



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**MEJORA DEL DESEMPEÑO DE BASES SUELO-CEMENTO
MEDIANTE NANOCOMPUESTOS TENSIOACTIVOS
CATIÓNICOS EN LA CARRETERA RUTA PU-165 CARACOTO -
HUATA, 2024**

TESIS

PRESENTADA POR:

DENNIS MARWIN RAMOS MEDINA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2025



DENNIS RAMOS MEDINA

MEJORA DEL DESEMPEÑO DE BASES SUELO-CEMENTO MEDIANTE NANOCOMPUESTOS TENSIOACTIVOS CATIONICO...

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:576752844

163 páginas

Fecha de entrega
9 abr 2026, 10:12 p.m. GMT-5

32.223 palabras

Fecha de descarga
9 abr 2026, 10:17 p.m. GMT-5

180.879 caracteres

Nombre del archivo
DENNIS MARWIN RAMOS MEDINA v3.pdf

Tamaño del archivo
2.3 MB

ING. NESTOR SUCA SUCA



15% 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)

Fuentes principales

- 11% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 13% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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.

The image shows two handwritten signatures in blue ink. The signature on the left is over a circular stamp that reads: "ING. CINO FRANK LAQUE CORDOVA", "DOCENTE UNIVERSITARIO", and "COD. UNA N° 2006511". The signature on the right is over the text "ING. NESTOR SUCA SUCA".





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**MEJORA DEL DESEMPEÑO DE BASES SUELO-CEMENTO MEDIANTE
NANOCOMPUESTOS TENSOACTIVOS CATIONICOS EN LA CARRETERA RUTA
PU-165 CARACOTO - HUATA, 2024**

TESIS PRESENTADA POR:

DENNIS MARWIN RAMOS MEDINA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:

D.Sc. EDGAR VIDAL HURTADO CHAVEZ

PRIMER MIEMBRO:

D.Sc. CESAR EDWIN GUERRA RAMOS

SEGUNDO MIEMBRO:

Ing. JOSE LUIS CUTIPA ARAPA

DIRECTOR / ASESOR:

M.C. GINO FRANK LAQUE CORDOVA

Área: Transportes.

Tema: Mejora de bases suelo-cemento mediante nanocompuestos tensioactivos cationicos.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 23 de diciembre de 2025





DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, quien me guía por el sendero del bien y lo correcto. Por darme la capacidad de razonar, de la lógica, de la creatividad, lo cual me dio la posibilidad de estudiar tan noble carrera como es la Ingeniería Civil.

*A mi madre, **Liliana Medina**, quien con su determinación inquebrantable ha sido la roca firme sobre la que he construido mi camino. Su sacrificio y su amor ha sido el motor de mi esfuerzo. Sin su apoyo moral, económico y emocional, este logro no habría sido posible.*

*A mis hijos, **Valentina Matilde y Thiago Fabián**, cuyo porvenir me inspira y motiva. Que este trabajo sea una antorcha que ilumine su senda en el mundo de la ciencia y la razón, así como la ingeniería ha iluminado la mía.*

*In memoriam a mi hermano **Edu Arcadio**, con quien compartí el sueño del conocimiento en la Universidad Nacional del Altiplano. Hoy, llevo su anhelo en cada cálculo, en cada estructura, en cada idea hecha realidad. Su memoria es parte de este logro, y su espíritu seguirá viviendo en cada una de mis obras.*

Dennis Marwin Ramos Medina.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, honorable institución que me brindó el conocimiento y las herramientas para forjarme como ingeniero. En sus aulas aprendí que la ciencia no solo es teoría, sino práctica, esfuerzo y dedicación. A su laboratorio de suelos, donde la experimentación transforma la idea en certeza y la hipótesis en realidad, le agradezco la oportunidad de consolidar mis estudios con el rigor que exige la ingeniería.

A mi asesor, el ingeniero Gino Frank Laque Córdova, quien con su orientación, exigencia y sabiduría ha sido un guía en esta travesía. Su dedicación y paciencia fueron fundamentales para que este trabajo alcanzara la solidez que lo respalda.

A mis docentes de la carrera de Ingeniería Civil, quienes con su enseñanza han labrado en mí el rigor y la disciplina del conocimiento.

A mi familia, que ha sido sostén en cada etapa de este arduo camino. A todos aquellos que, con su palabra, su apoyo o su enseñanza silenciosa, han sido parte de este proceso, les brindo mi más sincero reconocimiento. Porque la grandeza de la ciencia y la ingeniería no es obra de un solo individuo, sino el resultado del esfuerzo colectivo de quienes creen en el poder del saber.

Dennis Marwin Ramos Medina



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2.1. Pregunta general de la investigación.....	23
1.2.2. Preguntas específicas de la investigación.....	23
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.3.1. Justificación práctica (para qué se hace la investigación).....	24
1.3.2. Justificación teórica (por qué se hace la investigación)	25
1.3.3. Justificación social (para quién se hace la investigación).....	26
1.3.4. Justificación metodológica (cómo se hace la investigación)	26
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
1.4.1. Objetivo general	27
1.4.2. Objetivos específicos	27
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	28



1.5.1.	Hipótesis general	28
1.5.2.	Hipótesis específicas	28
1.6.	DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
1.6.1.	Delimitación Espacial	29
1.6.2.	Delimitación Temporal	29
1.6.3.	Delimitación Teórica.....	29
1.6.4.	Delimitación Social	30
CAPÍTULO II		
REVISIÓN DE LA LITERATURA		
2.1.	ANTECEDENTES	31
2.1.1.	Antecedentes Internacionales	31
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	36
2.1.3.	Antecedentes Locales	43
2.2.	MARCO TEÓRICO	48
2.2.1.	Variable independiente: Adición nanocompuestos tensioactivos catiónicos	48
2.2.1.1.	Concepto de nanocompuestos	48
2.2.1.2.	Ventajas de los nanocompuestos.....	49
2.2.1.3.	Clasificación de nanocompuestos	50
2.2.1.4.	Nanocompuestos para la mejora del suelo	51
2.2.1.5.	Nanocompuestos y sus avances	51
2.2.1.6.	Propiedades y nanocompuestos del suelo	53
2.2.2.	Concepto de Tensioactivos	54
2.2.2.1.	Tipos de tensioactivos	55
2.2.2.2.	Caracterización de suelo-cemento	55



2.2.2.3.	Análisis Granulométrico	55
2.2.2.4.	Clasificación de suelos.....	56
2.2.2.5.	Contenido de humedad.....	62
2.2.2.6.	Límite de Atterberg.....	63
2.2.2.7.	Descripción de suelos.....	65
2.2.3.	Variable dependiente: Desempeño de bases suelo cemento	67
2.2.3.1.	Densidad de compactación.....	67
2.2.3.2.	Proctor estándar.....	69
2.2.3.3.	Proctor modificado.....	71
2.2.3.4.	Índice de soporte California Bearing Ratio (CBR)-ASTM D1883/NTP 339.145	72
2.2.3.5.	Procedimiento para determinación del CBR.....	73
2.2.3.6.	Relación de Soporte California Bearing Ratio (Relación de CBR)	76
2.2.3.7.	Diseño de mezcla suelo-cemento.....	79
2.2.3.8.	Humedecimiento y secado de mezclas suelo-cemento compactadas	82
2.2.3.9.	Resistencia a la compresión simple	83
2.3.	MARCO CONCEPTUAL	83
2.3.1.	La estabilización de suelos.....	83
2.3.2.	Carga	84
2.3.3.	Energía de compactación	84
2.3.4.	Ensayo Proctor Modificado.....	84
2.3.5.	Estudio de suelos.....	84
2.3.6.	Suelo.....	84



2.3.7. Granulometría	85
2.3.8. Límites de consistencia	85

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	86
3.1.1. Tipo de Investigación	86
3.1.2. Enfoque de investigación	86
3.1.3. Nivel de Investigación.....	87
3.1.4. Diseño de investigación	87
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO	88
3.2.1. Población.....	88
3.2.2. Muestreo.....	88
3.2.3. Muestra.....	89
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN	89
3.3.1. Técnicas	89
3.3.2. Instrumentos	90
3.3.2.1. Instrumentos de Investigación	90
3.3.2.2. Validez y Confiabilidad	90
3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	91
3.4.1. Procedimientos de la Recolección de Datos	91
3.4.2. Procedimiento del Análisis de Datos	91
3.4.3. Interpretación de Resultados	92
3.4.4. Validación de Resultados	92
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	93



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	94
4.1.1. Respecto al Objetivo Específico 1	94
4.1.1.1. Ensayos de caracterización de suelo-cemento	94
4.1.1.2. Ficha técnica de caracterización del suelo	99
4.1.2. Respecto al Objetivo Específico 2	102
4.1.2.1. Análisis de densidad.....	102
4.1.2.2. Análisis comparativo de modelos	104
4.1.2.3. Análisis de contenido de humedad.....	108
4.1.2.4. Resultados finales del objetivo específico 2	115
4.1.3 Respecto al Objetivo Específico 3	117
4.1.3.1. Resistencia y estabilidad	117
4.1.3.2. Resultados Finales del Objetivo Específico 3.....	124
4.1.4. Respecto al Objetivo Específico 4	124
4.1.4.1. Resultados Finales del Objetivo Específico 4.....	130
4.1.5. Respecto al Objetivo Específico 5	130
4.1.5.1. Resultados Finales del Objetivo Específico 5.....	136
4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	136
4.2.1. Contrastación de Hipótesis general	136
4.2.2. Contrastación de Hipótesis específica 1	137
4.2.3. Contrastación de Hipótesis específica 2.....	138
4.2.4. Contrastación de Hipótesis específica 3.....	139
4.2.5. Contrastación de Hipótesis específica 4.....	139



4.2.6. Contrastación de Hipótesis específica 5.....	140
4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS POR OBJETIVOS	141
4.3.1. Discusión de resultados del Objetivo Específico 1	141
4.3.2. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 2.....	142
4.3.3. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 3.....	143
4.3.4. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 4.....	144
4.3.5. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 5.....	145
4.3.6. Discusión de Resultados del Objetivo General	145
V. CONCLUSIONES.....	149
VI. RECOMENDACIONES.....	152
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
ANEXOS.....	161



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Clasificación de suelos por SUCS 57
Tabla 2	Clasificación de suelos por AASHTO..... 60
Tabla 3	Nomenclatura de los Grupos de Clasificación por AASHTO..... 61
Tabla 4	Clasificación de suelo según el sistema AASHTO y el sistema ASTM 62
Tabla 5	Especificaciones de la prueba Proctor estándar..... 70
Tabla 6	Especificaciones de la prueba Proctor modificado..... 71
Tabla 7	Categoría de subrasante 78
Tabla 8	Valores típicos de CBR 79
Tabla 9	Valor relativo de soporte para bases granulares 79
Tabla 10	Operacionalización de variables..... 93
Tabla 11	Ensayos físicos y mecánicos realizados 100
Tabla 12	Análisis de la densidad 103
Tabla 13	Análisis de varianza (ANOVA) del modelo cuadrático..... 107
Tabla 14	Proporciones de cemento y nanocompuestos tensioactivos catiónicos 109
Tabla 15	Análisis de varianza (ANOVA) del modelo cuadrático..... 113
Tabla 16	Resultados del CBR..... 118
Tabla 17	NOVA – CBR al 95% 122
Tabla 18	ANOVA – CBR al 100% 122
Tabla 19	Humedecimiento con y sin cepillado 125
Tabla 20	Análisis de Varianza (ANOVA) Pérdida de volumen sin cepillado 128
Tabla 21	Análisis de Varianza (ANOVA) Pérdida de volumen con cepillado 129
Tabla 22	Resistencia a la compresión..... 131
Tabla 23	ANOVA – Modelo Cuadrático de Resistencia a la Compresión 134



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Tipos de estructuras que se pueden obtener en los compuestos formados por polímeros y partículas laminares	50
Figura 2 Imagen representativa de un tensioactivo.....	54
Figura 3 Carta de plasticidad para clasificación de suelos de partículas	58
Figura 4 Límites de Atterberg	63
Figura 5 Deslizamiento de un suelo en el límite líquido	64
Figura 6 Signos convencionales para perfil de Calicatas – Clasificación AASHTO66	
Figura 7 Signos convencionales para perfil de calicatas- Clasificación SUCS	66
Figura 8 Equipo para el ensayo de Proctor estándar.....	70
Figura 9 Curva de ensayo Proctor.....	81
Figura 10 DMS según % de cemento y % de NLF.....	104
Figura 11 Modelo Lineal - Densidad Máx. Seca ($R^2 = 0.3827$)	105
Figura 12 Modelo Cuadrático - Densidad Máx. Seca ($R^2 = 0.5040$)	106
Figura 13 Modelo Lineal – Contenido Óptimo de Humedad ($R^2 = 0.3540$)	111
Figura 14 Modelo Cuadrático – Contenido Óptimo de Humedad ($R^2 = 0.5072$)	112
Figura 15 CBR según % de cemento y % de NLF	119
Figura 16 Modelo Lineal – CBR al 95%	120
Figura 17 Análisis comparativo del modelo cuadrático-CBR al 95% y modelo cuadrático de CBR al 100%	121
Figura 18 Durabilidad según % de cemento y % de NLF	126
Figura 19 Vista isométrica del modelo sin cepillado y del modelo con cepillado ...	127
Figura 20 Resistencia a compresión simple según % de cemento y % de NLF	132



Figura 21 Modelo multivariable-Resistencia a la compresión y Modelo cuadrático-
Resistencia a la compresión..... 134



ACRÓNIMOS

SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
AASHTO	: Asociación Americana de funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales
ASTM	: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
CBR	: California Bearing Ratio
DMS	: Densidad Máxima Seca
CHO	: Contenido óptimo de humedad
LL	: Límite Líquido
LP	: Límite Plástico
IP	: Índice de Plasticidad
NLF	: Nano Liquid Formulation (Nano Formulación Líquida)



RESUMEN

Esta investigación se centra en la necesidad de buscar alternativas para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los suelos que se utilizan en las carreteras de la región Puno, los cuales presentan predominancia de suelos arcillosos. Se propone el uso de nanocompuestos tensioactivos catiónicos de naturaleza vegetal (polímeros) aplicados a bases suelo-cemento, con el fin de mejorar la resistencia y durabilidad de las vías no pavimentadas, mejoramiento que se refleja en los resultados de ensayos de laboratorio de suelos. El **objetivo** general fue de analizar el desempeño de la base suelo-cemento de la ruta PU-165 con la incorporación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos. La **metodología** fue bajo una investigación de tipo básica, con enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y diseño experimental, realizándose ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas de una cantera de Huata. Los **resultados** más relevantes son como sigue, en la densidad máxima seca de 2.249 g/cm³ con 0.5% de cemento y 0.05% de nanocompuesto, el CBR al 100% resulta entre 413.6% a 454.5% con 1.55% de cemento y con 0.03 % a 0.1% de nanocompuesto, la resistencia a la compresión simple de 35.3 kg/cm² con 2% de cemento y 0.03% de nanocompuesto, la pérdida volumétrica por humedecimiento y secado es de 1.11% con 2.0% de cemento y 0.03% de nanocompuesto. Los modelos matemáticos ajustados mostraron coeficientes de determinación R² superiores a 0.95 en CBR y compresión, validando la eficacia técnica de la propuesta. Se **concluye** que la incorporación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos en suelos estabilizados con cemento para bases, mejoran su resistencia y durabilidad al desgaste, convirtiéndose en una alternativa para mejorar infraestructuras viales no pavimentadas.

Palabras clave: Bases suelo-cemento, Desempeño de bases, Estabilización de bases, Nanocompuestos tensioactivos, Polímeros.



ABSTRACT

This research focuses on the need to improve the properties of soils used in roads in the Puno region, which are predominantly clayey soils with physical and mechanical limitations. The use of cationic surfactant nanocomposites (a mixture of monomers and polymers of vegetal origin) applied to soil-cement bases is proposed in order to improve the stability, strength, and durability of unpaved roads, an improvement that will be reflected in the results of soil laboratory tests. The overall objective was to improve the performance of soil-cement bases with nanocomposites on the PU-165 highway during 2024, through basic research with a quantitative, explanatory approach and experimental design. Laboratory tests were carried out on samples extracted from a quarry in the area, evaluating the maximum dry density (up to 2,249 g/cm³), the optimum moisture content (5.82%), the CBR index (up to 454.5% at 100% compaction), compressive strength (up to 35.3 kg/cm²), and volumetric loss due to wetting and drying (less than 3% with brushing), with optimal results including the use of the additive. The best combinations corresponded to dosages of 2.0% cement with 0.03% additive. The adjusted mathematical models showed coefficients of determination R^2 greater than 0.95 in CBR and compression, validating the technical effectiveness of the proposal. It is concluded that the incorporation of cationic surfactant nanocomposites significantly improves the structural behavior of soil-cement bases, making it an effective solution for reinforcing road infrastructure in areas with low-quality soils.

Keywords: Base performance, Base stabilization, Polymers, soil-cement bases, Surfactant nanocomposites.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la construcción de obras viales en el Perú y en especial en la región de Puno, la estabilización del suelo y la calidad de las bases resultan fundamentales para garantizar la durabilidad y seguridad de las carreteras (Laricano y Reynaldo, 2021). La región Puno al ubicarse en el altiplano peruano y en la sierra del Perú, enfrenta dificultades particulares asociadas a la presencia de suelos arcillosos limosos, los cuales presentan una baja capacidad portante y son propensos a la retención de humedad (Guzmán, 2021). Estas condiciones del suelo generan vías no pavimentadas con deficiencias en su resistencia, incrementando los costos de mantenimiento y reparación.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC] (2014) establece requisitos mínimos para la calidad de las bases en la construcción de vías, enfatizando la necesidad de contar con suelos estables para reducir el deterioro prematuro de la infraestructura. Aun así, en diversas regiones incluyendo la Región de Puno, la aplicación de aditivos estabilizadores es insuficiente o incipiente, lo que limita la mejora del desempeño de las bases suelo-cemento. En Puno, particularmente, las fuertes precipitaciones y la sobrecarga de tráfico aceleran la degradación de las vías, afectando la transitabilidad y la seguridad vial (Gobierno Regional de Puno, 2016).

A nivel internacional, en todo el planeta, se está observando una tendencia creciente en el empleo de aditivos químicos y nanotecnológicos para la estabilización de suelos, con resultados favorables en términos de mejora de la resistencia y reducción de la permeabilidad (Nesteresko, 2018). Países como China, Brasil y Estados Unidos han



reportado experiencias exitosas en la aplicación de estabilizantes para suelos de baja calidad, contribuyendo a la optimización de costes y al aumento de la vida útil de las infraestructuras viales.

En el Perú, la adopción de aditivos de nanotecnología en suelos es relativamente reciente, aunque cada vez se documentan más casos de aplicación exitosa en regiones costeras y andinas (MTC, 2014). No obstante, la región Puno presenta condiciones climáticas y geológicas particulares, con suelos altamente plásticos y saturados, lo que exige soluciones tecnológicas específicas (Guzmán, 2021). El limitado uso de estos aditivos en zonas de altura indica la necesidad de estudios que demuestren la factibilidad y eficacia de tales intervenciones.

El distrito de Huata, en la región Puno, posee vías departamentales y rurales con un alto contenido de arcilla y limos, sufriendo deterioro acelerado producto de la combinación de clima extremo y tráfico pesado (Gobierno Regional de Puno, 2015). La falta de estabilidad de los suelos propicia deformaciones y baches que empeoran la calidad del servicio vial, lo cual repercute en la seguridad y confort de los usuarios, además de limitar el desarrollo socioeconómico de la zona.

La elección del aditivo para realizar esta tesis se debe a que en la región Puno se concesionaron varias rutas para realizar intervenciones de mejoramiento en vías de bajo tránsito, una de estas concesiones es la de “MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA EMP. PE-3S (DV. CALAPUJA) – EMP. PE-34 A (DEUSTUA); EMP. PE-3S (CARACOTO) – QUIVILLACA– EMP. PU-947, EMP. PE-3S (JULIACA) -EMP. PE-3SO (COATA), EMP. PE-34H (PTE. CCACACHI)-LORI PUNCO – EMP. PU-120, EMP. PE-34H (TARACO) – SAMAN – EMP. PU -113(DV. ARAPA); EMP. PE-3S (CHASQUI)-PILCUYO -ACCASO-PUCARA; EMP. PE-3S (BUENAVISTA



CHACACHACA)-YUNGUYO-ZEPITA, POR NIVELES DE SERVICIO, DISTRITO DE LAMPA-PROVINCIA DE LAMPA - DEPARTAMENTO DE PUNO”, el cuál fue concesionado por 5 años desde el año 2024 hasta el año 2029. Dentro de esta concesión se ubica la ruta PU-165 en la cual se realizarán trabajos de transitabilidad, ejecución de base y un tratamiento superficial asfáltico. En el caso de la base se especifica ejecutar una base suelo-cemento que incluya algún aditivo que mejore sus propiedades físico mecánicas, este aditivo podría ser un polímero, aceite sulfonado u otro, que mediante pruebas de laboratorio demuestre su eficacia. En este entender se hizo el contacto con un proveedor del aditivo denominado nanocompuesto tensioactivo catiónico, el cual nunca se usó en la región Puno, por lo que esta investigación busca dar una alternativa de solución y verificar mediante ensayos de laboratorio si el nanocompuesto tensioactivo catiónico logra mejorar las propiedades físico-mecánicas de las muestras suelo-cemento a utilizarse en la base ruta PU-165 Caracoto-Huata.

El **diagnóstico** refleja la insuficiente durabilidad de las bases suelo-cemento en las vías no pavimentadas de Puno, caracterizadas por el desgaste frente al cambio de clima cuando este se encuentra a la intemperie, también por tráfico y por ende el alto costo de mantenimiento. Esto se refleja en la vía Huata (Km 55+250)-Emp. PE-3S (Dv. Huata) el se encuentra al lado de la ruta PU-165 que es parte de esta investigación, donde se hizo un mejoramiento a nivel de soluciones básicas en vías de bajo tránsito en el año 2021, con trabajos de mantenimiento hasta el año 2023. Se realizó una inspección en el año 2024 detectando baches a nivel de base por efecto del tránsito y del intemperismo, prueba de ello se presenta un panel fotográfico de los daños en el Anexo 15 Panel fotográfico de daños en la ruta Huata (Km 55+250)-Emp. PE-3S (Dv. Huata). El **pronóstico** indica que, sin intervenciones efectivas, el deterioro de las carreteras se agravará, aumentando los riesgos de accidentes y los gastos de rehabilitación (MTC, 2014). El **control del**



pronóstico radica en la implementación de soluciones tecnológicas, como los aditivos con nano compuestos tensioactivos catiónicos, orientadas a robustecer las bases suelo-cemento y mitigar los efectos de la humedad y el tráfico.

La presente investigación es **pertinente** porque aborda directamente la problemática en cuanto al desgaste de bases suelo-cemento en las vías no pavimentadas de la región Puno, planteando una posible solución basada en el uso de nanotecnología. Es **relevante**, dado que aporta conocimiento científico y técnico para el diseño y mantenimiento de vías seguras, con un enfoque sostenible y escalable a otras zonas con condiciones similares (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010). Es **importante** en el ámbito local porque impacta en la calidad de vida de los habitantes, al facilitar el transporte de pasajeros y mercancías, reduciendo así los costos logísticos y potenciando el desarrollo socioeconómico del distrito de Huata.

Por lo tanto, el problema que estudia esta investigación es la **inestabilidad de los suelos arcillosos limosos** utilizados en las bases de las vías no pavimentadas de la región Puno, lo que provoca deformaciones prematuras y condiciones de transitabilidad deficientes. Se considera la aplicación de aditivos con nano compuestos tensioactivos catiónicos como una alternativa para mejorar las propiedades físico-mecánicas de las bases suelo-cemento, incrementar la durabilidad de las vías y optimizar el uso de recursos locales (Guzmán, 2021).

Las variables a estudiar se han definido como **variable independiente** al uso de nanocompuestos tensioactivos catiónicos en las bases suelo-cemento, y a la **variable dependiente** como el desempeño físico-mecánico de las bases (densidad, resistencia, índice CBR y pérdida de volumen).



El estudio propone una investigación de tipo básica, de enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y de diseño experimental, realizando ensayos de laboratorio bajo normas estandarizadas (ASTM, AASHTO) para comparar diversas dosificaciones de nano compuestos tensioactivos catiónicos en muestras de suelo-cemento (MTC, 2014). Posteriormente, se analizarán los datos estadísticamente para identificar la proporción óptima que mejore la capacidad portante y la resistencia de las bases (Arias & Cangalaya, 2023).

Por todo lo descrito, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Pregunta general de la investigación

- ¿Cómo mejoraría el desempeño de la base suelo-cemento mediante un nanocompuesto tensioactivo catiónico en la carretera ruta PU-165 Caracoto-Huata?

1.2.2. Preguntas específicas de la investigación

- ¿Cómo se caracterizan las propiedades físico-mecánicas de un suelo destinado a la base de la carretera PU-165 Caracoto - Huata?
- ¿Cómo incide el nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.05%, 0.07% y 0.1% en la máxima densidad seca de un suelo-cemento para base?
- ¿Cómo influye el nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03%, 0.05%, 0.07% y 0.1% en el valor de la relación de soporte de un suelo-cemento para base?
- ¿Cómo repercute el nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03% en la



durabilidad de un suelo-cemento para base?

- ¿Qué efecto tiene el nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03% en la resistencia a la compresión simple de un suelo-cemento para base?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Justificación práctica (para qué se hace la investigación)

En el distrito de Huata, región Puno, las vías no pavimentadas presentan deficiencias en su capacidad portante y resistencia, lo cual afecta la seguridad y el confort de los usuarios. Por esta problemática, la presente investigación está centrada en la aplicación de aditivos líquidos con nano compuestos tensioactivos catiónicos en bases suelo-cemento. Este procedimiento pretende mejorar las características físico-mecánicas del suelo para garantizar una mayor durabilidad de las vías y reduciendo los constantes costos de mantenimiento (Chamba, 2021). De este modo, este estudio ofrece una alternativa práctica y orientada a resolver un problema real, porque aborda la inestabilidad de los suelos arcillosos limosos. Asimismo, esta propuesta brinda la posibilidad de optimizar la calidad de la infraestructura vial y favorecer el desarrollo económico local de la Región de Puno, pues se facilitan el tránsito y la movilidad de personas y mercancías. Al incrementar la resistencia, estabilidad y durabilidad del suelo, se minimizan los daños ocasionados por la intemperie y el uso continuo de las carreteras. Este enfoque práctico, respaldado por el uso de recursos locales y técnicas estandarizadas, exhibe un alto potencial de transferencia tecnológica e innovación en el ámbito de la ingeniería de pavimentos.



1.3.2. Justificación teórica (por qué se hace la investigación)

Desde el punto de la teoría, la aplicación de aditivos líquidos con nano compuestos tensioactivos catiónicos en bases suelo-cemento representa un aporte innovador a la literatura especializada de la ingeniería civil en nuestro país. La posibilidad de modificar la microestructura del suelo-cemento para mejorar su comportamiento mecánico despierta un gran interés investigativo, pues se busca comprender los mecanismos de interacción entre los tensioactivos y las partículas del suelo (Arias & Cangalaya, 2023). Al estudiar estas interacciones, se generan conocimientos importantes que podrían orientar futuras investigaciones relacionadas con la estabilización de suelos dado que en la actualidad existe esta tendencia a nivel mundial.

Además, la importancia de profundizar en metodologías que combinen la nanotecnología con materiales de construcción tradicionales radica en la necesidad de contar con soluciones más eficientes y sostenibles. Este fundamento teórico se nutre de principios de mecánica de suelos y de química de materiales, permitiendo una aproximación sistémica a la problemática de la baja capacidad portante en vías no pavimentadas. En consecuencia, la presente investigación extiende las fronteras del conocimiento al examinar soluciones que aprovechan las propiedades de los tensioactivos para lograr mezclas más estables y resistentes.

La viabilidad técnica se da en base del “Documento técnico soluciones básicas en carreteras no pavimentadas” emitidas por el MTC mediante la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, en la cual presenta especificaciones técnicas para el uso de productos químicos como los polímeros.



1.3.3. Justificación social (para quién se hace la investigación)

La comunidad local del distrito de Huata se ve especialmente beneficiada al contar con vías más seguras y confortables. El deficiente estado de las carreteras repercute en la calidad de vida de los habitantes, ya que dificulta el traslado de pasajeros y mercancías, y aumenta los costos logísticos. Al mejorar la resistencia de las bases suelo-cemento con nano compuestos tensioactivos catiónicos, se promueve una movilidad más estable y confiable, con impactos positivos en el desarrollo regional. Por tanto, la implementación de estos métodos de estabilización contribuye a reducir las brechas de infraestructura y facilita el flujo comercial en la zona (Villalba & Venegas, 2022).

