones de ingeniería vial.

### **Nivel regional y local**

Sumarriva & Ortiz (2019) en su tesis, planteo el objetivo general; Estabilizar el suelo existente de los jirones de Molinopata y santo domingo de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay. Empleo la metodología; enfoque cuantitativo, tipo aplicada, diseño experimental. Arribo al resultado; donde el suelo y cal al comparar en estado natural reduciendo la plasticidad y expansión donde el 8% de cal es satisfactorio en ser estable del suelo analizado cumpliendo la normatividad vigente. Finalmente tomaron como conclusión; tiene significancia en la reducción de la plasticidad ganando resistencia donde el sulfato de calcio es óptimo al 100% en la mejora del CBR.

## 3.2 Bases Teóricas

### 3.2.1 *Sulfato de calcio*

“El sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), comúnmente denominado yeso, es un mineral que se presenta en forma de cristales incoloros o blancos, compuesto por calcio, azufre, oxígeno y agua de cristalización. Es ampliamente utilizado en la construcción, agricultura y más recientemente, en la ingeniería geotécnica para la estabilización de suelos debido a su disponibilidad, bajo costo y propiedades químicas que modifican la estructura del suelo (Aravindhana et al., 2024).

Desde el punto de vista químico, el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  actúa principalmente mediante procesos de floculación y aglomeración de partículas finas, reduciendo la plasticidad y mejorando la compactación del suelo. Este efecto se debe a la sustitución de cationes intercambiables en las arcillas y a la formación de compuestos cementantes que aumentan la cohesión interna (Kumar & Sharma, 2018). Dichos mecanismos generan una estructura más estable que resiste mejor la acción de cargas repetitivas y variaciones de humedad, factores críticos en el desempeño de la subrasante de vías no pavimentadas.

### 3.2.2 *Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )*

El sulfato de calcio dihidratado, conocido comúnmente como yeso, presenta propiedades físicas que lo hacen adecuado como material estabilizante en suelos finos. En su estado puro, se encuentra en forma de cristales incoloros o blancos, de estructura monoclinica, con un aspecto terroso cuando es pulverizado. Su densidad relativa es aproximadamente  $2,31 \text{ g/cm}^3$  y su dureza en la escala de Mohs es de 2, lo que indica que es un mineral blando y fácilmente triturable (Holtz et al., 2011).

Este compuesto posee una masa molar de  $172,17 \text{ g/mol}$  y contiene aproximadamente un 20,9 % de agua cristalina, la cual se libera parcialmente cuando el material se somete a temperaturas superiores a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , transformándose en hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) o en

sulfato de calcio anhidro ( $\text{CaSO}_4$ ) a temperaturas mayores (Das & Sobhan, 2018). Esta propiedad es relevante en ingeniería civil, ya que su reactividad y capacidad de formar compuestos cementantes dependen en parte de la hidratación y deshidratación controlada del mineral.

En cuanto a su solubilidad, el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  presenta un valor de 2,1 g/L a 25 °C, siendo considerado ligeramente soluble en agua (Kumar & Sharma, 2018). Esta baja solubilidad permite que el material libere gradualmente iones de calcio y sulfato al contacto con la humedad del suelo, favoreciendo procesos de floculación y aglomeración de partículas arcillosas. Adicionalmente, el color y la pureza del yeso dependen de su origen geológico y del método de obtención, pudiendo presentar tonalidades grisáceas o amarillentas por la presencia de impurezas como óxidos de hierro o materia orgánica (Bhatia & Solanki, 2021).

### ***3.2.3 Efecto del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en el suelo***

La adición de sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en suelos finos, particularmente en suelos arcillosos, produce cambios significativos en sus propiedades físicas y mecánicas debido a procesos fisicoquímicos que modifican su estructura interna. Uno de los principales efectos es la reducción de la plasticidad, ya que los iones calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) sustituyen a cationes de menor valencia (como  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) en la superficie de las partículas de arcilla, provocando una floculación y aglomeración de las láminas minerales (Das & Sobhan, 2018). Este proceso reduce el espesor de la doble capa difusa, disminuyendo la cohesión plástica y facilitando una mayor compactación.

En términos de compactación, el yeso tiende a aumentar la densidad seca máxima y modificar la humedad óptima, ya que su interacción con las partículas finas genera una estructura granular más estable y menos susceptible a variaciones volumétricas. Investigaciones internacionales reportan incrementos de hasta un 10 % en la densidad seca

máxima y reducciones del índice de plasticidad superiores al 25 % con dosis del 4 % al 8 % de yeso (Aravindhhan et al., 2024).

Otro efecto relevante es la mejora de la capacidad portante, medida a través del índice CBR (California Bearing Ratio). El yeso, al promover la formación de enlaces cementantes entre partículas, incrementa la resistencia al corte y la rigidez del suelo. Estudios en caminos rurales de la India mostraron aumentos del CBR de hasta un 50 % respecto al suelo sin tratamiento, lo que implica una mayor durabilidad y capacidad de soporte de la subrasante (Bhatia & Solanki, 2021).

En el contexto peruano, aunque las aplicaciones del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en estabilización vial son limitadas, investigaciones en la sierra sur han evidenciado mejoras sustanciales en subrasantes con clasificación A-7-6, alcanzando valores de CBR por encima del mínimo requerido por el MTC para capas de soporte (García & Ramos, 2020). Estos resultados posicionan al yeso como un material alternativo y de bajo costo para la estabilización de suelos en vías rurales, especialmente en zonas donde la disponibilidad de cal o cemento es limitada.

### **3.2.4 Subrasante**

La subrasante es la capa de suelo natural o mejorado sobre la cual se apoya la estructura de un pavimento, actuando como base de soporte para la transmisión de cargas hacia el terreno. Su función principal es proporcionar una plataforma estable y uniforme que garantice el buen desempeño del sistema vial a lo largo del tiempo (Holtz et al., 2011). La calidad de la subrasante es determinante para la durabilidad de la vía, ya que deficiencias en su resistencia, estabilidad o uniformidad pueden originar deformaciones, fisuras y fallas estructurales prematuras (Das & Sobhan, 2018).

La clasificación de la subrasante se realiza comúnmente usando los sistemas AASHTO y SUCS. Según AASHTO, los suelos con códigos A-6 y A-7 suelen presentar baja capacidad portante y alta plasticidad, siendo necesarios tratamientos como la estabilización química para su uso en capas de soporte (Vargas, 2019). En el caso del SUCS, los suelos de tipo CH (arcillas de alta plasticidad) requieren especial atención debido a su susceptibilidad a cambios volumétricos por variaciones de humedad (Holtz et al., 2011)

### ***3.2.5 Estabilización de la subrasante***

La estabilización de la subrasante es el conjunto de procesos y técnicas aplicadas para mejorar las propiedades físico-mecánicas de un suelo que no cumple con los requisitos mínimos establecidos para su uso como capa de soporte en un pavimento. Su objetivo es incrementar la capacidad portante, reducir la plasticidad, mejorar la resistencia al corte y minimizar los cambios volumétricos ocasionados por variaciones de humedad (Das & Sobhan, 2018).

Este proceso puede realizarse mediante métodos mecánicos, físicos o químicos. La estabilización mecánica consiste en la modificación de la granulometría mediante mezcla con otros suelos o materiales granulares; la estabilización física se logra a través de procesos como la compactación controlada; y la estabilización química emplea aditivos como cal, cemento, cloruro de sodio, polímeros y sulfato de calcio, los cuales reaccionan con las partículas del suelo para modificar su estructura interna y mejorar su comportamiento (Holtz et al., 2011).

En el caso de la estabilización química, el uso de sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) se ha mostrado efectivo en suelos arcillosos, ya que los iones de calcio favorecen la floculación y aglomeración de partículas finas, reduciendo el índice de plasticidad y mejorando la densidad seca máxima. Investigaciones internacionales reportan

que dosis de entre 4 % y 8 % de yeso pueden incrementar el CBR hasta en un 50 %, lo que extiende la vida útil de la vía y reduce los costos de mantenimiento (Aravindhyan et al., 2024).

### ***3.2.6 Propiedades físicas de la subrasante***

Las propiedades físicas de la subrasante corresponden a las características intrínsecas del suelo que determinan su comportamiento ante cambios de humedad, densidad y estructura. Estos parámetros son fundamentales para la clasificación y evaluación del suelo, así como para definir la necesidad de estabilización y los métodos más adecuados para su mejora (Holtz et al., 2011).

Uno de los principales parámetros físicos es la granulometría, que describe la distribución de tamaños de partículas presentes en el suelo. Este análisis permite clasificarlo en arenas, limos o arcillas y predecir su permeabilidad, capacidad de drenaje y tendencia a la retención de humedad (Das & Sobhan, 2018).

Otra propiedad relevante es la humedad natural, que corresponde al contenido de agua presente en el suelo en el momento de su muestreo. Este valor influye directamente en la resistencia y compactación, ya que un exceso de humedad reduce la fricción interna entre partículas y provoca pérdida de estabilidad (Vargas, 2019).

Asimismo, óptimo contenido de humedad (OCH) y la máxima densidad seca (MDS) se determinan mediante ensayos de compactación como el Proctor estándar (ASTM D698). La OCH es el óptimo contenido de humedad con el cual se logra la máxima densidad del suelo bajo una energía de compactación específica, mientras que la MDS es el valor más alto de densidad seca alcanzable en esas condiciones (MTC, 2020). Estos parámetros son clave en el diseño de la estructura de un pavimento, ya que un suelo bien compactado y con humedad controlada presenta mayor capacidad portante y menor susceptibilidad a deformaciones.

### 3.2.7 Ensayo de contenido de humedad (%)

El contenido de humedad de un suelo es la relación entre la masa de agua presente en una muestra y la masa de sus sólidos secos, expresada en porcentaje. Este parámetro es fundamental para el control de calidad de materiales de subrasante, ya que influye directamente en su densidad, resistencia y comportamiento volumétrico (Das & Sobhan, 2018).

En ingeniería vial, conocer el contenido de humedad es esencial para definir las condiciones de compactación y para evaluar el estado de un suelo en servicio. Un exceso de humedad puede provocar pérdida de resistencia y aumento de deformaciones, mientras que una humedad insuficiente dificulta la compactación óptima (Holtz et al., 2011).

El ensayo de contenido de humedad se realiza generalmente siguiendo la norma ASTM D2216, que consiste en pesar una muestra húmeda, secarla en un horno a  $105 \pm 5$  °C hasta masa constante y volver a pesarla para calcular el porcentaje de agua. La ecuación utilizada es:

$$w(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Donde:

$w$  = contenido de humedad (%)

$M_h$  = masa de la muestra húmeda (g)

$M_s$  = masa de la muestra seca (g)

En el caso de la estabilización de la subrasante con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , el control del contenido de humedad es especialmente importante, ya que el yeso tiene una ligera capacidad de absorción y retención de agua que puede modificar la humedad óptima y, en consecuencia, la densidad seca máxima del suelo (Bhatia & Solanki, 2021). Un control

preciso de este parámetro garantiza que la mezcla suelo–aditivo alcance las condiciones ideales de compactación, optimizando así sus propiedades físico-mecánicas.

### ***3.2.8 Límites de Atterberg***

Los límites de Atterberg son parámetros que definen los estados de consistencia de un suelo fino en función de su contenido de humedad. Estos valores permiten determinar el rango de humedad en el cual un suelo pasa de un estado sólido a semisólido, plástico y líquido, siendo fundamentales para su clasificación y para predecir su comportamiento frente a variaciones de humedad (Das & Sobhan, 2018).

El ensayo, regulado por la norma ASTM D4318, establece tres parámetros principales:

Límite líquido (LL): contenido de humedad a partir del cual el suelo cambia del estado plástico al estado líquido.

Límite plástico (LP): contenido de humedad a partir del cual el suelo pasa de un estado semisólido a plástico.

Índice de plasticidad (IP): diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ( $IP=LL-LP$ ), que indica la amplitud del rango plástico del suelo.

Estos parámetros son relevantes para el diseño y la estabilización de subrasantes, ya que su valor refleja la capacidad de deformación del suelo. Un IP elevado, característico de suelos arcillosos de alta plasticidad (CH), implica mayor susceptibilidad a cambios volumétricos y menor capacidad portante, lo que hace necesaria su estabilización (Holtz et al., 2011).

### ***3.2.9 Propiedades mecánicas de la subrasante***

Las propiedades mecánicas de la subrasante corresponden a su capacidad para resistir esfuerzos y deformaciones bajo la acción de cargas repetitivas, como las generadas por el tránsito vehicular. Estos parámetros determinan la funcionalidad estructural del pavimento

y la vida útil de la vía, por lo que su evaluación es fundamental en el diseño y mantenimiento de carreteras (Holtz et al., 2011).

Una de las propiedades mecánicas más relevantes es la capacidad portante, la cual se cuantifica generalmente mediante el ensayo CBR (California Bearing Ratio). Este índice expresa la resistencia a la penetración del suelo en relación con un material patrón de grava triturada. Valores bajos de CBR indican suelos con escasa resistencia que requieren estabilización para cumplir los criterios de diseño (Das & Sobhan, 2018).

Otra propiedad importante es la resistencia al corte, que refleja la capacidad del suelo para soportar esfuerzos tangenciales sin experimentar deslizamiento o colapso. Esta resistencia depende de la cohesión entre partículas, el ángulo de fricción interna y el grado de compactación, y se evalúa comúnmente mediante ensayos triaxiales o de corte directo (Vargas, 2019).

Asimismo, el módulo resiliente es un parámetro mecánico utilizado en el diseño mecanicista de pavimentos, que mide la capacidad del suelo para recuperar su forma después de ser sometido a una carga repetida. Un módulo resiliente elevado está asociado con una mayor rigidez y mejor distribución de cargas hacia capas inferiores (MTC, 2020).

La estabilización química con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  puede mejorar estas propiedades al inducir reacciones de floculación y cementación que aumentan la densidad, reducen la plasticidad y fortalecen la estructura interna del suelo. Investigaciones han reportado incrementos del CBR superiores al 50 % y mejoras significativas en la resistencia al corte en suelos arcillosos tratados con yeso, lo que se traduce en una mayor capacidad portante y estabilidad frente a cargas cíclicas (Bhatia & Solanki, 2021)

### 3.2.10 Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

El California Bearing Ratio (CBR) es un ensayo de laboratorio que evalúa la capacidad portante de un suelo o material granular, comparando su resistencia a la penetración con la de un material patrón de grava triturada de alta calidad. El valor del CBR se expresa como un porcentaje, y constituye uno de los parámetros más utilizados para el diseño estructural de pavimentos, especialmente en capas de subrasante (Das & Sobhan, 2018).

Este ensayo, regulado por la norma ASTM D1883 y el Manual de Carreteras del MTC, consiste en compactar una muestra de suelo en un molde cilíndrico bajo una energía de compactación especificada (Proctor estándar o modificado) y luego someterla a penetración mediante un pistón estándar de 50 mm de diámetro, registrando la carga necesaria para alcanzar penetraciones de 2,5 mm y 5,0 mm. El valor de CBR se calcula con la siguiente fórmula:

$$CBR(\%) = \frac{\text{Carga unitaria del suelo (kg/cm}^2\text{)}}{\text{Carga unitaria del material patrón (kg/cm}^2\text{)}} \times 100$$

Donde las cargas unitarias del material patrón son 70 kg/cm<sup>2</sup> para una penetración de 2,5 mm y 105 kg/cm<sup>2</sup> para una penetración de 5,0 mm (ASTM, 2021).

Los valores típicos de CBR para subrasantes varían de menos del 3 % en suelos arcillosos de baja calidad hasta más del 15 % en suelos granulares bien compactados. El Manual de Carreteras del MTC (2020) establece que para vías de bajo volumen de tránsito la subrasante debe tener un CBR mínimo de 6 %, mientras que para carreteras principales este valor puede aumentar a 8–10 %.

En la estabilización con CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, diversos estudios han reportado incrementos significativos del CBR debido a la mejora de la compactación y la formación de enlaces cementantes entre partículas. Por ejemplo, Aravindhana et al. (2024) observaron incrementos

del CBR superiores al 50 % en suelos arcillosos tratados con yeso en porcentajes de 4–8 %, mientras que García y Ramos (2020) documentaron mejoras que permitieron que subrasantes de la sierra sur del Perú alcanzaran los valores exigidos por el MTC.