Del mismo modo, el fortalecimiento de las vías beneficia a instituciones públicas y privadas, ya que la mejora en la conectividad facilita el acceso a servicios básicos, fomenta el turismo y dinamiza la economía local. Esta relevancia social se evidencia en la posibilidad de disminuir accidentes y costos de mantenimiento, generando un círculo virtuoso de progreso que involucra a transportistas, usuarios y autoridades. En tal sentido, la propuesta aborda directamente una necesidad prioritaria de la comunidad, incidiendo de manera tangible en el bienestar de la población. Asimismo, no se perturba el bienestar ambiental ya que los nanocompuestos tensioactivos catiónicos son polímeros de naturaleza vegetal por lo que no son contaminantes y sí amigables con el medio ambiente.

1.3.4. Justificación metodológica (cómo se hace la investigación)

La investigación adopta un enfoque sistemático y científico para analizar el impacto de los nano compuestos tensioactivos catiónicos en bases suelo-



cemento. Se emplea un diseño experimental, con ensayos de laboratorio que siguen normas estandarizadas (ASTM, AASHTO) y miden variables como la densidad, el índice CBR y la resistencia a la compresión. Este procedimiento permite obtener datos cuantitativos confiables y reproducibles, con el fin de establecer conclusiones sólidas acerca de la efectividad del aditivo. Así, la metodología garantiza la objetividad y precisión requeridas en el ámbito académico (Vara, 2015).

Por otro lado, el uso de técnicas de análisis estadístico facilita la interpretación de los resultados y la detección de tendencias relevantes. Al comparar los rendimientos obtenidos con distintas proporciones del aditivo, se determinan los porcentajes óptimos y se analizan las posibles causas de las variaciones observadas. Esta aproximación metodológica, basada en la observación y experimentación sistemáticas, aporta un modelo de referencia para futuras investigaciones en el campo de la estabilización de suelos y la ingeniería vial, ampliando el horizonte de aplicación de los nano compuestos tensioactivos catiónicos.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

- Determinar si mejora el desempeño de la base suelo-cemento mediante un nanocompuesto tensioactivo catiónico en la carretera ruta PU-165 Caracoto-Huata.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas del suelo destinado a la base



de la carretera PU-165 Caracoto – Huata mediante ensayos de laboratorio y análisis normativo.

- Determinar la incidencia del nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.05%, 0.07% y 0.1% en la máxima densidad seca de un suelo-cemento para base.
- Determinar la influencia del nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03%, 0.05%, 0.07% y 0.1% en el valor de la relación de soporte de un suelo-cemento para base.
- Determinar cómo repercute el nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03% en la durabilidad de un suelo-cemento para base.
- Determinar el efecto del nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03% en la resistencia a compresión simple de un suelo-cemento para base.

1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Hipótesis general

- El nanocompuesto tensioactivo catiónico mejora el desempeño de la base suelo-cemento en la carretera ruta PU-165.

1.5.2. Hipótesis específicas

- El suelo destinado a la base de la carretera PU-165 Caracoto – Huata no cumple con los parámetros físico-mecánicos exigidos para base según la normativa, requiriendo procesos de estabilización de suelos.
- El nanocompuesto tensioactivo catiónico incide directamente en la densidad máxima seca de un suelo-cemento para base.
- El nanocompuesto tensioactivo catiónico influye directamente en el valor



de relación de soporte de un suelo-cemento para base.

- El nanocompuesto tensioactivo catiónico repercute en un aumento de la durabilidad de un suelo-cemento para base.
- El nanocompuesto tensioactivo catiónico tiene un efecto positivo en la resistencia a compresión simple de un suelo-cemento para base.

1.6. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Delimitación Espacial

La investigación se lleva a cabo en el **distrito de Huata**, ubicado en la región de **Puno, Perú**. El estudio se centrará en las Carretera Ruta PU-165 Caracoto - Huata, donde se evaluará el desempeño de las bases suelo-cemento mejoradas con nanocompuestos tensioactivos catiónicos en condiciones reales de carga y clima. Las muestras de suelo serán recolectadas de diferentes puntos del distrito para su análisis en laboratorio, permitiendo así una caracterización representativa de la zona de estudio.

1.6.2. Delimitación Temporal

El estudio se desarrollará en el período comprendido entre el **año 2024 y 2025**, abarcando la fase de recolección de muestras, ensayos de laboratorio y análisis de resultados. Se establecerá un cronograma de ejecución que permita evaluar la evolución de las propiedades de las bases suelo-cemento con nanocompuestos tensioactivos en distintas etapas de aplicación y compactación.

1.6.3. Delimitación Teórica

El estudio se basa en conceptos de ingeniería de pavimentos, mecánica de suelos y nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos. Se analizará la



influencia de los nanocompuestos tensioactivos catiónicos en la mejora de la densidad de compactación, contenido de humedad, resistencia a la compresión y durabilidad de las bases suelo-cemento. Los indicadores clave incluyen:

- Índice de soporte CBR (%), para medir la capacidad estructural de la base.
- Resistencia a la compresión simple (MPa), para evaluar la cohesión y estabilidad del material.
- Pérdida de volumen por humedad (%), como indicador de durabilidad y resistencia a la erosión.

1.6.4. Delimitación Social

El estudio está dirigido a **ingenieros civiles, investigadores, constructores viales y autoridades locales**, con el objetivo de generar información útil para optimizar la estabilización de suelos en proyectos de infraestructura vial. Los resultados pueden contribuir a la **reducción de costos de mantenimiento, mayor durabilidad de las carreteras y mejores condiciones de transitabilidad** en el distrito de Huata.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Ortiz & Guanín (2025), en su investigación titulada "Mejoramiento de suelos mediante sustitución química: Estudio de caso de la autopista Azogues - El Descanso (Ecuador)" presenta un estudio que aborda la estabilización química de suelos expansivos mediante la sustitución de parte del suelo por hidróxido de cal. El **objetivo** del estudio fue determinar el porcentaje óptimo de hidróxido de cal, según el ábaco propuesto por Charles McDowell, que permita transformar suelos clasificados inicialmente como arcillas inorgánicas de alta plasticidad (tipo CH) en suelos con características limosas (tipo ML) aptos para la pavimentación. La **metodología** se fundamentó en la obtención de muestras alteradas e inalteradas de la subrasante de la autopista, sometiéndolas a una serie de ensayos de laboratorio que incluyeron análisis granulométrico, determinación de los límites de Atterberg, pruebas de compactación (según ASTM D698), ensayos de compresión simple, corte directo y medición de la expansibilidad (ASTM D4829). Los **resultados** revelaron que la adición de un 3% de hidróxido de cal redujo el límite líquido de 53,92% a 45,8%, disminuyó el índice de plasticidad de 20,83% a 13,82% y eliminó la expansibilidad (reduciéndola de 11% a 0%), mientras que la resistencia a la compresión y la cohesión aumentaron significativamente, pasando de 0,155 kg/cm² a 2,02 kg/cm² y de 0,2 kg/cm² a 0,6 kg/cm², respectivamente. La **conclusión** establece que la estabilización química mediante sustitución con hidróxido de cal mejora de forma notable las propiedades físico-



mecánicas del suelo, lo que garantiza una base más segura y durable para proyectos de infraestructura vial. Esta investigación es de gran importancia para para esta investigación, ya que ofrece una alternativa económica y sostenible para el mejoramiento de suelos expansivos.

Bosov & Valiev (2018) en su investigación titulada "Refuerzo de suelos en la construcción de carreteras. Métodos integrales para la transformación de suelos cohesivos. Visión general de la estabilización del suelo" abordan de forma exhaustiva los procedimientos y técnicas para transformar y reforzar suelos cohesivos destinados a la construcción de infraestructuras viales. El **objetivo** del estudio es analizar integralmente los métodos de estabilización que permiten modificar las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos, reduciendo su sensibilidad a la humedad, las heladas y las cargas variables del tránsito, a fin de optimizar la utilización de materiales locales y disminuir el costo global de los proyectos. La **metodología** se fundamenta en una revisión comparativa de técnicas que involucran tanto estabilizadores inorgánicos—como cemento, cal y cenizas volantes—como estabilizadores orgánicos, incluyendo betún, resinas y polímeros. Además, se evalúa el uso de aditivos tales como surfactantes y enzimas, los cuales modifican la hidrofobicidad de las partículas minerales, favoreciendo procesos de adsorción, floculación y reducción de la superficie específica del suelo. Se reporta que la estabilización con dorzin y la adición de cementos en proporciones del 6–8% puede alcanzar resistencias a la compresión de 4.0 MPa a 6.0 MPa y resistencias hasta de 25 ciclos al congelamiento y descongelamiento; también se informa el uso del aditivo LBS al 0.02% más 8% de cemento aumentando su resistencia a la compresión de 0.06 MPa a 3.9 MPa comparada con la muestra patrón. La **conclusión** del estudio destaca que la



aplicación de estos métodos integrales transforma significativamente los suelos cohesivos en bases viales más resistentes, duraderas y económicamente viables, lo que representa una alternativa sostenible frente a las técnicas convencionales en la construcción de carreteras.

García-Toro (2019) realizó una investigación titulada "Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín". El **objetivo** general del estudio fue examinar el comportamiento físico-mecánico de una mezcla suelo-cemento en laboratorio mediante ensayos de respuesta a la carga monotónica para determinar los valores de resistencia en suelos finos tipo caolín, con miras a su posible aplicación en vías terciarias con composición similar en el país. La **metodología** empleada fue de enfoque cuantitativo, realizando diversos cuerpos de prueba sometidos a cargas monotónicas de resistencia a la compresión inconfiada y tracción indirecta para evaluar la influencia de diferentes porcentajes de cemento en la mezcla de suelo. Los resultados mostraron que el cemento controla el índice de plasticidad del suelo, aumentando el límite plástico y disminuyendo el límite líquido. La resistencia máxima aumentó con el tiempo de curado y el contenido de cemento, pero también se observaron disminuciones en la resistencia para algunos porcentajes de cemento debido a una posible desecación del material. La muestra patrón llega a 7.65 Kg/cm² en su resistencia a compresión simple, mejorando hasta 16.32 Kg/cm² cuando se le adiciona 8 % de cemento. En cuanto a las **conclusiones**, destacó que el cemento desempeña un papel crucial en el control del comportamiento físico-mecánico de la mezcla suelo-cemento, especialmente en suelos con alto contenido de caolín. Se encontró que el tiempo de curado es fundamental para alcanzar la resistencia máxima, pero también puede afectar

negativamente la resistencia si no se cumple adecuadamente. Estas conclusiones resaltan la importancia de considerar cuidadosamente los factores de diseño, especialmente el tiempo de curado y el porcentaje de cemento, al aplicar la técnica de suelo-cemento en la estabilización de vías terciarias en Colombia con altos niveles de caolín.

Zormati et al. (2023) en su investigación titulada “Effects of cationic surfactant on fresh and hardened properties of cement-based mortar”, abordan la limitada interacción entre la matriz cementicia y los aditivos convencionales, lo cual reduce la resistencia mecánica y el aislamiento térmico de los morteros. El **objetivo** fue evaluar cómo la incorporación de un tensioactivo catiónico (CTAB) en emulsión con nanofibras de celulosa (NFC), en proporciones de 0 % a 2 % en peso de cemento, afecta la porosidad, la resistencia a compresión, la conductividad térmica y la hidratación del mortero. La **metodología** consistió en elaborar probetas con relación agua/cemento de 0,6, añadir CTAB combinado con NFC y curar las muestras a 25 °C y 95 % de humedad. Se determinó la porosidad por desplazamiento de metanol, la resistencia a compresión a los días 1, 7 y 28, y la conductividad térmica mediante un banco de transmisión de calor. Los **resultados** indicaron que la mezcla con 0,7 % de NFC y CTAB redujo la porosidad al 4,4–4,7 %, incrementó la resistencia a compresión de 9,8 MPa a 22,9 MPa y disminuyó la conductividad térmica a $0,95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, superando al mortero de referencia. La **conclusión** señala que el CTAB facilita la dispersión uniforme de las nanofibras y acelera la formación del gel C–S–H, mejorando tanto la mecánica como el aislamiento. La importancia de este estudio para la adición de nanocompuestos tensioactivos catiónicos en bases suelo-cemento radica en confirmar su capacidad para aumentar la resistencia estructural y optimizar el



comportamiento térmico de los pavimentos.

Niroumand et al. (2023), en su artículo “Nano soil improvement technique using cement”, parten de la problemática de los suelos arcillosos, cuya baja resistencia y alta deformabilidad limitan la estabilidad de las estructuras viales. El **objetivo** fue determinar cómo la incorporación de nanocemento, en proporciones de 0 %, 1 %, 3 %, 5 % y 7 % en peso, mejora las propiedades geotécnicas de una arcilla kelachay no tratada, comparándola con el suelo original. La **metodología** incluyó la preparación de suspensiones de micro- y nanocemento, el tratamiento de muestras de suelo compactado y su curado a 1, 7, 28 y 90 días. Se realizaron ensayos de compresión uniaxial sin confinamiento y de corte directo, además de análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X para verificar la formación de gel C–S–H y la distribución de las partículas. Los **resultados** mostraron que la resistencia a compresión simple de la muestra patrón llega a 1.21 Kg/cm², cuando se le agrega 7% de cemento llega a 21.41 Kg/cm² y cuando se le agrega 7 % de nanocemento llega a 23.45 Kg/cm². La **conclusión** indica que el nanocemento contribuye a la creación del gel C–S–H, compactando la matriz y aumentando su rigidez y durabilidad. Este antecedente es esencial para la investigación sobre la adición de nanocompuestos tensioactivos catiónicos, pues demuestra la eficacia de los nanosílices en optimizar el desempeño de bases suelo-cemento, aportando mayor resistencia estructural y menor deformabilidad en pavimentos.

Adlie y Nurul (2020), en su artículo “A Short Review on the Effect of Surfactants on the Mechanico-Thermal Properties of Polymer Nanocomposites”, buscan profundizar en el entendimiento de los efectos que producen los tensioactivos en nanocompuestos poliméricos. El **objetivo** es realizar una revisión



breve de los trabajos sobre nanorellenos inorgánicos y orgánicos modificados con tensioactivos para nanocompuestos poliméricos. La **metodología** usada fue de mezclar tensioactivos con nanorellenos en una matriz polimérica con un proceso de mezcla y si es necesario realizar un proceso final de colada o moldeo por compresión. Los **resultados** mostraron que los efectos de tensioactivos catiónicos en nanocompuestos poliméricos aumentan sus propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción entre 7.3% a 34%, el módulo de flexión entre 34% a 210% y la resistencia al impacto entre 3.6% a 66%. La **conclusión** muestra que los tensioactivos catiónicos mejoran las propiedades mecánicas de los nanocompuestos poliméricos. Este antecedente demuestra las virtudes de los nanocompuestos tensioactivos catiónicos, y el posible uso positivo en bases suelo-cemento, aportando mayor resistencia estructural y mayor durabilidad al desgaste por el tránsito de vehículos.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Guzmán (2021) en su investigación titulada "Estabilización de suelos arcillosos adicionando polímeros reciclados para mejoramiento de subrasante en el distrito de Mórrope, 2021" tiene como objetivo utilizar polímeros reciclados en el distrito de Mórrope para mejorar la subrasante de determinadas calles. La metodología empleada incluyó técnicas de recolección y análisis de datos, así como experimentación en el laboratorio de suelos y materiales de la Escuela de Ingeniería Civil. Los resultados obtenidos muestran que la presencia significativa de arcilla en la subrasante conlleva a una baja capacidad portante e inestabilidad volumétrica. Sin embargo, mediante la adición de polímeros reciclados obtenidos de botellas descartables, se mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo como material para subrasante. Como resultado se tiene que en la primera calicata



donde el suelo es un CL-ML llega a 5.41% de CBR al 95%, el cual aumenta a un 7.42% cuando se le adiciona 1% del polímero PET. En la segunda calicata donde el suelo es un CL llega a 5.8% de CBR al 95%, el cual aumenta a un 8.42% cuando se le adiciona 1% del polímero PET. La conclusión a la que llega el autor es que la utilización de polímeros reciclados resulta efectiva en la mejora de la subrasante en el distrito de Mórrope. Esta técnica proporciona una alternativa viable y sostenible para el mejoramiento de suelos arcillosos, contribuyendo así a la estabilidad de las calles y a la infraestructura vial en la región. El aspecto más importante de la investigación es la demostración de que el uso de polímeros reciclados puede ser una solución efectiva para mejorar la calidad del suelo y la estabilidad de las vías, lo que puede tener un impacto positivo en la infraestructura y el desarrollo de la comunidad.

Porta (2023) en su investigación titulada “Influencia técnica económica y ambiental de la estabilización de suelos arcillosos-vías de Azapampa, mediante desechos poliméricos y cal” tiene como objetivo general determinar la influencia técnica, económica y ambiental de la estabilización de suelos arcillosos-vías de Azapampa, mediante desechos poliméricos y cal. La metodología empleada es de tipo experimental, con un diseño de investigación correlacional explicativa. Se utilizaron desechos poliméricos y cal como aditivos para la estabilización de suelos arcillosos en las vías de Azapampa. Como conclusiones, se determinó que los desechos poliméricos y la cal tienen diferentes influencias en la estabilización de suelos arcillosos. Los polímeros muestran una influencia técnica favorable, económica muy favorable y ambiental muy favorable. Por otro lado, la cal exhibe una influencia técnica muy favorable, económica muy desfavorable y ambiental desfavorable. La combinación de ambos aditivos resulta en una influencia técnica



muy favorable, pero con una influencia económica muy desfavorable. En cuanto a las conclusiones específicas, se encontró que los desechos poliméricos mejoran la capacidad portante del suelo en un 29.78% al tratarse con PET reciclado y en un 302.22% al tratarse con cal. La combinación de ambos aditivos aumenta la resistencia del suelo en un 330.89%. Económicamente, el tratamiento con PET resulta más económico en comparación con el tratamiento con cal. Sin embargo, ambientalmente, el uso de PET genera un impacto positivo considerable en contraste con el impacto negativo de la cal. El aspecto más importante de la investigación es la identificación de alternativas viables y sostenibles para la estabilización de suelos arcillosos, contribuyendo así a la mejora de la infraestructura vial con un enfoque económico y ambientalmente favorable.

Villalba & Venegas (2022) en su estudio titulado "Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de entre un suelo estabilizado con cemento y suelo con polímero 2022" tiene como objetivo general evaluar los parámetros físico-mecánicos entre la estabilización de suelos con cemento versus polímero (Megasoil) en la Cantera Huayacundo, Huancavelica 2022. La metodología empleada consistió en experimentos de laboratorio y ensayos de resistencia, donde se aplicaron diseños para garantizar la resistencia mínima requerida. Se tomaron muestras de la Cantera Huayacundo Arma para intervenir la plataforma de un tramo específico. Se evaluó también la viabilidad económica de ambos estabilizadores, concluyendo que el costo por kilómetro con polímero es menor que con cemento, debido a la tasa de diseño obtenida en los ensayos. Los resultados de laboratorio sugieren que tanto el polímero Megasoil como el cemento mejoran las propiedades mecánicas del suelo, aunque afectan ligeramente las propiedades físicas debido al bajo porcentaje de aditivos



utilizados. Un aspecto destacado de la investigación es la consideración de la viabilidad económica en la elección del estabilizador, lo cual puede influir significativamente en la toma de decisiones en proyectos de infraestructura.

Castillo González, (2021), en su investigación titulada "Análisis comparativo de los diferentes polímeros para mejorar las propiedades del suelo nativo mediante la estabilización de suelos en la localidad de Mocupe" presenta un estudio que tiene como **objetivo** realizar un análisis comparativo entre el polímero natural almidón de papa y el polímero industrial Terrasil para mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo nativo, el cual se caracteriza por contener más del 80% de material fino (70% limos y 10% arcillas). La **metodología** empleada consistió en la aplicación de ensayos de laboratorio, tales como el Proctor Modificado, California Bearing Ratio (CBR), ensayos de permeabilidad y de durabilidad (humedecimiento y secado), para evaluar el efecto de diferentes dosificaciones de ambos polímeros en las avenidas Víctor Raúl, 28 de Julio y El Porvenir. En el caso del almidón de papa, se trabajó con dosificaciones de 4%, 6%, 8%, 10% y 12%, determinándose que la dosis óptima fue del 8.8%, lo cual permitió incrementar la capacidad de soporte (CBR) de 3% a 8.07% y se observaron pérdidas de volumen en la durabilidad de 3.16% a una pérdida de 1.68%. Por otro lado, con el polímero Terrasil se evaluaron dosificaciones de 0.5, 1, 1.5 y 2 kg/m³, concluyéndose que la dosis óptima fue de 1.4 kg/m³; con esta cantidad se logró mejorar la capacidad de soporte de 3% a 25.63%, evidenciando además mejoras en la durabilidad pasando de una pérdida de volumen de 3.16% a 2.95%. La **conclusión** del estudio resalta que ambos polímeros son efectivos para estabilizar y reforzar el suelo nativo, ofreciendo una alternativa viable y económica para la optimización de las subrasantes en



proyectos de pavimentación.

Nesterenko (2018) en su tesis, titulada "Desempeño de suelos estabilizados con polímeros en Perú", tiene como objetivo general definir el procedimiento constructivo de estabilización de suelos mediante el uso del polímero poliacrilamida, incorporando variables propias del contexto peruano, como los tipos de equipos de ejecución y rendimientos constructivos. Además, busca comparar los resultados de los suelos ensayados en estado natural con los suelos estabilizados con polímero PAM bajo las mismas condiciones. La metodología empleada fue cuantitativa experimental, realizada en diversas localidades peruanas, incluyendo Chiclayo, Cajamarca, Huánuco, Pasco y Pucallpa. Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para caracterizar física y mecánicamente los suelos, como granulometría, límites de consistencia, clasificación de suelos, relación humedad-densidad y CBR. Los resultados muestran que el PAM puede ser una alternativa efectiva para mejorar la capacidad portante de los caminos, aumentando el CBR en promedio en más del 20% en comparación con los suelos naturales. Además, se observa un aumento promedio del 2% en la máxima densidad seca (MDD) y una reducción del 8% en el contenido de humedad óptima (OCH) en las muestras de suelo estabilizadas con PAM en comparación con las muestras en estado natural. Estos hallazgos sugieren que el uso de PAM puede densificar las capas granulares del pavimento, mejorando su durabilidad y reduciendo el consumo de agua en la construcción de carreteras.

Castillo (2018) en su estudio titulado "Influencia de la aplicación de aditivos químicos en la estabilización de suelos cohesivos para uso como subrasante mejorada de pavimentos entre los sectores Calamarca - Huaso, La Libertad, 2018" tiene como objetivo general determinar la influencia de la



aplicación de aditivos químicos en la estabilización de suelos. La metodología empleada consistió en una investigación experimental, aplicando ensayos de CBR en muestras entre Huaso y Calamarca. Las conclusiones del estudio indican que el aditivo PROES mejora significativamente las propiedades mecánicas del suelo, con dosificaciones específicas de aditivo líquido PROES y cemento Portland. Por ejemplo, se observó un aumento considerable en el CBR en tres lugares entre Huaso y Calamarca aumentando de 6.90% a 109.80% en el primer punto, de 7.57% a 116.40% en el segundo punto y de 7.54% a 114.28% en el tercer punto. Además, se encontró que el uso de PROES junto con cemento Portland reduce los costos de construcción de carreteras en hasta un 15.57%, debido a la reducción en el espesor de la base granular y la eliminación de la sub base granular, lo que también acorta el tiempo de ejecución en un 30.77%. El aspecto más relevante de la investigación es la demostración de que la adición de aditivos químicos puede mejorar las propiedades del suelo y reducir los costos de construcción de infraestructura vial, lo que podría tener un impacto positivo en proyectos de desarrollo vial.

Pacheco (2023) en su investigación titulada “Aceite sulfonado con cemento para estabilización de suelos cohesivos en subrasante”, aborda la necesidad de estabilizar suelos cohesivos a nivel de subrasante usando aditivos químicos. El objetivo fue evaluar cómo la incorporación de aceite sulfonado y cemento en diferentes proporciones, mejoran la estabilidad del suelo. La metodología consistió en extraer muestras de calicatas para su caracterización y propiedades físico-mecánicas mediante ensayos de laboratorio. Los resultados se describe a continuación, la clasificación del suelo es de una arena mal gradada con arcilla y grava (SP-SC), su máxima densidad seca es 1.916 gr/cm³ y su CBR



al 100% es de 10.7%, con la adición de 3% de cemento y 0.3 l/m³ de aceite sulfonado su MDS fue de 1.932 gr/cm³ y su CBR de 19.60%, con la adición de 5% de cemento y 0.5 l/m³ de aceite sulfonado su MDS fue de 2.008 gr/cm³ y su CBR de 36.20%, con la adición de 7% de cemento y 0.7 l/m³ de aceite sulfonado su MDS fue de 2.126 gr/cm³ y su CBR de 63%, llegando a la conclusión de que a más contenido de cemento y aceite sulfonado, habrá una mejora en la densidad máxima seca y el CBR; por lo tanto, se mejora la estabilización del suelo.

Chamba (2021) en su tesis titulada “Análisis comparativo de estabilización para el mejoramiento de subrasante entre el uso del cloruro de sodio y el sistema consolid en zonas urbanas no pavimentadas de la urbanización el parral del distrito de La Victoria, 2020”, realiza el mejoramiento de una subrasante mediante la adición de dos aditivos que son el cloruro de sodio y el sistema Consolid. El objetivo es hacer la comparación de las propiedades físico-mecánicas cuando se aplican los aditivos por separado. La metodología radicó en la ejecución de 4 calicatas para caracterizar el suelo y someterlo a diferentes ensayos de laboratorio, adicionándole diferentes dosificaciones de cloruro de sodio y del sistema Consolid. Los resultados hallados clasificó al suelo en una arcilla de baja plasticidad (CL), la DMS del suelo fue de 1.824 gr/cm³, su CBR al 95% fue de 2.4% y su resistencia a la compresión simple fue de 0.43 Kg/cm², la DMS del suelo más el 6% de cloruro de sodio fue de 1.882 gr/cm³, su CBR al 95% fue de 44% y su resistencia a la compresión simple fue de 0.66 Kg/cm², la DMS del suelo más 0.045% del consolid y 2% del solidry fue de 1.817 gr/cm³, su CBR al 95% fue de 55.07% y su resistencia a la compresión simple fue de 0.89 Kg/cm², concluyendo que el uso del sistema consolid y solidry tienen mejor desempeño físico-mecánico que cuando se usa el cloruro de sodio; por lo tanto, para mejorar



la estabilización del suelo es mejor usar en este tipo de suelo el sistema consolid.

2.1.3. Antecedentes Locales

Mamani et al. (2023), en su investigación titulada "Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú" presenta un estudio que se orienta a solventar los problemas de deterioro en las vías de Puno, donde la carencia de pavimentación y la presencia de deformaciones afectan la movilidad vehicular. En este estudio, el objetivo fue determinar cuán efectiva es la combinación de ceniza de quinua y cal en la estabilización de suelos cohesivos, considerando que dichos estabilizadores podrían optimizar las condiciones mecánicas del terreno. La metodología aplicada se fundamenta en un enfoque cuantitativo, mediante un diseño experimental puro y métodos aplicados, que incluyeron ensayos de laboratorio como el Proctor Modificado y la prueba de California Bearing Ratio (CBR). Los resultados revelaron que, al incorporar 9 % de ceniza de quinua junto con 5 % de cal, se logró aumentar la máxima densidad seca a $1,902 \text{ g/cm}^3$ y disminuir el contenido óptimo de humedad a 9 %, evidenciado además por el incremento del CBR a 32,0 % (al 100 % de la densidad seca) y 25,6 % (al 95 % de la densidad seca). La conclusión del estudio establece que la adición de estos materiales mejora significativamente las propiedades del suelo, proporcionando una base más resistente para la infraestructura vial. Se destaca que el aspecto más relevante de esta investigación reside en la comprobación empírica del potencial de estabilización de suelos mediante materiales alternativos, aportando un significativo avance al conocimiento en el ámbito de la ingeniería vial, enmarcado estrictamente en las conclusiones presentadas por los autores.



Condori (2023) en su tesis titulada “Mejoramiento de la resistencia del suelo con emulsión asfáltica y cemento para la conformación de solución básica, tramo Huancané-Cotapata-Huarisani, 2023”, busca mejorar la base del tramo Huancané – Cotapata – Huarisini con material de cantera y la adición por un lado de emulsión asfáltica, y por otro lado con cemento para mejorar sus propiedades físicas. El objetivo fue evaluar cómo mejora la resistencia a compresión y durabilidad de la base con la incorporación de cemento en proporciones de 0% a 10% y con emulsión asfáltica en proporciones de 0 % a 8.50 % del peso de material de cantera. La metodología consistió en realizar ensayos de laboratorio para caracterizar los suelos de cantera, hacer probetas para someterlos a ensayos de compresión simple y humedecimiento y secado, comparando los resultados obtenidos. Se obtuvo los siguientes resultados, la resistencia a la compresión simple para suelos SP-SM es de 13.052 kg/cm² con 0% de cemento, de 20.693 Kg/cm² con 8% de cemento, de 13.052 kg/cm² con 0% de emulsión CSS-1h, de 22.469 Kg/cm² con 7.60% de CSS-1h y para suelos SW de 12.812 kg/cm² con 0% de cemento, de 25.158 Kg/cm² con 6.5% de cemento, de 12.812 kg/cm² con 0% de emulsión CSS-1h y de 26.092 Kg/cm² con 7.20% de CSS-1h. Se llega a la conclusión que la resistencia mejora en un 58.5% con inclusión de 8% cemento, mejora la resistencia en un 72.1% con la inclusión de 7.6% de CSS-1h para suelos SP-SM, por otro lado, la resistencia mejora en un 96.4% con inclusión de 6.5% cemento, mejora la resistencia en un 103.7% con la inclusión de 7.20% de CSS-1h para suelos SW.