### 3.3 Definición de términos

**ASTM:** Corresponde a las siglas de American Society for Testing and Materials, actualmente conocida como ASTM International, una organización internacional que desarrolla y publica normas técnicas voluntarias aplicables a una amplia variedad de materiales, productos, sistemas y servicios. Estas normas establecen métodos de ensayo, especificaciones y guías que garantizan la calidad, seguridad y desempeño de los materiales y procesos utilizados en la industria y la ingeniería, siendo ampliamente empleadas en el sector de la construcción, la ingeniería civil, la minería y otras áreas técnicas a nivel mundial (ASTM International, 2023).

**Subrasante:** Es la capa natural o mejorada de suelo sobre la cual se apoya la estructura del pavimento y que actúa como su base de soporte principal, transmitiendo las cargas del tránsito hacia las capas inferiores del terreno. Sus propiedades físico mecánicas, como la capacidad de soporte, la resistencia al corte, la compactación y la estabilidad frente a la humedad, son determinantes para el desempeño y la durabilidad de la vía. Una subrasante de baja calidad puede provocar deformaciones, hundimientos y fallas prematuras en el pavimento, por lo que es fundamental evaluarla y, de ser necesario, mejorarla mediante técnicas de estabilización mecánica o química para cumplir con los estándares establecidos en las normativas viales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2018).

**Sulfato de calcio:** Es un compuesto químico inorgánico cuya fórmula es  $\text{CaSO}_4$ , que puede encontrarse en distintas formas hidratadas como el sulfato de calcio dihidratado  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  conocido comúnmente como yeso. Se caracteriza por su amplia disponibilidad,

bajo costo y propiedades que lo hacen útil como material estabilizador de suelos en ingeniería civil. Cuando se incorpora al suelo, puede mejorar sus propiedades físico mecánicas, incrementando la resistencia, optimizando la compactación y reduciendo la plasticidad, lo que contribuye a aumentar la capacidad portante de la subrasante. Además, su reacción con otros aditivos como el cemento puede potenciar su efectividad, siendo empleado en proyectos viales para prolongar la vida útil de caminos y reducir costos de mantenimiento (Neville & Brooks, 2010).

**Suelo arcilloso:** Es un tipo de suelo compuesto principalmente por partículas de arcilla, las cuales son de tamaño muy fino, menor a 0,002 mm, y presentan una gran superficie específica que les confiere alta capacidad de retener agua y elevada plasticidad. Este tipo de suelo se caracteriza por su baja permeabilidad, su tendencia a expandirse al absorber humedad y a contraerse al secarse, lo que puede provocar cambios volumétricos significativos y afectar la estabilidad de las estructuras construidas sobre él. En ingeniería civil, los suelos arcillosos suelen presentar una capacidad portante limitada y un comportamiento sensible a las variaciones de humedad, por lo que con frecuencia requieren tratamientos o técnicas de estabilización mecánica o química para mejorar sus propiedades y garantizar un adecuado desempeño estructural en obras de infraestructura (Das, 2016)

**Succión en el suelo:** Es la presión negativa que se desarrolla en el agua contenida en los poros del suelo debido a la acción combinada de las fuerzas capilares y osmóticas, lo que provoca que el agua se mantenga retenida incluso en ausencia de saturación completa. Este fenómeno es característico de los suelos no saturados y se expresa en unidades de presión, generalmente en kiloPascuales (kPa). La succión influye directamente en propiedades como la resistencia al corte, la compresibilidad y la permeabilidad del suelo, afectando su comportamiento mecánico frente a cargas y cambios de humedad. En ingeniería geotécnica, la medición y control de la succión son fundamentales para el diseño y mantenimiento de

obras civiles, ya que cambios bruscos en su valor pueden provocar asentamientos, pérdida de capacidad portante o inestabilidad en taludes y estructuras (Fredlund & Rahardjo, 2023).

**Compactación:** Es el proceso mecánico mediante el cual se incrementa la densidad de un suelo reduciendo el volumen de vacíos que contiene, generalmente por la aplicación de cargas estáticas o dinámicas, con el objetivo de mejorar sus propiedades físico mecánicas. Este procedimiento incrementa la capacidad portante, disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia al corte del suelo, lo que contribuye a garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras que se construyan sobre él. En ingeniería civil, la compactación se realiza siguiendo parámetros como la humedad óptima y la densidad seca máxima, determinados mediante ensayos normalizados como el Proctor estándar o modificado, que permiten obtener un suelo con el grado de compactación requerido según el tipo de obra y las especificaciones técnicas establecidas (Holtz et al., 2011).

**Densidad:** Es la relación entre la masa de un material y el volumen que ocupa, expresada normalmente en unidades de gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ) o kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). En el ámbito de la ingeniería civil y geotecnia, la densidad del suelo constituye un parámetro fundamental para evaluar su compacidad, resistencia y comportamiento bajo cargas. Existen diferentes tipos de densidad aplicables al suelo, como la densidad húmeda, la densidad seca y la densidad aparente, cada una determinada en función de la presencia de agua y del estado del material. La determinación precisa de la densidad permite establecer parámetros de control de calidad en procesos como la compactación, así como estimar la capacidad portante y el grado de consolidación de un terreno (Lambe & Whitman, 2018).

**Índice de plasticidad:** Es un parámetro geotécnico que representa el rango de contenido de humedad en el cual un suelo presenta comportamiento plástico, calculado como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico obtenidos mediante ensayos

normalizados. Este índice es fundamental para clasificar suelos finos y determinar su capacidad de deformarse sin fracturarse cuando se les aplica una carga. Un valor alto de índice de plasticidad indica que el suelo tiene una gran cantidad de partículas finas, como arcillas activas, lo que se traduce en elevada compresibilidad y sensibilidad a cambios de humedad, mientras que un valor bajo corresponde a suelos menos cohesivos y más estables. En ingeniería civil, este parámetro es clave para el diseño de cimentaciones, pavimentos y obras de tierra, ya que influye en la resistencia, la expansividad y el comportamiento volumétrico del material (Das, 2016)

## **IV. Metodología**

### **4.1 Tipo y nivel de investigación**

#### **4.1.1 Tipo de Investigación**

La presente investigación se enmarca dentro del tipo aplicada, conforme a la clasificación propuesta por Hernández Sampieri, (2014). “Este tipo de estudio tiene como finalidad generar conocimientos orientados a la acción práctica, mediante la ejecución de intervenciones específicas, el diseño de soluciones o la introducción de mejoras en una situación concreta. Su carácter esencialmente utilitario se fundamenta en la búsqueda de respuestas a problemáticas precisas y bien delimitadas, aportando información y herramientas metodológicas que facilitan la toma de decisiones y la implementación de cambios efectivos”. “De este modo, la investigación aplicada se distingue por garantizar que sus resultados posean una aplicabilidad inmediata y un impacto tangible dentro del contexto en el que se desarrolla” (p. 7).

#### **4.1.2 Nivel de investigación**

El nivel de la investigación se caracteriza como explicativo y correlacional, de acuerdo con la clasificación propuesta por Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014). “En este tipo de estudio se busca profundizar en las causas que originan determinados acontecimientos de naturaleza física o social, examinando las condiciones en que se producen y los fundamentos por los cuales dos o más variables pueden encontrarse asociadas. De este modo, se pretende construir una explicación coherente que articule lógicamente los componentes del fenómeno, lo que facilita la interpretación de su origen y evolución, así como la comprensión de las interacciones que lo definen dentro de un contexto específico” (p. 92).

### **4.1.3 Diseño de la Investigación**

La presente tesis adopta un diseño de tipo experimental, de acuerdo con lo señalado por Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014). En este enfoque, el investigador realiza una manipulación intencional de una o más variables independientes, asumidas como causas, con el propósito de analizar los efectos que dicha intervención genera sobre una o más variables dependientes. Este procedimiento se desarrolla en un contexto controlado, lo que permite supervisar de manera rigurosa las condiciones en que ocurre el fenómeno y asegurar que los resultados obtenidos se deban exclusivamente a la manipulación efectuada sobre las variables consideradas en el estudio” (p. 147).

### **4.1.4 Enfoque de la Investigación**

Es cuantitativo, se refiere al análisis cuantitativo del análisis de los efectos de la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en laboratorio, en la cual se utiliza el ensayo de capacidad de soporte de suelo (CBR) para dar aplicabilidad en la subrasante vial.

## **4.2 Ámbito Temporal y espacial**

La presente tesis se desarrolló entre el periodo del año 2024 Camino vecinal Aymas Osnomocco desde el km 0+000 al km 1+000, de la ciudad de Abancay.

## **4.3 Población y muestra**

### **4.3.1 Población**

“La población se define como el conjunto completo de elementos o individuos que comparten una característica específica y son objeto de estudio. Este conjunto establece el marco general del cual se busca obtener conclusiones y generalizaciones; sin embargo, debido a limitaciones de tiempo y recursos, es común seleccionar una muestra representativa para realizar observaciones y recopilar datos” (Sampieri et al., 2018).

La población para esta investigación se considera el camino vecinal Aymas Osnomocco desde el km 0+000 al km 1+000, de la ciudad de Abancay – Apurímac.

#### **4.3.2 Muestra**

Una muestra de estudio se define como un grupo reducido y específico que forma parte de una población más amplia y que es seleccionado de forma estratégica para obtener información representativa del Km 0+000 al Km 1+000 de la ciudad de Abancay-Aymas Osnomocco, de manera que los datos recogidos de este subconjunto permitan realizar inferencias o estimaciones sobre las características y comportamientos generales de toda la población, asegurando que el análisis realizado mantenga validez y pueda aplicarse a la totalidad del conjunto.(Borja, 2016, p. 30).

Conforme a lo establecido en el RNE CE.010 Pavimentos Urbanos (2018), se considera técnicamente pertinente contar con un mínimo de tres puntos de investigación que sirvan de referencia para obtener un diagnóstico confiable de las condiciones del terreno. “En este estudio se definieron tres puntos de muestreo ubicados en el camino vecinal Aymas Osnomocco, entre el km 0+000 y el km 1+000, en la ciudad de Abancay, identificados como C-01, C-02 y C-03. Dichos puntos fueron seleccionados en zonas estratégicamente determinadas, con el propósito de asegurar una representación precisa de las propiedades y condiciones del suelo evaluado, garantizando así la validez de los resultados obtenidos”.

#### **4.4 Instrumentos**

“Los instrumentos que utiliza el investigador son elementos creados para recopilar de manera estructurada y confiable los datos o la información relacionada con las variables que forman parte del estudio, estos medios permiten obtener registros claros y precisos que representen de forma adecuada las características del fenómeno analizado, facilitando así el desarrollo de un análisis posterior que responda a los objetivos y requerimientos establecidos en la investigación” (Hernández & Baptista, 2014).

En la presente tesis, el procedimiento de recolección de datos contempló el uso de formatos específicos para la ejecución de ensayos de laboratorio, complementados con herramientas informáticas como Microsoft Excel y Microsoft Word, que facilitaron la organización, procesamiento y sistematización eficiente de la información obtenida. Asimismo, se llevó a cabo un registro fotográfico detallado de cada etapa del trabajo, con el propósito de verificar la correcta ejecución de las actividades y disponer de un respaldo visual del desarrollo del proceso. “Durante las pruebas de laboratorio se emplearon instrumentos y formatos propios de los ensayos de mecánica de suelos, los cuales se describen a continuación, garantizando rigor técnico y trazabilidad en la generación de los datos.”

**Tabla 2**

*Instrumentos utilizados para los ensayos de laboratorio*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>NORMA</b>
Análisis granulométrico de suelos por tamizado	MTC E 107
Determinación del contenido de humedad de un suelo	MTC E 108
Determinación del límite líquido de los suelos	MTC E 110
Determinación del límite plástico de los suelos	MTC E 111
Compactación de suelos utilizando una energía modificada (Proctor)	MTC E 115
CBR de suelos (laboratorio)	MTC E 132

*Nota.* En la tabla 2, se muestra los instrumentos y normas empleadas en los ensayos de laboratorio. (MTC, 2016)

#### **4.5 Procedimientos**

##### Recolección de información

“La recopilación de datos se efectuó en las calicatas a cielo abierto, estratégicamente ubicadas a lo largo del camino vecinal Aymas–Osnomocco, específicamente entre el km 0+000 y el km 1+000, de donde se extrajeron muestras representativas de cada punto de

exploración. Posteriormente, dichas muestras fueron trasladadas al laboratorio de suelos para la realización de los ensayos correspondientes, siguiendo rigurosamente los procedimientos establecidos en las normas y manuales técnicos vigentes. En este proceso se aplicaron los lineamientos de la Norma E.050 “Suelos y Cimentaciones” del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), la Norma C.010 “Pavimentos Urbanos” del RNE, el Manual de Ensayo de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, así como las especificaciones contempladas en la Norma Técnica Peruana (NTP). Esta secuencia metodológica permitió garantizar la validez, confiabilidad y trazabilidad de los resultados obtenidos, asegurando una evaluación integral y técnicamente fundamentada del comportamiento del suelo estudiado

#### **4.6 Análisis de Datos**

El análisis de datos se realizará siguiendo un enfoque cuantitativo, empleando herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales para evaluar la variación de las propiedades físico-mecánicas de la subrasante antes y después de la incorporación del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). El procedimiento contempla las siguientes etapas:

##### **Organización y codificación de la información**

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio incluyendo la máxima densidad seca (MDS), el óptimo contenido de humedad (OCH), la capacidad de soporte del suelo (CBR) y el índice de plasticidad (IP) serán organizados y sistematizados en una base de datos estructurada mediante hojas de cálculo. Cada una de las muestras será clasificada mediante un código específico que permita reconocer su procedencia, el tipo de tratamiento aplicado y el porcentaje de aditivo incorporado. Asimismo, se elaborarán tablas y representaciones gráficas comparativas con el propósito de identificar y analizar las variaciones existentes entre el grupo de control (sin aditivo) y los grupos intervenidos con

distintos porcentajes de sulfato de calcio, garantizando así una interpretación rigurosa y una comprensión integral de los resultados experimentales.

### **Pruebas de normalidad**

Se aplicará la prueba de Shapiro–Wilk para determinar si los datos presentan una distribución normal, lo que permitirá seleccionar el método estadístico más adecuado para las comparaciones.

### **Cálculo del porcentaje de mejora**

Se determinará el porcentaje de incremento en cada propiedad físico mecánica en relación con la condición inicial (sin estabilización), permitiendo cuantificar el efecto del sulfato de calcio.

### **Correlación entre variables**

Se aplicará el coeficiente de correlación de Pearson o Spearman, según corresponda, para identificar la relación entre las propiedades analizadas (entre índice de plasticidad y CBR).

### **Interpretación de resultados**

Los hallazgos serán contrastados con estudios previos y con los estándares establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) para subrasantes en caminos vecinales.

Se elaborarán conclusiones que indiquen la viabilidad técnica y económica del uso del sulfato de calcio como estabilizador.

Interpretación técnica: Finalmente, los resultados serán interpretados desde el punto de vista de la ingeniería civil, relacionando los efectos observados con la mejora en el comportamiento de la subrasante para fines de tránsito vehicular

#### 4.7 Consideraciones Éticas

El desarrollo de la presente investigación se realizará bajo principios de integridad científica, respeto por el entorno y responsabilidad social, las normas internacionales de buenas prácticas de investigación y las especificaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC, 2020). Se garantizará que todas las actividades de campo, como la recolección de muestras de suelo en el tramo Aymas Osnomocco, se efectúen minimizando el impacto ambiental y manteniendo una comunicación transparente con las autoridades y comunidades locales sobre los objetivos y alcances del estudio.

En el aspecto técnico, los ensayos de laboratorio contenido de humedad, límites de Atterberg, Proctor estándar y CBR se ejecutarán conforme a las normas ASTM y a lo establecido en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC, asegurando precisión y reproducibilidad en los resultados. El manejo del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se llevará a cabo siguiendo las fichas de seguridad del producto y aplicando las medidas de protección personal necesarias, priorizando la salud y seguridad de los investigadores y técnicos participantes.

Asimismo, se garantizará la originalidad del contenido mediante la redacción propia y la citación correcta de todas las fuentes utilizadas, siguiendo el formato APA (7.ª edición). Se evitará cualquier forma de plagio mediante el uso de herramientas de verificación de similitud, y se mantendrá un registro claro de los procedimientos, datos y resultados para asegurar su trazabilidad y reproducibilidad. De este modo, la investigación se conducirá con transparencia, responsabilidad y compromiso ético, contribuyendo al avance del conocimiento técnico y al desarrollo sostenible de la infraestructura vial rural.

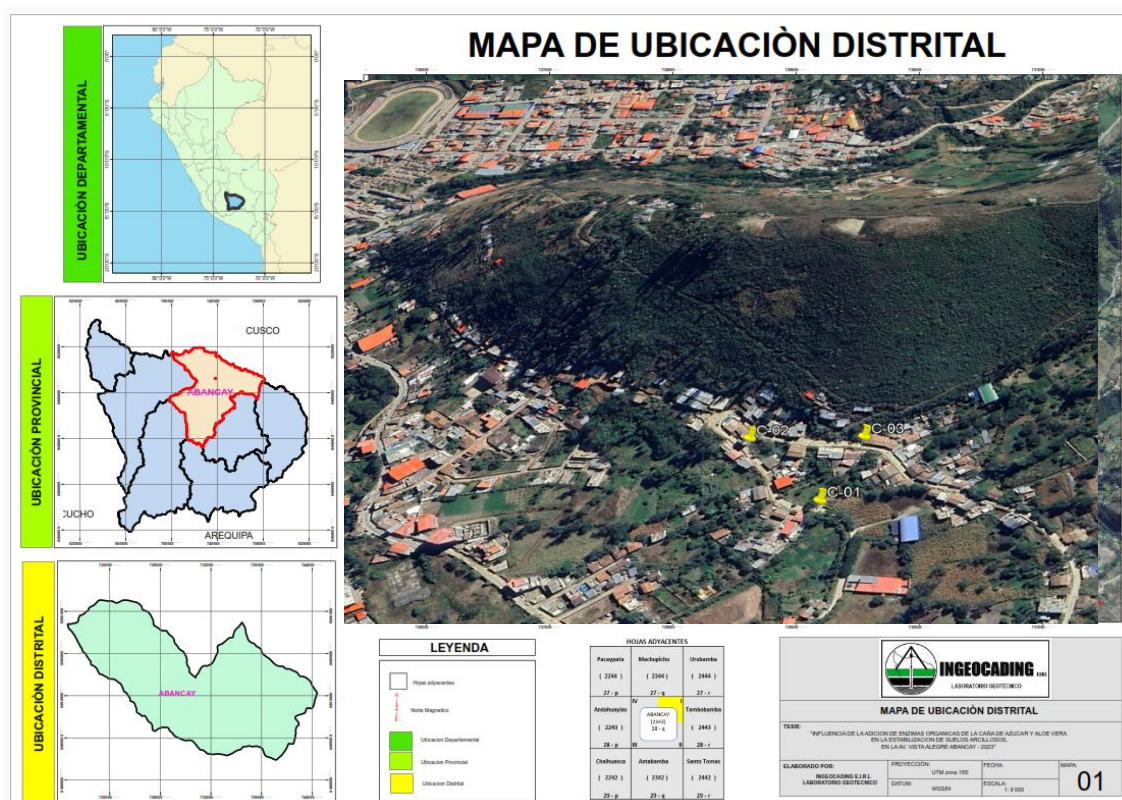
## V. Resultados y Discusión

### 5.1 Descripción de los trabajos de campo

“Para la toma de muestras primeramente se inició con el reconocimiento del terreno e identificación de camino vecinal Aymas Osnomocco, de esta manera se tomaron muestras alteradas representativas cada 300 m en una vía de 1000 m de longitud, el cual viene a ser 3 muestras (calicatas) a una profundidad mínima de 1.50 m para realizar todos sus respectivos ensayos todo ello con la finalidad de conocer las propiedades mecánicas de capacidad de carga (CBR) de la subrasante”, ubicando convenientemente en el terreno y equidistantes como se muestra a continuación:

#### Figura 1

Ubicación referencial de las calicatas C-01, C-02 y la C-03



Nota. Se visualiza la ubicación de las calicatas en el terreno.

### 5.1.1 Registro de la Excavación de Calicatas

“Para el desarrollo de la investigación se realizaron tres calicatas, es decir, excavaciones manuales a cielo abierto ejecutadas con herramientas convencionales como pico, pala y barreta. Estas excavaciones fueron estratégicamente ubicadas a lo largo del tramo analizado, alcanzando una profundidad aproximada de 1,50 metros. “Su propósito central fue identificar las propiedades de la subrasante y construir un perfil estratigráfico que permitiera comprender con mayor precisión la estructura interna del suelo y la disposición de sus distintas capas. Asimismo, se elaboró un cuadro con la ubicación georreferenciada en coordenadas UTM (Zona 18L) de las tres calicatas distribuidas en el camino vecinal Aymas–Osnomocco, entre el km 0+000 y el km 1+000, en la ciudad de Abancay – Apurímac. Este tramo posee relevancia territorial, pues funciona como una vía alterna de acceso y desvío hacia la ciudad de Abancay, lo que refuerza la importancia de caracterizar adecuadamente sus condiciones geotécnicas”.

**Tabla 3**

*Coordenadas UTM de las calicatas C-01, C-02 y la C-03*

<b>CALICATA</b>	<b>TRAMO</b>	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>	<b>CAPA</b>
C-01	Aymas	731053	8490991	Subrasante
C-02	Aymas	730982	8491050	Subrasante
C-03	Aymas	731072	8491056	Subrasante

*Nota.* Se visualiza las coordenadas Este y Norte de las calicatas.

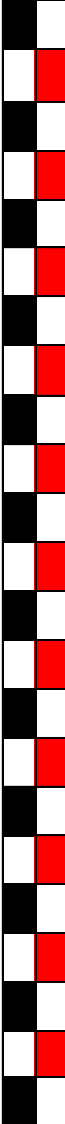

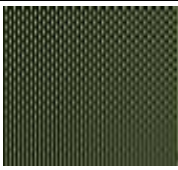
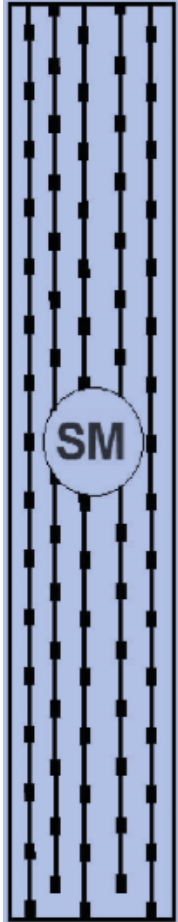

**Tabla 4***Clasificación del suelo (SUCS y ASTHO)*

<b>REGISTRO DE EXPLORACIÓN</b>				
<b>CALICATA</b>	Estratos	Capa	Caracterización de los estratos	
			Composición – Clasificación (SUCS y ASTHO)	Observación.
C - 01	E - 02	Subrasante	SM / A-2-4 (0)	Arena limosa arcillosa
C - 02	E - 02	Subrasante	CL / A-6 (5)	Arcillosa
C - 03	E - 02	Subrasante	GM / A-4-b (0)	Grava limosa con arena

*Nota.* Se visualiza la clasificación del suelo por SUCS Y ASTHO

**Figura 2**

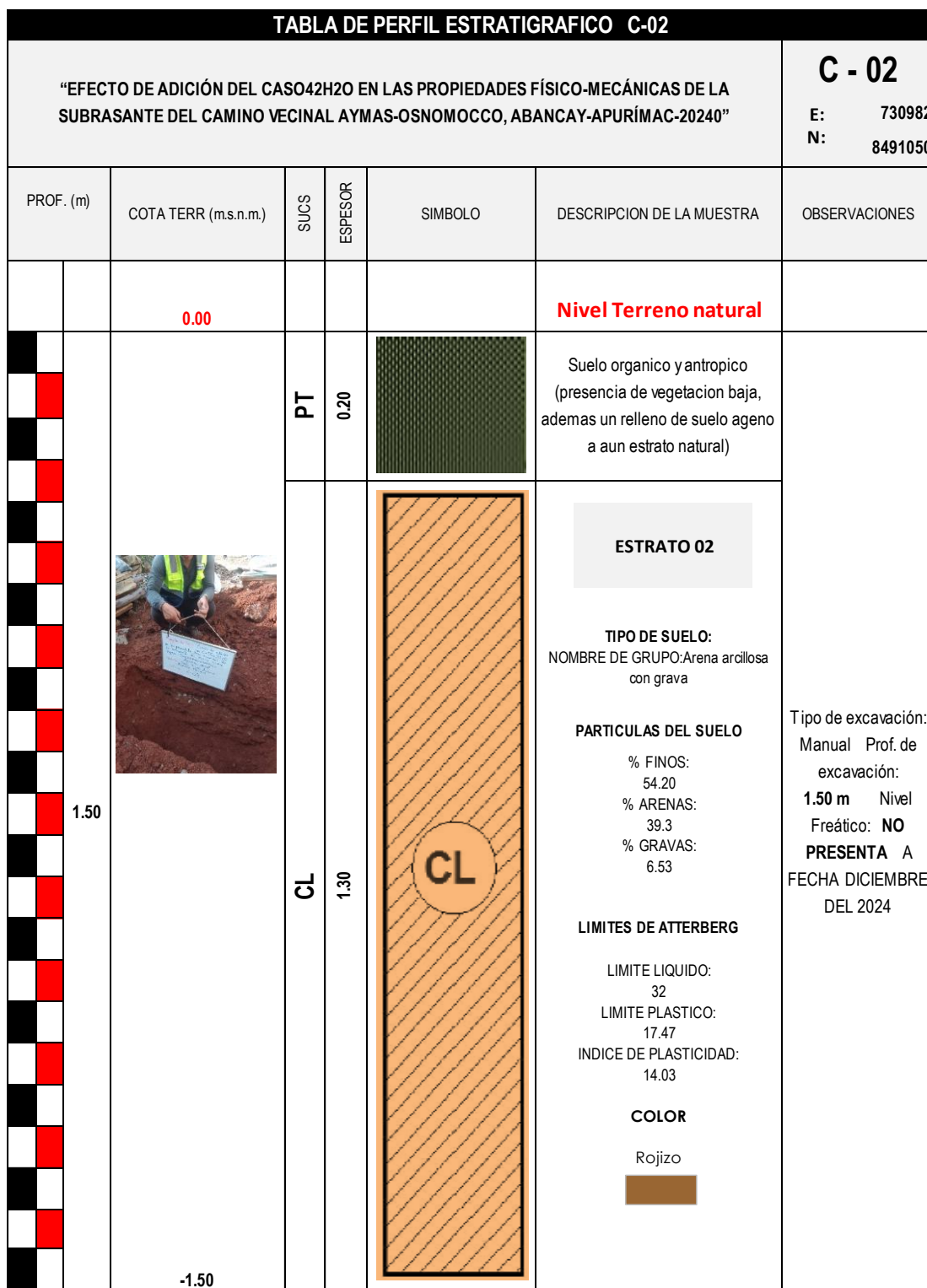
Ubicación referencial y perfil estratigráfico de la Calicata C - 01

TABLA DE PERFIL ESTRATIGRAFICO C-01						
"EFECTO DE ADICIÓN DEL CASO42H2O EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE DEL CAMINO VECINAL AYMAS-OSNOMOCCO, ABANCAY-APURÍMAC-20240"						C - 01
						E: 731053 N: 8490991
PROF. (m)	COTA TERR (m.s.n.m.)	SUCS	ESPESOR	SIMBOLO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	OBSERVACIONES
	0.00				<b>Nivel Terreno natural</b>	
		PT	0.20		Suelo organico y antropico (presencia de vegetacion baja, ademas un relleno de suelo ageno a aun estrato natural)	Tipo de excavación: Manual Prof. de excavación: <b>1.50 m</b> Nivel Freático: <b>NO</b> <b>PRESENTA A</b> FECHA DICIEMBRE DEL 2024
		SM	1.30		<b>ESTRATO 02</b>  <b>TIPO DE SUELO:</b> NOMBRE DE GRUPO: Grava limosa con arena  <b>PARTICULAS DEL SUELO</b> % FINOS: 29.70 % ARENAS: 41.7 % GRAVAS: 28.56  <b>LIMITES DE ATTERBERG</b> LIMITE LIQUIDO: 29 LIMITE PLASTICO: 22.62 INDICE DE PLASTICIDAD: 5.88  <b>COLOR</b> Maron 	
	-1.50					

Nota. En la Figura 2 se muestra el perfil estratigráfico de la C – 01 y recolección de muestras

**Figura 3**

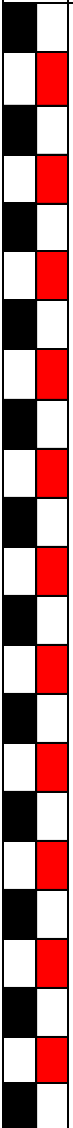

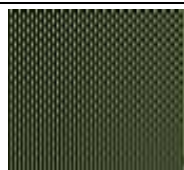


*Ubicación referencial y perfil estratigráfico de la Calicata C - 02*



*Nota.* En la Figura 3 se muestra el perfil estratigráfico de la C – 02 y recolección de muestras

Figura 4

Ubicación referencial y perfil estratigráfico de la Calicata C - 03

TABLA DE PERFIL ESTRATIGRAFICO C-03						
"EFECTO DE ADICIÓN DEL CASO42H2O EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE DEL CAMINO VECINAL AYMAS-OSNOMOCCO, ABANCAY-APURÍMAC-20240"						<b>C - 03</b> E: 731072 N: 8491056
PROF. (m)	COTA TERR (m.s.n.m.)	SUCS	ESPESOR	SIMBOLO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	OBSERVACIONES
	0.00				<b>Nivel Terreno natural</b>	
		PT	0.20		Suelo organico y antropico (presencia de vegetación baja, además un relleno de suelo ageno a aun estrato natural)	Tipo de excavación: Manual Prof. de excavación: <b>1.50 m</b> Nivel Freático: <b>NO</b> <b>PRESENTA A</b> FECHA DICIEMBRE DEL 2024
		GM	1.30		<b>ESTRATO 02</b>  <b>TIPO DE SUELO:</b> NOMBRE DE GRUPO: Grava arcillosa con arena  <b>PARTICULAS DEL SUELO</b> % FINOS: 18.60 % ARENAS: 36.2 % GRAVAS: 45.22  <b>LIMITES DE ATTERBERG</b> LIMITE LIQUIDO: 26 LIMITE PLASTICO: N.P. INDICE DE PLASTICIDAD: N.P.  <b>COLOR</b> gris 	
	-1.50					

Nota. En la Figura 4 se muestra el perfil estratigráfico de la C – 03 y recolección de muestras

## 5.2 Resultados de los Ensayos

### 5.2.1 Ensayos a las muestras del grupo Patrón - Granulometría

El análisis granulométrico realizado sobre las muestras obtenidas en los distintos puntos de muestreo proporcionó información detallada acerca del porcentaje de material que atraviesa cada tamiz y del que queda retenido en ellos, cumpliendo rigurosamente con las disposiciones establecidas en la Norma Técnica Peruana 339.128. Este procedimiento permitió obtener una caracterización precisa del suelo respecto a su distribución de tamaños de partículas, información que resulta fundamental tanto para su correcta clasificación como para su selección y uso en proyectos de ingeniería. Además, dicho análisis constituye un insumo indispensable para prever el comportamiento del suelo bajo diversas condiciones de carga y servicio, fortaleciendo así la evaluación integral de su desempeño geotécnico.