Vilca (2024) en su tesis titulada “Evaluación de la utilidad de la ceniza de cáscara de quinua (CCQ) como estabilizante de un suelo limoso de subrasante”, la investigación tiene como finalidad evaluar la estabilización de una subrasante

limosa con la adición de ceniza de quinua. El objetivo fue analizar cómo mejora la compactación Proctor, CBR, resistencia a compresión inconfiada y tracción indirecta de suelos limosos para subrasante con la incorporación de CCQ en proporciones de 3%, 6%, 9% , 12% y tiempos de curados de 7 y 28 días. La metodología trató de la ejecución de ensayos de laboratorio para caracterizar el suelo limoso, realizar a ensayos de compactación Proctor, CBR, durabilidad y tracción indirecta, comparando los resultados obtenidos. Para adición de CCQ de 0%, 3%, 6%, 9% y 12% los resultados fueron los siguientes; para la densidad máxima seca fue de 1.50 gr/cm³, 1.49 gr/cm³, 1.49 gr/cm³, 1.48 gr/cm³ y 1.47 gr/cm³ respectivamente, para el CBR se obtuvo 2.9%, 3.8%, 61.2%, 107.9% y 117.3% respectivamente, para la resistencia a la compresión inconfiada del suelo con 9 días de curado se obtuvo 689.9 KPa, 741.3 KPa, 768.5 KPa, 775.7 KPa y 788.2 KPa respectivamente, con 32 días de curado se obtuvo 689.9 KPa, 798.4 KPa, 851.3 KPa, 883.9 KPa y 889.2 Kpa, para la tracción indirecta a 11 días de curado se obtiene 167.3 KPa, 146.5 KPa, 126.2 KPa, 114.1 KPa y 109.6 KPa respectivamente, a 46 días de curado se obtiene 167.3 KPa, 175.5 KPa, 172.3 KPa, 175.7 KPa y 167.7 KPa. Concluyendo que sus propiedades físico mecánicas mejoran con el aumento de ceniza de quinua y con más días de curado.

Calizaya & Juchani (2023) en su tesis titulada “Influencia de la Ceniza de Fondo para la Estabilización de Suelos Arcillosos a Nivel de Subrasantes”, la investigación tiene como finalidad evaluar la influencia de la ceniza de fábricas ladrilleras en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante. El objetivo fue determinar los cambios en la compactación Proctor, CBR, resistencia a compresión inconfiada y tracción indirecta de suelos arcillosos con la adición de ceniza de fondo en proporciones de 10%, 15% y 20%. La metodología se hizo



de la siguiente manera, se realizó 06 calicatas realizando los ensayos de caracterización del suelo de cada uno de ellas, posteriormente se adicionó la ceniza en diferentes porcentajes para evaluar la compactación y CBR. Los resultados para 0% de adición de ceniza de fondo se obtuvo una máxima densidad seca de 1.90 gr/cm³ (C-1), 2.00 gr/cm³ (C-2), 1.80 gr/cm³ (C-3), 2.00 gr/cm³ (C-4), 2.00 gr/cm³ (C-5) y 2.00 gr/cm³ (C-6), para el CBR al 95% fue de 5 % (C-1), 4.8 % (C-2), 5 % (C-3), 5 % (C-4), 4 % (C-5), 4 % (C-6), para 10% de adición de ceniza de fondo se obtuvo una máxima densidad seca de 1.785 gr/cm³ (C-1), 1.805 gr/cm³ (C-2), 1.803 gr/cm³ (C-3), 1.805 gr/cm³ (C-4), 1.802 gr/cm³ (C-5) y 1.80 gr/cm³ (C-6), para el CBR al 95% fue de 6 % (C-1), 6.5 % (C-2), 7 % (C-3), 6 % (C-4), 5.8 % (C-5) y 5.5 % (C-6), para 15% de adición de ceniza de fondo se obtuvo una máxima densidad seca de 1.785 gr/cm³ (C-1), 1.802 gr/cm³ (C-2), 1.803 gr/cm³ (C-3), 1.803 gr/cm³ (C-4), 1.802 gr/cm³ (C-5) y 1.80 gr/cm³ (C-6), para el CBR al 95% fue de 9 % (C-1), 9 % (C-2), 10 % (C-3), 8.5 % (C-4), 8 % (C-5) y 8 % (C-6), para 20% de adición de ceniza de fondo se obtuvo una máxima densidad seca de 1.783 gr/cm³ (C-1), 1.802 gr/cm³ (C-2), 1.802 gr/cm³ (C-3), 1.80 gr/cm³ (C-4), 1.802 gr/cm³ (C-5) y 1.799 gr/cm³ (C-6), para el CBR al 95% fue de 11 % (C-1), 11 % (C-2), 10.5 % (C-3), 9.5 % (C-4), 9 % (C-5) y 9.8 % (C-6). Concluyendo que a pesar de que no hay una diferencia notoria en cuanto a la máxima densidad seca, si se aprecia una mejora en cuanto al CBR, lo cual indica que sí existe una mejora en la estabilización del suelo con la adición de ceniza de fondo.

Jiménez (2022) en su tesis titulada “Geología y geotecnia para estabilizar con cemento portland en el mejoramiento y conservación del corredor vial Arapa – Santa María tramo KM 34+500 al KM 71+602”, la tesis tiene como finalidad



evaluar la estabilización de un suelo con la adición de cemento. El objetivo fue determinar el comportamiento de suelos mediante la compactación Proctor, CBR y resistencia a compresión simple. La metodología se basa en realizar probetas de suelo y realizar los ensayos de laboratorio para caracterizar el suelo y los ensayos mencionados anteriormente. Como resultado se obtuvo que el material se clasifica como una grava limosa y grava arcillosa (GM-GC), se determinó una densidad máxima seca del suelo de 2.06 gr/cm³, un CBR al 100% del suelo de 64%, se determinó una resistencia a la compresión simple promedio de 22.56 Kg/cm² con la adición de 1.87% de cemento Yura tipo I. Concluyendo que los resultados de CBR y compresión simple cumplen con lo mínimo requerido en los manuales del MTC, admitiendo así que la adición de cemento mejora la resistencia a compresión simple del suelo compactado.

Choquechambi & Huanca (2023) en su tesis titulada “Efecto de la ceniza de cáscara de papa adicionado en suelos arcillosos”, la investigación tiene como finalidad evaluar la influencia de la ceniza de cáscara de papa en suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). El objetivo fue evaluar los cambios en el CBR de suelos CL con la adición de ceniza de papa en proporciones de 0%, 10%, 15% y 20%. La metodología usada fue de realizar calicatas en la segunda circunvalación del Distrito de Juliaca, extraer material de muestra y realizar los ensayos de caracterización del suelo de cada una de ellas, luego evaluar el comportamiento del CBR a diferentes dosificaciones de ceniza de papa. Los resultados para 0% de adición de ceniza de papa dieron CBR entre 5 a 6%, para 10% de adición de ceniza de papa dieron CBR entre 6 a 9%, para 15% de adición de ceniza de papa dieron CBR entre 7 a 24% y para 20% de adición de ceniza de papa dieron CBR entre 22 a 27%. Concluyendo que la ceniza de papa mejora el valor de resistencia de



soporte del suelo en un promedio de 19% en comparación de un suelo sin adición de ceniza de papa y otra con adición de 20% de ceniza de papa.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Variable independiente: Adición nanocompuestos tensioactivos catiónicos

2.2.1.1. Concepto de nanocompuestos

Los nanocompuestos son materiales que constan de dos o más fases, de las cuales al menos una presenta dimensiones a escala nanométrica en alguna de sus tres direcciones. Dentro de los materiales más utilizados en la fabricación de nanocompuestos se encuentran las nanofibras que son fibras a escala nanométrica, los nanotubos que son estructuras en forma de cilindro hueco a nanoescala, los silsesquioxanos que son moléculas que combinan silicio y oxígeno y las arcillas que están compuestas principalmente por silicatos de aluminio hidratados. Estas últimas, a lo largo del tiempo, han destacado como efectivos sistemas adsorbentes gracias a su gran área superficial y su capacidad para captar moléculas orgánicas, especialmente aquellas que son solubles en agua, de naturaleza polar o con baja actividad catiónica, lo que refleja su carácter hidrofílico. Los compuestos formados por arcilla y polímeros están constituidos por capas de silicatos, como las montmorillonitas, que tienen un grosor de apenas unos nanómetros y pueden alcanzar longitudes que oscilan entre cientos y miles de nanómetros (Aradilla et al., 2009).

La adición de nanopartículas con dimensiones que oscilan entre 1 y 100 nm a una matriz polimérica produce nanocompuestos poliméricos



con características ópticas, eléctricas, magnéticas, térmicas y mecánicas específicas, las cuales dependen del tipo de nanorrefuerzo utilizado. La concentración de estas nanopartículas en los nanocompuestos suele ser extremadamente baja, entre un 0,5% y un 5%, debido a su alta relación superficie-volumen y baja densidad. A diferencia de los polímeros reforzados tradicionales, donde se incorporan materiales orgánicos o inorgánicos de tamaño macroscópico, los nanocompuestos poliméricos se destacan por la incorporación de refuerzos a nanoescala en la matriz polimérica, lo que les confiere propiedades únicas (Adlie & Nurul., 2020). Por lo tanto, se deduce que el uso de nanocompuestos es eficiente en pequeñas dosis frente a otros aditivos.

La obtención de nanocompuestos requiere que las nanocargas se distribuyan de manera uniforme a lo largo de la matriz polimérica. Este proceso asegura la formación de una interfaz unidimensional dentro del material, lo cual es fundamental para aprovechar al máximo sus propiedades y capacidades (Zormati, Aloulou & Sammouda, 2023).

2.2.1.2. Ventajas de los nanocompuestos

Aradilla et al. (2009) destacan diversas ventajas de los nanocompuestos, entre las cuales se encuentran las siguientes:

Incremento de la rigidez

Mejora en las propiedades mecánicas.

Aumento de las capacidades barrera frente a gases, agua o hidrocarburos.

Mayor estabilidad térmica.

Incremento de la resistencia química.

Mejora en la retardancia a la llama, acompañado de una reducción de la generación de humos.

Mayor estabilidad dimensional.

Mayor resistencia al desgaste por fricción.

Mejora en la conductividad eléctrica.

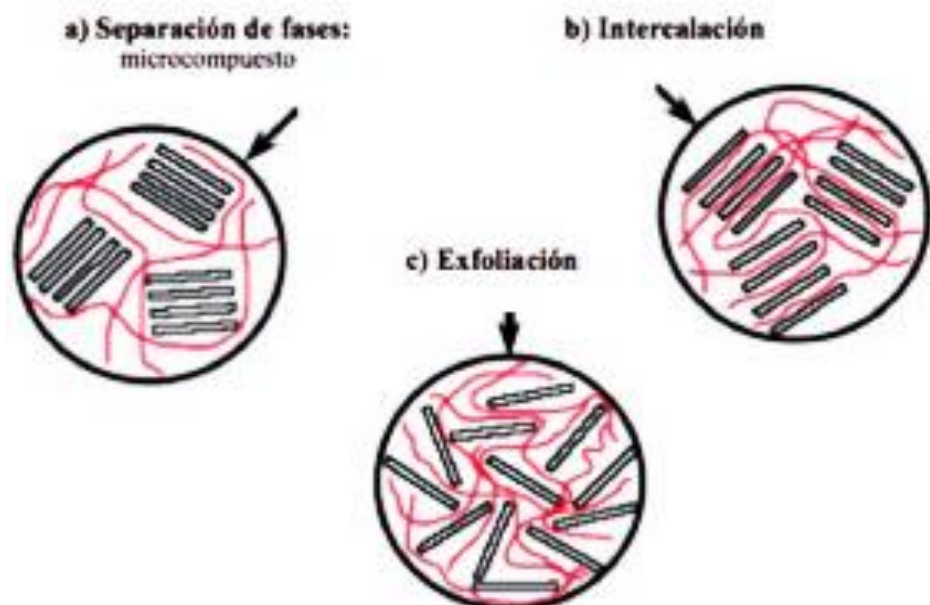
Conservación de la transparencia.

2.2.1.3. Clasificación de nanocompuestos

Según Aradilla et al. (2009), los nanocompuestos arcilla se clasifican en tres categorías principales (Figura 1).

Figura 1

Tipos de estructuras que se pueden obtener en los compuestos formados por polímeros y partículas laminares



Nota: Tomado de nanocompuestos de arcilla-polímero por, Aradilla et al., 2009.

Microcompuesto: El silicato actúa como un refuerzo a nivel de



microescala, manteniendo su estructura en agregados más grandes.

Intercalado: Las cadenas poliméricas se insertan entre las capas de silicato, las cuales conservan un orden estructural a largo alcance, creando una disposición uniforme pero no completamente separada.

Exfoliado: Las capas de silicato se dispersan de forma individual dentro de la matriz polimérica. Este tipo de material logra excelentes propiedades incluso con cantidades muy bajas de silicato, generalmente entre el 1% y el 2% en volumen.

2.2.1.4. Nanocompuestos para la mejora del suelo

La nanotecnología presenta un potencial considerable en el ámbito de la mejora de suelos, aunque su aplicación aún se encuentra en una fase inicial y con necesidades futuras por definir. Por su parte, la nanociencia se centra en el análisis de los fenómenos y alteraciones que ocurren en los materiales a escala nanométrica, donde sus propiedades cambian notablemente en comparación con las observadas a mayores escalas (Terrones et al., 2004). La nanotecnología, basada en los fundamentos de la nanociencia, se emplea en múltiples campos para crear una variedad de productos con potencial comercial. Los nanomateriales, en este contexto, son definidos como aquellos compuestos cuyas dimensiones internas o superficiales se encuentran en el rango de 1 a 100 nanómetros (Boverhof et al., 2015).

2.2.1.5. Nanocompuestos y sus avances

Los compuestos se componen de dos o más materiales que, al



combinarse, exhiben propiedades superiores en comparación con las que tendrían de forma individual. En el caso de los compuestos de suelo, suelen estar integrados por tres elementos principales:

- (i) una fase matriz continua, como arena, limo o arcilla
- (ii) una fase dispersa discontinua, que incluye refuerzos como fibras, partículas o materiales geosintéticos, y
- (iii) la zona de interfaz entre las fases. Las propiedades finales dependerán del tipo de fases presentes y de las proporciones en que se combinen.

Los nanocompuestos se caracterizan por incluir al menos una fase con dimensiones nanométricas (Camargo et al., 2009). La adición de nanopartículas genera mejoras significativas en las propiedades de estos compuestos, influenciadas por la morfología y las interacciones en la interfaz de los materiales que los conforman. Generalmente, la cantidad de nanomaterial incorporada a la matriz es baja, entre un 0,5 % y un 5 % en peso, lo que evidencia su eficiencia. La relación superficie-volumen extremadamente alta de los nanomateriales otorga un papel crucial a las interacciones interfaciales en los nanocompuestos. Un ejemplo común son los nanocompuestos de arcilla y polímero, en los cuales las arcillas pueden integrarse en distintas estructuras dentro de una matriz polimérica a nivel nanométrico, logrando mejoras significativas en propiedades específicas de ingeniería (Gao, 2004).



2.2.1.6. Propiedades y nanocompuestos del suelo

- Nanoarcilla/arena calcárea

La incorporación de nanoarcilla incrementa la cohesión de la CCS, sin modificar de manera significativa su ángulo de fricción interna. Estas partículas, altamente reactivas, absorben agua, se expanden para ocupar los poros del suelo y contribuyen al proceso de hidratación del cemento, lo que refuerza la cohesión del material. Además, la presencia de nanoarcilla reduce la cantidad de poros en la estructura del suelo, disminuyendo su compresibilidad. En las muestras analizadas, este efecto genera fallas caracterizadas por fracturas oblicuas (Thomas et al., 2022).

- Nanoarcilla/loess soil

El incremento en los valores de cohesión y ángulo de fricción mejora de manera significativa la resistencia al corte del suelo. Incluso con cantidades mínimas de nanoarcilla, se reduce notablemente la colapsabilidad inducida por la humedad y el comportamiento dispersivo del suelo. Además, el loess tratado con nanoarcilla demuestra una mayor resistencia frente a procesos de erosión y socavación (Thomas et al., 2022).

- Nanosílice/arena

Según Choobbasti et al. (2019), citado por Thomas et al. (2022), se analiza cómo la combinación de nanosílice y cemento impacta en las propiedades de un suelo arenoso. El estudio considera la incorporación de nanosílice en proporciones de 0 %, 5 %, 10 % y 15 % respecto al peso del cemento, junto con tres niveles de contenido de cemento: 5 %, 9 % y 14

% del peso de la arena seca. Los resultados indican que, con bajos contenidos de cemento, el incremento en la cantidad de nanosílice eleva la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad. Además, la resistencia a la compresión sin confinamiento mejora significativamente al alcanzar la proporción adecuada de cemento. De igual manera, la inclusión de la cantidad óptima de nanosílice incrementa la deformación axial en la falla y otorga un comportamiento más dúctil a las muestras evaluadas.

2.2.2. Concepto de Tensioactivos

A los tensioactivos también se les conoce con el nombre de surfactantes, que es la contracción del término agente activo en superficie. Tienen la propiedad de absorberse sobre la superficie o interfaz de un sistema dado. Son sustancias anfífilas; es decir, tienen dos regiones con propiedades opuestas en su cola y cabeza (Grupo de investigación DERFARM, 2021).

Figura 2

Imagen representativa de un tensioactivo



Nota: Tomado de *Tensioactivos aniónicos, catiónicos y anfóteros*, grupo de investigación DERFARM, 2021.



2.2.2.1. Tipos de tensioactivos

Los tensioactivos mayormente se clasifican en cuatro tipos: no iónicos, aniónicos, catiónicos y anfóteros, estos se basan dependiendo de la polaridad del grupo de cabeza del tensioactivo. Los tensioactivos no iónicos no tiene carga en el grupo de cabeza, los tensioactivos aniónicos tiene cargas negativas en sus grupos de cabeza, los tensioactivos catiónicos tiene cargas positivas en sus grupos de cabeza y los tensioactivos anfóteros tiene cargas tanto negativas como positivas en sus grupos de cabeza (Adlie & Nurul, 2020).

2.2.2.2. Caracterización de suelo-cemento

La investigación sobre las propiedades del suelo resulta esencial en los campos de la ingeniería civil y la geotecnia, ya que facilita tanto la comprensión como la anticipación del comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones y usos (Rico & Castillo, 1977).

2.2.2.3. Análisis Granulométrico

La granulometría es un método ampliamente empleado para identificar la distribución de tamaños de partículas en muestras de suelo, siendo crucial para establecer su clasificación y evaluar tanto sus propiedades mecánicas como geotécnicas (AASHTO, 2021).

El análisis granulométrico se lleva a cabo principalmente mediante dos técnicas: tamizado y sedimentación. El tamizado, utilizado para partículas más grandes como arenas y gravas, implica el paso del suelo a través de una secuencia de tamices con aberturas de tamaño



progresivamente menor, permitiendo clasificar las partículas según sus dimensiones (Barahona, Ovando & Araya, 2021). El método de sedimentación, ideal para partículas finas como limos y arcillas, utiliza el principio de la ley de Stokes para determinar la velocidad a la que las partículas esféricas sedimentan en un fluido. Este procedimiento consiste en dispersar la muestra en un líquido y registrar la concentración de partículas suspendidas en distintos intervalos de tiempo (M. Das, 2013).

2.2.2.4. Clasificación de suelos

- Clasificación por SUCS

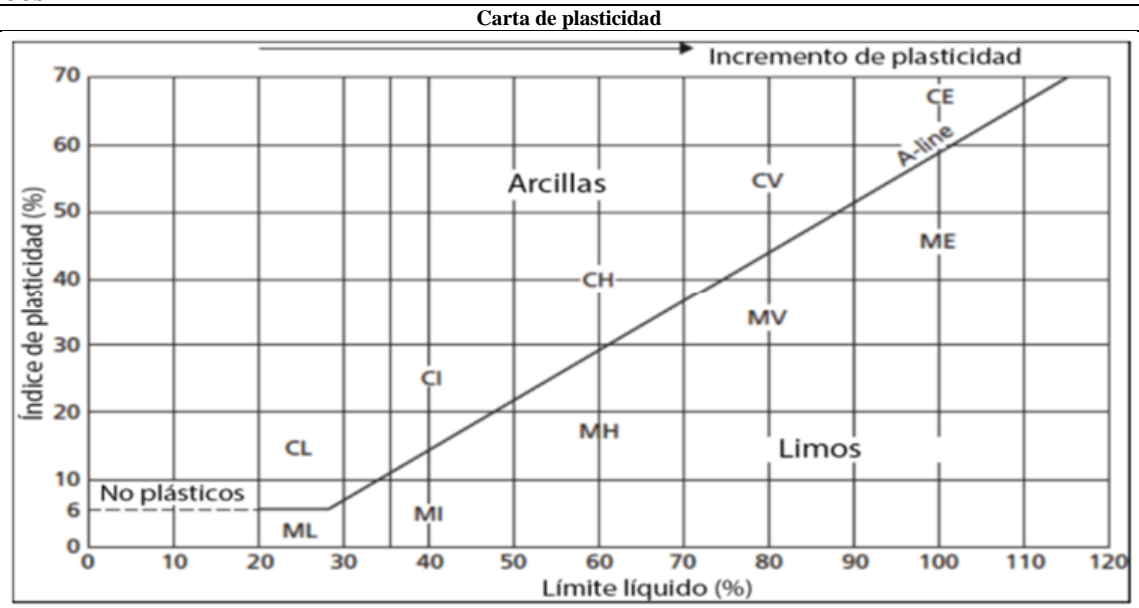
El sistema clasifica los suelos en dos categorías principales ver **Tabla 1**, gruesos y finos, basándose en la cantidad de material que pasa a través del tamiz N° 200. Los suelos de grano grueso se subdividen en arenas y gravas según el material que pasa por el tamiz N° 4. Posteriormente, estas arenas y gravas se agrupan en limpias o sucias dependiendo del porcentaje de partículas finas presentes, determinado por el pasante del tamiz N° 200 (Márquez, 2006).

Tabla 1

Clasificación de suelos por SUCS

Divisiones Principales	Símbolo del grupo	Nombres Típicos	Identificación del laboratorio
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS limpias (sin o con pocos finos)	GW Gravadas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	$Cu = D_{60} / D_{10} > 4$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
		GP Gravadas, mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.
	GRAVAS con finos (apreciable cantidad de finos)	GM Gravadas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP < 4
		GC Gravadas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
	ARENAS limpias (pocos o si finos)	SW Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	< 5% → GW, GP, SW, SP. > 12% → GM, GC, SM, SC.
		SP Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$Cu = D_{60} / D_{10} > 6$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
ARENAS con finos (apreciable cantidad de finos)		SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.
	SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	5 al 12% → casos límite que requieren usar doble símbolo.	
SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	LIMOS Y ARCILLAS (Inorgánico)	ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas.	Límites de Atterberg debajo de la línea A.
		CL Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas.	Límites de Atterberg sobre la línea A con IP > 7.
	OL Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 requieren doble símbolo (CL-ML).	
	LIMOS Y ARCILLAS (Inorgánico)	MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.	Límite líquido (secado al horno) < 0.75 del LL sin secar.

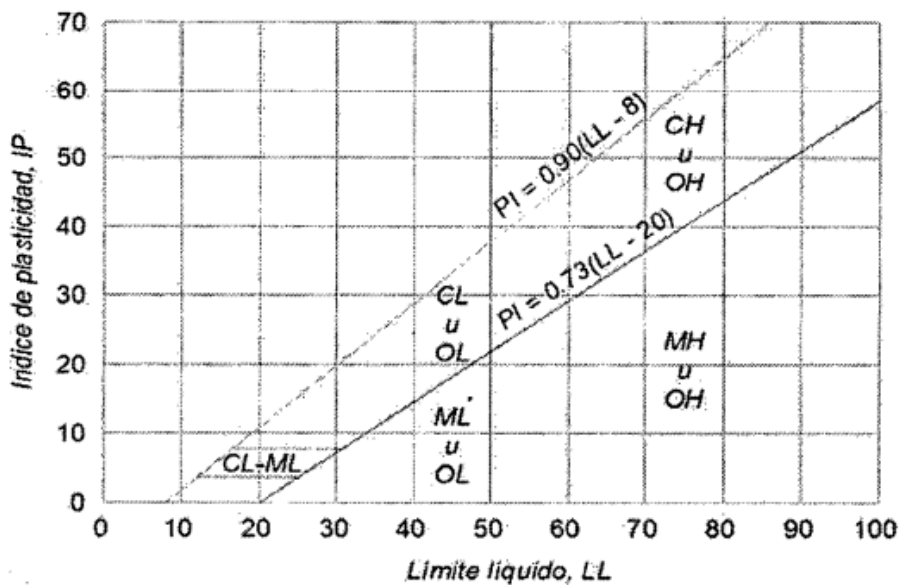
Divisiones Principales	Símbolo del grupo	Nombres Típicos	Identificación del laboratorio
Límite líquido > 50	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.	Límites de Atterberg sobre la línea A.
(Orgánico)	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.	Criterio de Secado de Límite líquido (secado al horno) < 0.75 del LL sin secar.
SUELOS MUY ORGÁNICOS	PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.	Identificación Visual Color oscuro, olor orgánico, textura fibrosa y esponjosa.



Nota: Tomado de *Mecánica de suelos y cimentaciones* por Villalaz, 2004.

Figura 3

Carta de plasticidad para clasificación de suelos de partículas



Nota: Tomado de *Mecánica de suelos y diseño de pavimentos*, por Mora, 1988.



De acuerdo con Romero y Sañac (2016), este sistema de clasificación emplea símbolos para identificar los diferentes grupos de suelos, asignando el nombre según el tipo de material predominante en su composición. Los materiales granulares son aquellos cuyas partículas superan los 0.075 mm, correspondiente al tamiz #200, mientras que los materiales finos son aquellos con partículas de menor tamaño. Además, los suelos finos de origen orgánico y la turba se clasifican en categorías separadas.

Clasificación por AASHTO

El sistema de clasificación propuesto por Terzaghi y Hogentogler organiza los suelos en ocho categorías principales, identificadas del A-1 al A-8. Los suelos con un alto contenido de materia orgánica se agrupan en la categoría A-8, mientras que los suelos inorgánicos se distribuyen entre siete categorías, del A-1 al A-7, las cuales se subdividen en un total de 12 subgrupos. La clasificación completa puede consultarse en la Tabla 2 (Montejo, 2001)., mientras que los nombres correspondientes a los grupos se detallan en la tabla 3 (MTC, 2014).



Clasificación de suelos por AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos que pasa por la malla #200)							Materiales Limo-arcillosos (pasados por la malla #200)		
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6
	A - 1a	A - 1b		A-2-4	A-2-5	A-2-0	A-2-7			
Clasificación por Grupos:										
Características granulométricas del porcentaje que pasa:										
Tamiz N° 10	50 máx.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tamiz N° 40	30máx.	50 máx.	51 mín.	-	-	-	-	-	-	-
Tamiz N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa por el tamiz N°40										
Contenido de arcilla			No plástico	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.
Índice de plasticidad	6máx.			10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10máx.	11 mín.
Componentes usuales de los suelos	Fragmentos de Piedra, Grava y Arena		Arena Fina	Arenas y Gravas Limosas o Arcillosas			Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Importancia										
Clasificación general como	De excelente a buena							De regular a mala		

Manual de Ingeniería de pavimentos para carreteras por Montejo, 2001

La nomenclatura de los Grupos de Clasificación según AASHTO se presenta en la tabla 3.

Tabla 3

Nomenclatura de los Grupos de Clasificación por AASHTO

Clasificación de suelos - American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)			
Suelos con el 35% o menos de finos		Suelos con más del 35% de finos	
A-1	Gravas y Arenas	A-4	Suelos limosos
A-2	Gravas limosas o arcillosas	A-5	Suelos limosos
	Arenas limosas o arcillosas	A-6	Suelos arcillosos
A-3	Arenas finas	A-7	Suelos arcillosos

Nota: Tomado de Manual de carreteras. Suelos geología, geotecnia y pavimentos por MTC, 2014.

- Correlación de los sistemas AASHTO y SUCS

El suelo se clasifica según sus propiedades, lo que permite prever su comportamiento esperado. Esta clasificación se fundamenta en el análisis de la granulometría, la plasticidad y el índice de grupo. Por ello, es imprescindible evaluar el suelo siguiendo los criterios de dos sistemas ampliamente aceptados, como se detalla en la tabla 4: el sistema AASHTO y el sistema SUCS (MTC, 2014).