**Tabla 5**

*Análisis granulométrico de la muestra C – 01*

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (gr.)</b>	<b>Peso Corregido (gr.)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulado Ret.</b>	<b>% Pasa</b>
2''	50.800	305.80	305.80	9.73	9.73	100.00
1 1/2''	38.100	180.10	180.10	5.73	15.46	94.27
1''	25.400	250.00	250.00	7.95	23.41	86.32
3/4''	19.050	73.20	73.20	2.33	25.74	83.99
1/2''	12.700	304.10	304.10	9.67	35.41	74.32
3/8''	9.525	124.00	124.00	3.94	39.35	70.31
1/4''	6.350	0.00	0.00	0.00	39.35	70.31
Nº 4	4.750	265.00	265.00	8.43	47.78	61.88
Nº 10	2.000	261.90	261.90	8.33	56.11	53.55
Nº 20	0.850	209.80	209.80	6.66	62.77	46.89
Nº 40	0.425	134.82	134.82	4.29	67.06	42.61
Nº 60	0.300	92.13	92.13	2.93	69.99	39.68
Nº 100	0.149	93.01	93.01	2.97	72.96	36.71
Nº 200	0.075	115.06	115.06	3.66	76.62	33.05
<b>Fondo (cazuela)</b>	—	9.80	9.80	23.32	100.00	0.00

*Nota.* La Tabla 10 presenta el análisis granulométrico correspondiente a la muestra patrón C-01.

La Tabla 5 expone los resultados del análisis granulométrico de la muestra C-01, en el cual se verifica una distribución gradual del material a través de los distintos tamaños de tamiz, siguiendo rigurosamente los lineamientos establecidos en la NTP 339.128. Se constata que el 100 % del material atraviesa el tamiz de 2", lo que confirma la ausencia de partículas de gran tamaño. A partir de este punto, el porcentaje de material que pasa disminuye progresivamente hasta registrar un 33.05 % en el tamiz N° 200 (0.075 mm), evidenciando la presencia significativa de partículas finas en la composición del suelo.

Los resultados permiten inferir que el material posee un comportamiento propio de un suelo bien gradado, caracterizado por una combinación equilibrada de fracciones gruesas y finas, condición que favorece procesos de compactación eficientes y que repercute positivamente en su desempeño mecánico. Asimismo, el hecho de que el 61.88 % del material pase por el tamiz N° 4 sugiere una proporción armónica entre grava y arena, lo cual aporta a la versatilidad del suelo para su aplicación en obras de ingeniería.

**Tabla 6**

*Análisis granulométrico de la muestra C – 02*

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Peso corregido (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
2"	50.800	297.64	297.64	9.96	9.96	100.00
1 1/2"	38.100	146.32	146.32	4.90	14.86	95.10
1"	25.400	273.38	273.38	9.15	24.01	85.96
3/4"	19.050	68.56	68.56	2.29	26.30	83.66
1/2"	12.700	370.12	370.12	12.38	38.68	71.28
3/8"	9.525	98.93	98.93	3.31	41.99	67.97
1/4"	6.350	0.00	0.00	0.00	41.99	67.97
N° 4	4.750	281.80	281.80	9.43	51.42	58.54
N° 10	2.000	198.74	198.74	6.65	58.07	51.90
N° 20	0.850	230.31	230.31	7.71	65.78	44.19
N° 40	0.425	110.42	110.42	3.69	69.47	40.50
N° 60	0.300	63.70	63.70	2.13	71.60	38.36
N° 100	0.149	98.30	98.30	3.29	74.89	35.08

N° 200	0.075	43.42	43.42	1.45	76.34	33.62
<b>Fondo</b>	—	6.51	6.51	23.67	100.00	0.00

*Nota.* En la Tabla 6 se presenta el análisis granulométrico correspondiente a la muestra patrón C-02.

La Tabla 6 recoge los resultados del análisis granulométrico aplicado a la muestra C-02, evidenciando una distribución gradual de las partículas en función de los tamaños de tamiz establecidos por la NTP 339.128. Se identifica que el 100 % del material atraviesa el tamiz de 2", lo cual confirma la ausencia de elementos de gran dimensión. A partir de este punto, el porcentaje de material retenido incrementa de manera progresiva hasta registrar un 33.62 % de paso en el tamiz N° 200 (0.075 mm), reflejando una presencia significativa de partículas finas en la composición del suelo. Asimismo, el tamiz N° 4 muestra un 58.54 % de material que pasa, indicador de un contenido moderado de grava y de una proporción relevante de arenas y finos, lo que revela un material de naturaleza heterogénea. Esta configuración granulométrica sugiere que el suelo posee un potencial adecuado para procesos de estabilización; no obstante, podría requerir un control específico para minimizar riesgos asociados a la plasticidad y al comportamiento hidráulico. En conjunto, la muestra C-02 evidencia una gradación relativamente uniforme, condición que aporta información clave para comprender su comportamiento geotécnico y su posible aplicación en obras de infraestructura.

**Tabla 7***Análisis granulométrico de la muestra C - 03*

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Peso corregido (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
2"	50.800	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	30.00	30.00	2.65	2.65	97.35
1"	25.400	84.69	84.69	4.48	7.13	92.87
3/4"	19.050	68.56	68.56	3.63	10.76	89.24
1/2"	12.700	370.12	370.12	12.59	23.35	69.65
3/8"	9.525	98.93	98.93	5.24	28.59	64.41
1/4"	6.350	0.00	0.00	0.00	28.59	64.41
N° 4	4.750	198.74	198.74	10.22	38.81	53.89
N° 10	2.000	230.31	230.31	12.19	51.00	41.70
N° 20	0.850	110.42	110.42	5.84	56.84	35.86
N° 40	0.425	98.30	98.30	5.14	61.98	32.22
N° 60	0.300	98.30	98.30	5.00	66.98	27.02
N° 100	0.149	43.42	43.42	2.30	69.28	24.72
N° 200	0.075	46.46	46.46	2.26	71.54	22.26
<b>Fondo</b>	—	6.51	6.51	22.26*	100.00	0.00

*Nota.* En la Tabla 7 se muestra el análisis granulométrico correspondiente a la muestra patrón C-03.

La Tabla 7 reúne los resultados del análisis granulométrico efectuado a la muestra C-03, donde se aprecia una distribución paulatina de las partículas en función de los tamices normados por la NTP 339.128. Se verifica que el 100 % del material atraviesa el tamiz de 2", lo cual confirma la inexistencia de partículas de gran tamaño. A partir de este tamiz, el porcentaje de material que pasa disminuye de forma progresiva hasta alcanzar un 22.26 % en el tamiz N° 200 (0.075 mm), lo que evidencia una menor proporción de finos en comparación con las muestras previamente analizadas. El paso del 53.89 % del material por el tamiz N° 4 indica una mezcla relativamente equilibrada entre grava y arena, aunque con una presencia más reducida de partículas finas. Esta configuración granulométrica sugiere

que el suelo posee una gradación media, lo que potencialmente favorece un proceso de compactación eficiente; sin embargo, la limitada fracción de finos podría afectar su cohesión natural si no se considera un tratamiento complementario. Por ello, resulta fundamental ampliar la caracterización mediante ensayos de límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y de CBR, a fin de determinar su clasificación geotécnica definitiva y evaluar su comportamiento mecánico, tanto en condición de subrasante natural como en escenarios de estabilización.

**Tabla 8**

Clasificación del suelo (SUCS y ASTHO)

<b>REGISTRO DE EXPLORACIÓN</b>				
<b>CALICATA</b>	Caracterización de los estratos			
	Estratos	Capa	Composición – Clasificación (SUCS y ASTHO)	Observación.
C - 01	E – 02	Subrasante	SM / A-2-4 (0)	Arena limosa arcillosa
C - 02	E – 02	Subrasante	CL / A-6 (5)	Arcillosa
C - 03	E – 02	Subrasante	GM / A-4-b (0)	Grava limosa con arena

*Nota.* Se visualiza la clasificación del suelo por SUCS Y ASTHO

La Tabla 8 presenta la clasificación de los suelos realizado en las calicatas del camino vecinal Aymas Osnomocco evidencia la presencia de materiales heterogéneos en la subrasante, donde en la C-01 se identificó un suelo tipo SM según SUCS y A-2-4 en AASHTO, correspondiente a una arena limosa arcillosa de calidad media y comportamiento aceptable aunque sensible a la humedad, en la C-02 se encontró un suelo CL en SUCS y A-4 en AASHTO, que corresponde a una arcilla de baja plasticidad con limitada capacidad portante y alta variabilidad frente a la humedad, constituyéndose en el sector más crítico, mientras que en la C-03 se clasificó como GM en SUCS y A-1-b en AASHTO, es decir una grava limosa con arena de buena calidad y mayor resistencia, lo que representa el material más favorable de la zona, de manera que se concluye que la subrasante presenta sectores con

condiciones variables que justifican la aplicación de procesos de estabilización como la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  para mejorar sus propiedades físico-mecánicas y garantizar un desempeño uniforme y adecuado en la estructura vial.

**Tabla 9**

Los resultados de los ensayos.

CARACTERÍSTICAS	CALICATA	CALICATA	CALICATA
	PATRÓN	PATRÓN	PATRÓN
	C-01	C-02	C-03
Clasificación SUCS	SM	CL	GM
Clasificación AASHTO	A-2-4 ( 0 )	A-6 ( 5 )	A-1-b ( 0 )
Humedad natural (%)	5.9	10.21	8.83
Limite liquido (%)	28.5	31.5	25.5
Limite plástico (%)	16.8	17.47	17.36
Índice de plasticidad	11.7	14.03	8.14
Densidad Máxima Seca ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	1.95	1.78	1.935
Contenido Óptimo de Agua (COA) (%)	9	13	8.8
California Bearing Ratio (CBR) – al 95%	9.2	4.2	11
California Bearing Ratio (CBR) – al 100%	10.8	6.3	17.7

Nota. En la tabla 9 se muestra las propiedades físicas de las calicatas de la muestra patrón

La Tabla 9 muestra los resultados de los ensayos de laboratorio muestran que la subrasante presenta características contrastantes según cada calicata, en la C-01 clasificada como SM/A-2-4 se observa una humedad natural baja (5.90 %) y un índice de plasticidad moderado (5.88 %), con una densidad máxima seca de  $1.93 \text{ g}/\text{cm}^3$  y un CBR de 10.80 % al 100 %, lo que refleja un comportamiento aceptable aunque con sensibilidad a la humedad, en la C-02 clasificada como CL/A-6 destaca un contenido de humedad natural elevado (10.21 %) y un índice de plasticidad alto (13.03 %), factores que explican su baja capacidad portante con un CBR de solo 6.30 % al 100 %, constituyéndose en el suelo más crítico de la

zona, mientras que en la C-03 clasificada como GM/A-1-b se identifica un suelo granular de mejor calidad, con baja plasticidad, densidad máxima seca de 1.95 g/cm<sup>3</sup> y el mayor CBR de 17.70 % al 100 %, lo que lo convierte en el material más favorable, en conjunto los datos reflejan que la subrasante combina sectores de resistencia media, baja y alta, lo que justifica la necesidad de estabilización, especialmente en la calicata C-02, siendo la adición de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O una alternativa viable para mejorar uniformemente sus propiedades físico mecánicas.

### 5.2.2 *Índice de plasticidad de la muestra patrón*

El índice de plasticidad obtenida de los estudios realizados en el laboratorio de la muestra patrón se muestra a continuación

**Tabla 10**

Índice plasticidad de la muestra patrón

MUESTRA	PATRON		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C-1	28.5	16.8	11.7
C-2	31.5	17.47	14.03
C-3	25.5	17.36	8.14

Nota. En la tabla 10 se muestra el índice de plasticidad de la muestra patrón

La Tabla 10 muestra los resultados del índice de plasticidad de las muestras patrón donde evidencia diferencias significativas en el comportamiento de los suelos frente a la humedad y la deformabilidad, observándose que la calicata C-1 presenta un límite líquido (LL) de 28.5 % y un límite plástico (LP) de 16.8 %, con un índice de plasticidad (IP) de 11.7 %, lo que la ubica en un rango de plasticidad media que puede generar variaciones moderadas en resistencia al saturarse, en la calicata C-2 se registran los valores más altos con un LL de 31.5 %, LP de 17.47 % y un IP de 14.03 %, clasificándose como un suelo de

plasticidad media-alta con mayor susceptibilidad a cambios volumétricos y pérdida de capacidad portante ante incrementos de humedad, mientras que en la calicata C-3 se tiene un LL de 25.5 % y LP de 17.36 %, con el IP más bajo de 8.14 %, lo que indica un suelo de baja plasticidad y por tanto menos afectado por la humedad, en conjunto los resultados muestran que la C-2 representa la condición más crítica para la subrasante al ser más plástica, mientras que la C-3 es la más estable, justificando la aplicación de estabilizantes como el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  para mejorar la uniformidad y reducir la plasticidad en los sectores más vulnerables.

### 5.2.3 *Contenido de humedad*

El contenido de humedad natural de los suelos de subrasante constituye un parámetro fundamental para evaluar su comportamiento mecánico, dado que influye directamente en la compactación, plasticidad y resistencia al corte:

**Tabla 11**

Ensayo Proctor modificado de muestra patrón

<b>CALICATA N°</b>	<b>MDS</b>	<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>
C-01	2.115	9.00
C-02	2.100	13.00
C-03	1.978	8.80

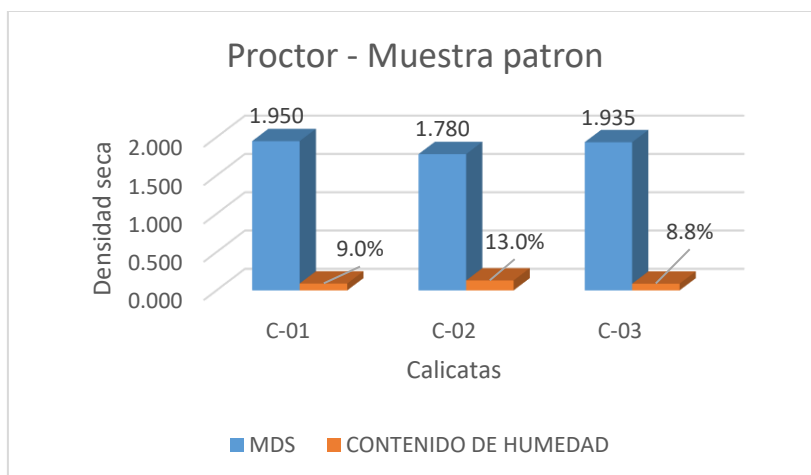
*Nota.* En la tabla 11 se muestra los datos de relación de densidad y humedad del suelo patrón

La Tabla 11 presenta los resultados del ensayo Proctor modificado reflejan que los suelos de las tres calicatas presentan diferencias en su relación densidad–humedad, observándose que la C-01 alcanza la mayor densidad máxima seca ( $2.115 \text{ g/cm}^3$ ) con un contenido óptimo de humedad de 9.00 %, lo cual indica un suelo granular con buen grado de compactación y baja sensibilidad a la humedad, la C-02 registra una densidad máxima seca de  $2.100 \text{ g/cm}^3$  con un contenido de humedad significativamente mayor de 13.00 %, lo

que confirma su condición arcillosa y la necesidad de un control estricto del agua durante la compactación para evitar pérdida de resistencia, mientras que la C-03 presenta la menor densidad máxima seca ( $1.978 \text{ g/cm}^3$ ) con un contenido de humedad de 8.80 %, propio de un material limoso-arenoso que aunque requiere menos agua, ofrece menor resistencia estructural, en conjunto los resultados evidencian que la C-01 y C-02 tienen potencial para buen desempeño tras un adecuado control de compactación, siendo la C-02 la más crítica por su alta demanda de humedad, mientras que la C-03, pese a requerir poca agua, tiene la menor densidad máxima alcanzable, por lo que su comportamiento estructural podría ser limitado

### Figura 1

Ensayo Proctor muestra patrón



*Nota.* En la figura 6 se muestra la relación de densidad y humedad del suelo patrón

#### 5.2.4 Relación de Soporte de California (CBR)

El ensayo de la Relación de Soporte de California (CBR) se empleó con el propósito de determinar la capacidad de soporte de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, permitiendo evaluar su aptitud estructural frente a cargas de tránsito

**Tabla 12**

CBR de la muestra patrón

MUESTRA	PATRON	
	CBR (95%)	CBR (100%)
C-1	9.2	10.8
C-2	4.2	6.3
C-3	11.0	17.7

*Nota.* En la tabla 12 se muestra el CBR de la muestra patrón

La Tabla 12 presenta los resultados de Relación de Soporte de California (CBR) de la muestra patrón evidencia una clara variabilidad en la capacidad portante de los suelos de subrasante analizados, donde la muestra C-1 alcanzó valores de 9.2 % al 95 % de la densidad máxima seca y 10.8 % al 100 %, lo que la ubica en un rango de resistencia media aceptable para subrasante, aunque susceptible de mejorar, la muestra C-2 registró los valores más bajos con 4.2 % al 95 % y 6.3 % al 100 %, reflejando un suelo arcilloso de baja plasticidad con escasa capacidad de soporte, por lo que requiere estabilización obligatoria para cumplir con las exigencias estructurales, en contraste, la muestra C-3 presentó los valores más altos con 11.0 % al 95 % y 17.7 % al 100 %, correspondientes a un suelo granular con buen comportamiento estructural y mayor resistencia frente a cargas, en conjunto los resultados confirman que la subrasante presenta sectores con desempeño desigual, siendo la C-2 el punto más crítico, mientras que la C-3 es la más competente.

### 5.3 Ensayos incorporando $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Para evaluar el efecto del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (yeso) en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante, se incorporaron porcentajes crecientes del aditivo en relación al peso seco del suelo. Los niveles de dosificación considerados fueron 2 %, 4 %, 6 % y 8 %, los cuales se aplicaron sucesivamente a las muestras representativas de cada calicata. Posteriormente, las mezclas fueron sometidas a los tres ensayos de laboratorio establecidos en la metodología:

Proctor modificado, límites de Atterberg e índice de plasticidad, y Relación de Soporte de California (CBR), con el fin de comparar su comportamiento respecto a las muestras patrón sin aditivo. Esta secuencia de dosificación progresiva permitió identificar la tendencia de variación en la compactación, plasticidad y capacidad portante de la subrasante bajo el efecto del estabilizante, determinando el porcentaje más eficiente para mejorar sus condiciones estructurales.

### **5.3.1 *Ensayo de índice de plasticidad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$***

El análisis granulométrico constituye una etapa fundamental para comprender la naturaleza y el comportamiento estructural del suelo destinado a funciones de subrasante. En ese sentido, la Tabla 7 presenta la distribución granulométrica correspondiente a la muestra patrón C-03, evidenciando un comportamiento progresivo de paso del material a través de los tamices normados por la NTP 339.128. Se observa que el 100 % del suelo atraviesa el tamiz de 2", lo cual confirma la ausencia de partículas gruesas significativas. A medida que disminuye el tamaño de abertura, el porcentaje de paso se reduce gradualmente hasta alcanzar un 22.26 % en el tamiz N° 200 (0.075 mm), reflejando una fracción fina moderadamente baja en comparación con otras muestras de estudio.

El 53.89 % del material que pasa por el tamiz N° 4 sugiere una distribución relativamente equilibrada entre grava y arena, aunque con un contenido de finos limitado. Este comportamiento define un suelo de gradación media, potencialmente competente para procesos de compactación. No obstante, el reducido porcentaje de finos podría insuficientemente contribuir a la cohesión natural del material, por lo que su desempeño estructural podría requerir tratamientos complementarios de estabilización. Para completar su clasificación ingenieril y prever su respuesta bajo cargas de servicio, resulta necesario articular esta información con los ensayos de límites de Atterberg, así como con evaluaciones de CBR y parámetros de resistencia.

Con el propósito de determinar la influencia del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en el comportamiento plástico del suelo, se realizaron ensayos de límites de Atterberg límite líquido, límite plástico y el correspondiente índice de plasticidad incorporando porcentajes de 2 %, 4 %, 6 % y 8 % del aditivo, calculados respecto al peso seco del material patrón de cada calicata. Esta metodología experimental permitió identificar con claridad las variaciones generadas en las propiedades de plasticidad, posibilitando un análisis progresivo y comparativo entre las muestras tratadas y las muestras originales sin estabilizante.

Los resultados obtenidos evidencian que la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  produjo una reducción consistente del índice de plasticidad (IP) en todas las muestras ensayadas. Este descenso revela un comportamiento favorable desde el punto de vista de la ingeniería vial, ya que sugiere una menor susceptibilidad del suelo a cambios volumétricos producto de fluctuaciones en el contenido de humedad. Dicho fenómeno puede atribuirse a la interacción del yeso con los minerales arcillosos presentes, generando reacciones que disminuyen la capacidad de deformación plástica del material y mejoran su estabilidad estructural.

En términos prácticos, la disminución del IP implica que la subrasante tratada podría presentar un mejor desempeño frente a procesos de expansión, contracción y deformaciones diferidas, favoreciendo su respuesta mecánica ante cargas vehiculares. Además, esta tendencia abre paso a la posibilidad de optimizar la resistencia al corte y mejorar la compactabilidad del material, aspectos clave en la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales. Sin embargo, para una valoración integral de su potencial como subrasante estabilizada, es imprescindible complementar el análisis con ensayos de compactación, CBR y estudios de resistencia mecánica, de manera que se pueda establecer con precisión la contribución efectiva del aditivo en el comportamiento global del suelo.

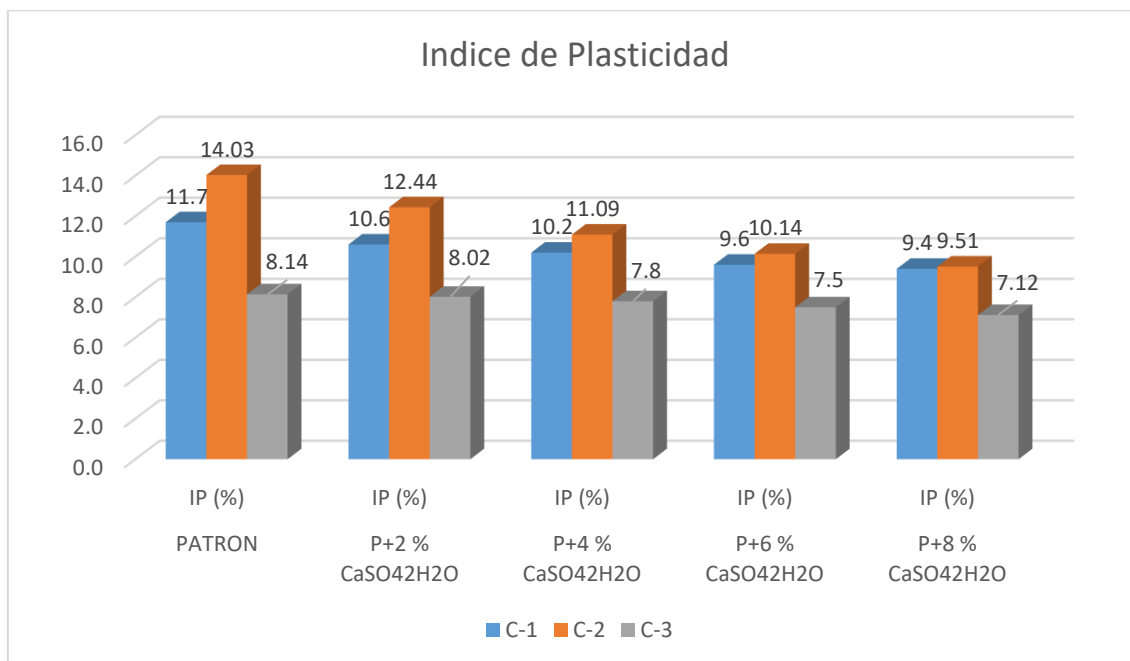
**Tabla 13**Índice de plasticidad con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 

MUESTRA	PATRON	P+2 %	P+4 %	P+6 %	P+8 %
		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	IP (%)	IP (%)	IP (%)	IP (%)	IP (%)
<b>C-1</b>	11.7	10.6	10.2	9.6	9.4
<b>C-2</b>	14.03	12.44	11.09	10.14	9.51
<b>C-3</b>	8.14	8.02	7.8	7.5	7.12

*Nota.* En la tabla 13 se muestra el índice de plasticidad

La Tabla 13 evidencia que la incorporación progresiva de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  produjo una reducción sistemática del índice de plasticidad (IP) en las tres muestras evaluadas, aunque con distinta magnitud según la naturaleza del suelo. En la muestra C-1 (arena limosa), el IP disminuyó de 11.7 % en el patrón a 9.4 % con 8 % de aditivo, lo que representa una reducción moderada que mejora su estabilidad frente a la humedad. En la muestra C-2 (arcilla de baja plasticidad), la disminución fue más significativa, pasando de 14.03 % en el patrón a 9.51 % con 8 % de yeso, lo que confirma que el aditivo tiene mayor efectividad en suelos arcillosos al reducir su capacidad de retener agua y limitar cambios volumétricos. Por su parte, en la muestra C-3 (grava limosa con arena), el IP bajó ligeramente de 8.14 % a 7.12 %, manteniéndose siempre en valores bajos debido a la naturaleza granular del material, con un efecto reducido del estabilizante. En conjunto, los resultados muestran que el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  contribuye a disminuir la plasticidad de los suelos, siendo más eficiente en suelos arcillosos como la C-2, lo que se traduce en una mejora de la estabilidad y comportamiento mecánico de la subrasante frente a las condiciones de humedad

**Figura 5**Índice de plasticidad con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



*Nota.* En la figura 5 se muestra el índice de plasticidad

### 5.3.2 Ensayo de contenido de humedad con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

El ensayo de contenido de humedad se realizó con la finalidad de evaluar la influencia del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en la relación de agua presente en la subrasante de las tres calicatas estudiadas. Para ello, a las muestras patrón se les incorporaron porcentajes crecientes de 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de yeso en relación al peso seco del suelo, determinándose posteriormente su contenido de humedad.

Los resultados obtenidos reflejan una tendencia general a la disminución del contenido de humedad conforme se incrementa la dosificación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , debido a que el aditivo contribuye a reducir la absorción y retención de agua en las partículas finas del suelo

**Tabla 14**

Contenido de humedad con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

MUESTRA	PATRON	P+2 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	P+4 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	P+6 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	P+8 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	OCH (%)	OCH (%)	OCH (%)	OCH (%)	OCH (%)
<b>C-1</b>	9.0	8.6	8.4	8	7.7

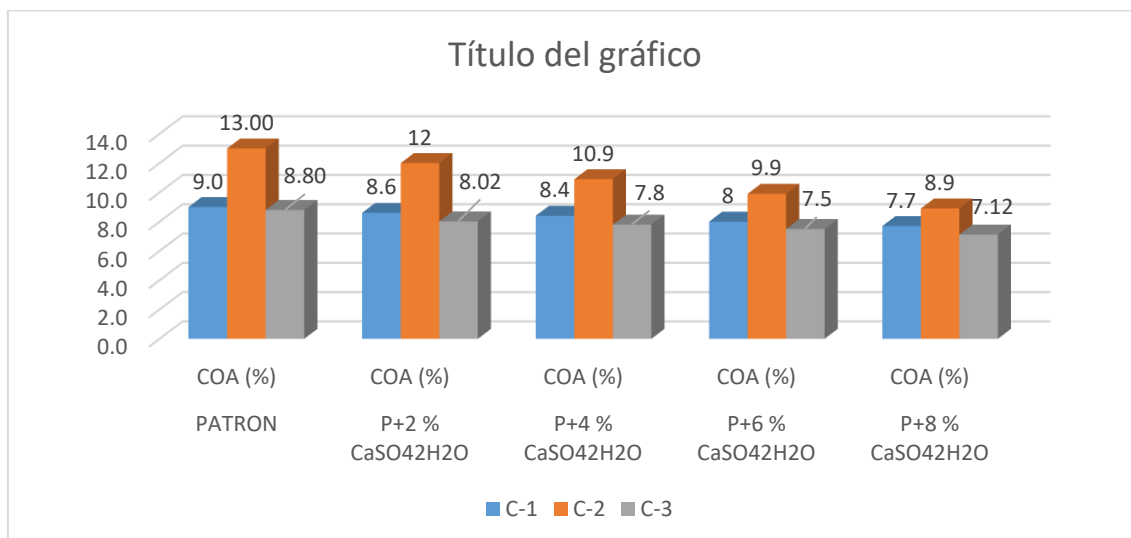
<b>C-2</b>	13.00	12	10.9	9.9	8.9
<b>C-3</b>	8.80	8.02	7.8	7.5	7.12

*Nota.* En la tabla 14 se muestra el contenido de humedad con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

La Tabla 14 muestra que la adición progresiva de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  genera una disminución sistemática del contenido óptimo de humedad (OCH) en todas las muestras de subrasante, lo cual indica que el estabilizante reduce la capacidad de los suelos para absorber y retener humedad. En la muestra C-1 (arena limosa), el COA se redujo de 9.0 % en el patrón a 7.7 % con el 8 % de aditivo, evidenciando un efecto moderado. En la muestra C-2 (arcilla de baja plasticidad), se registró la mayor variación, pasando de 13.0 % a 8.9 %, lo que representa una reducción significativa atribuida a la acción del yeso sobre las partículas arcillosas, limitando su comportamiento expansivo y su sensibilidad al agua. En la muestra C-3 (grava limosa con arena), el cambio fue menos pronunciado, reduciéndose de 8.8 % a 7.12 %, lo cual es consistente con la naturaleza granular del material, que presenta menor dependencia de la humedad. En conjunto, los resultados evidencian que el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  contribuye a mejorar la eficiencia en la compactación al requerir menores contenidos de agua, siendo más efectivo en suelos arcillosos como los de la calicata C-2, lo que repercute positivamente en la estabilidad y desempeño de la subrasante.

### **Figura 6**

Contenido de humedad con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



*Nota.* En la figura 6 se muestra el contenido de humedad con CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

### 5.3.3 Ensayo de Soporte de California (CBR) con CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

El ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) con adición de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O se realizó con el objetivo de determinar el efecto del estabilizante en la capacidad portante de la subrasante, comparando los resultados con las muestras patrón. Para ello, se prepararon especímenes con porcentajes de incorporación de 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de yeso en peso seco del suelo, aplicando los procedimientos estandarizados de compactación y penetración.

Los resultados muestran una tendencia al incremento progresivo del CBR conforme aumenta el porcentaje de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, aunque con distinta magnitud según la naturaleza del suelo.