Tabla 4

Clasificación de suelo según el sistema AASHTO y el sistema ASTM

Categoría de suelo AASHTO	Clasificación de suelo SUCS ASTM-D-2487
A-1, a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1, b	GW, GP, GM, SP
A-2	GW, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	CL, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	CH, MH, CH

Nota: Tomado de Manual de carreteras. Suelos geología, geotecnia y pavimentos por MTC, 2014.

2.2.2.5. Contenido de humedad

Es la cantidad de agua presente en una muestra de suelo. Se calcula como la relación entre el peso del agua (W_w) contenida en la muestra y el peso de la fase sólida (W_s). Este valor suele expresarse como un porcentaje (Llique, 2003).

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Por lo tanto, el contenido de humedad se considera una propiedad física clave que refleja la cantidad de agua contenida en una muestra de suelo. Se expresa como el porcentaje del peso del agua en relación con el peso del suelo seco. Este parámetro es primordial para calcular la cantidad

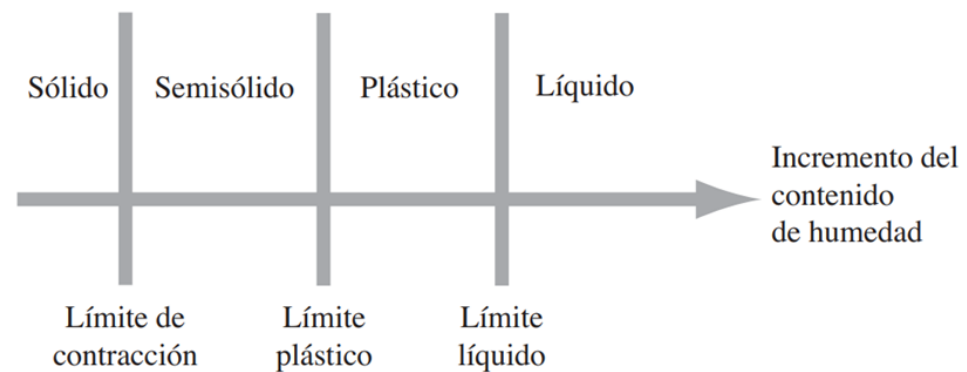
de agua necesaria para alcanzar una capacidad de carga ideal en el suelo.

2.2.2.6. Límite de Atterberg

La consistencia del suelo se determina observando los puntos de transición entre sus distintos estados, comenzando en el estado sólido, pasando por el semisólido, seguido del plástico, hasta llegar al estado líquido (ver Figura 4). Este procedimiento se emplea principalmente para analizar la plasticidad del suelo (M, Das, 2013).

Figura 4

Límites de Atterberg



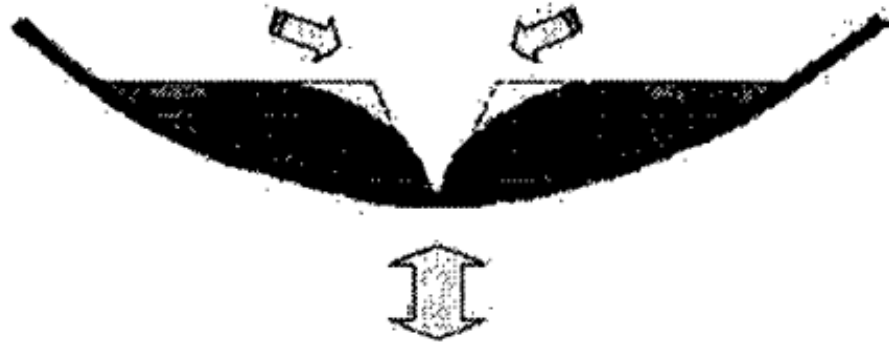
Nota: Tomado de *Fundamentos de ingeniería geotécnica* por (M. Das, 2013)

El límite líquido (LL) se determina siguiendo un método estandarizado que utiliza la copa de Casagrande y se expresa como un porcentaje respecto al peso seco del suelo. Este valor define el punto en el que el suelo pasa de un estado semilíquido a uno plástico, permitiendo su manipulación. La prueba consiste en colocar una muestra en la copa de Casagrande, evitando la presencia de burbujas de aire, y dividirla en dos partes con una espátula. Luego, se eleva la leva hasta aproximadamente 1 cm y se deja caer la copa 25 veces, hasta que el surco se cierre a una distancia de 1.3 cm. Este proceso permite medir la humedad del suelo en

el surco formado (M. Das, 2013).

Figura 5

Deslizamiento de un suelo en el límite líquido



Nota: Tomado de Influencia del índice plástico en el contenido óptimo de humedad en suelos arcillosos, por Ocon, 2013.

El ensayo realizado con el dispositivo desarrollado por Casagrande permite interpretar que, en condiciones de golpes secos, la resistencia a la corte dinámica en los taludes de la ranura se reduce, lo que genera una estructura de flujo que provoca el deslizamiento (**Figura 5**). La fuerza resistente a la deformación se considera como la resistencia al corte de un suelo (Shuan, 2004).

El límite plástico (LP) es el punto en el que un suelo pasa del estado plástico al semisólido, definido por el contenido de agua en el que el material pierde su plasticidad y deja de ser moldeable. Este límite corresponde a la humedad en la que el suelo se quiebra y presenta fisuras al intentar formar pequeños cilindros o rollitos. El ensayo para determinar el límite plástico se realiza con la fracción de arcilla que pasa por un tamiz con abertura de 400 μm (N°40), utilizando un contenido de humedad ligeramente superior al límite plástico. En estas condiciones, la arcilla debe poder formar fácilmente una bola sin fracturarse. Junto con el límite



líquido, este parámetro es fundamental para la clasificación e identificación de los suelos (Shuan, 2004).

El índice de plasticidad (IP) es un parámetro que refleja la magnitud del intervalo de humedades en cual el suelo exhibe consistencia plástica. Y se determina de la siguiente manera:

$$IP = W_L - W_P$$

Donde:

WL: Límite líquido

WP: Límite plástico

IP: Índice de plasticidad

2.2.2.7. Descripción de suelos

Los suelos identificados se analizan y se categorizan siguiendo la metodología establecida para proyectos de construcción vial. La clasificación se lleva a cabo de manera obligatoria utilizando los sistemas AASHTO y SUCS, empleando los símbolos convencionales correspondientes (ver Figura 6 y Figura 7):

Figura 6

Signos convencionales para perfil de Calicatas – Clasificación AASHTO

Simbología	Clasificación	Simbología	Clasificación
	A - 1 - a		A - 5
	A - 1 - b		A - 6
	A - 3		A - 7 - 5
	A - 2 - 4		A - 7 - 6
	A - 2 - 5		Materia Orgánica
	A - 2 - 6		Roca Sana
	A - 2 - 7		Roca Desintegrada
	A - 4		

Fuente: Sistema de Clasificación AASHTO.

Figura 7

Signos convencionales para perfil de calicatas- Clasificación SUCS

	Grava bien graduada mezcla, grava con poco o nada de materia fino, variación en tamaños granulares		Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy bajo
	Grava mal granulada, mezcla de arena-grava con poco o nada de material fino		Arena arcillosa, mezcla de arena-arcillosa
	Grava limosa, mezcla de grava, arena limosa		Limo orgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa o limo arcilloso con ligera plasticidad
	Grava arcillosa, mezcla de grava-arena-arcilla; grava con material fino cantidad apreciable de material fino		Limo orgánico de plasticidad baja o mediano, arcilla grava, arcilla arenosa, arena limosa, arcilla magra
	Arena bien graduada, arena con grava, poco o nada de material fino. Arena limpia poco o nada de material fino, amplia variación en tamaños granulares y cantidades de partículas en tamaños intermedios		Limo orgánico y arcilla limosa orgánica, baja plasticidad
	Arena mal graduada con grava poco o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas intermedios		Limo inorgánico, suelo fino gravoso o limoso, micacea o diatometacea, limo elástico

Nota: Símbolos gráficos para suelos. Tomado de *Manual de Ensayos de Materiales* – Norma MTC E101.

2.2.3. Variable dependiente: Desempeño de bases suelo cemento

2.2.3.1. Densidad de compactación

La compactación se define como cualquier procedimiento que incrementa la densidad del suelo. En términos generales, compactar un suelo resulta beneficioso para mejorar su resistencia al esfuerzo cortante, disminuir su capacidad de compresión y aumentar su impermeabilidad (Montejo, 2001).

$$D_s = \frac{D_h}{\left(1 + \frac{W\%}{100}\right)}$$

Donde:

Ds: Densidad seca

Dh: Densidad húmeda

W%: Contenido de humedad

La compactación tiene como finalidad mejorar las características mecánicas del suelo, incrementando su resistencia y reduciendo su capacidad de deformación. Además, este procedimiento favorece la densificación del material, lo que contribuye a disminuir su permeabilidad y susceptibilidad a la erosión, proporcionando así una mayor estabilidad (Juárez y Rico, 1975).

Las técnicas de compactación desempeñan un papel fundamental en la mayoría de las obras civiles, ya que permiten mejorar las propiedades del suelo existente sin recurrir a su sustitución. Esto es particularmente



relevante en proyectos como terraplenes de relleno, presas de tierra, pavimentos y cimentaciones, entre otros. En el caso de suelos de arena suelta, se recomienda emplear métodos de vibración, ya que estos favorecen una densificación más eficiente del material, tal como lo indican diversas investigaciones (M, Das, 2013).

Según Shuan (2004) la compactación del suelo está influenciada por diversos factores, entre los cuales se destacan:

Tipo de suelo

Distribución granulométrica

Forma de partículas

Energía de compactación

Contenido de humedad.

El Proctor estándar fue el primer método diseñado para compactar suelos, pero con el progreso tecnológico y la aparición de equipos de compactación más avanzados en obra, se introdujo el Proctor modificado, el cual utiliza una mayor cantidad de energía en las muestras. La energía aplicada a estas muestras puede calcularse mediante la siguiente ecuación (Juárez y Rico, 1975).

$$Ee = \frac{N \times w \times n \times h}{V}$$

Dónde:

Ee = Energía de compactación, depende del tipo de ensayo



N = No de golpes por capa

n = No de capas

W = Peso del pisón

H = Altura de caída del pisón

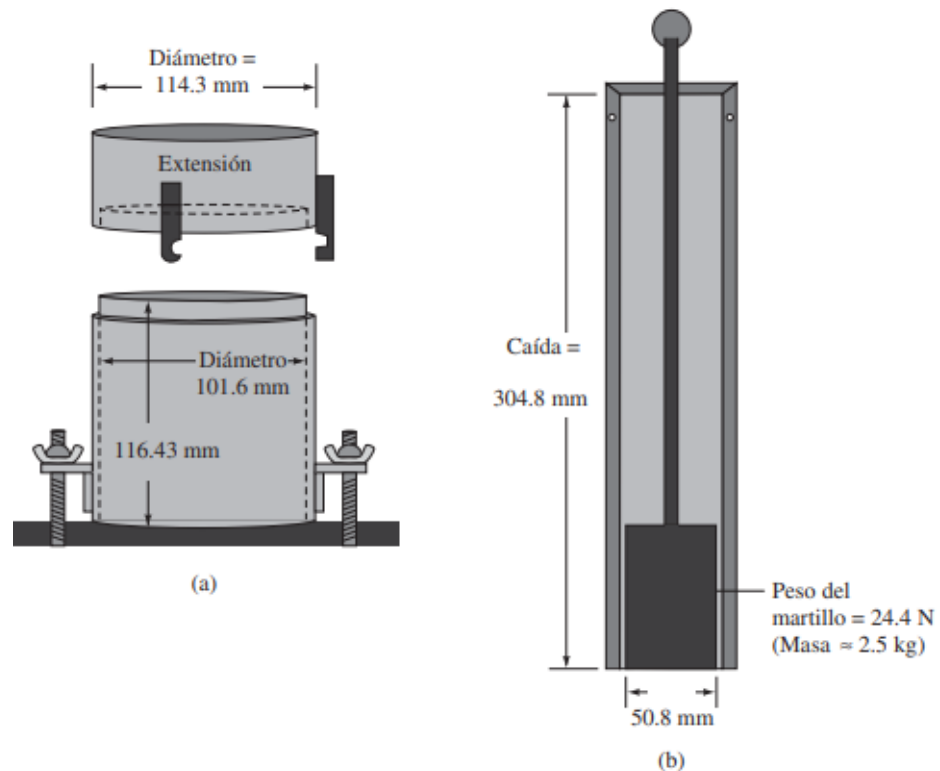
V = Volumen del suelo compactadores

2.2.3.2. Proctor estándar

En el ensayo Proctor, el suelo se compacta dentro de un molde con un volumen de 943.3 cm^3 y un diámetro de 101.6 mm . Para realizar la prueba en el laboratorio, el molde se ensambla con una placa base en la parte inferior y una extensión en la parte superior (**ver figura 8a**). El suelo se prepara mezclándolo con diferentes cantidades de agua y luego se compacta en tres capas uniformes. Cada capa recibe 25 golpes aplicados con un martillo (**ver figura 8b**) (geotecniafacil.com, 2018).

Figura 8

Equipo para el ensayo de Proctor estándar



Nota: Tomado de Fundamentos de ingeniería geotécnica, por M. Das, 2013.

A continuación, según M. Das (2013), la tabla 5 presenta las especificaciones detalladas de la prueba Proctor estándar, que incluyen las características del molde, el martillo y los procedimientos de compactación utilizados en los métodos A, B y C.

Tabla 5

Especificaciones de la prueba Proctor estándar

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	24.4 N	24.4 N	24.4 N
Altura de la caída del martillo	304.8 mm	304.8 mm	304.8 mm
# de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56

Elemento	Método A	Método B	Método C
# de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	591.3 kN-m/m ³	591.3 kN-m/m ³	591.3 kN-m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% peso es retenido en el tamiz de 19 mm

Nota: Adaptado de Norma ASTM 698.

2.2.3.3. Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado es similar al Proctor Estándar, pero se utilizan diferentes parámetros para aumentar la energía de compactación (ASTM, 2023). Según M. Das (2013), La tabla 6 a continuación detalla las especificaciones de la prueba Proctor modificado, incluyendo las características del molde, el martillo y los procedimientos de compactación aplicados en los métodos A, B y C.

Tabla 6

Especificaciones de la prueba Proctor modificado

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de la caída del martillo	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm



Elemento	Método A	Método B	Método C
# de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	25
# de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN- m/m ³	2696 kN- m/m ³	2696 kN- m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% peso es retenido en el tamiz de 19 mm

Nota: Adaptado de Norma ASTM Prueba 1577.

2.2.3.4. Índice de soporte California Bearing Ratio (CBR)-ASTM D1883/NTP 339.145

El ensayo de C.B.R. es uno de los métodos más utilizados para el diseño de pavimentos, ya que permite evaluar la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones específicas de humedad y densidad controladas (NTP 339.145, 1999).

$$C.B.R. = 100 \times \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}}$$

Este parámetro se utiliza para analizar la capacidad de carga de suelos granulares en proyectos de ingeniería vial. Su determinación se basa en comparar la presión necesaria para que un pistón penetre en el suelo de estudio con la presión requerida para un suelo de referencia (Qiang y Xu,



2023). La capacidad portante del suelo se establece a través de pruebas realizadas en laboratorio y en campo, como ensayos de placa de carga, pruebas de penetración estándar y ensayos CBR, entre otros. Estas evaluaciones ofrecen datos sobre la resistencia y el comportamiento del suelo frente a cargas, permitiendo determinar su aptitud para soportar estructuras y esfuerzos específicos (Han, et al; 2022).

2.2.3.5. Procedimiento para determinación del CBR

El proceso para su determinación se divide en las siguientes tres etapas:

1. Ensayo de compactación CBR (determinación de la densidad y humedad del suelo)

Preparar la muestra utilizando el contenido óptimo de humedad obtenido previamente en el ensayo de compactación Proctor modificado.

Compactar la muestra en 5 capas dentro de cada uno de los 3 moldes CBR. En el primer molde, aplicar 13 golpes por capa; en el segundo, 27 golpes; y en el tercero, 56 golpes por capa.

Medir tanto la densidad húmeda como el contenido de humedad de las muestras correspondientes a cada molde.

Calcular la densidad seca de las muestras obtenidas en cada uno de los moldes

2. Ensayo de hinchamiento (Determinación de las propiedades expansivas del material)



Voltear las muestras para que la superficie libre quede orientada hacia la parte superior al volver a ensamblar los moldes con sus respectivas placas de base.

Colocar sobre cada muestra un papel filtro, seguido de la placa de expansión, la sobrecarga, el trípode y el dial de expansión.

Sumergir los tres moldes completamente equipados en un tanque de agua durante un periodo de 4 días (96 horas).

Registrar las lecturas del dial de expansión cada 24 horas para evaluar las propiedades expansivas del material.

3. Ensayo carga – penetración (determinación de la resistencia a la penetración)

Una vez transcurridos los 4 días, retirar los moldes del tanque de agua y desmontar el dial, el trípode, la sobrecarga y la placa de expansión de cada uno. Dejar que las muestras drenen durante 15 minutos.

Colocar nuevamente la sobrecarga en cada molde y llevarlos a la prensa hidráulica para realizar el ensayo de penetración, aplicando un pisón a una velocidad de 0.05 pulgadas por minuto. Registrar las lecturas de carga correspondientes a cada muestra.

Medir nuevamente la densidad húmeda y el contenido de humedad de las muestras de cada molde.

Calcular el esfuerzo aplicado asociado a cada lectura de carga obtenida.



$$\sigma = \frac{P}{A}$$

σ : Esfuerzo

P: Carga aplicada

A: Área del pisón

Graficar las tres curvas esfuerzo-deformación correspondientes a las muestras de cada molde, utilizando escala natural. En el eje de abscisas se representarán los valores de la deformación, mientras que en el eje de ordenadas se indicarán los valores de esfuerzo. Si fuera necesario, ajustar las curvas corrigiendo su origen.

Identificar los valores de esfuerzo correspondientes a penetraciones de 0.1” y 0.2” en cada una de las curvas esfuerzo-deformación.

Calcular los índices CBR para las penetraciones de 0.1” y 0.2”, dividiendo los valores de esfuerzo obtenidos a esas penetraciones en las muestras ensayadas entre los valores de esfuerzo estándar correspondientes a 0.1” y 0.2”.

$$C.B.R. = 100 \times \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}}$$

Representar gráficamente las curvas que relacionan la densidad seca con los valores de CBR para penetraciones de 0.1” y 0.2”.

Definir el índice CBR de diseño como el valor correspondiente a las penetraciones de 0.1” y 0.2”, expresado como un porcentaje del valor



estándar correspondiente.

El número CBR se determina, generalmente, a partir de la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0.1”). No obstante, si el valor de CBR calculado para una penetración de 5.08 mm (0.2”) resulta superior, este valor debe considerarse como el índice final de CBR.

En caso de que el valor de CBR para 0.2” sea significativamente mayor al de 0.1”, se debe repetir el ensayo para confirmar los resultados obtenidos.

2.2.3.6. Relación de Soporte California Bearing Ratio (Relación de CBR)

Una vez que los suelos hayan sido clasificados utilizando los sistemas AASHTO y SUCS, se procederá a elaborar un perfil estratigráfico correspondiente a cada tramo homogéneo o sector en estudio, según lo estipulado en este manual. Con base en este perfil, se definirá el programa de ensayos necesarios para determinar el CBR, que representa la capacidad de soporte o resistencia del suelo, calculado en relación con el 95% de la Máxima Densidad Seca (MDS) y una penetración de carga de 2.54 mm (MTC, 2014).

Para establecer el valor CBR de diseño de la subrasante, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a) En los sectores donde se cuente con 6 o más valores de CBR obtenidos para un tipo de suelo representativo o para una sección con características homogéneas, el valor de diseño del CBR de la



subrasante se calculará como el promedio de todos los valores analizados en dicho sector.

- b) En los sectores con menos de 6 valores de CBR realizados para un tipo de suelo representativo o para una sección homogénea, el valor de diseño del CBR de la subrasante se establecerá atendiendo a los criterios específicos siguientes:

En caso de que los valores de CBR sean consistentes o similares, se tomará el promedio de los mismos como el valor de diseño.

Si los valores de CBR presentan diferencias significativas, se deberá seleccionar el valor crítico, es decir, el más bajo. Alternativamente, se puede subdividir la sección en subsectores que agrupen valores similares, calculando el promedio para cada subsector.

La longitud mínima para los subsectores definidos no deberá ser inferior a 100 metros. Los valores de CBR se consideran similares o consistentes si están dentro del rango correspondiente a una misma categoría de subrasante, según lo indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

- c) Una vez determinado el valor de diseño del CBR para cada sector con características homogéneas, se procederá a clasificar la categoría de subrasante a la que pertenece dicho sector o subtramo, siguiendo los criterios establecidos.

Para verificar si la capa de subrasante es adecuada, es esencial evaluar las propiedades del suelo que se encuentra por debajo de su superficie superior. Asimismo, el CBR (California Bearing Ratio) debe



alcanzar o superar el 6%. En caso de que este valor sea inferior, será imprescindible estabilizar la subrasante mediante el uso de materiales como aditivos, enzimas, polímeros u otras sustancias apropiadas. En la tabla 7 se detallan las categorías de subrasante que varían desde condiciones deficientes hasta excelentes.

Tabla 7

Categoría de subrasante

Categoría de Sub rasante	CBR
Sub rasante inadecuada	CBR<3%
Sub rasante insuficiente	De CBR \geq 3% a CBR<6%
Sub rasante regular	De CBR \geq 6% a CBR<10%
Sub rasante buena	De CBR \geq 10% a CBR<20%
Sub rasante muy buena	De CBR \geq 20% a CBR<30%
Sub rasante excelente	CBR<30%

Nota: Tomado de Manual de carreteras. Suelos geología, geotecnia y pavimentos por MTC, 2013.

A continuación, en la tabla 8 se muestra valores, características y usos recomendados según el CBR obtenido

Tabla 8*Valores típicos de CBR*

Valor CBR (%)	Calificación cualitativa del suelo	Uso recomendado
2 - 5	<i>Muy mala</i>	<i>Subrasante</i>
5 - 8	<i>Mala</i>	<i>Subrasante</i>
8 - 20	<i>Regular a buena</i>	<i>Subrasante</i>
20 - 30	<i>Excelente</i>	<i>Subrasante</i>
30 - 60	<i>Buena</i>	<i>Subbase</i>
60 - 80	<i>Buena</i>	<i>Base</i>
80 - 100	<i>Excelente</i>	<i>Base</i>

Nota: Adaptado de *Guía de laboratorio de mecánica de suelos I*, por Universidad Nacional de Ingeniería, 2019, facultad de Tecnología de la Construcción (p. 115) Derechos reservados.

El requisito de CBR (referido al 100% de la MDS y una penetración de 0.1”) para uso de bases granulares, se plasma en la tabla 9 que se muestra a continuación.

Tabla 9*Valor relativo de soporte para bases granulares*

<i>Valor relativo de soporte</i>	<i>Tráfico en ejes equivalentes ($\leq 10^6$)</i>	<i>Mínimo 80%</i>
	<i>Tráfico en ejes equivalentes ($> 10^6$)</i>	<i>Mínimo 100%</i>

Nota: Tomado de Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales por MTC, 2014.

2.2.3.7. Diseño de mezcla suelo-cemento

El suelo-cemento consiste en una mezcla uniforme de suelo pulverizado con proporciones específicas de cemento portland y agua.



Tras su compactación, con el objetivo de alcanzar una alta densidad, y un proceso de curado que permita un endurecimiento óptimo, se forma un material nuevo con alta resistencia a la compresión, gran estabilidad en el tiempo, características de impermeabilidad y propiedades de aislamiento térmico.

El diseño de la mezcla de suelo-cemento requiere preparar el suelo de manera adecuada para garantizar que, al añadir el cemento y el agua, se obtenga una mezcla homogénea. Para ello, el suelo debe extenderse sobre una superficie plana, lo que facilita la pérdida de su humedad natural y permite desintegrar los grumos utilizando una maceta de madera dura. A medida que el suelo se procesa, adquiere una coloración uniforme. Este procedimiento se realiza con mayor rapidez si el suelo contiene una proporción adecuada de partículas finas.

El suelo-cemento se comporta de manera similar al suelo natural que lo compone, lo que implica que alcanza su densidad máxima al compactarse cuando su contenido de humedad coincide con la humedad óptima, valores determinados mediante el ensayo Proctor. La humedad que presenta el suelo tras ser secado al aire se conoce como humedad higroscópica. Este valor debe considerarse al calcular, ya sea por peso o volumen, la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima requerida.

Dicho en otras palabras, la densidad máxima corresponde al peso más alto por unidad de volumen que puede alcanzar una muestra de suelo mediante compactación. Para lograr este nivel de compactación, es

fundamental contar con la humedad óptima, la cual permite que el suelo pase de un estado seco a uno plástico, mientras se aplica carga y se disminuye el volumen de aire contenido en el material.

$$W_{\text{agua}} = W_{\text{agua óptima}} - W_{\text{agua higroscópica}}$$

$$W_{\text{agua}} = \text{Peso del agua}$$

$$W_{\text{agua}} = V_{\text{agua}} \times \gamma_{\text{agua}}$$

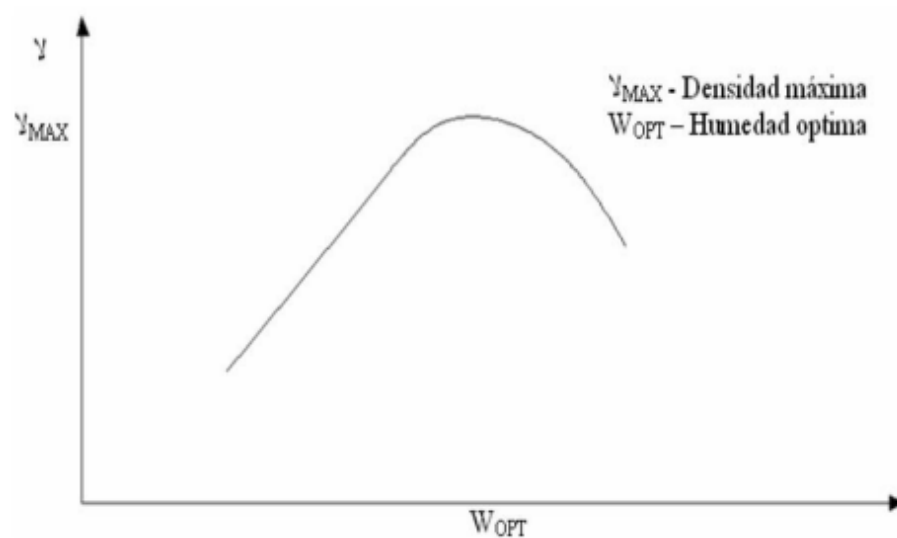
$$\gamma_{\text{agua}} = 1t / m^3$$

$$V_{\text{agua}} = V_{\text{agua óptima}} - V_{\text{aguahigroscópica}}$$

La relación entre la densidad, la humedad y la energía de compactación se detalla a continuación, ya que estos tres factores son esenciales para lograr las resistencias requeridas, minimizar la absorción de agua y asegurar la máxima durabilidad del suelo-cemento.

Figura 9

Curva de ensayo Proctor



Nota: Tomado de *El suelo-cemento como material de construcción*. ciencia y sociedad, por Corral J.T., 2008.

Tal como se mencionó previamente, la densidad máxima se logra

cuando el suelo alcanza la humedad óptima, y ambos parámetros están directamente relacionados con la cantidad de energía de compactación utilizada.

Como se indicó anteriormente, la densidad máxima se obtiene al alcanzar la humedad óptima, y tanto esta como la densidad están directamente influenciadas por el nivel de energía de compactación aplicado.

2.2.3.8. Humedecimiento y secado de mezclas suelo-cemento compactadas

En este ensayo de laboratorio se someten a las muestras suelo-cemento compactadas a cambios de temperatura y humedad lo cual genera en la muestra variaciones de volumen, resistencia y en su estructura interna (Montejo et al., 2018).

Para cada dosificación definida se realizan dos especímenes, el primer espécimen será para los ensayos de humedecimiento y secado sin cepillado y el segundo espécimen será con cepillado. Las muestras compactadas tendrán 7 días de curado, al final de este periodo de curado se sumergirán las muestras en agua durante 5 horas, luego se secará en un horno a $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 42 horas, posteriormente se realizarán las medidas de variación de volumen y peso, todos estos pasos representan un ciclo de 48 horas de humedecimiento y secado, continuar con el mismo ciclo hasta llegar a los 12 ciclos de ensayo (MTC, 2016)

2.2.3.9. Resistencia a la compresión simple

Se refiere a la determinación de la resistencia de muestras compactadas de suelo-cemento a cargas axiales donde la muestra está sin confinamiento, además las muestras a 7 días de curado de suelos GW, GC, SW, SC, SP, SM Y GP estabilizados con cemento llegan a una resistencia a la compresión de 21 Kg/cm² a 42 Kg/cm². (Montejo et al., 2018), para esto se necesita una máquina para el ensayo de compresión y moldes se acuerdo a la norma ASTM ED 1633.