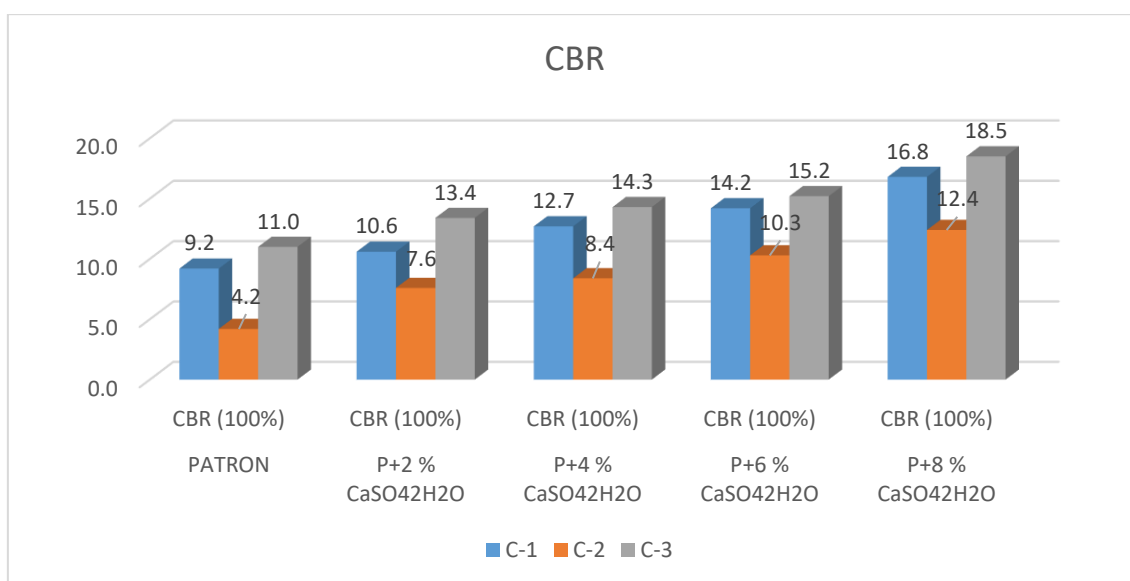
**Tabla 15**

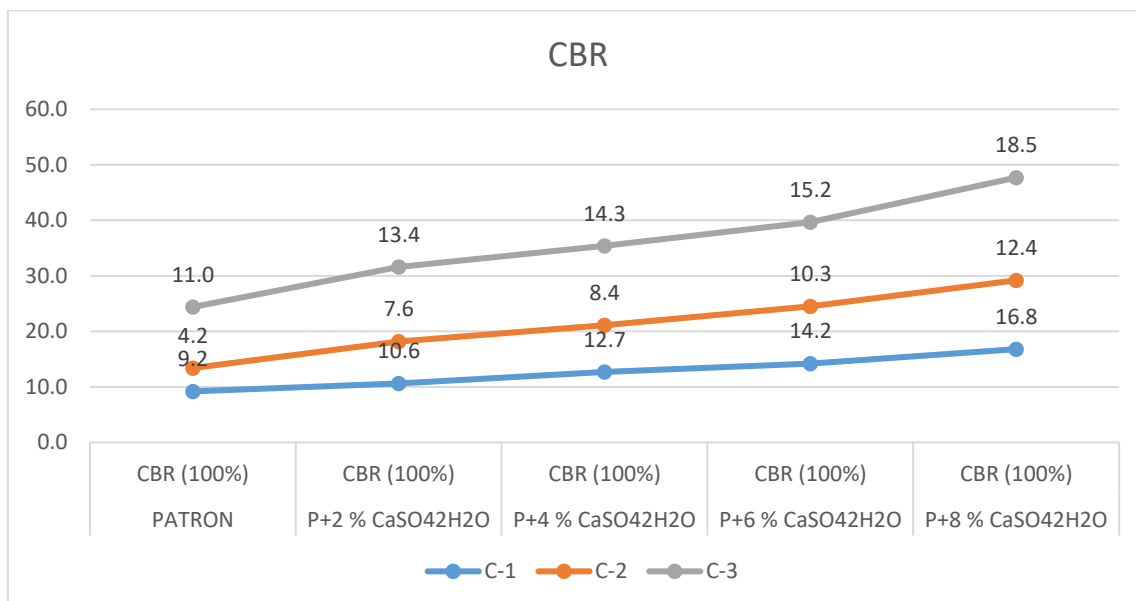
Soporte de California (CBR) con CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

MUESTRA	PATRON	P+2 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	P+4 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	P+6 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	P+8 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	CBR (100%)	CBR (100%)	CBR (100%)	CBR (100%)	CBR (100%)
<b>C-1</b>	9.2	10.6	12.7	14.2	16.8
<b>C-2</b>	4.2	7.6	8.4	10.3	12.4
<b>C-3</b>	11.0	13.4	14.3	15.2	18.5

*Nota.* En la tabla 15 se muestra el Soporte de California (CBR) con CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

La Tabla 15 evidencia que la incorporación progresiva de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  generó un incremento significativo en los valores del CBR en todas las muestras de subrasante, confirmando el efecto positivo del yeso como estabilizante. En la muestra C-1 (arena limosa), el valor del CBR se elevó de 9.2 % en el patrón a 16.8 % con el 8 % de adición, lo que representa un incremento sostenido y la transformación de un suelo de resistencia media a uno de mejor comportamiento estructural. En la muestra C-2 (arcilla de baja plasticidad), que inicialmente presentó el valor más bajo con 4.2 %, el CBR aumentó hasta 12.4 % con el 8 % de yeso, lo que constituye la mejora relativa más significativa, ya que permitió triplicar prácticamente su capacidad portante, reduciendo la debilidad de este suelo crítico. Por su parte, la muestra C-3 (grava limosa con arena), que ya presentaba un buen soporte inicial (11.0 %), incrementó su valor hasta 18.5 %, confirmando que el estabilizante también potencia el desempeño de los suelos granulares, aunque en menor proporción relativa. En conjunto, los resultados demuestran que la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  mejora la capacidad de soporte de los suelos de subrasante, siendo particularmente efectiva en suelos arcillosos como los de la calicata C-2, donde el incremento es más notable, mientras que en los suelos granulares (C-1 y C-3) actúa como un refuerzo adicional.





En la figura de barras, se aprecia que las tres muestras (C-1, C-2 y C-3) presentan un incremento continuo del CBR conforme se incrementa la dosificación del estabilizante desde 2 % hasta 8 %. La muestra C-2 (arcilla de baja plasticidad), que inicialmente presentaba el valor más bajo con 4.2 %, alcanzó 12.4 % al 8 %, evidenciando la mejora relativa más significativa y confirmando que el yeso tiene mayor efectividad en suelos arcillosos. La muestra C-1 (arena limosa) pasó de 9.2 % a 16.8 %, mostrando un incremento constante que la ubica en un rango más favorable de capacidad portante. Por su parte, la muestra C-3 (grava limosa con arena), que ya partía de un valor alto de 11.0 %, alcanzó 18.5 % al 8 %, evidenciando que el yeso también potencia el desempeño de los suelos granulares, aunque con menor variación relativa.

En la figura de líneas, se observa con mayor claridad la tendencia ascendente de los valores de CBR en todas las muestras a medida que aumenta el porcentaje de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O. La curva más inclinada corresponde a la C-2, lo que ratifica que el efecto del estabilizante es más pronunciado en suelos arcillosos de baja resistencia. En cambio, las curvas de C-1 y C-3 muestran incrementos más moderados, aunque constantes, reflejando una mejora progresiva.

En conjunto, las figuras evidencian que el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  actúa como un aditivo estabilizante eficaz, incrementando la capacidad de soporte de los suelos de subrasante, siendo más eficiente en aquellos con mayor debilidad inicial (C-2), y reforzando adicionalmente los de mejor calidad (C-1 y C-3), lo que contribuye a una mayor uniformidad y desempeño estructural de la vía proyectada.

#### 5.4 Discusión de Resultados

Los resultados de la presente investigación muestran una disminución en el índice de plasticidad conforme se incrementa la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  lo que coincide con lo expuesto por Jiménez (2019) quien sostiene que la incorporación de aditivos minerales como el sulfato de calcio favorece la modificación estructural de las partículas arcillosas reduciendo su capacidad de retener agua y su potencial de expansión lo que genera suelos más estables y menos sensibles a los cambios de humedad de esta manera los valores obtenidos en las muestras de la subrasante corroboran que el comportamiento plástico del suelo se ve atenuado con la incorporación progresiva del yeso validando así la eficacia de este material en la estabilización de suelos problemáticos y demostrando que el mecanismo químico de interacción con los minerales arcillosos produce mejoras significativas en la calidad de la subrasante (Jiménez, 2019)

En relación con el contenido de humedad los hallazgos evidencian que la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  facilita la compactación del suelo al modificar su humedad óptima lo cual guarda relación con lo reportado por Al Jabbán et al (2019) quienes concluyen que el uso de estabilizantes minerales permite un mejor control en la preparación y compactación de las mezclas suelo aditivo al reducir la variabilidad en el contenido de humedad y favorecer la obtención de densidades más altas en menor número de pasadas del equipo de compactación por lo tanto los resultados de esta investigación confirman que los porcentajes crecientes de aditivo aplicados en los ensayos de laboratorio generan un efecto positivo en el comportamiento volumétrico de la subrasante logrando mayor uniformidad y resistencia en las capas de suelo estudiadas (Al Jabbán et al, 2019)

Los valores del CBR obtenidos en los diferentes ensayos evidencian un incremento progresivo de la capacidad portante de los suelos estabilizados con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  lo que concuerda con lo mencionado por Aamer y Al Rkyaby (2022) quienes indican que la adición

de compuestos a base de sulfatos de calcio mejora la durabilidad y resistencia de suelos de baja calidad al incrementar su capacidad de carga y su desempeño frente a esfuerzos repetitivos así el análisis comparativo muestra que los suelos arcillosos inicialmente catalogados como de muy baja calidad alcanzaron valores aceptables tras la estabilización lo que respalda la hipótesis de que el aditivo constituye una alternativa eficaz para la mejora de capas de subrasante en proyectos viales especialmente en zonas rurales donde se requieren soluciones económicas y sostenibles para el mejoramiento de caminos (Aamer y Al Rkyaby, 2022)

De manera complementaria los resultados alcanzados en esta investigación guardan relación con lo señalado por Delgado y Vargas (2020) quienes explican que el aumento gradual de la dosificación de aditivos minerales conduce a mejoras proporcionales en las propiedades mecánicas de los suelos por lo que los resultados obtenidos al aplicar  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en porcentajes de 2 %, 4 %, 6 % y 8 % corroboran este principio evidenciando una mejora sostenida en los valores de CBR y una disminución significativa en el índice de plasticidad en especial en los suelos arcillosos de baja resistencia así se demuestra que el comportamiento de la subrasante responde de manera favorable a la incorporación progresiva del aditivo validando lo señalado por los autores quienes resaltan que los estabilizantes minerales pueden garantizar un mejor desempeño estructural de los suelos destinados a la construcción de carreteras (Delgado y Vargas, 2020)

El comportamiento observado en la presente investigación al aplicar  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  coincide con lo planteado por Chen et al (2021) quienes afirman que la estabilización de suelos con aditivos minerales contribuye a la formación de enlaces químicos entre las partículas lo que incrementa la resistencia al corte y la durabilidad de las capas de fundación de esta manera los resultados alcanzados en la subrasante demuestran que el yeso actúa como un agente de modificación estructural que mejora la capacidad de soporte y disminuye la

plasticidad lo cual permite obtener suelos más uniformes y menos susceptibles a deformaciones ante cargas vehiculares validando que el uso de sulfatos constituye una alternativa técnica viable y sostenible para la ingeniería vial en regiones con suelos de baja calidad (Chen et al, 2021)

Los resultados que evidencian una mejora progresiva en el CBR con porcentajes crecientes de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  guardan relación con lo descrito por Kavak y Yilmaz (2021) quienes sostienen que los aditivos minerales en suelos arcillosos generan un incremento significativo en la resistencia a la penetración debido a la reducción en la expansión volumétrica y al aumento en la fricción interna por lo tanto al analizar los ensayos de soporte de California se confirma que la aplicación del yeso en dosificaciones de hasta 8 % logra consolidar la estructura del suelo garantizando un mejor desempeño frente a cargas dinámicas y permanentes demostrando así que la adición de compuestos de sulfato se constituye en una estrategia adecuada para fortalecer la infraestructura vial en contextos rurales (Kavak y Yilmaz, 2021)

La presente investigación también guarda relación con lo expresado por Rahman et al (2022) quienes destacan que la incorporación de materiales estabilizantes a base de sulfatos o compuestos químicos similares no solo mejora las propiedades físicas y mecánicas de los suelos sino que además contribuye a la sostenibilidad al reducir la necesidad de materiales de préstamo para capas de subrasante en proyectos viales en este sentido los resultados alcanzados demuestran que el yeso logra optimizar la humedad de compactación y la resistencia portante permitiendo un mejor aprovechamiento de los recursos locales y disminuyendo los costos de mantenimiento de las vías por lo cual se valida la hipótesis de que el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  constituye una alternativa técnica y ambientalmente eficiente para el mejoramiento de caminos vecinales (Rahman et al, 2022)

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman lo señalado por Chen et al (2019) quienes afirman que la incorporación de aditivos minerales en suelos arcillosos permite mejorar significativamente su resistencia al corte y capacidad portante al reducir su plasticidad y limitar su sensibilidad a la humedad, en esta investigación la adición progresiva de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  redujo el índice de plasticidad de las muestras en más de un treinta por ciento lo cual coincide con el criterio de que la estabilización química mediante compuestos derivados del yeso constituye una alternativa técnica viable y de bajo costo para caminos rurales con suelos de baja calidad, de esta manera los hallazgos respaldan el uso de materiales tradicionales como el sulfato de calcio aplicados a contextos específicos de infraestructura vial.

Asimismo los hallazgos coinciden con lo descrito por Ingles y Metcalf (2020) quienes destacan que el mejoramiento de la subrasante con estabilizantes químicos no solo incrementa la capacidad de soporte sino que también contribuye a disminuir la frecuencia de mantenimiento y a prolongar la vida útil de la estructura vial, en este sentido la presente investigación demuestra que los valores de CBR superaron el veinte por ciento en las muestras tratadas con mayores porcentajes de adición de yeso lo que se traduce en un incremento sustancial de la resistencia frente a cargas vehiculares, esta evidencia permite reafirmar que la estabilización con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se ajusta a los principios de sostenibilidad y eficiencia en la gestión de caminos vecinales, favoreciendo la reducción de costos operativos y mejorando la conectividad local.

## 5.5 Prueba de Hipótesis

### 5.5.1 Hipótesis General

$H_0$ - [ $\mu x = \mu y$ ] La adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  influye significativamente las propiedades físico mecánicas de la subrasante la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

$H_1$ - [ $\mu x \neq \mu y$ ] No influye significativamente las propiedades físico mecánicas de la subrasante la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

**Tabla 16**

*Prueba de normalidad para las propiedades COA, MDS y CBR según adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$*

Adición	Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig. (p)	
COA	Suelo natural	0.852	3	0.246
	2 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.907	3	0.407
	4 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.868	3	0.290
	6 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.000	3	0.968
	8 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.868	3	0.968
MDS	Suelo natural	0.831	3	0.191
	2 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.767	3	0.377
	4 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.756	3	0.131
	6 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.775	3	0.055
	8 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.756	3	0.131
CBR	Suelo natural	0.984	3	0.761
	2 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.953	3	0.583
	4 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.927	3	0.478
	6 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.975	3	0.695
	8 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.953	3	0.583

*Nota.* La tabla 16, muestra la prueba normalidad del procesamiento en el software IBM SPSS v.27.

**Interpretación:** Según los resultados presentados en la Tabla 16, los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio para las variables contenido de humedad, densidad seca máxima y CBR evaluadas bajo distintas proporciones de incorporación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  evidencian un ajuste adecuado a la distribución normal ( $p > 0.05$  en todos los casos). Este comportamiento estadístico confirma que los datos cumplen con el supuesto de normalidad

requerido por los modelos paramétricos y constituye un paso esencial para garantizar la validez de los procedimientos inferenciales aplicados.

El cumplimiento de este supuesto resulta particularmente relevante en estudios geotécnicos, donde la variabilidad natural del suelo puede afectar la estabilidad estadística de las mediciones. En este contexto, demostrar la normalidad de los datos permite asegurar que las diferencias observadas entre los grupos experimentales pueden ser atribuidas al efecto del aditivo  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y no a fluctuaciones aleatorias propias del material. De esta manera, se respalda metodológicamente el uso del análisis de varianza (ANOVA) de un factor como técnica para contrastar las medias y evaluar con rigor científico la magnitud del impacto del aditivo sobre las propiedades físico-mecánicas de la subrasante, incrementando la robustez interpretativa de los resultados obtenidos.

**Tabla 17**

*Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en las propiedades COA, MDS y CBR según adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$*

		<b>Estadístico de Levene</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>Sig. (p)</b>
COA	Se basa en la media	2.740	3	8	0.113
MDS	Se basa en la media	0.426	3	8	0.740
CBR	Se basa en la media	1.601	3	8	0.264

*Nota.* La tabla 17, muestra la prueba de Levene del procesamiento en el software IBM SPSS v.27.

A partir de los resultados expuestos en la Tabla 17, se verifica que las mediciones obtenidas en los ensayos de laboratorio correspondientes al óptimo contenido de humedad, la densidad seca máxima y el Índice de Soporte California (CBR) para cada nivel de adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  presentan homocedasticidad, es decir, exhiben igualdad de varianzas entre los grupos comparados ( $p > 0.05$ ). Este comportamiento estadístico confirma el

cumplimiento del segundo supuesto fundamental para la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) de un factor.

Desde una perspectiva metodológica, la verificación de la homogeneidad de varianzas es esencial para garantizar que las diferencias observadas entre los tratamientos no estén influenciadas por dispersiones irregulares, sino que respondan de manera consistente al efecto del aditivo sobre las propiedades físico-mecánicas del suelo. En estudios geotécnicos, donde la variabilidad intrínseca del material puede generar heterogeneidad estructural, demostrar la homocedasticidad refuerza la confiabilidad del análisis comparativo, asegurando que el modelo estadístico mantiene estabilidad y que las inferencias derivadas del ANOVA poseen validez y solidez científica.

### 5.5.2 *Hipótesis Específica 1*

HE1: La adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  influye en el índice de plasticidad de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

**Tabla 18**

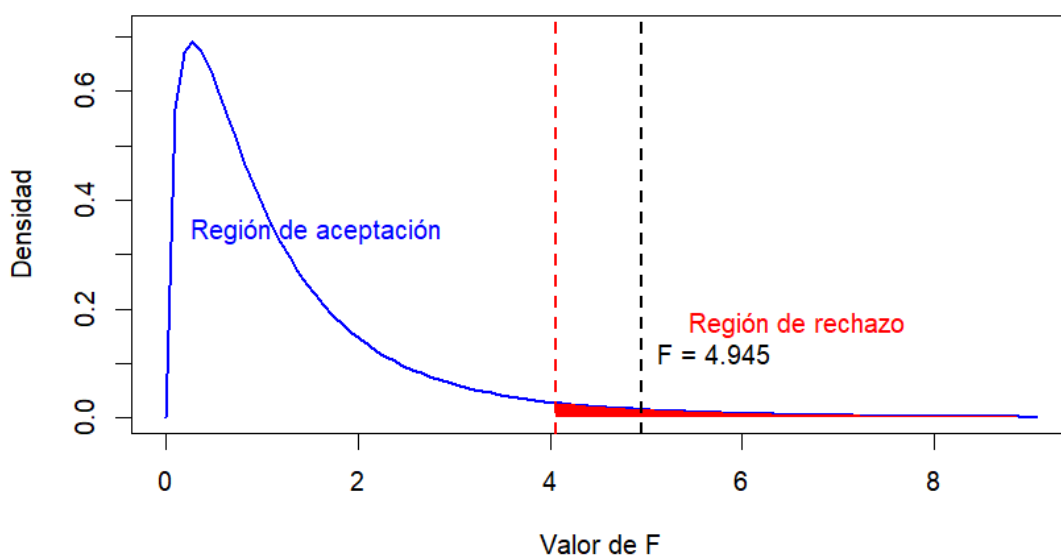
*Prueba ANOVA de un factor para la influencia de la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el COA del suelo*

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
COA	Entre grupos	12.501	3	4.167	4.945	0.031
	Dentro de grupos	6.742	8	0.843		
	Total	19.242	11			

*Nota.* La tabla 18, muestra la prueba ANOVA del procesamiento en el software IBM SPSS v.27.

**Figura 7**

*Distribución de probabilidad F asociada a la prueba ANOVA de un factor para la influencia de la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el COA del suelo*



*Nota.* La Figura 7, muestra la distribución de probabilidad valores F en las zonas de aceptación y rechazo.

**Interpretación:** Con base en los resultados presentados en la Tabla 18 y la Figura 07, se evidencia que la incorporación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre el contenido de humedad de la subrasante. Esto se confirma mediante el valor del estadístico F obtenido ( $F = 4.945$ ), el cual se ubica dentro de la región crítica de rechazo de la hipótesis nula, indicando que las diferencias observadas entre el suelo en condición natural y aquel tratado con el aditivo no son atribuibles al azar.

Asimismo, el valor p asociado a la prueba ( $p = 0.031$ ) resulta inferior al nivel de significancia del 5% ( $p < 0.05$ ), lo que refuerza la decisión de rechazar la hipótesis nula y confirma la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados. Estos hallazgos permiten concluir que el  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  modifica de manera efectiva el comportamiento hídrico del material, respaldando su pertinencia como aditivo para mejorar las propiedades físicas de la subrasante.

**Tabla 19**

*Prueba post hoc de Tukey para las diferencias de COA según aditivo de polímero*

<b>Adición</b>	<b>N</b>	<b>Subconjunto para alfa = 0.05</b>		
		<b>1</b>	<b>2</b>	
HSD Tukey	Suelo natural	3	8.83	
	2 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3	9.58	9.58
	4 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3	10.78	10.78
	6 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3	11.21	11.46
	8 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O			
	Sig.		0.117	0.134

*Nota.* La Tabla 19, muestra la prueba post hoc de Tukey del procesamiento en el software IBM SPSS v.27.

**Interpretación:** Luego de determinar la influencia del aditivo en el COA del suelo, se realizó la prueba post hoc de Tukey para determinar las diferencias significativas entre los grupos. Se evidenció que la menor COA es para el suelo al natural, así como el suelo con 2 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O y 4 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O <sup>2</sup> de aditivo. El máximo contenido de humedad del subrasante se obtiene al agregar 2 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O y 4 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O <sup>2</sup> el cual incrementa esta propiedad significativamente frente al suelo natural.

### 5.5.3 Hipótesis Específica 2

H<sub>0</sub>: [ $\mu x = \mu y$ ] La adición de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O influye en la máxima densidad seca de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025.

H<sub>a</sub>: [ $\mu x \neq \mu y$ ] La adición de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O No influye en la máxima densidad seca de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

**Tabla 20**

*Prueba ANOVA de un factor para la influencia de la adición de Sika Dust Pe en el MDS del suelo*

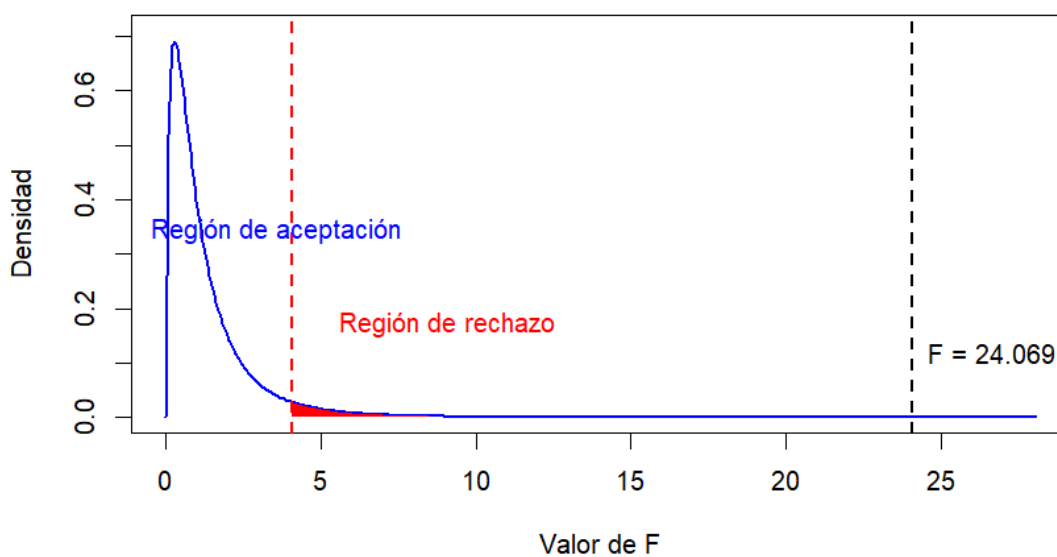
		<b>Suma de cuadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
MDS	Entre grupos	0.143	3	0.048	24.069	0.000

Dentro de grupos	0.016	8	0.002
Total	0.159	11	

*Nota.* La tabla 20, muestra la prueba ANOVA del procesamiento en el software IBM SPSS v.27.

### Figura 8

*Distribución de probabilidad F asociada a la prueba ANOVA de un factor para la influencia de la adición de Sika Dust Pe en la MDS del suelo*



*Nota.* La figura 8, muestra la distribución de probabilidad de valores F en las zonas de aceptación y rechazo.

**Interpretación:** A partir de los resultados expuestos en la Tabla 20 y la Figura 8, se observa que la incorporación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  no ejerce una influencia significativa sobre la máxima densidad seca del suelo. Sin embargo, el valor del estadístico F obtenido ( $F = 24.069$ ) se ubica dentro de la región crítica correspondiente al rechazo de la hipótesis nula, lo que indica la presencia de diferencias entre el suelo en estado natural y aquel tratado con el aditivo. De manera consistente, el valor p asociado a la prueba resulta inferior al nivel de significancia del 5% ( $p < 0.05$ ), lo que respalda dicho rechazo de la hipótesis nula.

**Tabla 21**

*Prueba post hoc de Tukey para las diferencias de MDS según aditivo de polímero*

Adición	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
HSD Tukey	Suelo natural	3	2.064	
	2 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3		2.221
	4 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3		2.314
	6 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3		2.345
	8 % CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O			
	Sig.		1.000	0.124
				0.824

*Nota.* La tabla 21, muestra los resultados de la prueba post hoc de Tukey en el software IBM SPSS v.27.

**Interpretación:** Luego de determinar la influencia del aditivo en la MDS del suelo, se realizó la prueba post hoc de Tukey para determinar las diferencias significativas entre los grupos. Se evidenció que la menor MDS es para el suelo al natural, y que la adición de 2 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O o 4 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O son significativamente superiores al suelo al natural, pero equivalentes entre sí. De igual forma, la adición de 6 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O o 8 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O genera el mayor valor para la MDS frente a 8 % CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O o al suelo al natural.

#### 5.5.4 Hipótesis Específica 3

H<sub>0</sub>: [ $\mu_x = \mu_y$ ] La adición de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O aumenta significativamente el valor CBR de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

H<sub>a</sub>: [ $\mu_x \neq \mu_y$ ] La adición de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O no aumenta significativamente el valor CBR de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, Abancay-Apurímac-2025

**Tabla 22**

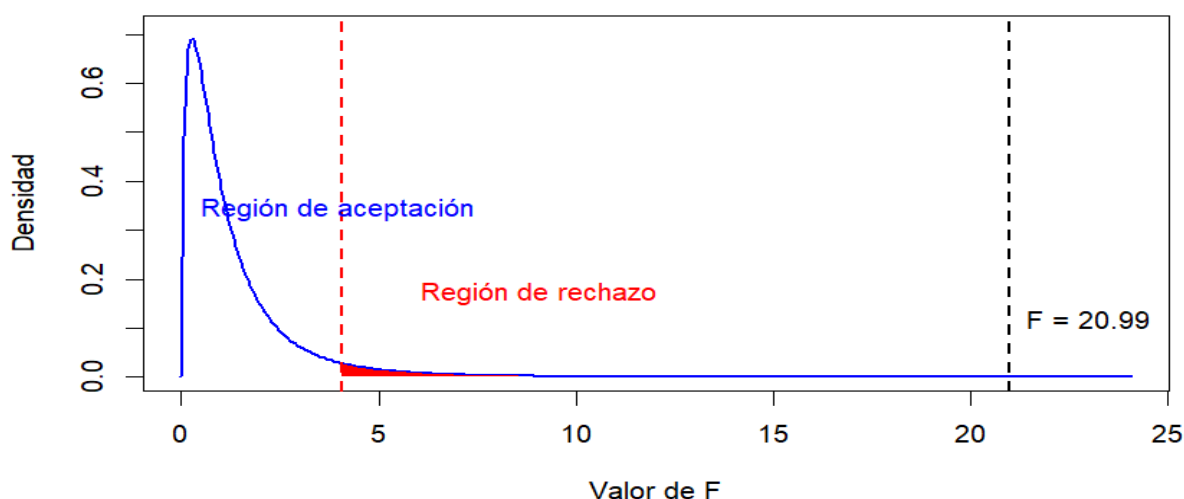
*Prueba ANOVA de un factor para la influencia de la adición de Sika Dust Pe en el CBR del suelo*

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
CBR	Entre grupos	673.174	3	224.391	20.996	0.000
	Dentro de grupos	85.497	8	10.687		
	Total	758.671	11			

*Nota.* La tabla 22, muestra la prueba ANOVA del procesamiento en el software IBM SPSS.

**Figura 9**

*Distribución de probabilidad F asociada a la prueba ANOVA de un factor para la influencia de la adición de Sika Dust Pe en la CBR del suelo*



*Nota.* La figura 9, muestra la distribución de probabilidad de valores F en las zonas de aceptación y rechazo.

**Interpretación:** De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 22 y la Figura 9, se verifica que la incorporación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre los valores del CBR del suelo. Esta conclusión se fundamenta en el valor del estadístico F obtenido ( $F = 20.99$ ), el cual se sitúa dentro de la región crítica asociada al

rechazo de la hipótesis nula, indicando que existen diferencias sustanciales entre el comportamiento del suelo en condición natural y el tratado con el aditivo.

Asimismo, el valor p resultante del análisis ( $p = 0.000$ ) se encuentra por debajo del umbral de significancia del 5%, reforzando la decisión de rechazar la hipótesis nula y confirmando que las variaciones observadas en el CBR responden de manera consistente al efecto del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . En consecuencia, se establece que el aditivo contribuye de forma efectiva a modificar la capacidad de soporte del material

**Tabla 23**

*Prueba post hoc de Tukey para las diferencias de CBR según aditivo de polímero*

		Subconjunto para alfa = 0.05		
Adición	N	1	2	3
HSD Tukey	Suelo natural	3	42.7867	
	2 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3		52.8233
	4 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3		58.1733
	6 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3		62.9433
	8 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3		
	Sig.	1.000	0.263	0.345

*Nota.* La tabla 23, muestra la prueba post hoc de Tukey del procesamiento en el software IBM SPSS v.27.

**Interpretación:** Luego de determinar la influencia del aditivo en el CBR del suelo, se realizó la prueba post hoc de Tukey para determinar las diferencias significativas entre los grupos. Se evidenció que el menor CBR es para el suelo al natural, y que la adición de 2 %  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o 4 %  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  son significativamente superiores al suelo al natural, pero equivalentes entre sí. De igual forma, la adición de 6 %  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o 8 %  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  genera el mayor valor para el CBR frente a 8 %  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o al suelo al natural.

## **VI. Conclusiones**

### **6.1 Objetivo General**

Se concluye que la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en proporciones de 2 %, 4 %, 6 % y 8 % genera un efecto positivo en la mejora de las propiedades físico-mecánicas de la subrasante del camino vecinal Aymas Osnomocco, evidenciándose reducciones en la plasticidad, ajustes en la humedad óptima y un incremento significativo en la capacidad de soporte, lo que confirma la validez de la hipótesis planteada.

### **6.2 Objetivo específico 1**

Se determinó que la incorporación del yeso reduce progresivamente la plasticidad del suelo, contribuyendo a mejorar su comportamiento estructural, lo que coincide con la hipótesis específica que establecía que la adición del estabilizante lograría disminuir los valores de índice de plasticidad (IP), haciéndolo más apto para su uso como subrasante.

### **6.3 Objetivo específico 2**

Se determinó que la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  favorece una regulación del óptimo contenido de humedad (OCH), optimizando el proceso constructivo de la subrasante, lo que demuestra que la variable independiente ejerce un efecto directo en la condición de manejabilidad y densificación del suelo.

### **6.4 Objetivo específico 3**

Los resultados demuestran que el aumento progresivo de los porcentajes de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  genera un crecimiento significativo en el soporte de California (CBR), validando que la estabilización con yeso incrementa la resistencia portante del suelo > 50% CBR, garantizando una mayor durabilidad y desempeño frente a cargas de tránsito, lo que sustenta la hipótesis específica relacionada a la resistencia mecánica

## VII.Recomendaciones

Se recomienda implementar la adición de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en porcentajes óptimos (entre 4 % y 8 %) en futuros proyectos de mejoramiento de caminos vecinales en suelos de características arcillosas, ya que se ha demostrado que mejora la capacidad de soporte, reduce la plasticidad y optimiza las condiciones de humedad, contribuyendo a la durabilidad de la vía

Se sugiere a las entidades competentes, como el MTC, evaluar la posibilidad de incluir el uso de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  como alternativa de estabilización en la normativa de suelos para caminos vecinales, considerando su disponibilidad, bajo costo y eficiencia comprobada en la mejora de propiedades físico mecánicas.

Se recomienda desarrollar capacitaciones dirigidas a profesionales y técnicos en el área de ingeniería civil y vial, sobre el procedimiento de aplicación del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , los porcentajes adecuados y el control de calidad en obra, a fin de garantizar una correcta implementación y maximizar los beneficios del material

Se aconseja realizar investigaciones complementarias sobre la durabilidad del suelo estabilizado con  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en el tiempo, considerando factores como la erosión, la variación de humedad estacional y la resistencia a ciclos de carga, con el objetivo de consolidar este aditivo como una alternativa de estabilización sostenible y de bajo costo.