Según el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2016), existen dos procedimientos alternativos para el moldeo de las muestras suelo-cemento que son las siguientes:

- Método A: en cilindros con un diámetro de 101.6 mm y 116.4 mm de altura. La relación altura/diámetro es de 1.15. Recomendado para suelos que tengan material retenido en el tamiz de 4.75 mm (N° 4).
- Método B: en cilindros con un diámetro de 71.1 mm y 142.2 mm de altura. La relación altura/diámetro es de 2.00.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. La estabilización de suelos

Es un procedimiento orientado a optimizar las características físico-mecánicas del suelo natural, como su resistencia a la deformación, su sensibilidad al agua, así como a reducir la erosión y las variaciones volumétricas, mediante el uso de productos químicos, naturales o sintéticos (Jibaja, 2021).



2.3.2. Carga

Las estructuras de un edificio están formadas por diversos elementos estructurales, sobre los cuales se aplican las cargas correspondientes (Villalaz, 2004).

2.3.3. Energía de compactación

El ensayo Proctor estándar genera una energía de 600 kNm/m^3 , mientras que el ensayo Proctor modificado alcanza una energía de 2700 kNm/m^3 . Estas magnitudes de energía corresponden a pruebas de laboratorio diseñadas para identificar la densidad seca máxima que un suelo puede lograr bajo una cantidad específica de energía aplicada durante la compactación (M. Das, 2013).

2.3.4. Ensayo Proctor Modificado

Establecer la densidad seca máxima de un suelo es un paso fundamental tanto para el control de calidad como para investigaciones. Este método permite analizar la relación entre la densidad seca de un terreno y su contenido de humedad, considerando niveles específicos de energía de compactación (Fratelli, 1993).

2.3.5. Estudio de suelos

La aplicación de este procedimiento permite identificar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, además de analizar la composición de los materiales presentes en las capas más profundas (Villalaz, 2004).

2.3.6. Suelo

Los materiales tratados en este contexto son de origen terrestre y presentan



estructuras organizadas cuyas propiedades varían en intensidad dependiendo de la dirección. En la dirección vertical, estas variaciones suelen ser mucho más rápidas en comparación con las que ocurren en el plano horizontal (Fratelli, 1993).

2.3.7. Granulometría

El análisis granulométrico del suelo es esencial para identificar la distribución de sus partículas, utilizando tamices que cumplen con normas estandarizadas (Das Braja, 2013).

2.3.8. Límites de consistencia

La consistencia del suelo está determinada por su comportamiento ante diferentes contenidos de humedad, lo que permite clasificarlo en cuatro estados principales: sólido, semisólido, plástico y líquido (Das Braja, 2013).

2.3.9. Polímero

Un polímero es una sustancia formada por moléculas compuestas por la repetición de una o más unidades básicas (unidades constitutivas), unidas entre sí en cantidades suficientes para conferirle un conjunto específico de propiedades (ISO 472, 2013).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de Investigación

La investigación es de tipo **básica**, ya que se orienta al incremento de los conocimientos científicos teóricos para mejorar procesos y productos para su aplicación en diversos contextos reales, a pesar de que se ha decidido usar los materiales de una cantera de Huata el cual sirvió como grupo de control. Según Vara (2015), este tipo de investigación “pretende incrementar la teoría de un tema determinado”. En este caso, la aplicación se centra en la incorporación de **nanocompuestos tensioactivos catiónicos** a bases suelo-cemento, con el fin de analizar y mejorar su desempeño en las carreteras del distrito de Huata.

3.1.2. Enfoque de investigación

El enfoque es **cuantitativo**, puesto que se recopilan datos numéricos para contrastar hipótesis y explicar fenómenos medibles. De acuerdo con Hernández et al. (2010), este enfoque “usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías”. El análisis estadístico permitirá correlacionar la **cantidad de nanocompuestos tensioactivos catiónicos** con variables clave como la **densidad de compactación**, el **índice de soporte CBR**, la **resistencia a la compresión y de durabilidad**, satisfaciendo de manera directa los objetivos planteados.

3.1.3. Nivel de Investigación

Se adopta un nivel de investigación **explicativo**, puesto que se busca determinar las causas o la influencia de las variables independientes (adición de nanocompuestos) en las variables dependientes (desempeño de las bases suelo-cemento). Arias y Cangalaya (2023) señalan que la investigación explicativa “identifica la causa o la influencia de una variable sobre otra [...] con la finalidad de explicar el comportamiento de una variable en función de otras” (p. 153). En este estudio, se pretenden **explicar** los cambios en la resistencia, estabilidad y durabilidad de las bases suelo-cemento a partir de la incorporación de los nanocompuestos tensioactivos catiónicos.

3.1.4. Diseño de investigación

El presente estudio adopta un **diseño experimental**, puesto que la variable independiente (adición de distintos porcentajes de nanocompuestos tensioactivos catiónicos) se manipula de manera deliberada para observar su efecto en el desempeño de las bases suelo-cemento (variable dependiente). En este sentido, Lozano (2020) señala que “existen dos tipos de diseños: los diseños experimentales [...] y los diseños no experimentales” (p. 80). Dado que aquí se controlan los niveles de adición del aditivo y se evalúa cuantitativamente la respuesta del material, el estudio se enmarca en la categoría de investigación experimental.

Asimismo, Vitulas (2022) destaca que, en el ámbito de la experimentación, “los ensayos son realizados en laboratorio con muestras cuyo entorno se mantiene controlado para asegurar la validez de los resultados” (p. 56). Este criterio se cumple en la presente investigación, ya que las pruebas se desarrollan bajo



condiciones específicas (proporciones de aditivo, compactación y humedad óptima, entre otras), permitiendo la comparación estadística de los resultados obtenidos en cada tratamiento. Así, el diseño experimental garantiza una aproximación objetiva y rigurosa que, además de analizar los cambios en la resistencia y la estabilidad del suelo-cemento, permite inferir la posible relación de causa-efecto entre la adición de nanocompuestos y la mejora de las bases. En consecuencia, se contribuye a la obtención de conclusiones explicativas y a la generación de recomendaciones técnicas fundamentadas.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO

3.2.1. Población

La población objeto de estudio corresponde a las carreteras del distrito de Huata, en la región de Puno, que utilizan suelos arcillosos limosos y se ubican en el inicio de la carretera NORTE 8278566.72 ESTE 381899.55 y coordenadas UTM y finalizan en NORTE 8272471.96 ESTE 392352.50, con una longitud aproximada de **12 905 Km**. Dichas vías se construyen con el material extraído de la cantera del **Cerro Huata Cantera-Huata con coordenadas NORTE: 8272873.930 ESTE: 397360.170**, por lo que representan el escenario real en el que se evalúa el comportamiento de las bases suelo-cemento mejoradas con nanocompuestos tensioactivos catiónicos.

3.2.2. Muestreo

El muestreo es **no estadístico**, dado que las muestras de suelo se obtendrán de una cantera cercana a la carretera PU-165 específicamente en la denominada **Cantera-Huata** con coordenadas NORTE: 8272873.930 ESTE: 397360.170. Esta selección obedece a la necesidad de disponer de un material homogéneo y



representativo de la zona, a fin de evaluar las diferentes proporciones de nanocompuestos tensioactivos catiónicos sobre la base suelo-cemento en condiciones de laboratorio.

3.2.3. Muestra

La muestra estará conformada por **probetas de bases suelo-cemento** elaboradas según los protocolos de ensayo establecidos en la normativa de pavimentos y mecánica de suelos. Para cada **proporción de nanocompuestos tensioactivos catiónicos**, se prepararán probetas a través de un **método por juicio de expertos**, asegurando la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados. Estas probetas permitirán analizar la densidad máxima seca, el índice de soporte **California Bearing Ratio (CBR)** y otros parámetros mecánicos, en consonancia con los objetivos de la investigación.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN

3.3.1. Técnicas

Se emplearán dos técnicas principales para la obtención de datos:

Observación en laboratorio: Abarca la preparación, compactación y ensayo de las muestras de suelo-cemento mezcladas con diferentes proporciones de nanocompuestos tensioactivos catiónicos, midiendo propiedades físicas y mecánicas (densidad, resistencia, índice CBR y pérdida de volumen).

Observación de las propiedades de los materiales: Incluye la caracterización de propiedades físicas y básicas de la composición química (por ejemplo, medición de pH) del suelo, el cemento y los nanocompuestos antes de la mezcla.



3.3.2. Instrumentos

3.3.2.1. Instrumentos de Investigación

Fichas de Registro y Guías de Observación: Para anotar sistemáticamente los resultados de caracterización del suelo y los valores obtenidos en los ensayos (densidad, resistencia, CBR, pérdida de volumen).

Cuaderno de Campo: Permiten documentar el origen de las muestras, sus condiciones iniciales y las particularidades de cada ensayo.

Fichas de laboratorio: Para ensayo de análisis granulométrico de suelos por tamizado, para determinación del contenido de humedad, para determinación del límite líquido, para determinación del límite plástico, para el ensayo estándar valor de equivalente de arena, para ensayo de abrasión los ángeles, para determinar el porcentaje de partículas chatas y alargadas, para determinar el porcentaje de partículas fracturadas, para ensayo de compactación Proctor, para el ensayo CBR, para el ensayo de resistencia a la compresión simple, para ensayo de pérdida de volumen (humedecimiento y secado).

3.3.2.2. Validez y Confiabilidad

Validez: Asegurada mediante la aplicación de normas estandarizadas (ASTM, AASHTO) en los ensayos de compactación, resistencia y durabilidad (CBR y pérdida de volumen), lo que hace que los indicadores respondan fielmente a los objetivos de la investigación.

Confiabilidad: Garantizada por las condiciones controladas de los



ensayos y la calibración periódica de los equipos.

3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.4.1. Procedimientos de la Recolección de Datos

La recolección de datos se realiza a partir de las muestras de suelo-cemento (con distintas proporciones de nanocompuestos tensioactivos) preparadas en laboratorio. Se efectúan los siguientes pasos:

Selección de Muestras: Se identifican y extraen las muestras de suelo de la cantera del Cerro Huata, cuidando la representatividad de estas.

Preparación de Probetas: Cada probeta se elabora siguiendo los protocolos de compactación y humedad óptima (Ensayo Proctor).

Aplicación de Ensayos: Se llevan a cabo ensayos de densidad, índice CBR, resistencia y pérdida de volumen, registrando todos los datos en fichas de observación y guías de laboratorio.

3.4.2. Procedimiento del Análisis de Datos

Organización de la Información: Los datos obtenidos (densidad, CBR, resistencia, variación de volumen) se ingresan en hojas de cálculo o software estadísticos.

Procesamiento y Estadística Descriptiva: Se calculan medidas como el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para describir el comportamiento de las probetas.

Comparación de Resultados: Se confrontan los valores entre las diferentes combinaciones de nanocompuestos y suelo-cemento, evaluando su



efecto en las propiedades mecánicas y físicas.

3.4.3. Interpretación de Resultados

Los resultados se interpretan relacionándolos con los objetivos específicos:

- Se identifica cómo la adición de nanocompuestos tensioactivos influye en la densidad y resistencia de las bases suelo-cemento.
- Se determina qué proporción de aditivo genera el mejor desempeño, expresado en un mayor índice CBR y menor pérdida de volumen.
- Se explican las posibles causas de los cambios observados, considerando factores como la cohesión y la compactación lograda con cada mezcla.

3.4.4. Validación de Resultados

Para asegurar la validez y confiabilidad de los hallazgos:

- **Repetición de Ensayos:** Las pruebas se efectúan en múltiples probetas con el mismo procedimiento, garantizando reproducibilidad.
- **Control de Calidad y Calibración:** Se verifica periódicamente el correcto funcionamiento de los equipos y la precisión de los instrumentos de medición.
- **Uso de Estándares:** La aplicación de normas (ASTM, AASHTO) avala que los métodos de prueba y los datos obtenidos sean comparables y confiables.
- **Contrastación Teórica:** Se comparan los resultados con estudios previos y literatura especializada para confirmar la coherencia de los hallazgos.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 10

Operacionalización de variables

Variables	Marco Operacional	Indicadores	Instrumento	Unidad de medida	Rango de medida	Tipo de variable
Variable independiente: Nanocompuestos tensioactivos catiónicos	Cantidad de nanocompuestos adicionada de acuerdo con el peso de suelo	Concentración de nanocompuestos	Balanza de precisión	Porcentaje	0.01% - 0.1%	Númerica continua
Variable interviniente: Cemento	Cantidad de cemento adicionada al suelo a proporciones predeterminadas. - Grado de compactación alcanzado durante el ensayo Proctor modificado. - Resistencia a la penetración de un suelo durante el ensayo CBR.	Concentración de cemento	Balanza de precisión	Porcentaje	0.5%, 1%, 1.5% y 2%	Númerica continua
Variable Dependiente: Desempeño de bases suelo-cemento	- Soporte de una muestra compactada ante cargas axiales sin confinamiento. - Pérdida de masa de una muestra compactada ante ciclos repetidos de saturación, secado y desgaste.	- California Bearing Ratio (CBR) - Resistencia a la Compresión simple - Durabilidad	- Equipo Proctor modificado - Máquina CBR - Ensayo de resistencia a la compresión simple de probetas suelo-cemento compactadas - Ensayo de humedecimiento y secado de muestras de Suelo-cemento compactadas	- Gramos por centímetro cúbico (g/cm ³) - Índice CBR en porcentaje - Resistencia a la compresión en MPa - Pérdida de volumen en %	1.00 g/cm ³ - 2.25 g/cm ³ 29%-483% 0.2 Mpa - 3.6 Mpa 0-100%	Númerica continua Númerica continua Númerica continua Númerica continua

Nota: Elaboración Propia



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.1. Respecto al Objetivo Específico 1

OE1: Caracterizar las propiedades físico-mecánicas del suelo destinado a la base en la carretera PU-165 Caracoto- Huata mediante ensayos de laboratorio y análisis normativo.

La caracterización inicial de los materiales que conforman las bases suelo-cemento es la etapa crucial para esta investigación. Su importancia radica en establecer una línea base confiable que permita, posteriormente, evaluar y cuantificar el grado de mejora que se pueda obtener con la incorporación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos. Los ensayos realizados están dirigidos a determinar las propiedades físicas y mecánicas fundamentales del suelo natural, a fin de identificar limitaciones y potencialidades del material, lo cual justifica técnicamente la necesidad de recurrir a una estabilización química para optimizar su desempeño estructural en carreteras.

4.1.1.1. Ensayos de caracterización de suelo-cemento

Los ensayos realizados y sus respectivos resultados son los siguientes:

Análisis Granulométrico

Norma MTC: MTC E 107



Código interno de ensayo: AG-1

Ficha utilizada: OE1-GRANULOM-01

Fecha: 17.06.2024 al 19.06.2024

Este ensayo proporciona la composición granulométrica del material, que es fundamental para predecir cómo se comportará el suelo bajo esfuerzos mecánicos, especialmente cuando se estabiliza con cemento y nanocompuestos. El suelo estudiado mostró una distribución granulométrica de 42.51% de grava, 42.74% arena y 15% de finos, no cumpliendo plenamente con la gradación requerida por la norma técnica EG-2013 para bases granulares tipo A, recomendada para altitudes mayores a 3000 msnm.

Contenido de Humedad Natural

Norma MTC: MTC E 108

Código interno de ensayo: CH-1

Ficha utilizada: OE1-HUMNAT-02

Fecha: 07.08.2024 al 08.08.2024

El ensayo de humedad natural permite conocer el estado inicial del suelo en términos de contenido de agua. La humedad obtenida del 3.44% indica que el material presenta condiciones relativamente secas. Esta información es crucial para precisar la cantidad exacta de agua necesaria durante la compactación y estabilización posterior. Al establecer una línea base precisa del contenido hídrico, se podrá evaluar mejor cómo la adición



de nanocompuestos puede afectar la humedad óptima y la capacidad del suelo para alcanzar su máxima densidad en la mezcla estabilizada.

Límites de Consistencia

Normas MTC: MTC E 110 (LL), MTC E 111 (LP)

Códigos internos de ensayo: LL-1, LP-1

Ficha utilizada: OE1-CONSIST-03

Fecha: 18.06.2024 al 19.06.2024

Estos ensayos definen la plasticidad del suelo, un aspecto clave para determinar su potencial expansivo y su trabajabilidad al mezclarse con cemento. Los resultados obtenidos (LL=25%, LP=16.3%, IP=8.7%) indican una plasticidad moderada que clasifica al suelo como A-2-4(0) según AASHTO y arena arcillosa (SC) según SUCS. Estas propiedades indican buena trabajabilidad, pero aun así existe potencial de mejora con la aplicación de nanocompuestos tensioactivos, los cuales podrían optimizar la cohesión y reducir la plasticidad efectiva en condiciones de campo, beneficiando directamente la estabilidad estructural de la mezcla suelo-cemento.

Equivalente de Arena

Norma MTC: MTC E 114

Código interno de ensayo: EA-1

Ficha utilizada: OE1-EQARENA-04



Fecha: 10.09.2024 al 11.09.2024

El equivalente de arena mide la proporción relativa de finos no plásticos presentes en el suelo. El resultado obtenido de 25% se sitúa por debajo del mínimo de 45% recomendado para regiones altoandinas según EG-2013. Esta condición refleja un exceso de partículas finas potencialmente plásticas, lo que podría comprometer la estabilidad y resistencia de la mezcla suelo-cemento. Este valor bajo de equivalente de arena sustenta aún más la necesidad técnica de aplicar los nanocompuestos tensioactivos para mejorar la adhesión y resistencia interna del material estabilizado.

Abrasión Los Ángeles

Norma MTC: MTC E 207

Código interno de ensayo: AA-1

Ficha utilizada: OE1-ABRLA-05

Fecha: 11.09.2024 al 13.09.2024

Este ensayo determina la resistencia al desgaste de los agregados gruesos utilizados en la base. Con un valor del 25.9%, el agregado cumple adecuadamente la exigencia máxima del 40% establecida por la norma EG-2013. A pesar de este resultado positivo inicial, la incorporación posterior de nanocompuestos tensioactivos podría contribuir a mantener o incluso mejorar esta propiedad mecánica bajo condiciones extremas de tráfico y climáticas propias del distrito de Huata.



Partículas Chatas y Alargadas

Norma MTC: MTC E 223

Código interno de ensayo: CHA-1

Ficha utilizada: OE1-CHAL-06

Fecha: 11.09.2024 al 12.09.2024

El ensayo mide la morfología de los agregados gruesos, obteniéndose un 3.3%, muy por debajo del máximo permisible de 15%. Esta favorable forma de partículas facilita una adecuada interacción y compactación, proporcionando una base inicial robusta para la posterior estabilización química mediante nanocompuestos. El resultado obtenido establece una ventaja inicial en cuanto a la calidad morfológica del material, sobre la cual se buscará mejorar aún más con los aditivos investigados.

Partículas Fracturadas

Norma MTC: MTC E 210

Código interno de ensayo: PF-1

Ficha utilizada: OE1-FRACT-07

Fecha: 11.09.2024 al 12.09.2024

Se observó que el material presentó porcentajes deficientes de partículas fracturadas: 19.99% con una cara fracturada y 6.22% con dos o más caras fracturadas. Estos resultados son significativamente inferiores a



los mínimos requeridos (80% y 50% respectivamente) y evidencian claramente una limitación estructural crítica. La futura aplicación de nanocompuestos tensioactivos buscará mitigar esta deficiencia mejorando la trabazón y cohesión interna entre las partículas.

Contenido de Sales Solubles

Norma MTC: MTC E 219

Código interno de ensayo: SS-1

Ficha utilizada: OE1-SALES-08

Fecha: 23.09.2024 al 30.09.2024

Finalmente, se determinó que el contenido de sales solubles es despreciable ($<0.001\%$), muy por debajo del límite máximo permitido (0.5%), garantizando la ausencia de problemas químicos en la futura reacción suelo-cemento y aditivo. Esta información proporciona seguridad adicional para la futura etapa experimental donde se incorporarán nanocompuestos, confirmando la idoneidad química del suelo estudiado para tratamientos de estabilización avanzada.

Todos estos datos han confluído para realizar entonces una ficha técnica que se puede sintetizar en la siguiente ficha técnica:

4.1.1.2. Ficha técnica de caracterización del suelo

Datos del proyecto

Proyecto: Mejora del desempeño de bases suelo-cemento mediante nanocompuestos tensioactivos catiónicos



Ubicación: Distrito de Huata, Región Puno

Fuente del Material: Cantera Cerro Huata

Coordenadas UTM: Norte 8272892.0728 – Este 397418.6591

Altitud: > 3000 msnm

Fecha de realización: Junio-Septiembre de 2024

Responsable Técnico: [Tesista]

- Datos generales del material

Clasificación AASHTO: A-2-4(0)

Clasificación SUCS: SC (Arena arcillosa)

- Ensayos físicos y mecánicos realizados

Tabla 11

Ensayos físicos y mecánicos realizados

Ensayo Realizado	Norma (MTC)	Código Interno	Fecha de ensayo	Resultado	Valor Referencial EG-2013 *	Cumplimiento
Análisis Granulométrico	MTC E 107	AG-1	17-19/06/24	G=42.51%; A=42.74%; F=15%	Gradación tipo A	No cumple
Contenido Humedad Natural	MTC E 108	CH-1	07-08/08/24	3.44%	No especificado	-
Límite Líquido (LL)	MTC E 110	LL-1	18-19/06/24	LL=25%	-	-
Límite Plástico (LP)	MTC E 111	LP-1	18-19/06/24	LP=16.3%; IP=8.7%	IP 2% mín.	Cumple
Equivalente de Arena	MTC E 114	EA-1	10-11/09/24	25%	45% mín.	No cumple



Ensayo Realizado	Norma (MTC)	Código Interno	Fecha de ensayo	Resultado	Valor Referencial EG-2013 *	Cumplimiento
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	AA-1	11-13/09/24	25.90%	40% máx.	Cumple
Partículas Chatas y Alargadas	MTC E 223	CHA-1	11-12/09/24	3.30%	15% máx.	Cumple
Partículas Fracturadas (una cara)	MTC E 210	PF-1	11-12/09/24	19.99%	80% mín.	No cumple
Partículas Fracturadas (≥2 caras)	MTC E 210	PF-1	11-12/09/24	6.22%	50% mín.	No cumple
Contenido de Sales Solubles	MTC E 219	SS-1	23-30/09/24	<0.001%	0.5% máx.	Cumple

Nota: (G=Grava; A=Arena; F=Finos; IP=Índice de Plasticidad). (*) ≥ 3000 msnm

- Interpretación de la ficha técnica

El material analizado presenta condiciones físicas y mecánicas parcialmente adecuadas para su uso en bases estabilizadas con cemento. Destacan positivamente la resistencia a la abrasión (25.9%), la adecuada morfología de partículas (solo 3.3% de partículas chatas y alargadas) y un bajo contenido de sales solubles (<0.001%), condiciones favorables para estabilización química.

No obstante, la deficiencia observada en la granulometría (gradación tipo B en lugar de A), equivalente de arena (25% frente al mínimo exigido de 45%) y, sobre todo, en la angularidad (partículas fracturadas insuficientes) plantea limitaciones técnicas importantes, requiriendo mejoras adicionales mediante el uso de ligantes y aditivos.

Por lo tanto, la caracterización realizada establece claramente la línea base desde la cual se evaluará la efectividad de la posterior



incorporación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos. Con la adición de dichos compuestos se espera cumplir con los siguientes objetivos de la investigación y así superar estas limitaciones iniciales, mejorando la compactación, cohesión y estabilidad global del material en las bases suelo-cemento destinadas a vías no pavimentadas.

Otras recomendaciones implicarían hacer ajustes granulométricos incorporando agregados adicionales para alcanzar la gradación tipo A. como incorporar arenas limpias para mejorar el equivalente de arena. O incorporar piedra chancada para corregir la también la insuficiencia en partículas fracturadas, por lo que la estabilización química con nanocompuestos tensioactivos si es una alternativa para mejorar la resistencia mecánica, cohesión y estabilidad de las mezclas suelo-cemento.

4.1.2. Respecto al Objetivo Específico 2

OE2: Determinar la incidencia del nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.05%, 0.07% y 0.1% en la máxima densidad seca de un suelo-cemento para base.

4.1.2.1. Análisis de densidad

El ensayo de compactación de suelos con energía modificada, codificado en esta investigación como PM-1 y desarrollado conforme a la norma técnica MTC E-115, tiene como finalidad determinar la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco máximo alcanzable por el suelo. Esta relación, conocida como curva de compactación, permite identificar los valores óptimos de humedad y densidad que garantizan un adecuado comportamiento mecánico del suelo en campo.

Este ensayo es particularmente relevante para el presente estudio, ya que busca determinar cómo influye la incorporación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos (NLF) en las propiedades físico-mecánicas de mezclas suelo-cemento, especialmente en su densidad seca máxima, que es un parámetro fundamental para la estabilidad y resistencia de las capas de base en carreteras.

Tabla 12

Análisis de la densidad

ÍTEM	CEMENTO (%)	ADITIVO (%)	Densidad máx. seca (gr/cm ³)
1	0.00	0.00	2.215
2	0.50	0.00	2.194
3	1.00	0.00	2.219
4	1.50	0.00	2.204
5	2.00	0.00	2.220
6	0.00	0.03	2.212
7	0.50	0.03	2.246
8	1.00	0.03	2.213
9	1.50	0.03	2.232
10	2.00	0.03	2.211
11	0.50	0.01	2.241
12	0.50	0.02	2.241
13	0.50	0.05	2.249
14	0.50	0.07	2.230
15	0.50	0.10	2.246

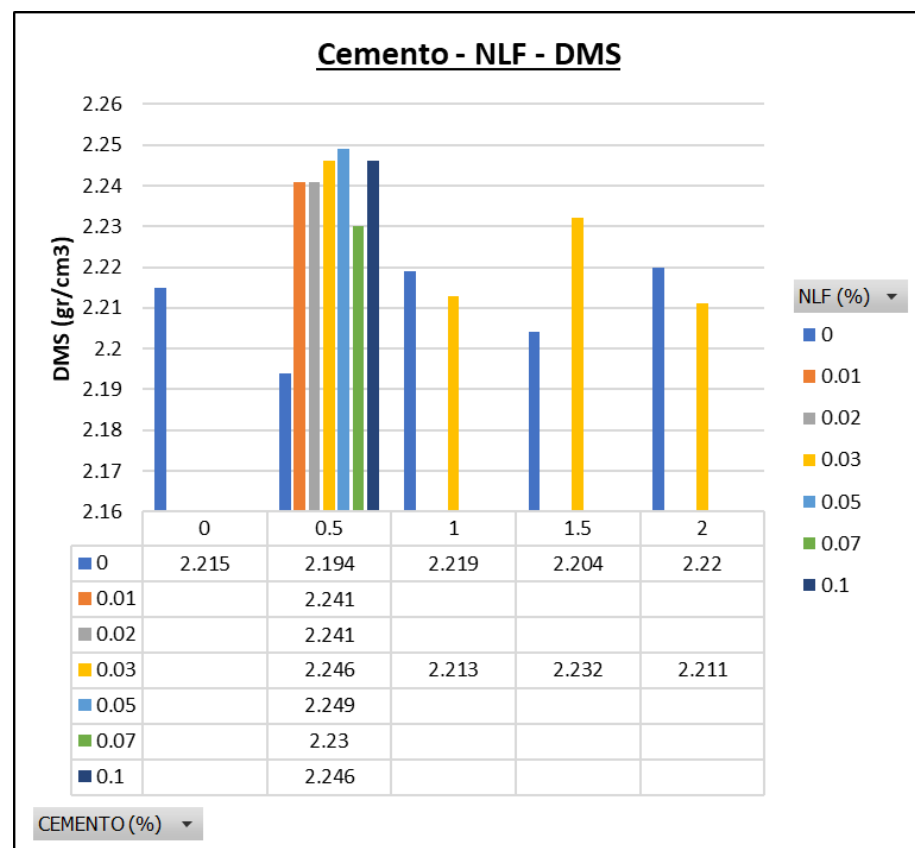
Nota: Elaboración propia.

De la tabla 12 se aprecia que la DMS de las muestras suelo-cemento-nanocompuestos están en el rango de 2.211 a 2.249 gr/cm³, la DMS de las muestras suelo-cemento están en el rango de 2.194 a 2.220

gr/cm³ y la muestra patrón tiene una DMS de 2.215 gr/cm³. De estos resultados se determina que DMS de las muestras de suelo-cemento puede mejorar hasta en un 0.22% con respecto a la muestra patrón y la DMS de las muestras suelo-cemento-nanocompuestos puede mejorar hasta en un 1.5% con respecto a la muestra patrón.

Figura 10

DMS según % de cemento y % de NLF



Nota: Elaboración propia.

Para el análisis y predicción de resultados primero se previó cual modelo es el más óptimo si una regresión lineal o una regresión cuadrática.

4.1.2.2. Análisis comparativo de modelos

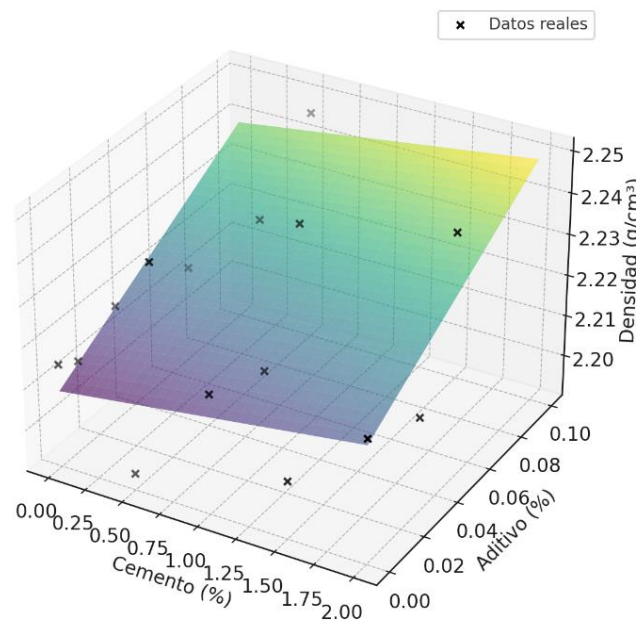
Con el fin de identificar la relación entre la densidad máxima seca (variable dependiente) y las proporciones de cemento y aditivo catiónico

(variables independientes), se evaluaron dos modelos de regresión: uno lineal y uno cuadrático. Ambos fueron ajustados utilizando los datos del diseño factorial correspondiente a 15 combinaciones experimentales de dosificación.

Figura 11

Modelo Lineal - Densidad Máx. Seca ($R^2 = 0.3827$)

Modelo Lineal - Densidad Máx. Seca ($R^2 = 0.3827$)



Nota: Elaboración propia.

Ecuación del modelo:

$$y=2.2085+0.0050 \cdot C+0.3059 \cdot A$$

Donde:

y = Densidad máxima seca (g/cm^3)

C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

Coefficiente de determinación:

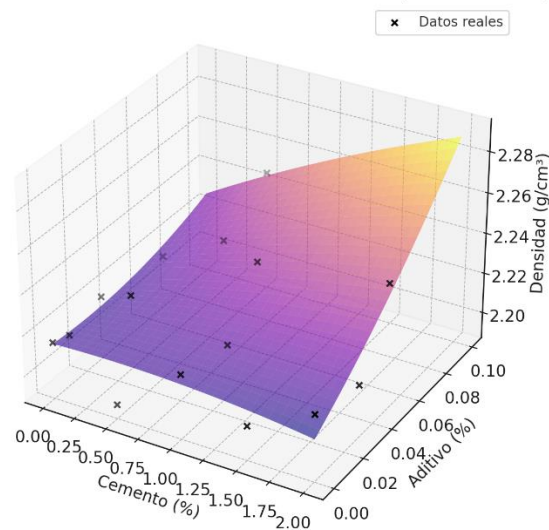
$$R^2 = 0.3827$$

Este valor indica que el modelo lineal explica el **38.27%** de la variabilidad de la densidad máxima seca.

Figura 12

Modelo Cuadrático - Densidad Máx. Seca ($R^2 = 0.5040$)

Modelo Cuadrático - Densidad Máx. Seca ($R^2 = 0.5040$)



Nota: Elaboración propia.

Ecuación del modelo cuadrático:

$$y=2.2144+0.0028 \cdot C-0.0937 \cdot A-0.0030 \cdot C^2+0.3412 \cdot C \cdot A+2.1941 \cdot A^2$$

Donde:

y = Densidad máxima seca (g/cm^3)

C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

Coefficiente de determinación:

$$R^2 = 0.5040$$

El modelo cuadrático explica el **50.4%** de la variabilidad total de la densidad seca.

El modelo lineal presentó un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.3827$, lo que indica que explica el 38.27% de la variabilidad de la densidad. Su ecuación ajustada es la siguiente:

$$y=2.2085+0.0050\cdot C+0.3059\cdot A$$

Por su parte, el modelo cuadrático, que incluye términos de segundo orden e interacción, alcanzó un R^2 más elevado de 0.5040, mejorando sustancialmente el ajuste respecto al modelo lineal. La ecuación obtenida es:

$$y=2.2144+0.0028\cdot C-0.0937\cdot A-0.0030\cdot C^2+0.3412\cdot C\cdot A+2.1941\cdot A^2$$

Esta formulación permite capturar mejor la curvatura observada en los datos experimentales, reflejando los posibles efectos no lineales de las variables, así como la sinergia entre el cemento y el aditivo.

Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo cuadrático

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	gl	F	Valor-p (p)
Cemento (C)	0.000004	1	0.0225	0.8842
Aditivo (A)	0.000008	1	0.0396	0.8467
Cemento ² (C ²)	0.000024	1	0.121	0.7359
Interacción (C·A)	0.000415	1	2.0778	0.1833
Aditivo ² (A ²)	0.000047	1	0.2348	0.6395
Error (residual)	0.001796	9	—	—
Total	0.002294	14		

Nota: Elaboración propia.



Hipótesis estadísticas evaluadas

H₀₁: El porcentaje de cemento no tiene efecto significativo sobre la densidad máxima seca. → *Se acepta*, $p = 0.8842$.

H₀₂: El porcentaje de aditivo catiónico no influye significativamente en la densidad máxima seca. → *Se acepta*, $p = 0.8467$.

H₀₃: No existe interacción significativa entre el cemento y el aditivo. → *Se acepta*, pero con tendencia a la significancia ($p = 0.1833 > 0.05$).

- Interpretación

A pesar de que los valores p no permiten rechazar las hipótesis nulas con un nivel de significancia del 5%, se observa una tendencia importante en la interacción entre el cemento y el aditivo. Esta sinergia podría estar detrás del ligero incremento de densidad observado experimentalmente, especialmente en la combinación 0.5% de cemento y 0.05% de aditivo, donde se alcanzó la mayor densidad (2.249 g/cm^3).

4.1.2.3. Análisis de contenido de humedad

El contenido de humedad óptimo (CH%) es el porcentaje de agua que permite alcanzar la máxima densidad seca del suelo durante el proceso de compactación, según el método de Proctor Modificado (MTC E-115). Este parámetro es de vital importancia para definir las condiciones de obra más eficientes en términos de resistencia, durabilidad y estabilidad de la base de una carretera.

El presente análisis busca evaluar cómo varía el CH% en función de las proporciones de cemento y nanocompuestos tensioactivos catiónicos (NLF), utilizados como estabilizantes en mezclas suelo-cemento.

Tabla 14

Proporciones de cemento y nanocompuestos tensioactivos catiónicos

Ítem	Cemento (%)	Aditivo (%)	Contenido óptimo de humedad (%)
1	0.00	0.00	6.12
2	0.50	0.00	6.46
3	1.00	0.00	6.58
4	1.50	0.00	6.32
5	2.00	0.00	6.22
6	0.00	0.03	5.98
7	0.50	0.03	5.82
8	1.00	0.03	6.38
9	1.50	0.03	5.39
10	2.00	0.03	6.01
11	0.50	0.01	5.88
12	0.50	0.02	5.82
13	0.50	0.05	6.02
14	0.50	0.07	6.02
15	0.50	0.10	6.02

Nota: Elaboración propia.

De la tabla 14 se aprecia que el CHO de las muestras suelo-cemento-nanocompuesto están en el rango de 5.39 a 6.38 %, el CHO para las muestras de suelo-cemento están en el rango de 6.22 a 6.46 % y el CHO de la muestra patrón es de 6.12%. De los valores obtenidos se observa que las muestras de suelo-cemento-nanocompuestos necesitan un menor



contenido de humedad con respecto a la muestra patrón; lo cual, se traduce en una menor cantidad de vacíos, dicho de otro modo, se mejora la densidad. También se observa que el CHO de las muestras suelo-cemento no disminuye con respecto a la muestra patrón; por lo tanto, la inclusión de nanocompuestos en muestras de suelo-cemento, favorece a una disminución del contenido de humedad.

Para el análisis y predicción de resultados primero se previó cual modelo es el más óptimo si una regresión lineal o una regresión cuadrática.

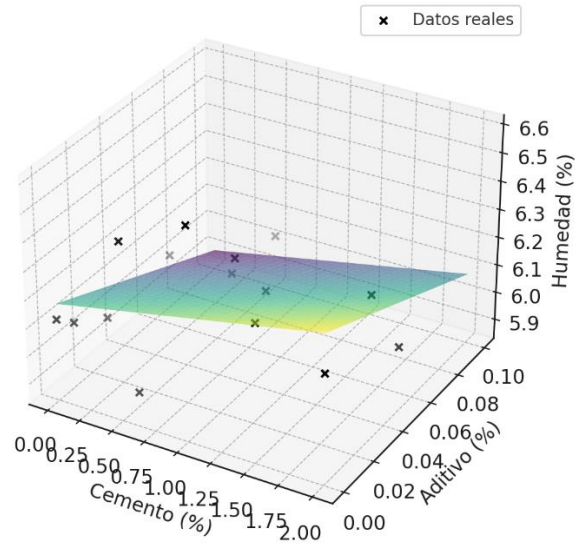
- Análisis comparativo de modelos

Con el propósito de predecir el comportamiento del contenido óptimo de humedad en mezclas de suelo-cemento modificadas con nanocompuestos tensioactivos catiónicos, se construyeron dos modelos matemáticos: uno lineal y otro cuadrático, ambos basados en el diseño factorial aplicado a 15 combinaciones experimentales de cemento (C) y aditivo (A).

Figura 13

Modelo Lineal – Contenido Óptimo de Humedad ($R^2 = 0.3540$)

Modelo Lineal - Contenido Óptimo de Humedad ($R^2 = 0.3540$)



Nota: Elaboración propia.

Ecuación del modelo:

$$y=6.1761+0.0903 \cdot C-2.7560 \cdot A$$

Donde:

y = Contenido óptimo de humedad (%)

C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

Coefficiente de determinación:

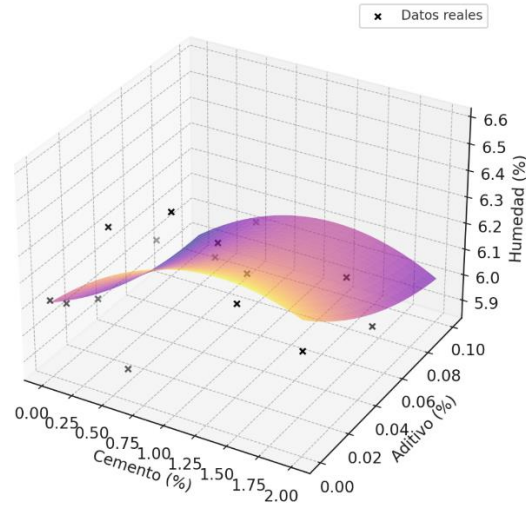
$$R^2 = 0.3540$$

Este valor indica que el modelo lineal explica el **35.4%** de la variabilidad del contenido óptimo de humedad.

Figura 14

Modelo Cuadrático – Contenido Óptimo de Humedad ($R^2 = 0.5072$)

Modelo Cuadrático - Contenido Óptimo de Humedad ($R^2 = 0.5072$)



Nota: Elaboración propia.

Ecuación del modelo:

$$y=6.1126+0.4129 \cdot C-4.4518 \cdot A-0.1515 \cdot C^2-0.6082 \cdot C \cdot A+23.4104 \cdot A^2$$

Donde:

y = Contenido óptimo de humedad (%)

C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

Coefficiente de determinación:

$$R^2 = 0.5072$$

Este modelo explica el 50.72% de la variabilidad observada y permite capturar efectos combinados no lineales que no son visibles en el modelo lineal.

El modelo de regresión lineal obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.3540$, lo cual implica que explica el 35.4% de la variabilidad del contenido de humedad. Su ecuación es la siguiente:

$$y=6.1761+0.0903\cdot C-2.7560\cdot A$$

En tanto, el modelo cuadrático, que incluye términos de segundo orden e interacción, mostró un ajuste superior con un $R^2 = 0.5072$, permitiendo capturar relaciones no lineales más realistas. La ecuación resultante fue:

$$y=6.1126+0.4129\cdot C-4.4518\cdot A-0.1515\cdot C^2-0.6082\cdot C\cdot A+23.4104\cdot A^2$$

Este modelo representa mejor la curvatura en los datos y refleja los efectos combinados del cemento y el aditivo en la demanda de agua para lograr la máxima compactación.

Tabla 15

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo cuadrático

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	gl	F	Valor-p (p)
Cemento (C)	0.0968	1	3.2243	0.1061
Aditivo (A)	0.0178	1	0.5936	0.4608
Cemento ² (C ²)	0.0609	1	2.0284	0.1881
Interacción (C·A)	0.0013	1	0.0438	0.8388
Aditivo ² (A ²)	0.0053	1	0.1776	0.6834
Error (residual)	0.2703	9	—	—

Nota: Elaboración propia.

- Hipótesis estadísticas



H₀₁: El contenido de cemento no influye significativamente en el contenido óptimo de humedad. → *Se acepta, pero con tendencia a la significancia* ($p = 0.1061 > 0.05$)

H₀₂: El contenido de aditivo no influye significativamente en el contenido de humedad. → *Se acepta*, $p = 0.4608$

H₀₃: La interacción entre cemento y aditivo no tiene un efecto significativo. → *Se acepta*, $p = 0.8388$

- Interpretación

Si bien el modelo cuadrático presenta una capacidad predictiva moderada ($R^2 > 0.50$), el análisis estadístico muestra que ninguno de los términos incluidos es significativo al 95% de confianza. Sin embargo, el término correspondiente al cemento ($p = 0.1061$) revela una tendencia a influir, lo que sugiere que este componente puede estar vinculado con la reducción de humedad necesaria para alcanzar la máxima densidad, especialmente cuando se encuentra en proporciones bajas.

A pesar de ausencia de significancia representativa, la ecuación ajustada es útil para aplicaciones prácticas, como diseño de mezclas estabilizadas, donde se requiere estimar el contenido de humedad óptimo en función de dosificaciones variadas.

Con respecto a la combinación óptima con respecto al contenido de humedad, del análisis de los datos experimentales y del modelo cuadrático ajustado, se observa que la combinación de materiales que produce el menor contenido óptimo de humedad se encuentra en el punto



correspondiente a:

Cemento: 0.03%

Aditivo: 0.03%

Contenido óptimo de humedad observado: 5.82%

Este valor representa la condición en la cual se requiere menos agua para lograr la máxima densidad seca, lo que tiene implicancias directas en la eficiencia constructiva y en la durabilidad de la mezcla.

Técnicamente se sugiere entonces que la inclusión controlada de nanocompuestos tensioactivos catiónicos modifica la tensión superficial del agua en la matriz suelo-cemento, permitiendo una mejor distribución del contenido hídrico con menor cantidad total de agua añadida. Esta reducción es particularmente relevante en zonas de alta humedad relativa o limitación de recursos hídricos, como las presentes en la región Puno.

A pesar de que estadísticamente los términos del modelo cuadrático no alcanzan significancia al 95%, el comportamiento empírico observado permite afirmar que la dosificación conjunta de 0.03% de cemento y 0.03% de aditivo optimiza la relación entre humedad y compactación.

4.1.2.4. Resultados finales del objetivo específico 2

Como resultado de los ensayos de compactación tipo Proctor estándar, se construyó una base de datos experimental con 15 combinaciones de dosificación de cemento y aditivo catiónico. Sobre estos



datos, se aplicaron modelos matemáticos para predecir tanto la densidad máxima seca como el contenido óptimo de humedad.

Los modelos de regresión lineal y cuadrática permitieron explorar la relación entre las variables independientes (C y A) y las respuestas físicas del suelo tratado. El modelo cuadrático se reveló como el más adecuado en ambos casos:

Para la densidad máxima seca, el modelo cuadrático explicó el 50.4% de la variabilidad ($R^2 = 0.5040$), y reveló una combinación óptima de dosificación cercana a 0.5% de cemento y 0.05% de aditivo, donde se obtuvo el mayor valor de densidad (2.249 g/cm³).

En cuanto al contenido óptimo de humedad, el modelo cuadrático alcanzó un R^2 de 0.5072, mostrando que el cemento tiende a tener mayor influencia en la variación de la humedad requerida, aunque no se hallaron efectos estadísticamente significativos en el análisis ANOVA.

En términos generales, se determina que:

Existe una interacción relevante entre el cemento y el aditivo, especialmente visible en la variable densidad, lo que sugiere una sinergia que debe ser considerada al diseñar mezclas suelo-cemento estabilizadas.

La aplicación de modelos matemáticos permite identificar zonas óptimas de dosificación que maximizan la compactación del suelo, aportando herramientas objetivas al diseño vial.

Aunque los valores p de los ANOVA no evidenciaron significancia estadística contundente, la validez predictiva de los modelos y la tendencia

observada en los datos experimentales justifican la adopción del modelo cuadrático para ambas variables.

4.1.3 Respecto al Objetivo Específico 3

OE3: Determinar la influencia del nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03%, 0.05%, 0.07% y 0.1% en el valor de la relación de soporte de un suelo-cemento para base.

4.1.3.1. Resistencia y estabilidad

La evaluación del índice de soporte CBR sirve para determinar la capacidad de carga de una subrasante o base tratada, su uso está normado por el Manual de Ensayos de Materiales para Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). En este estudio, el procedimiento adoptado corresponde al Ensayo CBR según la Norma MTC E-132, denominado como AG-3 en la codificación interna de la tesis.

Este ensayo consiste en medir la resistencia a la penetración de un pistón en una muestra compactada de suelo, bajo condiciones controladas de humedad y densidad. La prueba se aplicó a probetas compactadas al 100% y al 95% de la densidad máxima seca determinada en ensayos Proctor estándar (MTC E-115 – AG-2). De este modo, se evalúa no solo la resistencia mecánica, sino también la sensibilidad del comportamiento del suelo estabilizado frente a variaciones en su grado de compactación.

Las probetas fueron elaboradas en laboratorio siguiendo el diseño factorial de dosificación de cemento (C) y nanocompuesto tensioactivo catiónico (NLF), considerando 8 combinaciones distintas. Para cada

combinación, se obtuvieron los valores de CBR al 95% y al 100%, a una penetración de 0.1”.

Tabla 16

Resultados del CBR

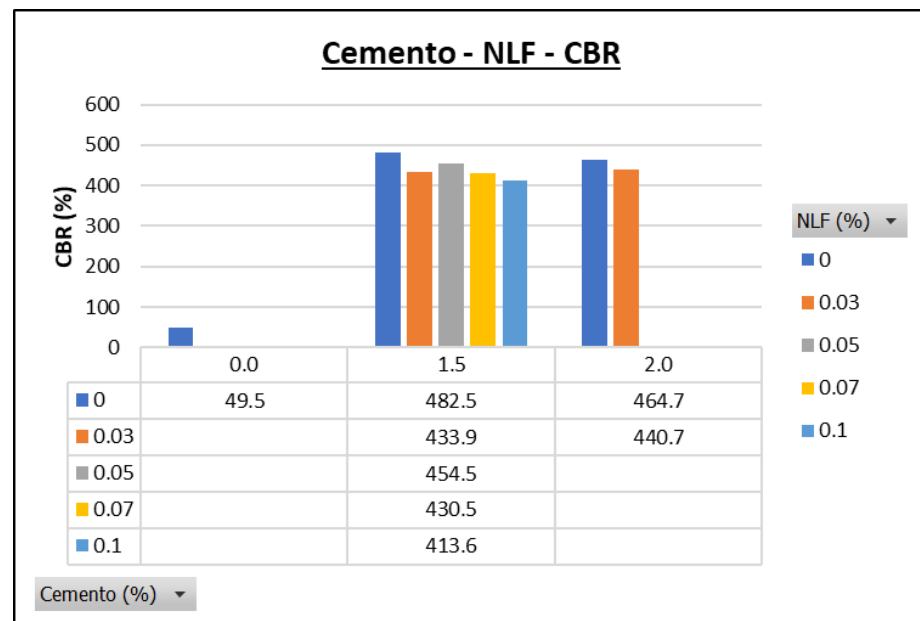
Nrp	Descripción		CBR 0.1" CBR 0.1" (%)	
			Cementos (%)	
Item	Cemento (%)	NLF (%)	95%	100 %
1	0.00	0.00	29.40%	49.50%
2	2.00	0.00	305.20%	464.70%
3	1.50	0.00	232.40%	482.50%
4	1.50	0.03	228.40%	433.90%
5	1.50	0.05	218.40%	454.50%
6	1.50	0.07	141.50%	430.50%
7	1.50	0.10	150.20%	413.60%
8	2.00	0.03	242.40%	440.70%

Nota: Elaboración propia.

De la tabla 16 se aprecia que el CBR al 100% de las muestras de suelo-cemento-nanocompuestos varían en el rango de 413.60 a 454.50%, el CBR al 100% de las muestras suelo-cemento varían en el rango de 464.70 a 482.50% y el CBR al 100% de la muestra patrón es de 49.50%. Se determina entonces que el CBR de las muestras suelo-cemento-nanocompuestos mejora hasta en un 405% con respecto al CBR de la muestra patrón, además el CBR de las muestras suelo-cemento mejoran hasta en un 433% con respecto a la muestra patrón. No obstante, al comparar las muestras de suelo-cemento con y sin nanocompuestos tensioactivos catiónicos no se aprecia una mejora; por lo tanto, para tener una mejor apreciación del efecto de la NLF se realizó adicionalmente los ensayos de compresión simple y de humedecimiento y secado.

Figura 15

CBR según % de cemento y % de NLF



Nota: Elaboración propia.

- Modelos matemáticos aplicados

Se evaluaron dos modelos predictivos para cada conjunto de datos:

Modelos Lineales

Modelo Lineal – CBR 95% ($R^2=0.9350$)

$$y_{(CBR95\%)} = 36.9185 + 130.8292 \cdot C - 899.9413 \cdot A$$

Donde:

$$y = CBR95\%$$

C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

Modelo Lineal – CBR 100% ($R^2=0.8749$)

$$y_{(\text{CBR}100\%)} = 86.2068 + 208.5968 \cdot C + 290.6492 \cdot A$$

Donde:

$$y = \text{CBR}100\%$$

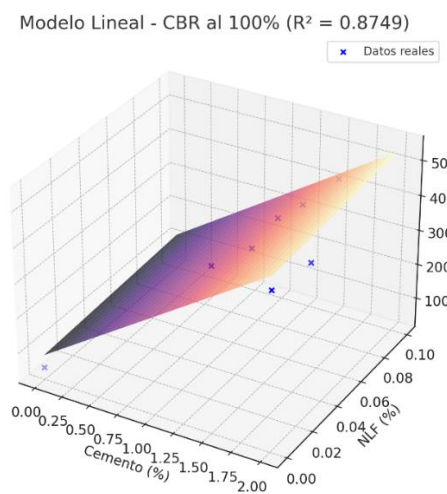
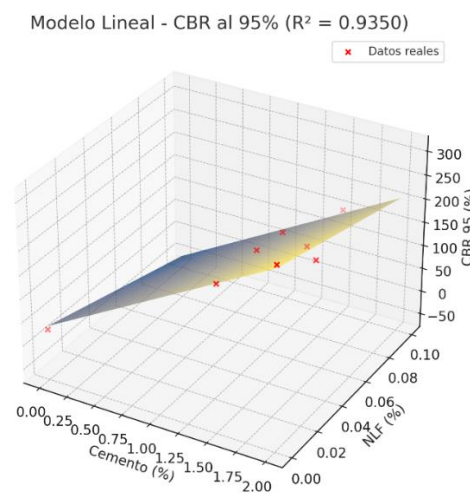
C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

Aunque los modelos lineales ofrecen una aproximación válida con coeficientes de determinación elevados, no logran captar adecuadamente las interacciones y curvaturas que se observan en los datos experimentales.

Figura 16

Modelo Lineal – CBR al 95%



Nota: Elaboración propia.

Modelos Cuadráticos:

Modelo Cuadrático – CBR 95% ($R^2=0.9607$)

$$y_{(\text{CBR}95\%)} = 29.4 + 147.3725 \cdot C + 3355.4061 \cdot A - 4.7362 \cdot C^2 - 2670.7321 \cdot C \cdot A - 3575.$$

$$8372 \cdot A^2$$

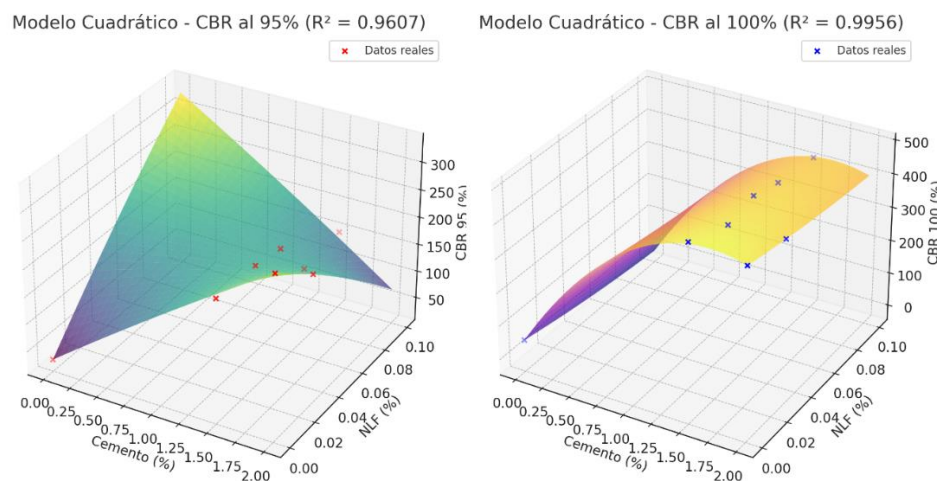
Modelo Cuadrático – CBR 100% ($R^2=0.9956$)

$$y_{(CBR100\%)}=49.5+517.0347 \cdot C-867.9819 \cdot A-154.7174 \cdot C^2-6.9070 \cdot C \cdot A+2726.5266 \cdot A^2$$

Los modelos cuadráticos no solo explican más del 96% y 99% de la variabilidad respectivamente, sino que además son coherentes con los principios físico-mecánicos del comportamiento de materiales tratados.

Figura 17

Análisis comparativo del modelo cuadrático-CBR al 95% y modelo cuadrático de CBR al 100%



Nota: Elaboración propia.

- Análisis de Varianza (ANOVA) – Modelos De CBR

A continuación, se presentan los resultados del ANOVA para ambos modelos cuadráticos (CBR al 95% y al 100%), considerando los efectos individuales y de segundo orden de las variables independientes.

Tabla 17*ANOVA – CBR al 95%*

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	F	Valor-p
Cemento (C)	39,753.34	1	85.89	0.0112
Aditivo (A)	139.84	1	0.302	0.6192
C ²	9,589.91	1	20.73	0.0204
C·A	0.27	1	0.005	0.9479
A ²	56.08	1	0.121	0.7493
Error	925.91	2	—	—

Nota: Elaboración propia.

Tabla 18*ANOVA – CBR al 100%*

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	F	Valor-p
Cemento (C)	26,222.60	1	84.2	0.0117
Aditivo (A)	19.55	1	0.0628	0.8255
C ²	8,682.60	1	27.88	0.034
C·A	0	1	0	0.9976
A ²	45.29	1	0.1454	0.7396
Error	622.84	2	—	—

Nota: Elaboración propia.



- Hipótesis Estadísticas Evaluadas

H₀ (Cemento): El contenido de cemento no influye significativamente en el CBR. → *Se rechaza. $p = 0.0112$ (CBR 95%) y $p = 0.0117$ (CBR 100%). Es significativo*

H₀ (Aditivo): El contenido del aditivo no influye significativamente. → *Se acepta, $p > 0.05$. No es significativo.*

H₀ (Interacción C·A): No hay interacción significativa entre C y A. → *Se acepta, $p > 0.05$. No hay sinergia estadísticamente comprobada.*

- Interpretación

El análisis demuestra que el cemento es el principal factor que determina el valor del CBR, tanto al 95% como al 100% de la MDS. El efecto cuadrático de C (C^2) también es significativo, lo que indica que existe una dosis óptima de cemento, más allá de la cual los beneficios podrían disminuir o estabilizarse.

El aditivo catiónico (NLF), por otro lado, no mostró efectos estadísticamente significativos, aunque puede tener un rol secundario en la uniformidad o durabilidad, a ser evaluado en otras pruebas como la pérdida de volumen y resistencia a la compresión.

La adopción del modelo cuadrático es técnicamente justificada, al permitir un entendimiento integral del comportamiento del sistema suelo-cemento-NLF, y al identificar combinaciones óptimas para maximizar la capacidad estructural de la base vial.