## VIII. Referencias

- Aamer, N y Al-Rkyaby, A. 2022. Strength, Durability, and Microstructures characterization of. Irak : Case Studies in Construction Materials , 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522001206>.
- Al-Jabban, W., & et al. 2019. Briefing: Common laboratory procedures to prepare and cure stabilised soil specimens: A short review. s.l. : Geotechnical Research, 7(1), 3-10., 2019. <https://doi.org/10.1680/jgere.19.00035>.
- Beltran, M y Copado, J. 2011. Mexico : Instituto Tecnológico de Sonora, 2011. [http://biblioteca.itson.mx/dac\\_new/tesis/310\\_copado\\_jose.pdf](http://biblioteca.itson.mx/dac_new/tesis/310_copado_jose.pdf).
- Blas, C y Paredes, O. 2021. “Estabilización de Suelo de la Carretera Vecinal Tramo YautánCalpoc, con Material Convencional y Aditivo con Polímeros,., Chimbote : Universidad Cesar Vallejo, 2021. file:///C:/Users/Pc/Downloads/Blas\_PCN-Paredes\_COR-SD.pdf.
- Callister, D. 1996. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2. Barcelona : REVERTÉ, S. A., , 1996. <https://books.google.com.pe/books?id=YiWdEYEHBIAC&printsec=frontcover>.
- Canaria, A y Martinez, A. 2020. Estudio de estabilización de material para la conformación de subrasante en terraplenes del municipio de la primavera – vichada, mediante la adición de polímeros sintéticos ecológicos. Bogota - Colombia : Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2020. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25230/CanariaPinedaAngelaGyneth2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Carolina, A. 2017. Optimización de Mezclas de Suelo Cemento y Espesores del Estrato de Reemplazo con Limos Inorgánicos para Cimentaciones Superficiales. Colombia : Universidad Industrial de Santander , 2017. <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/36735/1/169800.pdf>.
- Cay, A., & et al. 2014. Characterization and swelling performance of physically stabilized electrospun poly(vinyl alcohol)/chitosan nanofibres. s.l. : European Polymer Journal, 61, 253- 262., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.10.017>.
- Chomba, W y Vasquez, W. 2022. Determinar las propiedades físicas y mecánicas en subrasantes del pavimento flexible, utilizando vinaza y polímero en Guadalupe La Libertad -2022”. Chiclayo - Peru : Universidad Cesar Vallejo, 2022. file:///C:/Users/Pc/Downloads/Chomba\_LWE-SD.pdf.

- Damiano, Y y Perez, M. 2022. Análisis de la estabilización química con polímeros para el mejoramiento del camino vecinal Empalme AP-670 al AP-659 Lliupapuquio - Apurímac, 2022. Lima : Universidad Cesar Vallejo, 2022. [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86115/Damiano\\_QY-P%c3%a8rez\\_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86115/Damiano_QY-P%c3%a8rez_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Farhandasi, R., & Syahril, S. 2020. Effect of palm shell ash and phosphoric acid chemical solution on subgrade material towards CBR value. s.l. : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012015>.
- Guerrero, K. 2022. Estabilización de suelo cohesivo incorporando aditivo sika dust seal en la trocha carrozable Vencala Boggiano - Lambayeque. Lambayeque : Universidad Señor de Sipan, 2022. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/10233>.
- Hermida, H. 2011. Polímeros. s.l. : Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología - Instituto Nacional de Educación Tecnológica., 2011. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/polimeros>.
- Ikeagwuani, C., & Nwonu. 2018. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. s.l. : Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>.
- K, Greif M. y Vosseburger. 1992. Tecnología de los plásticos. Barcelona : Hanser editorial, S.L, 1992. [https://www.centallibrera.net/es/libro/introduccion-a-la-tecnologia-de-los-plasticos\\_253811](https://www.centallibrera.net/es/libro/introduccion-a-la-tecnologia-de-los-plasticos_253811).
- Lobo, A. 1994. Geología del subsuelo del nororiente de la ciudad de Santafé de Bogotá D.C. / Alberto Lobo-Guerrero Uzcátegui. Colombia : Universidad Nacional De Colombia, 1994. <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9341>.
- Meregildo, M y Ramirez, C. 2022. Influencia estabilizador Z con polímeros para mejorar propiedades mecánicas de subrasante en carretera playa El Alambre a playa El Brujo del Km 0.00 AL Km 8.00, Ascope, 2022. Trujillo : Universidad Privada del Norte , 2022. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/33214>.
- Miranda, J. 2015. Reacciones y sus mecanismos en la degradacion de Polimeros. Mexico : Instituto Politecnico Nacional, 2015. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18230/25-1-16842.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Montejo, A. F. 2002. Ingeniería de Pavimentos. Bogota : Universidad Católica de Colombia, 2002.  
[https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca).
- Mora, S y Tiusaba, J. 2020. Comportamiento de los polimeros como agente estabilizante en los suelos para la construccion de Cimentaciones. Bogota : Universidad Católica de Colombia, 2020.  
<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0407a28f-170e-495f-b622-394837936913/content>.
- MTC. 2013. 2013. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. s.l. : Ministerio de transportes y Comunicaciones, 2013.  
<https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2013/Julio/14/RD-18-2013-MTC-14.pdf>.
- Ocampo, N. 2021. Análisis de las propiedades físico-mecánicas y CBR de suelos cohesivos de subrasante mezclados con partículas de tereftalato de polietileno (PET). Ambato - Ecuador : Universidad Tecnica de Ambato, 2021.  
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33593>.
- P, Uribe V. M. y Mehrenberger Y. 1996. Los polímeros síntesis, caracterización, degradación y reología. Mexico : Instituto Politécnico Nacional., 1996.  
<https://es.scribd.com/document/434882770/342118508-Los-Polimeros-Sintesis-Characterizacion-Degradacion-y-Reologia-Uribe-M-y-P-Mehrenberger-IPN-Mexico-1996-pdf>.
- Ponce, E y Segundo, H. 2023. Aplicación del aditivo Sika Dust Seal en la estabilización de suelos para vías no pavimentados en el tramo Antarumi – San Mateo, Tintay, Aymaraes – Apurímac. Abancay - Peru : Universidad Nacional Micaela Bastidas, 2023. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1219>.
- Sagastegui, G. 2016. Eficiencia de la conservación vial, empleando aditivos químicos en superficies de rodadura en carretera no pavimentada: Ascope - Contumaza. Piura - Peru : Universidad Privada Antenor Orrego, 2016.  
<https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/2541>.
- Serrano, E y Padilla, E. 2019. Análisis de los cambios en las propiedades mecánicas de materiales de subrasante por la adición de materiales poliméricos reciclados. Bogota - Colombia : Universidad de la Salle, 2019.  
<https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/download/2695/2671/6267>.

- Sulla de la Cruz, Denis. 2018. Evaluación de la Aplicación del Polímero Sika Dust Seal PE en Caminos no Pavimentados, Intersección Av. San Luis y Cuadra 1- Palian-Huancayo 2017. Huancayo - Peru : Universidad Peruana Los Andes, 2018. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/803>.
- T, Lopez., y otros. 2010. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Mexico : Revista Iberoamericana de Polímeros, 2010. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-industrial-de-santander/mecanica-de-suelos-i/polimeros-para-la-estabilizacion-volumetrica-de-ar/59619850>.
- Woodward, A. 1995. Understanding Polymer Morphology. s.l. : Hanser Pub Inc , 1995. <https://www.amazon.com/Understanding-Polymer-Morphology-Hanser-Books/dp/1569901414>.
- Yepez, P. 2014. La estabilización de suelos. Valencia : Universidad Politecnica de Valencia, 2014. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/01/23/la-estabilizacion-de-suelos/>.
- Zambrano, A y Casanova, M. 2016. Uso de Polimeros Como estabilizador de suelos aplicado en vias de arcilla (CL) Y grava arcillosa (GC). Sambordon - Ecuador : Universidades de Especialidades Espirito Santo UUES, 2016. <http://201.159.223.2/handle/123456789/567>.
- Aamer, N y Al-Rkyaby, A. 2022. Strength, Durability, and Microstructures characterization of. Irak : Case Studies in Construction Materials , 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522001206>.
- Al-Jabban, W., & et al. 2019. Briefing: Common laboratory procedures to prepare and cure stabilised soil specimens: A short review. s.l. : Geotechnical Research, 7(1), 3-10., 2019. <https://doi.org/10.1680/jgere.19.00035>.
- Beltran, M y Copado, J. 2011. Mexico : Instituto Tecnológico de Sonora, 2011. [http://biblioteca.itson.mx/dac\\_new/tesis/310\\_copado\\_jose.pdf](http://biblioteca.itson.mx/dac_new/tesis/310_copado_jose.pdf).
- Blas, C y Paredes, O. 2021. “Estabilización de Suelo de la Carretera Vecinal Tramo YautánCalpoc, con Material Convencional y Aditivo con Polímeros,. Chimbote : Universidad Cesar Vallejo, 2021. [file:///C:/Users/Pc/Downloads/Blas\\_PCN-Paredes\\_COR-SD.pdf](file:///C:/Users/Pc/Downloads/Blas_PCN-Paredes_COR-SD.pdf).
- Callister, D. 1996. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2. Barcelona : REVERTÉ, S. A., , 1996. <https://books.google.com.pe/books?id=YiWdEYEHBIAC&printsec=frontcover>.

- Canaria, A y Martinez, A. 2020. Estudio de estabilización de material para la conformación de subrasante en terraplenes del municipio de la primavera – vichada, mediante la adición de polímeros sintéticos ecológicos. Bogota - Colombia : Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2020.  
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25230/CanariaPinedaAngelaGyneth2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Carolina, A. 2017. Optimización de Mezclas de Suelo Cemento y Espesores del Estrato de Reemplazo con Limos Inorgánicos para Cimentaciones Superficiales. Colombia : Universidad Industrial de Santander , 2017.  
<http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/36735/1/169800.pdf>.
- Cay, A., & et al. 2014. Characterization and swelling performance of physically stabilized electrospun poly(vinyl alcohol)/chitosan nanofibres. s.l. : European Polymer Journal, 61, 253- 262., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.10.017>.
- Chomba, W y Vasquez, W. 2022. Determinar las propiedades físicas y mecánicas en subrasantes del pavimento flexible, utilizando vinaza y polímero en Guadalupe La Libertad -2022". Chiclayo - Peru : Universidad Cesar Vallejo, 2022.  
[file:///C:/Users/Pc/Downloads/Chomba\\_LWE-SD.pdf](file:///C:/Users/Pc/Downloads/Chomba_LWE-SD.pdf).
- Damiano, Y y Perez, M. 2022. Análisis de la estabilización química con polímeros para el mejoramiento del camino vecinal Empalme AP-670 al AP-659 Lliupapuquio - Apurímac, 2022. Lima : Universidad Cesar Vallejo, 2022.  
[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86115/Damiano\\_QY-P%c3%a8rez\\_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/86115/Damiano_QY-P%c3%a8rez_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Farhandasi, R., & Syahril, S. 2020. Effect of palm shell ash and phosphoric acid chemical solution on subgrade material towards CBR value. s.l. : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,, 2020. <https://doi.org/10.1088 / 1757-899X / 732/1/012015>.
- Guerrero, K. 2022. Estabilización de suelo cohesivo incorporando aditivo sika dust seal en la trocha carrozable Vencala Boggiano - Lambayeque. Lambayeque : Universidad Señor de Sipan, 2022. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/10233>.
- Hermida, H. 2011. Polímeros. s.l. : Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología - Instituto Nacional de Educación Tecnológica., 2011.  
<https://www.virtualpro.co/biblioteca/polimeros>.

- Ikeagwuani, C., & Nwonu. 2018. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. s.l. : Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>.
- K, Greif M. y Vosseburger. 1992. Tecnología de los plásticos. Barcelona : Hanser editorial, S.L, 1992. [https://www.centrallibrera.net/es/libro/introduccion-a-la-tecnologia-de-los-plasticos\\_253811](https://www.centrallibrera.net/es/libro/introduccion-a-la-tecnologia-de-los-plasticos_253811).
- Lobo, A. 1994. Geología del subsuelo del nororiente de la ciudad de Santafé de Bogotá D.C. / Alberto Lobo-Guerrero Uzcátegui. Colombia : Universidad Nacional De Colombia, 1994. <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9341>.
- Meregildo, M y Ramirez, C. 2022. Influencia estabilizador Z con polímeros para mejorar propiedades mecánicas de subrasante en carretera playa El Alambre a playa El Brujo del Km 0.00 AL Km 8.00, Ascope, 2022. Trujillo : Universidad Privada del Norte , 2022. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/33214>.
- Miranda, J. 2015. Reacciones y sus mecanismos en la degradacion de Polimeros. Mexico : Instituto Politecnico Nacional, 2015. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18230/25-1-16842.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Montejo, A. F. 2002. Ingenieria de Pavimentos. Bogota : Universidad Catolica de Colombia, 2002. [https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca).
- Mora, S y Tiusaba, J. 2020. Comportamiento de los polimeros como agente estabilizante en los suelos para la construccion de Cimentaciones. Bogota : Universidad Catolica de Colombia, 2020. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0407a28f-170e-495f-b622-394837936913/content>.
- MTC. 2013. 2013. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. s.l. : Ministerio de transportes y Comunicaciones, 2013. <https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2013/Julio/14/RD-18-2013-MTC-14.pdf>.
- Ocampo, N. 2021. Análisis de las propiedades físico-mecánicas y CBR de suelos cohesivos de subrasante mezclados con partículas de tereftalato de polietileno (PET). Ambato - Ecuador : Universidad Tecnica de Ambato, 2021.

- <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33593>.
- P, Uribe V. M. y Mehrenberger Y. 1996. Los polímeros síntesis, caracterización, degradación y reología. Mexico : Instituto Politécnico Nacional., 1996. <https://es.scribd.com/document/434882770/342118508-Los-Polimeros-Sintesis-Characterizacion-Degradacion-y-Reologia-Uribe-M-y-P-Mehrenberger-IPN-Mexico-1996-pdf>.
- Ponce, E y Segundo, H. 2023. Aplicación del aditivo Sika Dust Seal en la estabilización de suelos para vías no pavimentados en el tramo Antarumi – San Mateo, Tintay, Aymaraes – Apurímac. Abancay - Peru : Universidad Nacional Micaela Bastidas, 2023. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1219>.
- Sagastegui, G. 2016. Eficiencia de la conservación vial, empleando aditivos químicos en superficies de rodadura en carretera no pavimentada: Ascope - Contumaza. Piura - Peru : Universidad Privada Antenor Orrego, 2016. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/2541>.
- Serrano, E y Padilla, E. 2019. Análisis de los cambios en las propiedades mecánicas de materiales de subrasante por la adición de materiales poliméricos reciclados. Bogota - Colombia : Universidad de la Salle, 2019. <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/download/2695/2671/6267>.
- Sulla de la Cruz, Denis. 2018. Evaluación de la Aplicación del Polímero Sika Dust Seal PE en Caminos no Pavimentados, Intersección Av. San Luis y Cuadra 1- Palian-Huancayo 2017. Huancayo - Peru : Universidad Peruana Los Andes, 2018. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/803>.
- T, Lopez., y otros. 2010. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Mexico : Revista Iberoamericana de Polímeros, 2010. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-industrial-de-santander/mecanica-de-suelos-i/polimeros-para-la-estabilizacion-volumetrica-de-ar/59619850>.
- Woodward, A. 1995. Understanding Polymer Morphology. s.l. : Hanser Pub Inc , 1995. <https://www.amazon.com/Understanding-Polymer-Morphology-Hanser-Books/dp/1569901414>.
- Yepez, P. 2014. La estabilización de suelos. Valencia : Universidad Politecnica de Valencia, 2014. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/01/23/la-estabilizacion-de-suelos/>.

Zambrano, A y Casanova, M. 2016. Uso de Polimeros Como estabilizador de suelos aplicado en vias de arcilla (CL) Y grava arcillosa (GC). Sambordon - Ecuador : Universidades de Especialidades Espirito Santo UUES, 2016.  
<http://201.159.223.2/handle/123456789/567>.

/RV DQH[RV SDQHO IRWRJUiILFR \ RWURV GRFXPHQWRV F  
GLJLWDO LQVWLWXFLRQDO HQ OD %LEOLRWHFD &HQQWUDC