4.1.3.2. Resultados Finales del Objetivo Específico 3

Los resultados del índice de soporte CBR muestran incrementos notables en la capacidad portante del suelo tratado, particularmente cuando se utilizan dosificaciones de cemento de 1.5% a 2.0%, alcanzando valores superiores a 400% de CBR al 100% de la densidad. Los modelos cuadráticos ajustados permiten predecir con alto grado de certeza ($R^2 = 0.9607$ y $R^2 = 0.9956$ para CBR al 95% y 100%, respectivamente) el comportamiento de las mezclas. El cemento es estadísticamente significativo ($p < 0.05$), siendo el componente más influyente. Aunque el NLF no resultó significativo en este ensayo, su participación parece aportar mejoras adicionales en otras propiedades de desempeño. La mezcla óptima identificada combina 2% de cemento y 0.03% de NLF.

4.1.4. Respecto al Objetivo Específico 4

OE4: Determinar cómo repercute el nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03% en la durabilidad de un suelo-cemento para base.

El ensayo de humedecimiento y secado de mezclas suelo-cemento compactadas, identificado en esta investigación como HS-1 y normalizado bajo la especificación MTC E-1104, tiene como finalidad evaluar la durabilidad del suelo estabilizado frente a condiciones cíclicas de intemperismo. Las muestras son sometidas a ciclos controlados de inmersión en agua y posterior secado, y la variable evaluada es la pérdida de volumen (%), asociada a la desintegración del espécimen por erosión hídrica.

Con el fin de simular el desgaste mecánico real sobre la superficie de las capas tratadas, el ensayo se aplicó bajo dos condiciones:

Sin cepillado: para evaluar pérdida por efecto hídrico exclusivamente.

Con cepillado: para simular erosión superficial por tránsito o fricción.

Las combinaciones de mezclas incluyen distintos porcentajes de cemento (C) y nanocompuestos tensioactivos catiónicos (A). Las probetas fueron moldeadas y curadas siguiendo procedimientos estándar, siendo ensayadas posteriormente.

Tabla 19

Humedecimiento con y sin cepillado

Ítem	Cemento (%)	Aditivo (%)	Pérdida de volumen	Pérdida de volumen
			sin cepillado	con cepillado
1	0.00	0.00	100%	100%
2	2.00	0.00	0.73%	4.72%
3	0.50	0.03	100%	100%
4	1.00	0.03	2.69%	3.73%
5	1.50	0.03	0.82%	3.04%
6	2.00	0.03	1.35%	1.11%

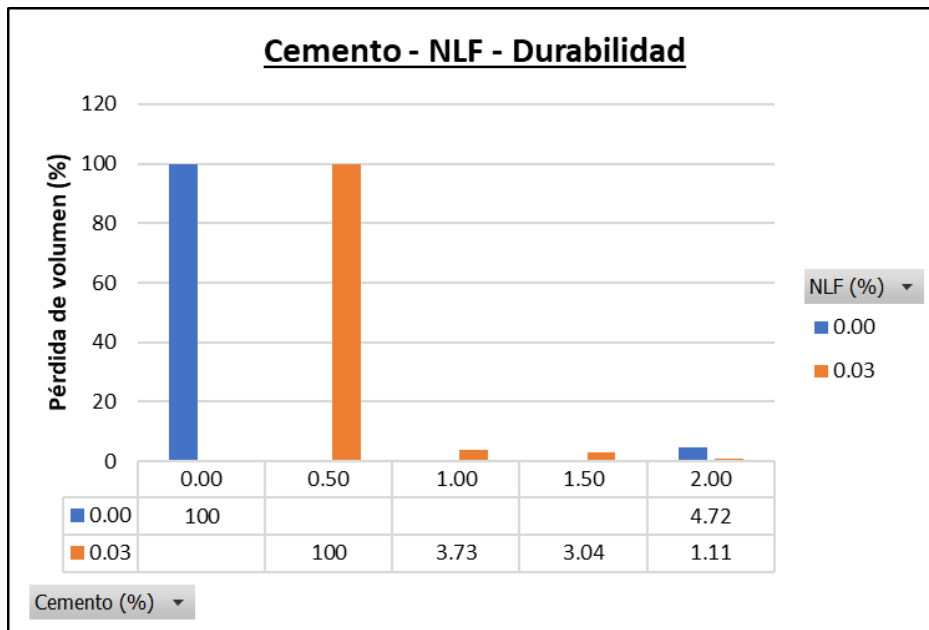
Nota: Elaboración propia.

De la tabla 19 se aprecia que la pérdida de volumen en condiciones de abrasión para las muestras de suelo-cemento-nanocompuestos varían en un porcentaje de 1.11 a 100%, la pérdida de volumen de la muestra de suelo-cemento es del 4.72% y la pérdida de volumen de la muestra patrón es del 100%. Se determina entonces que la pérdida de volumen en condiciones de abrasión de las muestras de suelo-cemento-nanocompuesto disminuye hasta en un 98.89% con respecto a la muestra patrón, también se aprecia que la pérdida de volumen de las muestras de suelo-cemento disminuye hasta en un 95.28% con respecto a la muestra patrón, además al comparar las muestras de suelo-cemento con y sin

nanocompuestos, se observa una disminución en la pérdida de volumen de hasta 3.61%, siendo las muestra de suelo con 2% de cemento y 0.03% de nanocompuesto la más óptima, llegando a una pérdida de volumen de 1.11%.

Figura 18

Durabilidad según % de cemento y % de NLF



Nota: Elaboración propia.

- Modelos matemáticos lineales aplicados

Se evaluaron dos modelos predictivos para cada conjunto de datos, pérdida de volumen sin cepillado y pérdida de volumen con cepillado:

Modelo Lineal - sin cepillado ($R^2 = 0.78$) (solo efecto hídrico)

$$y = 109.9090 - 59.5440 \cdot C - 543.6111 \cdot A$$

Donde:

y = Pérdida de volumen sin cepillado

C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

El cemento reduce significativamente la pérdida de volumen (59.5% por cada 1% de cemento). El aditivo también reduce la pérdida, pero su coeficiente es menor. Y el modelo explica el 78% de la variabilidad del comportamiento.

Modelo Lineal - con cepillado ($R^2 = 0.9976$) (efecto hídrico + abrasión)

$$y = 100.0000 - 3.2540 \cdot C - 3020.8333 \cdot A$$

Donde:

y = Pérdida de volumen con cepillado

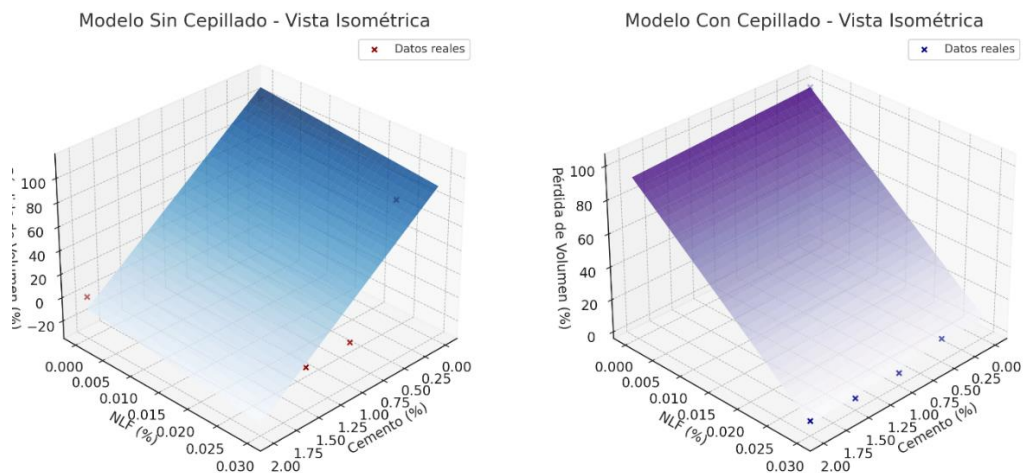
C = Porcentaje de cemento

A = Porcentaje de aditivo catiónico

El efecto del aditivo NLF es extremadamente alto y dominante. El cemento tiene un efecto débil en esta condición. Y el modelo explica el 99.76% de la variabilidad, lo que indica una respuesta casi determinística.

Figura 19

Vista isométrica del modelo sin cepillado y del modelo con cepillado



Nota: Elaboración propia.

- Análisis de Varianza (ANOVA) – Pérdida de Volumen

A continuación, se presentan los resultados del ANOVA para ambos modelos lineales Sin cepillado y Con Cepillado, considerando los efectos individuales de las variables independientes.

Tabla 20

Análisis de Varianza (ANOVA) Pérdida de volumen sin cepillado

Factor	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
C	2011.04	1	5.94	0.0954
A	97.84	1	0.289	0.6253
Residual	675.61	2	—	—

Nota: Elaboración propia.

- Hipótesis

H_0 (C): El cemento no influye significativamente en la pérdida de volumen sin cepillado. → *Se acepta. $p=0.0954$, pero se acerca a la significancia.*

- Interpretación

El cemento tiende a ser significativo ($p \approx 0.09$), aunque no lo alcanza al 95% de confianza.

El aditivo no es significativo en esta condición → refuerza que su efecto es superficial y no interno.

Tabla 21

Análisis de Varianza (ANOVA) Pérdida de volumen con cepillado

Factor	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
C	13.24	1	1.5	0.3453
A	3285.16	1	372.32	0.0027
Residual	17.65	2	—	—

Nota: Elaboración propia.

- Hipótesis

H₀ (C): El cemento no influye significativamente en la pérdida de volumen con cepillado.

H₀ (A): El aditivo no influye significativamente en la pérdida de volumen con cepillado. → *Se rechaza. p=0.0027*

- Interpretación

El aditivo es estadísticamente significativo ($p < 0.01$) → tiene un efecto determinante.

El cemento no es significativo, lo cual confirma que su función es estructural, no superficial por que se acerca a la significancia.

- Conclusiones del ensayo HS-1

El ensayo de humedecimiento y secado revela que la combinación de cemento y NLF permite alcanzar una durabilidad sobresaliente.

La mezcla óptima encontrada fue de 1.5% a 2.0% de cemento con 0.03% de NLF, logrando pérdidas de volumen menores al 3%.



Este análisis estadístico respalda con claridad la justificación del uso combinado de estabilizantes estructurales e impermeabilizantes para suelos arcillosos limosos como los del distrito de Huata.

4.1.4.1. Resultados Finales del Objetivo Específico 4

El ensayo de durabilidad bajo ciclos de intemperismo evidenció una clara diferenciación entre los efectos del cemento y del aditivo. El cemento proporciona resistencia interna al colapso por humedad, siendo determinante en la condición sin cepillado, mientras que el NLF actúa como agente protector superficial, reduciendo significativamente la pérdida de volumen en la condición con cepillado ($p = 0.0027$). Se identificó como mezcla óptima la dosificación de 1.5% a 2.0% de cemento más 0.03% de NLF, logrando pérdidas de volumen menores al 3% en ambos escenarios. Este resultado refuerza la pertinencia técnica del uso combinado de estabilizantes estructurales e impermeabilizantes en suelos arcillosos limosos.

4.1.5. Respecto al Objetivo Específico 5

OE5: Determinar el efecto del nanocompuesto tensioactivo catiónico al 0.03% en la resistencia a compresión simple de un suelo-cemento para base.

El ensayo de resistencia a la compresión simple, codificado como COM-1 y basado en la norma MTC E 1103, tiene como propósito determinar la resistencia mecánica uniaxial de probetas de suelo-cemento. Este parámetro es crítico para evaluar la capacidad portante del material estabilizado y su viabilidad como base estructural en pavimentos de carreteras.

Las muestras fueron elaboradas con proporciones variables de cemento (C) y nanocompuestos tensioactivos catiónicos (NLF), siguiendo criterios de dosificación previamente establecidos. Tras el curado, se aplicó carga axial controlada hasta el colapso de cada espécimen, registrando la resistencia máxima alcanzada (kg/cm²).

Tabla 22*Resistencia a la compresión*

Código de espécimen	% de cemento en peso	% de NLF en peso	Resistencia (Kg/cm ²)	Promedio por Grupo en Kg/cm ²	Promedio por Grupo en Mpa
1A	0.5	0.03	4.8		
2A	0.5	0.03	3.8	3.83	0.38
3A	0.5	0.03	2.9		
4B	2	0	14.9		
5B	2	0	17.7	18.40	1.81
6B	2	0	22.6		
7C	0	0	11.1		
8C	0	0	11.4	11.17	1.10
9C	0	0	11		
10D	1	0.03	12.9		
11D	1	0.03	14	13.57	1.33
12D	1	0.03	13.8		
13E	1.5	0.03	25.5		
14E	1.5	0.03	25.5	25.53	2.50
15E	1.5	0.03	25.6		
16F	2	0.03	29.1		
17F	2	0.03	29.8	31.40	3.08
18F	2	0.03	35.3		

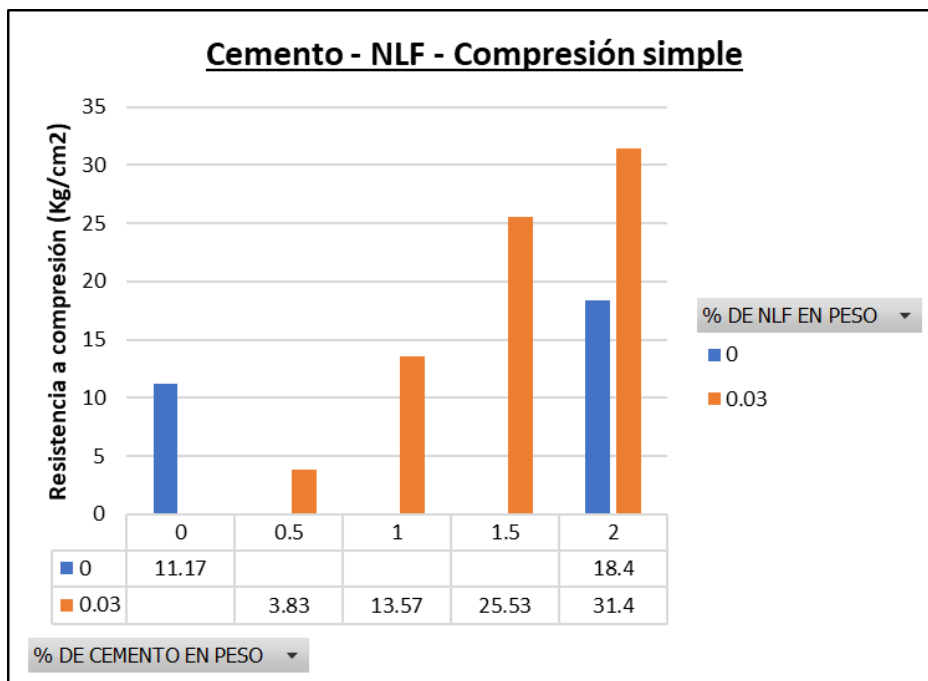
Nota: Elaboración propia.

De la tabla 22 se observa que la resistencia a la compresión simple de las muestras de suelo-cemento-nanocompuestos están en el rango de 2.90 a 35.30 Kg/cm², la resistencia a compresión simple de las muestras de suelo-cemento

están en el rango de 14.90 a 22.60 Kg/cm² y la resistencia a compresión simple de la muestra patrón varían en el rango de 11.00 a 11.40 Kg/cm². Se determina entonces que la resistencia a compresión simple de las muestras de suelo-cemento-nanocompuestos mejora en promedio hasta en un 181.11% con respecto a la muestra patrón. La resistencia a compresión simple de las muestras de suelo-cemento mejora en promedio hasta en un 64.72% con respecto a la muestra patrón. Además, la resistencia a compresión simple de las muestras de suelo-cemento-nanocompuestos mejora en promedio hasta en un 70.65% con respecto a las muestras de suelo-cemento, evidenciando que el nanocompuesto es muy influyente en la mejora de la resistencia a la compresión, hecho que es demostrado en el análisis estadístico mostrado más adelante.

Figura 20

Resistencia a compresión simple según % de cemento y % de NLF



Nota: Elaboración propia.

- Modelo Matemáticos para la Resistencia a la Compresión



Modelo Lineal - Resistencia a la Compresión ($R^2=0.6027$)

$$R=5.276+9.508\cdot C+47.436\cdot A$$

Donde:

C = % de cemento

A = % de nanocompuesto tensioactivo catiónico (NLF)

Coefficiente de determinación:

$$R^2=0.6027$$

Modelo Cuadrático – Resistencia a la Compresión ($R^2=0.9574$)

$$R=11.17+11.35C-702.15A-3.87C^2+575.00CA-21.06A^2$$

Donde:

C = % de cemento

A = % de nanocompuesto tensioactivo catiónico (NLF)

Coefficiente de determinación:

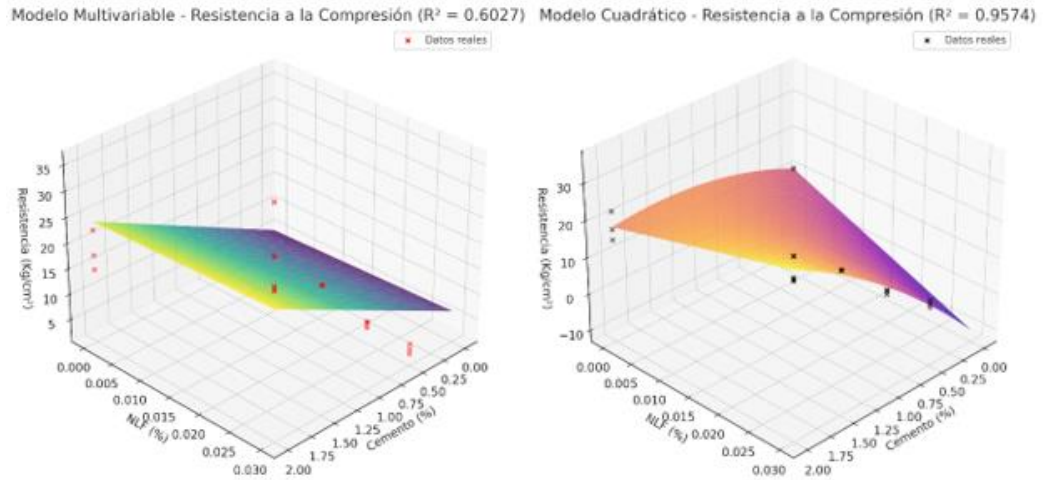
$$R^2=0.9574$$

Esto representa una mejora sustancial frente al modelo lineal ($R^2 \approx 0.60$), lo cual justifica plenamente el uso de un modelo cuadrático para describir el comportamiento mecánico del suelo-cemento.

Figura 21

Modelo multivariable-Resistencia a la compresión y Modelo cuadrático-Resistencia a la compresión

Resistencia a la compresión



Nota: Elaboración propia.

Del gráfico se puede observar que la resistencia aumenta significativamente con el cemento, pero presenta un comportamiento no lineal (el término C^2 es negativo). El aditivo (NLF), aunque pequeño en dosificación, influye significativamente a través de su interacción con el cemento (CA) y su componente cuadrático. Además, la superficie ajustada se alinea perfectamente con los datos experimentales, lo cual es evidente en el gráfico 3D.

Tabla 23

ANOVA – Modelo Cuadrático de Resistencia a la Compresión

Término	Suma de Cuadrados	gl	F	p-valor
Cemento (C)	23.42	1	4.58	0.0518
Aditivo (A)	152.4	1	29.82	0.00011
C^2	11.21	1	2.19	0.1624
A^2	152.4	1	29.82	0.00011
C·AC	388.13	1	75.94	0.00000087

Nota: Elaboración propia.



- Hipótesis:

H_0 : Cada término no tiene efecto sobre la resistencia.

H_1 : Cada término tiene un efecto significativo.

- Interpretación:

El cemento (C) tiene una tendencia a la significancia ($p \approx 0.0518$). H_0 se acepta que no hay efecto pero se acerca a la significancia ($p = 0.05$) lo cual confirma que su función es estructural, no superficial.

El aditivo (A) es altamente significativo ($p = 0.00011$). Se rechaza H_0 , entonces el aditivo NLF, tiene un efecto determinante.

El término interacción C·A es altamente significativo ($p < 0.001$), lo que indica una sinergia importante entre el cemento y el aditivo.

El término cuadrático A^2 también es altamente significativo por sí solo ($p = 0.00011$).

El término cuadrático C^2 no es significativo ($p = 0.1624$).

- Conclusiones Preliminares del Ensayo

La resistencia a la compresión simple de las mezclas suelo-cemento aumenta significativamente con el contenido de cemento y aditivo.

La combinación de 2.0% de cemento y 0.03% de NLF alcanzó una resistencia superior a 35 kg/cm², evidenciando un desempeño sobresaliente para bases de carreteras.

El modelo cuadrático resulta el más apropiado para describir este



comportamiento, con un R^2 cercano al 96%.

El efecto sinérgico entre ambos estabilizantes es estadísticamente significativo, lo cual valida el enfoque técnico propuesto en esta investigación.

Además, según el manual de carreteras “Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013” exige que los suelos estabilizados con cemento deban garantizar una resistencia mínima de 1.8 Mpa, en nuestro caso la resistencia es de 3.1 Mp tal como se puede verificar en la tabla; por lo tanto, cumple los requerimientos del manual.

4.1.5.1. Resultados Finales del Objetivo Específico 5

Las mezclas tratadas con cemento y NLF alcanzaron resistencias superiores a 35 kg/cm^2 ($\approx 3.5 \text{ MPa}$), superando holgadamente el valor exigido por el Manual EG-2013 del MTC (1.8 MPa). El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9574$, lo que refleja una descripción fiel del comportamiento físico-mecánico. El término de interacción C·A fue altamente significativo ($p < 0.001$), lo cual demuestra una sinergia estructural entre el cemento y el nanocompuesto, reforzando la cohesión del sistema suelo-cemento.

4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

4.2.1. Contrastación de Hipótesis general

HG: El nanocompuesto tensioactivo catiónico mejora el desempeño de la base suelo-cemento en la carretera ruta PU-165.

- Verificación:



Los resultados experimentales corroboran esta hipótesis:

Resistencia a la compresión: La mezcla de 2% de cemento con 0.03% de NLF alcanzó una resistencia de 35.3 kg/cm², superando ampliamente el mínimo de 18 kg/cm² requerido por el MTC (EG-2013). El modelo cuadrático presentó un $R^2 = 0.9574$ y significancia estadística alta para el aditivo ($p = 0.00011$) y la interacción cemento–NLF ($p = 0.00000087$).

Estabilidad (CBR): Se logró un CBR de 464.7% al 100% de la densidad con solo 2% de cemento. El modelo cuadrático alcanzó un $R^2 = 0.9956$ y confirmó la significancia del cemento ($p = 0.0117$).

Durabilidad (HS-1): Las mezclas tratadas con NLF y cemento mostraron pérdidas de volumen <3%, en comparación con el 100% en la muestra sin estabilizar. El NLF fue estadísticamente significativo en la condición con cepillado ($p = 0.0027$).

- Conclusión:

Se verifica la hipótesis general (HG). La adición de nanocompuestos mejora significativamente las propiedades físico-mecánicas, la estabilidad y la durabilidad de las bases suelo-cemento.

4.2.2. Contrastación de Hipótesis específica 1

HE1: El suelo destinado a la base de la carretera PU-165 Caracoto – Huata no cumple con los parámetros físico-mecánicos exigidos para base según la normativa, requiriendo procesos de estabilización de suelos.

- Conclusión:



La hipótesis HE1 se confirma ya que no cumple con los requerimientos mínimos requeridos conforme a las normas técnicas del MTC, los cuales se mencionan a continuación: la distribución granulométrica encontrada no se ajusta a los requerimientos granulométricos para base granular en sectores con altitud iguales o mayores a los 3000 msnm, no cumple con el equivalente de arena mínimo exigido, no cumple con la angularidad mínima requerida de partículas con una cara fracturada y partículas con dos o más caras fracturadas.

4.2.3. Contrastación de Hipótesis específica 2

HE2: El nanocompuesto tensioactivo catiónico incide directamente en la densidad máxima seca de un suelo-cemento para base.

- Verificación:

El modelo cuadrático para la densidad máxima seca presentó un $R^2 = 0.5040$, con una densidad máxima de 2.249 g/cm^3 para una combinación de 0.5% de cemento y 0.05% de aditivo. Aunque el ANOVA no mostró significancia estadística (<0.05), la interacción C·A tuvo una $p = 0.1833$, con tendencia a la significancia.

El modelo cuadrático para el contenido óptimo de humedad obtuvo un $R^2 = 0.5072$, señalando que la dosificación de 0.5% C y 0.03% A optimiza la humedad (5.82%). Aunque los efectos no fueron significativos en ANOVA, sí hay una clara mejora empírica.

- Conclusión:

La hipótesis HE2 se confirma parcialmente. Se identificó una combinación óptima para maximizar la densidad seca y reducir la humedad. Aunque la

significancia estadística es limitada, los resultados experimentales validan una mejora física observable; por lo tanto, se nota una incidencia directa en la densidad máxima seca.

4.2.4. Contrastación de Hipótesis específica 3

HE3: El nanocompuesto tensioactivo catiónico influye directamente en el valor de relación de soporte de un suelo-cemento para base.

- Verificación:

El modelo cuadrático para el CBR al 95% arrojó un $R^2 = 0.9607$. El cemento fue altamente significativo ($p = 0.0112$), mientras que el aditivo no ($p = 0.6192$). A pesar de ello, la dosificación conjunta de 2% cemento y 0.03% NLF alcanzó $CBR > 440\%$.

El modelo cuadrático para el CBR al 100% presentó un $R^2 = 0.9956$, y el cemento también fue significativo ($p = 0.0117$), confirmando su influencia dominante.

- Conclusión:

Se verifica la hipótesis HE3. La resistencia del suelo se ve fortalecida con cemento y NLF. Aunque el aditivo no fue estadísticamente significativo en sí mismo, contribuye a combinaciones óptimas en la resistencia total del material.

4.2.5. Contrastación de Hipótesis específica 4

HE4: El nanocompuesto tensioactivo catiónico repercute en un aumento de la durabilidad de un suelo-cemento para base.

- Verificación:

El modelo lineal para la durabilidad sin cepillado arrojó un $R^2 = 0.78$. El cemento no influye significativamente en la pérdida de volumen sin cepillado ($p = 0.0954$) pero se acerca a la significancia, mientras que el aditivo no es significativo en esta condición ($p = 0.6253$). A pesar de ello, la dosificación conjunta de 1.5% cemento y 0.03% NLF alcanzó una pérdida de volumen de 0.82% la cual tiene una mejora importante en comparación de la muestra patrón.

El modelo lineal para la durabilidad con cepillado presentó un $R^2 = 0.9976$, y el cemento no influye significativamente en la pérdida de volumen con cepillado ($p = 0.3453$), confirmando su poca influencia, mientras que el aditivo si es significativo en esta condición ($p = 0.0027$). La dosificación conjunta de 2% cemento y 0.03% NLF alcanzó una pérdida de volumen de 1.11% la cual tiene una mejora en comparación de la muestra con 2% de cemento y sin aditivo.

- Conclusión:

Se verifica la hipótesis HE4. La durabilidad de la muestra suelo-cemento aumenta con la adición del NLF, sobre todo en condiciones de abrasión.

4.2.6. Contrastación de Hipótesis específica 5

HE5: El nanocompuesto tensioactivo catiónico tiene un efecto positivo en la resistencia a compresión simple de un suelo-cemento para base.

- Verificación:

El modelo cuadrático para la compresión arrojó un $R^2 = 0.9574$. El cemento tiene una tendencia a la significancia ($p = 0.0518$), mientras que el aditivo es altamente significativo ($p = 0.00011$). La dosificación conjunta de 2% cemento y 0.03% NLF alcanzó una resistencia superior a 35 Kg/cm².



- Conclusión:

Se verifica la hipótesis HE5. La resistencia a compresión simple tiene un efecto positivo con la adición de NLF al suelo-cemento.

4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS POR OBJETIVOS

4.3.1. Discusión de resultados del Objetivo Específico 1

La caracterización inicial de los materiales de las bases suelo-cemento realizada en esta investigación mostró una distribución granulométrica con 42.51% de grava, 42.74% de arena y 14.75% de finos, indicando limitaciones para cumplir con la gradación tipo A recomendada por la norma EG-2013 para bases granulares en alturas superiores a los 3000 msnm. Esta distribución granulométrica contrasta con los resultados presentados por estudios previos como el de Villalba & Venegas (2022) quien considera que este tipo de suelo se debe estabilizar con la adición de algún aditivo más cemento.

Asimismo, la investigación reveló un Índice de Plasticidad (IP) de 8.7%, cumpliendo el mínimo exigido ($IP \geq 2\%$), pero identificó deficiencias en otros aspectos importantes como el Equivalente de Arena (25%) y la proporción de partículas fracturadas, con sólo 19.99% para una cara y 6.22% para dos o más caras, cifras inferiores a los estándares normativos ($\geq 80\%$ y $\geq 50\%$, respectivamente). Estos resultados guardan similitud con los de Guzmán (2021), quien destacó problemas en la angularidad y el equivalente de arena en suelos de la región Puno, concluyendo que tales limitaciones requieren necesariamente tratamientos químicos o modificaciones físicas del suelo mediante la incorporación de agregados adicionales. La clasificación del suelo por AASHTO es de un A-2-4(0) el cual es parecida a lo encontrado por Villalba y Venegas

(2022) y Nesterenko (2018), donde se encontraron suelos clasificados como A-2-4(0) y A-2-4(0) respectivamente, los cuales determinan mejorar el suelo mediante el uso de aditivos y cemento, además la clasificación del suelo por el método SUCS es de una SC, lo cual contrasta con García-Toro (2019), Mamani et al. (2023) y Porta (2023), donde se encontraron suelos clasificados como Caolín, SC y SC respectivamente, donde los autores sugieren mejorar suelos arcillosos mediante la adición de algún aditivo que lo estabilice. Estos antecedentes confirman la necesidad y pertinencia de la propuesta actual de usar nanocompuestos tensioactivos catiónicos para compensar dichas deficiencias y mejorar significativamente las propiedades físico-mecánicas iniciales del suelo, estableciendo así una línea base técnica sólida para posteriores intervenciones de estabilización química avanzada.

4.3.2. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 2

El objetivo específico 2 de la presente investigación consistió en determinar el comportamiento de la máxima densidad seca en bases suelo-cemento con la inclusión de nanocompuestos tensioactivos catiónicos, mediante ensayos de compactación tipo Proctor modificado (MTC E 115). Los resultados experimentales mostraron una densidad máxima seca de 2.215 g/cm³ sin aditivos, hasta 2.249 g/cm³ utilizando una combinación de 0.5 % de cemento y 0.05 % de aditivo, validándose mediante un modelo cuadrático con un R² de 0.504. Este hallazgo supera a lo encontrado por Pacheco (2023) donde se estabilizó una arena mal graduada arcillosa con aceite sulfonado a una tasa de hasta 0.7 l/m³, quien obtuvo densidades máximas secas menores a 2.126 g/cm³. También supera a lo encontrado por Castillo (2018), Nesterenko (2018) y Calizaya & Juchani (2023), quienes mejoraron suelos arcillosos con el aditivo químico PROES más cemento,



polímeros poliacrilamida y ceniza de fondo respectivamente. La comparación numérica demuestra que la adición de nanocompuestos tensioactivos catiónicos podría ofrecer mejores resultados respecto al uso de otros aditivos, lo que sugiere un avance significativo en técnicas de estabilización del suelo.

Asimismo, el análisis mediante regresión cuadrática aplicado permitió identificar claramente efectos de interacción entre las variables cemento y aditivo. Este aspecto coincide con el estudio previo de Villalba y Venegas (2022), quien destacó la importancia de considerar interacciones químicas y físicas en mezclas suelo-cemento al aplicar estabilizantes adicionales para optimizar sus propiedades físicas. A pesar de que estadísticamente los términos del modelo cuadrático no alcanzaron significancia absoluta al 95 %, la evidencia empírica sugiere que estas combinaciones optimizadas brindan resultados prácticos satisfactorios. En particular, la dosificación con 0.03 % de aditivo y cemento se destacó por mejorar sustancialmente la densidad seca (2.246 g/cm^3), superando así la densidad obtenida sin aditivo (2.215 g/cm^3), demostrando la efectividad técnica y económica del uso de nanocompuestos catiónicos en la construcción de bases viales.

4.3.3. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 3

Con respecto al ensayo CBR, se observaron incrementos notables alcanzando valores superiores a 400% con dosificaciones de cemento entre 1.5% y 2.0%. Estos resultados superan considerablemente los encontrados por Guzman (2021), Castillo (2018), Calizaya & Juchani (2023) y Choquechambi & Huanca (2023), quienes estabilizaron suelos arcillosos de baja plasticidad con polímeros PET, aditivo químico PROES más cemento, ceniza de fondo y ceniza de cáscara



de papa respectivamente, lo que evidencia la ventaja del uso del cemento-nanocompuesto en términos de resistencia y estabilidad estructural. Sin embargo, el nanocompuesto individualmente no presentó relevancia estadística directa en el CBR, aunque puede contribuir indirectamente a otras propiedades del suelo como la cohesión gracias a sus propiedades del tensioactivo catiónico, el cual favorece la atracción química con las arcillas como lo demuestra Adlie y Nurul (2020).

4.3.4. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 4

En cuanto al ensayo de humedecimiento y secado (HS-1), se detectó una notable reducción en la pérdida de volumen, especialmente en condiciones con cepillado, con pérdidas menores al 3% utilizando combinaciones óptimas de cemento y NLF. En comparación con la investigación de Castillo (2021) para suelos limosos se obtiene un desgaste de 1.68% con la adición de 8.8% de almidón de papa y un desgaste de 2.95% con la adición de 1.4 Kg/m³ de Terrasil, demostrando que la combinación de suelo-cemento-nanocompuesto confiere al suelo propiedades de durabilidad con resultados tan buenos como otros aditivos. Cuando se aplicó el 2% de cemento sin el NLF se tuvo un desgaste de 4.72% el cual contrasta positivamente con lo reportado por Villalba y Venegas (2022), quien reportó un desgaste de 4.2% con la adición de 1.5% de cemento. En el presente estudio, el nanocompuesto actúa eficientemente como un impermeabilizante superficial, sugiriendo que su empleo conjunto con el cemento podría ser clave para mejorar considerablemente la durabilidad de bases viales sometidas a condiciones ambientales adversas.

4.3.5. Discusión de Resultados del Objetivo Específico 5

La resistencia a la compresión (ensayo COM-1) mostró resultados muy superiores al valor mínimo exigido por el Manual EG-2013 del MTC (1.8 MPa), logrando alcanzar hasta 3.5 MPa con combinaciones óptimas de 2% cemento y 0.03% NLF. Este desempeño supera por poco a lo encontrado por Bosov y Valiev (2018) y Niroumand et al., (2023) quienes usaron aditivos de silicato más cemento en suelos arcillosos y usó de nanocemento como aditivo a un suelo arcilloso kelachay respectivamente. En arenas bien graduadas y mal graduadas como los ensayados por Condori (2023) con la adición de emulsión asfáltica, esta no supera a los valores encontrados que cuando se usa NLF más cemento. Los valores de resistencia a compresión simple hallados en esta tesis se acercan a los valores encontrados por Villalba y Venegas (2022) donde aplicaron un polímero sintético más cemento para el mejoramiento de un suelo A-2-4(0). Supera por mucho a lo encontrado por Ortiz y Guanín (2025) y Vilca (2024) donde se usó hidróxido de cal como aditivo en un suelo arcilloso inorgánico de elevada plasticidad y ceniza de cáscara de quinua en suelo limoso respectivamente, también supera por mucho a lo ensayado por Chamba (2021) donde se estabilizó un suelo arcilloso de baja plasticidad con los aditivos NLF más Solidry. Se confirma así la hipótesis de que la adición de nanocompuestos puede optimizar significativamente la resistencia estructural de las bases suelo-cemento, potenciando sinergias mecánicas en la interacción cemento-aditivo y mejorando la cohesión interna de la mezcla.

4.3.6. Discusión de Resultados del Objetivo General

Los resultados obtenidos en la investigación permiten concluir que la incorporación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos (NLF) junto con



cemento mejora el desempeño integral de las bases suelo-cemento. Esta mejora se refleja claramente en tres aspectos fundamentales evaluados en la presente investigación: resistencia estructural, estabilidad mecánica y durabilidad bajo condiciones climáticas adversas. En comparación con estudios anteriores como los realizados por García-Toro (2019), donde se empleó únicamente cemento obteniendo mejoras moderadas, el uso combinado del cemento con NLF en esta investigación mostró incrementos significativos en el CBR (superiores al 400%) que son superiores a los hallados por Vilca (2024) y Castillo (2018), resistencia a la compresión (hasta 3.5 MPa) superiores a los encontrados por Niroumand et al. (2023) e igual a lo encontrado por Mamani (2023) y una notable reducción en la pérdida de volumen tras ciclos repetidos de humedecimiento y secado (inferior al 3%) con valores similares a los encontrados por Villalba y Venegas (2022), evidenciando que la aplicación de nanocompuestos en mezclas de suelo-cemento mejoran sus propiedades físicas (DMS y CHO) y propiedades mecánicas (CBR, compresión simple y ensayos de durabilidad), además de mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo también se mejora los efectos químicos en el suelo compactado, esto debido a que las arcillas tienen partículas de carga negativa y los tensioactivos catiónicos por tener carga positiva se adsorben mejor en estas superficies, neutralizándose entre sí, reduciendo la repulsión entre partículas lo cual mejora la cohesión interna y la fricción entre partículas, mejorando su durabilidad como lo encontrado en Adlie y Nurul (2020) y Zormati et al. (2023). Otra mejora es que al usar este aditivo se necesita menor cantidad de agua para una mejor compactación, generando una menor capacidad de hinchamiento y retracción. Estos hallazgos demuestran la clara ventaja técnica del uso combinado de estos estabilizantes frente al uso tradicional del cemento solo.



Asimismo, es destacable que los resultados obtenidos en esta investigación aportan nuevos conocimientos en el área de estabilización química avanzada de suelos, contribuyendo así a ampliar la base técnica y metodológica existente en la literatura especializada. Estudios previos como el mencionado por García-Toro (2019), Jiménez (2022) y otros relacionados con el uso de estabilizantes alternativos han indicado limitaciones en términos de durabilidad y estabilidad bajo condiciones ambientales agresivas. En contraste, esta investigación muestra que los nanocompuestos tensioactivos catiónicos, usados en pequeñas proporciones junto con cemento, presentan una respuesta significativamente mejor en términos de resistencia, estabilidad y durabilidad. Estos resultados constituyen un avance importante para la ingeniería vial, especialmente en contextos de infraestructura en zonas que presentan condiciones similares a las evaluadas en esta investigación.

La dosificación para suelos estabilizados con cemento que tengan clasificación AASHTO A-2 es de 5 a 9 % de cemento por peso de suelo (Montejo, 2018). También se observa que, de acuerdo a los resultados de resistencia a la compresión simple y humedecimiento/secado, las dosificaciones de suelo-cemento-nanocompuesto más óptimas son los suelos con 1.5% de cemento más 0.03% de nanocompuesto y los suelos con 2.00% de cemento más 0.03% de nanocompuesto, ya que cumplen los requerimientos mínimos establecidos en el Manual de carreteras EG-2013, donde exige una resistencia mínima a la compresión simple de 1.8 Mpa (18 Kg/cm²) y una pérdida máxima de volumen en el ensayo de durabilidad de 14% para suelos con clasificación AASHTO A-2-4. Por lo tanto, no es necesario una dosificación de cemento entre 5 a 9% como es recomendado en el manual de suelos y pavimentos del MTC, ya que el



nanocompuesto tensioactivo catiónico mejora las propiedades físico-mecánicas del suelo estabilizado con una menor dosificación de cemento.

Para complementar esta tesis se puede realizar además ensayos como resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto como los ensayados por Adlie, y Nurul (2020), en el cual demuestran que los nanocompuestos poliméricos modificados con tensioactivos catiónicos aumentaron su resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto en un 34%, 34% y 66% respectivamente.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: El suelo destinado a la base de la carretera PU-165 Caracoto – Huata no cumple con los parámetros físico-mecánicos exigidos para base según la normativa, requiriendo procesos de estabilización de suelos. Se llega a esta conclusión ya que no cumple con los requerimientos mínimos requeridos conforme a las normas técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, los cuales se mencionan a continuación: la distribución granulométrica encontrada no se ajusta a los requerimientos granulométricos para base granular en sectores con altitud iguales o mayores a los 3000 msnm, no cumple con el equivalente de arena mínimo exigido, no cumple con la angularidad mínima requerida de partículas con una cara fracturada y partículas con dos o más caras fracturadas.

SEGUNDA: Se concluye que los nanocompuestos tensioactivos catiónicos tienen una incidencia directa en la densidad máxima seca, pero a la vez esa incidencia es baja. Esto debido a que los resultados del comportamiento de la DMS usando nanocompuestos tensioactivos catiónicos mejora hasta en un 2.5% comparando una muestra de suelo-cemento vs una muestra de suelo-cemento-nanocompuesto (2.194 gr/cm³ y 2.249 gr/cm³ respectivamente), también se nota una mejora 1.5 % en la DMS comparando la muestra patrón vs la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto (2.215 gr/cm³ y 2.249 gr/cm³ respectivamente).

TERCERA: Se concluye que el nanocompuesto tensioactivo catiónico influye directamente en muestras de suelo-cemento cuando se le realiza el ensayo CBR, pero esta influencia se acerca a la insignificancia, en cambio al



agregar la mezcla cemento-nanocompuesto al suelo es significativo en los resultados de ensayos de CBR. Esto se respalda en lo siguiente: las mezclas evaluadas presentaron un incremento notorio en el CBR, pasando de 49.5% de CBR en la muestra patrón a 482.5% de CBR de la muestra suelo-cemento (con adición de 1.5% de cemento de peso del suelo), llegando a 433.9% de CBR alcanzado en la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto (con la adición de 1.5 % de cemento y 0.03% de nanocompuesto) y llegando a 454.5% de CBR alcanzado en la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto (con la adición de 1.5 % de cemento y 0.05% de nanocompuesto), evidenciando que la adición conjunta de nanocompuestos y cemento propicia un aumento de 405% en la capacidad portante del suelo patrón vs la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto.

CUARTA: Al someter las probetas a ciclos de humedecimiento y secado, se constató que la pérdida volumétrica se redujo en condiciones de cepillado, llegando hasta 1.11 % de pérdida de volumen en la muestra con la adición de 2% de cemento y 0.03% de nanocompuesto, en cambio cuando no se usaron estabilizadores la pérdida de volumen fue del 100%, además la pérdida de volumen de la muestra con la adición de cemento al 2% fue de 4.72%. Este hallazgo sugiere que el nanocompuesto tensioactivo catiónico mejora el refuerzo estructural interno y además actúa eficazmente ante agentes erosivos, contribuyendo a la durabilidad del material en ambientes de humedad y desgaste cíclico. Analizando estas cifras se llega a la conclusión que el uso de nanocompuestos tensioactivos catiónicos si repercute en un aumento de la durabilidad de las muestras suelo-cemento y más aún de muestras de suelo sin estabilizantes.



QUINTA: En términos de resistencia a la compresión, los especímenes tratados alcanzaron valores que excedieron los mínimos requeridos para bases en carreteras no pavimentadas, llegando hasta 31.4 kg/cm² en combinación con 2.0% de cemento y 0.03% de nanocompuesto, en comparación a los 11.20 kg/cm² alcanzados de la muestra sin estabilizantes y los 18.4 Kg/cm² de la muestra de suelo con 2% de cemento, de estos resultados se aprecia una mejora del 70% en los resultados del ensayo de compresión simple comparando la muestra de suelo-cemento vs la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto.

En conclusión, la adición del nanocompuesto tensioactivo catiónico en muestras de suelo-cemento, tiene un efecto positivo en la resistencia a compresión simple.

GENERAL: Se concluye que se ha mejorado el desempeño de las bases suelo-cemento con la aplicación de nanocompuestos tensioactivos catiónicos, en la carretera ruta PU-165, ubicada entre los distritos de Caracoto y Huata. Las evidencias obtenidas muestran una mejora en la DMS del 2.5% comparando la muestra de suelo-cemento vs la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto. En los resultados de CBR se muestra una mejora del 405% de la muestra patrón vs la muestra suelo-cemento-nanocompuesto. En los resultados del ensayo de humedecimiento/secado se muestra una mejora del 98.89% de la muestra patrón vs la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto, en los resultados de resistencia a la compresión simple se muestra una mejora de 181.11% de la muestra patrón vs la muestra de suelo-cemento-nanocompuesto.



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda a PROVIAS NACIONAL realizar más ensayos de laboratorio con otros suelos de la región Puno y así conocer para que tipos de suelos es recomendable usar el nanocompuesto en esta región. Verificando si al momento de adicionar el nanocompuesto los ensayos de laboratorio se vean afectados por algún cambio físico-químico, teniendo un mayor conocimiento de los rangos en los que se puede usar el aditivo, como por ejemplo en su granulometría, PH, contenido de sales solubles, valor equivalente de arena, etc. Finalmente, la creación de una base de datos de caracterización permitirá documentar la evolución del material, unificando criterios de diseño y facilitando la toma de decisiones para futuras investigaciones o intervenciones en carreteras con condiciones geográficas y climáticas similares.

SEGUNDA: Por otra parte, se aconseja realizar pruebas de campo piloto con instrumentación básica o moderna, que registre deformaciones o hundimientos en tiempo real, validando la eficacia observada en laboratorio y brindando información directa sobre la resistencia y estabilidad alcanzada bajo condiciones de carga reales. Estos ensayos en campo serían de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Deflectometría, los cuales darían resultados que nos haga comprender como se comporta la base suelo-cemento-nanocompuesto, funcional y estructuralmente respectivamente. También puede ser apoyado con evaluaciones como el Índice de Condición del Pavimiento (PCI) cada cierto tiempo y monitorear



la evolución del deterioro, esto para evaluar el comportamiento a largo plazo.

CUARTO: Para una mejor dosificación de suelo-cemento-nanocompuesto se recomienda no usar el ensayo de CBR como medio para calificar la base, debido a que son suelos ligados, el ensayo de CBR es para verificar que el valor de soporte del suelo cumpla con la norma EG-2013. Para poder realizar una mejor calificación y dosificación es necesario apoyarse en más ensayos especiales para suelos estabilizados como la resistencia a compresión de probetas suelo-cemento, humedecimiento y secado de muestras suelo-cemento, ensayos de hielo y deshielo, los cuales darán otras características físico-mecánicas de las bases suelo-cemento-nanocompuesto.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2021). Standard Method of Test for Particle-Size Analysis of Soils. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Adlie, A., & Nurul, S. (2020). A Short Review on the Effect of Surfactants on the Mechanico-Thermal Properties of Polymer Nanocomposites. *Applied sciences*, 10(1), 4867. <https://doi.org/10.3390/app10144867>.
- Aradilla, D., Oliver, R., & Estrany, F. (2009). Nanocompuestos de arcilla-polímero. *Técnica Industrial*, (281), 57-59.
- Arias, D., & Cangalaya, L. M. (2023). Manual del tesista, principios metodológicos para escribir una tesis.
- ASTM D1883. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International.
- ASTM D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International.
- Barahona, A., Ovando, C., & Araya, R. (2021). Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado. [Información proporcionada en el texto original].
- Bosov, A. I., & Valiev, K. E. (2018). Refuerzo de suelos en la construcción de carreteras. Métodos integrales para la transformación de suelos cohesivos. Visión general de la estabilización del suelo.
- Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., West, J., & Gordon, S. C. (2015). Evaluación comparativa de las definiciones de nanomateriales y consideraciones de evaluación de seguridad. *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, 73(1), 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.06.001>.
- BSI. (2009). Nanotecnologías — Terminología y definiciones para nanoobjetos, nanofibras y nanoplacas (ISO/TS 27687:2008). Gestión. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?nummercs=44278.



- Calizaya, E. & Juchani, D. (2023). Influencia de la Ceniza de Fondo para la Estabilización de Suelos Arcillosos a Nivel de Subrasantes [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión]. Repositorio institucional UPeU. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/7445>.
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G., & Wypych, F. (2009). Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. *Materials Research*, 12(1), 1–39. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000100002>.
- Castillo Briceño, P. E. (2018). Influencia de la aplicación de aditivos químicos en la estabilización de suelos cohesivos para uso como subrasante mejorada de pavimentos entre los sectores Calamarca - Huaso, La Libertad, 2018 [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil]. Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería. Perú. <https://hdl.handle.net/11537/13798>.
- Castillo González, J. F. (2021). Análisis comparativo de los diferentes polímeros para mejorar las propiedades del suelo nativo mediante la estabilización de suelos en la localidad de Mocupe. [Tesis de grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].
- Chamba, L. A. (2021). Análisis comparativo de estabilización para el mejoramiento de subrasante entre el uso del cloruro de sodio y el sistema consolid en zonas urbanas no pavimentadas de la urbanización el parral del distrito de La Victoria, 2020 [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil Ambiental, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio institucional UCSTM. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/3913>.
- Choobbasti, A. J., Vafaei, A., & Kutanaei, S. S. (2015). Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica. *Open Engineering*, 5(1), 111–116. <https://doi.org/10.1515/eng-2015-0011>.
- Choquechambi, Y. & Huanca, F. (2023). Efecto de la ceniza de cascara de papa adicionado en suelos arcillosos [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión]. Repositorio institucional UPeU. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/7282>.



- Condori, J. S. (2023). Mejoramiento de la resistencia del suelo con emulsión asfáltica y cemento para la conformación de solución básica, tramo Huancané-Cotapata-Huarisani, 2023 [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional UNA. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22210>.
- Corral, J. T. (2008). El suelo-cemento como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, 33(4), 520-571.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: CENGAGE Learning.
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelos, fundaciones y muros*. Perú.
- Gao, F. (2004). Clay/polymer composites: the story. *Materials Today*, 7(11), 50–55.
- García-Toro, J. R. (2019). Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil]. Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/23731>.
- Gobierno Regional de Puno. (2016). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de Puno 2016–2021 (PGRD)*. CARE Perú. <https://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2659/doc2659-contenido.pdf>
- Gobierno Regional de Puno. (2015). *Informe Final del Área de Geología Región Puno*. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/memoria_descriptiva_geologia_0.pdf
- Guzmán Montenegro, M. J. (2021). Estabilización de suelos arcillosos adicionando polímeros reciclados para mejoramiento de subrasante en el distrito de Mórrope, 2021 [Tesis para optar el grado de Maestro en Transportes y Conservación Vial]. Universidad Privada Antenor Orrego, Escuela de Posgrado. Perú. <https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12759/13031>.
- Han, Y., Lin, R., & Yong Wang, X. (2022). Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103918>.



- Grupo de investigación DERFARM. (2021, 23 abril). Tensoactivos Aniónicos, Catiónicos y Anfóteros. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8A08Ltkzavo&t=102s>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación.
- ISO 472. (2013). Plastics Vocabulary.
- Jibaja, G. (2021). Influencia del aditivo Perma-Zyme y cenizas del bagazo de caña de azúcar en las propiedades de la subrasante, Av. Bonavista Carabayllo 2021 [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Jiménez, I. F. (2022). Geología y geotecnia para estabilizar con cemento portland en el mejoramiento y conservación del corredor vial Arapa – Santa María tramo KM 34+500 al KM 71+602 [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio de postgrado UNA. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18379>
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1975). Mecánica de suelos. Editorial Limusa.
- Laricano, P., & Reynaldo, R. (2021). Evaluación geotécnica de la carretera desvío Coraraca-poblado Coraraca tramo km 00+ 000-km 06+ 311 (puente Cullco) en la provincia de El Collao.
- Llique, R. H. (2003). Manual de laboratorio de mecánica de suelos. Editorial Universitaria UNC.
- Lozano, A. (2020). Cómo elaborar un proyecto de tesis en pregrado, maestría y doctorado. Editorial San Marcos E.I.R.L.
- Mamani Gonzalo, G., De La Cruz Vega, S. A., Vega Neyra, C. S., Yllescas Rodríguez, P. M., & Rea Olivares, W. M. (2023). Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú. *Infraestructura Vial*, 25(44), 1–7. <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.53569>
- Márquez, J. J. (2006). Mecánica de suelos y estudios geotécnicos en obras de ingeniería.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. (R.D. N.º 18–2016–MTC/14). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.



- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. (R.D. N.º 02–2018–MTC/14). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos* (R.D. N.º 10–2014–MTC/14). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2014). *Manual de carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial*. (R.D. N.º 08–2014–MTC/14). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Montejo, A. (2001). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.
- Montejo, A., Montejo, A. & Montejo, A. (2018). *Estabilización de suelos*. Bogotá.
- Mora, S. (1998). *Mecánica de suelos y diseño de pavimentos*. M y CO.
- NTP 339.145. (1999). *Determinación del CBR (California Bearing Ratio – Valor soporte de California) medido en muestras compactadas en laboratorio*.
- Nesterenko Cortes, D. (2018). *Desempeño de suelos estabilizados con polímeros en Perú [Tesis para optar el grado de Máster en Ingeniería Civil]*. Universidad de Piura. <https://hdl.handle.net/11042/3981>.
- Niroumand, H., Balachowski, L., & Parviz, R. (2023). Nano soil improvement technique using cement. *Scientific Reports*, 13(1), 10724. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-37918-z>.
- Ortiz, A. P., & Guanín, J. C. (2025). Mejoramiento de suelos mediante sustitución química: Estudio de caso de la autopista Azogues - El Descanso (Ecuador) [Soil improvement through chemical substitution: A case study of the Azogues - El Descanso motorway (Ecuador)]. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 01–19. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1233>
- Pacheco, Y. L. (2023). *Aceite sulfonado con cemento para estabilización de suelos cohesivos en subrasante [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil]*,



- Universidad Peruana los Andes]. Repositorio institucional UPLA. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/5902>.
- Porta Romero, S. Y. (2023). Influencia técnica, económica y ambiental de la estabilización de suelos arcillosos-vías de Azapampa, mediante desechos poliméricos y cal [Tesis para optar el grado de Maestro en Ingeniería Civil]. Universidad Peruana los Andes. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/5810>.
- Qiang, Y., & Xu, Y. (2023). Compression behavior and permeability of concrete composed of glass sand and rice husk ash. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107095>.
- Rico, A. & Castillo, H. (1977). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Editorial LIMUSA México.
- Romero, R., & Sañac, C. (2016). Evaluación comparativa mediante la capacidad de soporte y densidad máxima de un suelo adicionado con polímero adhesivo natural en porcentajes de 0.5%, 1%, 2% y 3% frente a un suelo natural para subrasante de pavimento rígido de la urb. San Judas Chico – Cusco [Tesis de pregrado]. Universidad Andina del Cusco.
- Shuan, L. (2004). Laboratorio de mecánica de suelos. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Terrones, M., et al. (2004). Nueva dirección en la ciencia de los nanotubos. *Materials Today*, 7(10), 30–45. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00628-5](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00628-5).
- Thomas, S., Chandrakaran, S., & Sankar, N. J. M. T. P. (2022). Nanocomposites are state-of-the-art in the field of ground improvement: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 877-882.
- Universidad Nacional de Ingeniería. (2019). *Guía de laboratorio de mecánica de suelos I*, Facultad de Tecnología de la Construcción.
- Vara, A.A. (2015). *Los 7 pasos para elaborar una tesis*.
- Vilca, H. R. (2024). Evaluación de la utilidad de la ceniza de cáscara de quinua (CCQ) como estabilizante de un suelo limoso de subrasante [Tesis para optar el título de Maestro en Transportes e Infraestructura Vial, Universidad Nacional del



Altiplano]. Repositorio de postgrado UNA.
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/24375>

Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México.

Villalba Velásquez, A., & Venegas Vergara, M. P. (2022). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de entre un suelo estabilizado con cemento y suelo con polímero [Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil]. Universidad Continental, Facultad de Ingeniería.

Vitulas, Y. (2022). *Guía para la elaboración del proyecto de tesis*. Primera edición.

Zormati, S., Aloulou, F., & Sammouda, H. (2023). Effects of cationic surfactant on fresh and hardened properties of cement-based mortar. *Journal of Renewable Materials*, 11(5), 2346. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.026170>.



ANEXOS

- Anexo 1.** Declaración jurada sobre autoría, autenticidad y uso ético de herramientas de inteligencia artificial
- Anexo 2.** Constancia de uso de equipos de laboratorio
- Anexo 3.** Ficha técnica del cemento
- Anexo 4.** Ficha técnica del aditivo
- Anexo 5.** Registro de resultados de laboratorio
- Anexo 6.** Ensayos de laboratorio
- Anexo 7.** Panel fotográfico de ensayos de laboratorio
- Anexo 8.** Planos de la carretera
- Anexo 9.** Panel fotográfico de la carretera
- Anexo 10.** Planos de la cantera
- Anexo 11.** Panel fotográfico de la cantera
- Anexo 12.** Matriz de consistencia
- Anexo 13.** Viabilidad económica
- Anexo 14.** Certificado de necesidad técnica de obra
- Anexo 15.** Panel fotográfico de daños en la ruta Huata (Km 55+250) - Emp. PE-3S (Dv. Huata)
- Anexo 16.** Diagrama de flujo de ejecución de tesis



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Dennis Marwin Ramos Medina,
identificado con DNI 43290752 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"MEJORA DEL DESEMPEÑO DE BASES SUELO-CEMENTO MEDIANTE
NANOCOMPUESTOS TENSIOSACTIVOS CATIONICOS EN LA CARRETERA
RUTA PU-165 CARACOTO-HUATA, 2024"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 06 de Enero del 2026

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Dennis Marwin Ramos Medina
identificado con DNI 43290752 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" MEJORA DEL DESEMPEÑO DE BASGS SUGLO-CEMENTO MEDIANTE
NANOCOMUESTOS TENSIÓACTIVOS CATIONICOS EN LA CARRETERA
UTA PU-165 CARACOTO - HUATA, 2024 "

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 06 de Enero del 2026

FIRMA (obligatoria)



Huella